



HAL
open science

Climat du futur: le témoignage du passé

Jean Jouzel, Claude Lorius, Dominique Raynaud

► **To cite this version:**

Jean Jouzel, Claude Lorius, Dominique Raynaud. Climat du futur: le témoignage du passé. *Natures Sciences Sociétés*, 1994, 2 (4), pp.298-308. 10.1051/nss/19940204298 . hal-03334830

HAL Id: hal-03334830

<https://hal.science/hal-03334830>

Submitted on 5 Sep 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

CLIMAT DU FUTUR : LE TÉMOIGNAGE DU PASSÉ

JEAN JOUZEL, CLAUDE LORIUS, DOMINIQUE RAYNAUD

La question d'un possible changement climatique lié au renforcement de l'effet de serre est une des questions cruciales de notre époque. Dans la vaste entreprise de recherche interdisciplinaire qu'elle requiert, les glaciologues viennent de faire des apports qui ouvrent des pistes pour répondre à des questions sur lesquelles bute la modélisation du climat à venir et qui en soulèvent d'autres : un bel exemple d'une interdisciplinarité féconde.

Résumé en anglais p. 308

L'HOMME MODIFIE L'EFFET DE SERRE SUR NOTRE PLANÈTE

Depuis quelques siècles, les activités anthropogéniques modifient de façon sensible la composition de l'atmosphère (IPCC, 1990, 1992). Entre 1700 et nos jours, la teneur en méthane a plus que doublé essentiellement à cause de l'intensification de l'agriculture. L'utilisation des combustibles fossiles est largement responsable de l'augmentation de la concentration en gaz carbonique depuis le début de l'ère industrielle (25 % depuis 1850). Ces combustibles fossiles seraient, avec les pratiques agricoles, la cause d'un accroissement de 10% de la teneur en oxyde d'azote sur la même période. Les chloroflorocarbones (fréons) dont l'emploi s'est développé au cours des deux dernières décennies sont mainte-

nant présents dans l'atmosphère. Ces modifications de la composition atmosphérique sont illustrées sur la figure 1.

Bien qu'il s'agisse là de constituants mineurs, de tels changements sont susceptibles de modifier notre climat car ils conduisent à une modification de l'effet de serre atmosphérique (cf. Mitchell, 1989, pour un article de synthèse). En effet, alors que notre atmosphère est transparente au rayonnement qui nous arrive du soleil dans le visible, ces différents composés ont la propriété d'absorber le rayonnement infrarouge réémis par le sol. La vapeur d'eau également qui, avec le gaz carbonique, joue le rôle principal. Bien que les concentrations soient beaucoup plus faibles, celle des autres traces gazeuses est loin d'être négligeable car elles absorbent efficacement dans une fenêtre spectrale laissée libre par ces deux composés. Cet effet de serre est en soi très bénéfique : il amène la température moyenne de la surface de la terre à + 15 °C, valeur beaucoup plus clémente que celle, estimée à - 18 °C, qui prévaudrait s'il n'y avait pas d'atmosphère. Mais c'est son augmentation qui inquiète : ces gaz à effet de serre ont, depuis le début de l'ère industrielle, augmenté l'énergie moyenne reçue par notre planète de 2 Wm⁻² (celle-ci est voisine de 240 Wm⁻²) ; 4 Wm⁻² supplémentaires devraient s'y ajouter au milieu du siècle prochain.

CLIMAT : SENSIBILITÉ ET VARIABILITÉ

Les modèles constituent l'outil privilégié pour prédire l'évolution du climat au

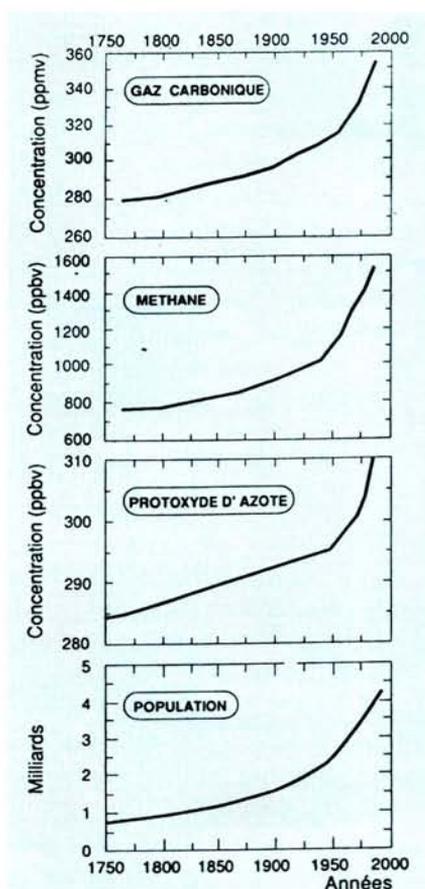


Figure 1 - Variation des teneurs de l'atmosphère en gaz à effet de serre depuis le XVIII^e siècle. Les résultats proviennent de l'analyse des bulles d'air mesurées dans la glace (Lorius, 1991 et références citées dans cet article) et, pour les années récentes, de mesures directes. Les concentrations actuelles sont notablement supérieures à celles enregistrées au cours des 150 000 dernières années ; celles mesurées vers le début de l'ère industrielle sont caractéristiques de celles observées lors des interglaciaires (cf. figure 2). Il existe un parallélisme marquant entre les teneurs observées et l'évolution de la population mondiale (courbe du bas).

RÉSUMÉ : Climat du futur : le témoignage du passé

Les activités humaines provoquent une augmentation de la concentration atmosphérique des gaz à effet de serre susceptible de conduire à un réchauffement sensible au cours des prochaines décennies. Au-delà de modèles prédictifs très complexes, les archives climatiques contiennent des informations pertinentes vis-à-vis du futur de notre climat : lien entre température et gaz à effet de serre et variabilité naturelle du climat y sont inscrits depuis des millénaires. C'est le cas, en particulier des glaces polaires qui nous livrent un témoignage essentiel sur le comportement du système climatique. Nous l'examinons ici à partir des résultats récemment obtenus sur les grands forages de l'Antarctique et du Groenland.

cours des prochaines décennies en fonction de l'augmentation de cet effet de serre additionnel. La tâche du modélisateur serait simple s'il n'était nécessaire de tenir compte que de l'effet radiatif direct : une augmentation de 4 Wm^{-2} , correspondant à peu près à un doublement de la teneur en CO_2 auquel il est très souvent fait référence, induirait, une fois l'équilibre atteint, un réchauffement moyen de $1,2^\circ\text{C}$.

Mais les choses sont plus compliquées. Ce réchauffement de l'atmosphère se transmet peu à peu à l'océan avec deux conséquences : accroissement de l'évaporation et diminution de la glace de mer. L'une et l'autre amplifient le réchauffement initial à travers, d'une part, l'augmentation de la vapeur d'eau atmosphérique et, de l'autre, la disparition de surfaces fortement réfléchissantes. Et surtout, les modifications induites au niveau des nuages sont mal connues et peuvent avoir des effets antagonistes suivant le type de nuage et leur altitude. Résultat : les expériences de doublement de CO_2 réalisées avec des modèles de circulation générale de l'atmosphère conduisent à des valeurs comprises entre ~ 2 et 5°C . Ces expériences de référence permettent de définir la notion de sensibilité du climat à un doublement de CO_2 . Les valeurs, toutes supérieures à $1,2^\circ\text{C}$, indiquent que le forçage radiatif direct est amplifié ; leur large dispersion est liée, pour l'essentiel, à la façon dont les modèles prennent en compte le rôle des nuages.

La sensibilité du climat n'est qu'un des éléments de la prédiction de l'évolution du cli-

mat au cours des prochaines décennies. Celle-ci requiert, entre autres, que soient pris en compte le caractère progressif de l'augmentation de la teneur en gaz carbonique, la contribution des autres gaz à effet de serre et le rôle de l'océan qui, par son inertie thermique, retarde le réchauffement. Ces différents facteurs sont désormais intégrés dans des simulations transitoires du climat (IPCC, 1992) fondées sur l'utilisation de modèles dans lesquels sont, à la fois, suivis l'atmosphère et l'océan (modèles couplés océan-atmosphère). Le réchauffement prédit à l'horizon 2100 est compris entre $\sim 1,5$ et $4,5^\circ\text{C}$ suivant l'hypothèse de sensibilité climatique retenue (IPCC, 1992). Au simple vu de ces résultats et des expériences de doublement de CO_2 , on comprend bien qu'il est important que soient explorées d'autres approches qui puissent apporter des informations sur la sensibilité du climat.

Ainsi, l'augmentation de l'effet de serre est bien documentée sur le dernier siècle¹ au cours duquel la température moyenne du globe a augmenté d'environ $0,5^\circ\text{C}$ (IPCC, 1992). La comparaison effet de serre/température globale est utilisée pour estimer la sensibilité du climat. Cette voie est largement explorée (IPCC, 1990, 1992) mais l'effet retard de l'océan et l'existence de forçages climatiques autres que celui des gaz à effet de serre et moins faciles à évaluer correctement, tels ceux liés aux aérosols produits par l'activité humaine, aux volcans ou à la variation du flux solaire, y apportent certaines limites. Et surtout on sait mal comment s'inscrit le réchauffement actuel dans le cadre de la varia-

1. Les variations de la composition de l'atmosphère sont suivies en différentes stations du globe depuis 1958 pour le gaz carbonique et plus récemment pour les autres composés à effet de serre. L'évolution de cette composition plus loin dans le passé (par exemple le dernier siècle) nous est connue à partir de l'analyse des bulles d'air piégées dans les glaces polaires.

bilité naturelle du climat à l'échelle du dernier siècle et des derniers millénaires. Il est probable que des changements de température supérieurs à 0,5 °C, tel le refroidissement associé au petit âge glaciaire, soient intervenus sans qu'il y ait eu modification notable de l'effet de serre.

Sensibilité vis-à-vis des gaz à effet de serre et variabilité naturelle du climat apparaissent donc comme deux paramètres clef de la prédiction climatique. L'objet de cet article est d'illustrer le fait que les données du lointain passé, celles, en particulier, des derniers cycles

glaciaires interglaciaires (*encadré*), contiennent des informations uniques sur chacun d'entre eux. Les raisons en sont simples. D'une part, il s'agit d'une période pour laquelle le changement de température moyenne globale est important (4 à 5 °C entre le dernier maximum glaciaire, il y a 20 000 ans, et les conditions actuelles). Comme les variations des gaz à effet de serre sont connues de façon suffisamment précise, ces données offrent une voie intéressante pour estimer la sensibilité du climat. De l'autre, l'examen des variations climatiques du passé permet de placer le réchauffement climatique du dernier siècle et celui qui

nous est prédit dans un contexte temporel beaucoup plus large.

GLACES POLAIRES : DES ARCHIVES CLIMATIQUES TRÈS RICHES

La connaissance que nous avons du climat du passé s'appuie sur différentes méthodes complémentaires :

- géomorphologie, croissance des anneaux d'arbres, lacs et sédiments lacustres, séries polliniques..., dans les régions continentales ;
- coraux et sédiments marins dans l'océan ;
- forages profonds en Antarctique et au Groënland (*figure 2*).

Ainsi l'étude des pollens renseigne sur les températures et les précipitations dans les régions continentales. Celle des sédiments marins indique les variations du niveau des mers, les températures et la circulation océaniques.

Une des spécificités des glaces polaires est qu'elles permettent de reconstituer, à la fois, l'atmosphère du passé, à partir de l'analyse des bulles d'air piégées lors de la transformation de la neige en glace, et le climat à partir de leur composition isotopique (*encadré*). Elles offrent ainsi un moyen d'estimer la sensibilité du climat et les résultats obtenus sur le forage de Vostok en Antarctique de l'Est ont joué un rôle déterminant dans cette approche. Par ailleurs, le fait que ces carottes soient très longues (jusqu'à 3 km), autorise une haute résolution temporelle, typiquement de l'ordre de la décennie, voire de l'année, permettant ainsi une analyse très fine de la variabilité naturelle du climat, et ce sur des dizaines de milliers d'années. L'analyse des carottages récemment réalisés au centre du Groënland (GRIP et GISP2) a d'ailleurs conduit à des découvertes surprenantes qui nous amènent à modifier notre vision de la variabilité naturelle du climat dans les régions de l'Atlantique Nord. Les équipes françaises² de Grenoble, Saclay et Orsay ont apporté une contribu-

GRANDS CYCLES CLIMATIQUES, ASTRONOMIE ET EFFET DE SERRE

Au cours de la longue histoire de notre planète (4,6 milliards d'années), le climat terrestre a évolué avec une tendance générale au refroidissement. Depuis un million d'années, celui-ci a été largement de type glaciaire avec des intervalles interglaciaires relativement brefs réapparaissant tous les 100 000 ans, environ. Ce cycle est caractéristique de la seconde moitié de l'ère Quaternaire (qui couvre les deux derniers millions d'années). Notre interglaciaire, l'Holocène a commencé il y a un peu plus de 10 000 ans. Il y a 20 000 ans, c'était le dernier maximum glaciaire. L'Amérique du Nord, l'Europe du Nord et la Sibérie stockaient 50 millions de kilomètres cubes de glace, le double, ou presque, du volume actuel de l'Antarctique, vingt fois celui du Groënland. Conséquence directe, un abaissement du niveau de la mer de 120 m. La température moyenne était de 4 à 5 °C inférieure à sa valeur actuelle, avec des différences plus faibles dans les régions équatoriales et tropicales et plus importantes près des calottes polaires. En Europe de l'Ouest, le refroidissement pouvait atteindre 10 °C. Nous parlons dans cet article du précédent interglaciaire, l'Eémien, il y a environ 120 000 ans.

L'idée d'une relation entre les grandes glaciations du Quaternaire et la position de la terre par rapport au soleil (définie par trois paramètres, l'excentricité de l'ellipse terrestre, l'inclinaison de la terre par rapport à son orbite et la précession qui définit la position de la terre au moment des équinoxes), a été émise au siècle dernier. Elle a été formalisée, sous le nom de théorie astronomique, par le physicien Serbe Milutin Milankovich à partir de 1930. Cette relation paramètres orbitaux/climat est désormais bien admise largement grâce aux reconstitutions effectuées à partir des sédiments

marins qui démontrent que l'on retrouve les périodicités caractéristiques de ces paramètres, 20 000, 40 000 et 100 000 ans, dans les enregistrements climatiques. Elle est confirmée par les enregistrements de l'Antarctique et du Groënland qui indiquent cependant qu'il ne s'agit pas là du seul acteur des grands cycles glaciaires - interglaciaires.

En effet, l'analyse des glaces de Vostok accrédite très fortement l'idée que les variations de l'effet de serre ont joué un rôle climatique dans le passé. Il semble clair que la prise en compte des variations de la concentration du gaz carbonique et du méthane (éventuellement du peroxyde d'azote) est en mesure de combler deux des principales lacunes de la théorie astronomique des paléoclimats : difficulté d'expliquer le cycle de 100 000 ans qui domine l'enregistrement climatique mais n'est présent dans le signal astronomique qu'à travers l'excentricité dont l'influence est très faible et le synchronisme des événements climatiques entre les deux hémisphères alors que les variations de l'insolation ne sont pas synchrones. La présence dans les enregistrements des variations du gaz carbonique et du méthane des périodes associées aux cycles astronomiques souligne néanmoins la complexité des mécanismes mis en jeu et renforce l'idée du rôle-clé de l'astronomie. C'est en fait vers l'idée d'un climat dont les paramètres astronomiques seraient le métronome et où les gaz à effet de serre joueraient le rôle d'amplificateur vis-à-vis des changements d'insolation que nous conduisent les enregistrements de l'Antarctique. Les forages du Groënland mettent, eux, l'accent sur l'existence de variations rapides qui ne sont pas liées, tout au moins directement, aux variations lentes de l'orbite terrestre.

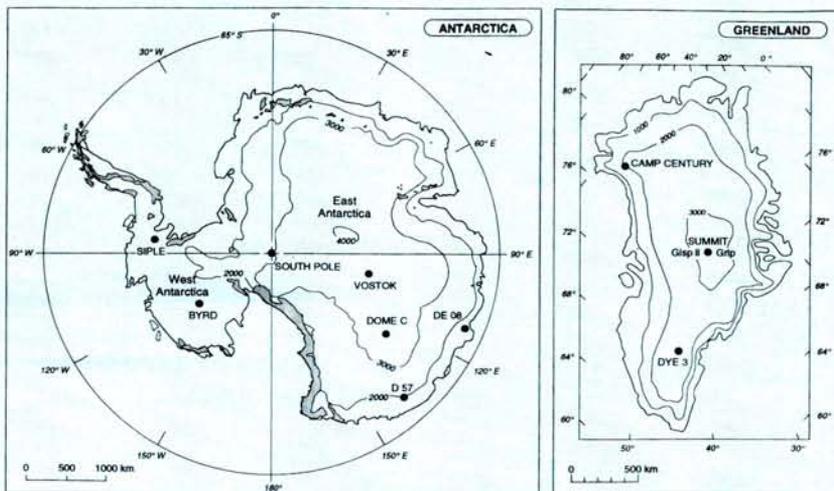


Figure 2 - Sites de forages profonds au Groenland et en Antarctique.

tion importante à ces recherches, sur la sensibilité et la variabilité du climat, dont nous rappelons dans cet article le cadre et les résultats majeurs.

La réalisation d'un carottage profond dans la glace n'est pas une opération techniquement facile et c'est ce qui explique que le nombre de séries permettant de remonter jusqu'au dernier maximum glaciaire (période très froide centrée autour de $-20\,000$ ans) soit très limité (figure 2). Les deux premières,

l'une à Camp Century au Nord Groenland et l'autre à Byrd en Antarctique de l'Ouest ont été obtenues dans les années soixante. Ces forages couvrent une bonne partie de la dernière période glaciaire (jusqu'à $-100\,000$ ans environ) mais pour remonter plus loin dans le temps, vingt années d'efforts ont été nécessaires. Les glaciologues se sont d'abord tournés vers les sites les mieux appropriés, ceux où l'accumulation annuelle de neige est très faible et l'épaisseur de glace importante.

ISOTOPES DE L'EAU ET RECONSTRUCTION DU CLIMAT

L'eau n'est pas composée que d'hydrogène "normal" (de masse 1) ou d'oxygène "normal" (de masse 16). Ces deux atomes ont l'un et l'autre des isotopes, deutérium (hydrogène de masse 2) et oxygène 18, en particulier. Leur existence conduit à des formes "isotopiques" de la molécule d'eau, HDO et $H_2^{18}O$ qui accompagnent la molécule d'eau, $H_2^{16}O$ dans tous les réservoirs où elle est présente. Les propriétés physiques de ces trois molécules sont légèrement différentes : les molécules lourdes ont, ce qui est intuitif, tendance à aller préférentiellement vers la phase condensée (pluie ou neige) plutôt que vers la vapeur. Résultat : à chaque changement de phase de l'eau, la phase condensée est plus riche en isotopes lourds que la phase vapeur qui lui donne naissance. Il y a donc appauvrissement

progressif des teneurs isotopiques de la vapeur et des précipitations à mesure que la masse d'air se refroidit ce qui se traduit dans les régions polaires par une relation linéaire entre température moyenne annuelle du site et teneur isotopique aussi bien pour le deutérium que pour l'oxygène 18. Cette linéarité s'explique bien à partir d'un modèle isotopique dans lequel est traduite cette description simplifiée de la vie d'une masse d'air. Elle est à la base de ce que nous appelons "le thermomètre isotopique" : plus il fait froid, plus la teneur isotopique est faible et inversement. Appliquée en un site donné, cette correspondance permet de reconstruire les variations du climat à partir d'un enregistrement des variations des teneurs soit en deutérium, soit en oxygène 18.

2. L'étude des carottages de l'Antarctique et du Groenland est, au niveau français, coordonnée par le Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement du CNRS (Grenoble). Cet effort s'appuie sur les compétences de trois laboratoires : le LGGE pour la chimie atmosphérique, les gaz à effet de serre et la physique de la glace, le Laboratoire de Modélisation du Climat et de l'Environnement du CEA à Saclay pour la reconstitution des variations climatiques et le Centre de Spectrométrie Nucléaire et de Spectrométrie de Masse du CNRS à Orsay pour les isotopes cosmogéniques. Il bénéficie du soutien de l'Institut National des Sciences de l'Univers (INSU/CNRS), du ministère de la Recherche et de l'Enseignement supérieur, du Commissariat à l'Energie Atomique, de l'Institut français pour la recherche et la technologie polaires, de la Fondation de France et des Communautés européennes. Ces recherches s'inscrivent dans le cadre de programmes internationaux : collaboration Russie, France, États-Unis pour le projet Vostok, collaboration européenne (Allemagne, Belgique, Danemark, Islande, France, Italie, Royaume-Uni et Suisse) mise sur pied par la Fondation européenne de la science pour le projet GRIP (Greenland Ice Core Project). Le projet GISP2 (Greenland Ice Sheet Project) est conduit par des équipes américaines.

VOSTOK : UNE RELATION ÉTROITE ENTRE CLIMAT ET EFFET DE SERRE

La station Vostok, en Antarctique de l'Est, présente ces caractéristiques : dans cette région centrale (figure 2) l'épaisseur de la calotte est de 3 700 m et il tombe l'équivalent de 2 cm d'eau par an. Ce régime quasi-désertique est dû au froid très intense. Vostok détient le record de la température la plus basse ($-89,7^{\circ}\text{C}$) et sa moyenne annuelle est de $-55,5^{\circ}\text{C}$. Malgré ces conditions hostiles, les Soviétiques y ont installé une station permanente et conduisent une série de forages depuis le début des années soixante-dix. Depuis 1982, les équipes françaises fortes du succès d'un forage de 900 m réalisé en 1978 au Dôme C, également en Antarctique de l'Est, sont associées au projet. Elles ont été rejointes quelques années plus tard par des laboratoires américains, le support logistique des États-Unis étant, par ailleurs, vital au succès de cet ambitieux projet. Les 2 000 m sont dépassés en 1983 ; le forage couvre alors un cycle climatique complet ($\sim 150\,000$ ans). Les enregistrements ont été récemment étendus aux 220 000 dernières années (2 546 m) et pourront être bientôt prolongés à 2 cycles climatiques complets ($\sim 250\,000$ ans) grâce à 200 m supplémentaires extraits en 1993 (profondeur actuelle : 2 755 m). La glace du fond est vieille d'au moins 500 000 ans mais beaucoup de difficultés restent à surmonter pour que celui-ci soit un jour atteint.

La relation entre climat et gaz à effet de serre illustrée sur la figure 3 est au rang des résultats majeurs obtenus à partir de l'analyse de ces carottages de Vostok. Les chercheurs de Grenoble et leurs collègues Suisses de Berne ont tout d'abord observé, à partir des forages de Dôme C, Byrd et Dye 3 que les teneurs en gaz carbonique et méthane étaient plus faibles au dernier maximum glaciaire qu'il y a 200 ans, avant le début de l'industrialisation et de l'agriculture intensive. Mais c'est un message beaucoup plus fort car portant sur l'ensemble d'un cycle climatique que nous livrent les glaces de Vostok : elles indiquent que tout au long des derniers 150 000 ans, les concentrations en CO_2 et CH_4 mesurées dans les bulles d'air de la glace sont, en général, fidè-

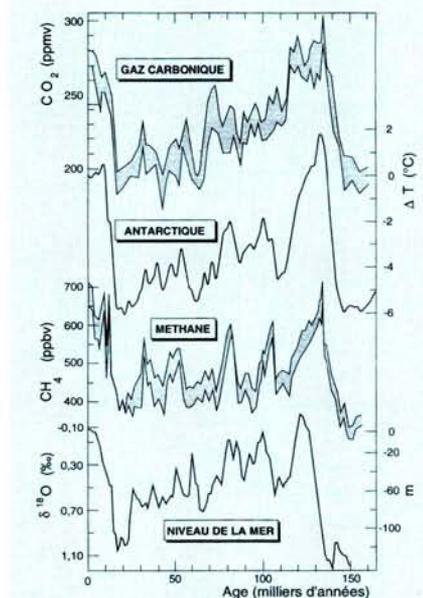


Figure 3 - Variation au cours des derniers 150 000 ans, de la concentration en gaz carbonique, de la différence de température au-dessus de l'Antarctique (la température actuelle est d'environ -55°C), de la teneur en méthane et de la teneur en oxygène 18 de l'océan (échelle de gauche), indicateur du niveau de la mer (échelle de droite). Cette figure est adaptée de Raynaud *et al.* (1993).

lement corrélées avec les variations de la température (Barnola *et al.*, 1987 ; Chappellaz *et al.*, 1990). Les résultats désormais disponibles sur 220 000 ans confirment ces corrélations (Jouzel *et al.*, 1993).

Les teneurs en gaz carbonique ont augmenté de 40 % pendant la déglaciation (de 200 à 280 ppmv (parties par million en volume) par rapport à l'air) tandis que celles du méthane ont doublé (350 à 700 ppbv (parties par milliard en volume) par rapport à l'air). L'explication de ces variations naturelles des concentrations de gaz carbonique et de méthane n'est pour l'instant que partielle mais on sait qu'elle met en jeu, dans chacun des cas, des interactions entre les paramètres physiques du climat et les cycles géochimiques liés au monde vivant. Elle implique certainement pour le gaz carbonique la circulation des océans et leur productivité, et, dans une certaine mesure, les interactions avec la biosphère continentale ; les variations du méthane proviennent essentiellement de l'impact du

climat sur ses sources terrestres incluant zones marécageuses et peut-être sols gelés des hautes latitudes Nord. Des résultats récents mais encore limités (Leunberger et Siegenthaler, 1992) indiquent que la teneur en N_2O a également augmenté pendant la déglaciation, d'environ 30 % (de ~ 200 à 260 ppbv).

Quelles qu'en soient les causes, les variations naturelles des concentrations de ces trois composés, entraînent une augmentation de l'effet de serre d'un peu plus de 2Wm^{-2} , équivalente donc à celle liée à l'action de l'homme au cours des 200 dernières années. Si le système climatique était exempt des rétroactions mentionnées dans l'introduction, cet effet radiatif direct induirait une augmentation de température de $0,6^{\circ}\text{C}$. Mais voilà, glace de mer, vapeur d'eau et nuages jouaient en période glaciaire, comme c'est le cas aujourd'hui et comme ce le sera dans le futur, à modifier la réponse de ce système. Il apparaît que la sensibilité du climat vis-à-vis de ces rétroactions dites rapides dépend relativement peu de la période climatique considérée ; elle peut donc être évaluée à partir des données du passé. Contrairement à une idée reçue, cette approche ne requiert pas que soit complètement déchiffrée la complexité des mécanismes des grands changements climatiques et que soit apportée une réponse définitive à la question de "l'œuf et de la poule", si souvent soulevée au sujet des variations respectives du climat et des gaz à effet de serre dans le passé (*encadré*). Il suffit, lorsque l'on se borne à cet aspect sensibilité du climat, que puissent être correctement estimés les différents forçages qui opèrent à l'échelle des grands changements glaciaires-interglaciaires et les changements climatiques associés. Un intérêt évident est que cette approche tient compte du rôle des nuages si difficile à appréhender dans les modèles. En outre, examiner la relation entre gaz à effet de serre et climat sur de longues échelles de temps permet de se libérer des contraintes liées à l'inertie thermique de l'océan auxquelles nous nous heurtons lorsque la sensibilité du climat est estimée à partir des données du dernier siècle.

Le problème est d'évaluer le rôle des différents facteurs pouvant rendre compte de

la succession des âges glaciaires et interglaciaires. Bien que sommaire, un moyen est de comparer statistiquement le profil de température de Vostok avec les différents forçages susceptibles de l'expliquer : contribution astronomique représentée par la variation du volume des glaces accumulées dans l'hémisphère nord et par celle de l'insolation locale, forçage lié aux variations de l'effet de serre, modifications du bilan radiatif résultant de celles de la teneur en aérosols atmosphériques (poussières et sulfates). Cette analyse statistique confirme l'impression visuelle : contribution liée au forçage astronomique et effet de serre expliquent chacun entre 40 et 50 % de la variabilité de température, l'influence des autres causes possibles demeurant marginale (Lorius *et al.*, 1990). Cette interprétation est indépendamment confortée à partir de simulations réalisées à l'aide de modèles de circulation générale (Broccoli et Manabe, 1987 ; Berger *et al.*, 1993), les mêmes que ceux utilisés pour la prédiction du climat du futur auxquels sont imposées les conditions aux limites du dernier maximum glaciaire.

Ainsi, l'augmentation de la teneur des gaz à effet de serre expliquerait jusqu'à 2 des 4 à 5 °C du réchauffement moyen de la Terre au cours de la déglaciation indiquant que le forçage radiatif direct a été amplifié, à travers les rétroactions liées à la glace de mer, à la vapeur d'eau et aux nuages, d'un facteur voisin de 3 (~ 2/6). Ceci suggère qu'une valeur de 3 à 4 °C pour la sensibilité du climat dans l'hypothèse de référence d'un doublement de CO₂ (3 * 1,2), est, au regard des paléodonnées, une prédiction tout à fait réaliste. Nous reconnaissons que cette approche a certaines limites, en particulier au niveau de l'estimation précise de la variation de température moyenne de la planète dans la passé, mais elle illustre bien le résultat-clé mis en évidence à des degrés divers par l'ensemble des modèles climatiques : ce sont des mécanismes d'amplification vis-à-vis du forçage radiatif lié à l'effet de serre anthropogénique qui devraient opérer au cours des prochaines décennies. D'ailleurs, les résultats obtenus à Vostok ont joué un rôle important dans la prise de conscience de ce pro-

blème du réchauffement climatique lié à l'augmentation des gaz à effet de serre.

GROENLAND : DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES À L'ÉCHELLE D'UNE VIE HUMAINE

Prise de conscience du rôle de l'effet de serre dans le passé et confirmation, tout au moins qualitative, des prédictions concernant la réalité de processus d'amplification constituent les aspects les plus marquants du message des glaces de l'Antarctique.

C'est, par contre, la révélation de quelque chose d'inattendu que nous offrent les forages du Groenland. Jugeons-en à travers les résultats les plus éloquents. Le Groenland (mais aussi l'Atlantique Nord et les continents adjacents) ont, au cours de la dernière période glaciaire et à la fin de la transition vers la période actuelle, été le siège de changements climatiques rapides et importants qui ont affecté l'ensemble des variables climatiques (température, précipitations, circulation atmosphérique...) et peuvent être survenus à l'échelle d'une vie humaine et même beaucoup moins.

Au Groenland, il est aisé de définir la région qui donne accès aux séries climatiques les plus longues : c'est le point le plus haut de la calotte (3 240 m) situé dans sa partie centrale et baptisé Summit bien qu'il s'agisse là d'un dôme très aplati. Ceci était connu lors des choix des sites de Camp Century et de Dye 3 (figure 2) où des forages réalisés en 1966 et 1982 ont donné accès à des séries climatiques couvrant une large part de la dernière période glaciaire. Mais aller au centre du Groenland est une opération difficile à mettre sur pied et ce n'est que très récemment que l'idée d'un forage profond au centre du Groenland s'est concrétisée.

Par deux fois coup sur coup. Car au milieu des années quatre-vingts, peu après l'obtention des résultats majeurs de Vostok, l'ensemble, ou presque, de la communauté glaciologique s'est mobilisé autour de cet objectif. La région de Summit est le seul endroit du Groenland où la glace trouvée en profondeur est d'origine purement locale. Dans le cas idéal

d'un dôme parfait et d'un socle rigoureusement plat, les couches de glace ne sont affectées lors de leur enfouissement dans la calotte que par le seul phénomène d'amincissement¹. Résultat : on peut remonter loin dans le temps (plus de 200 000 ans) mais les couches les plus anciennes sont très compactées (figure 4). Qui plus est, elles risquent, lorsque l'on s'approche du socle rocheux, d'être perturbées soit par l'existence quasi inévitable d'un relief sous-glaciaire soit, même, par un simple déplacement de la position du dôme au cours du temps.

Cette éventualité d'une perturbation des couches les plus anciennes a été l'un des arguments en faveur d'un projet coordonné comportant deux forages voisins, l'un européen, GRIP, dont l'emplacement correspond à la position actuelle du dôme, l'autre américain GISP2, situé 28 km à l'ouest. Les opérations de forage, conduites au cours des mois d'été, ont démarré en 1989. Les européens ont atteint le socle rocheux, à un peu plus de 3 000 m, le 12 juillet 1992 ; le forage américain ralenti par des problèmes liés au câble qui remonte le carottier, a été couronné de succès l'été suivant.

L'enregistrement isotopique obtenu le long du forage GRIP est reporté sur la figure 4 (Dansgaard *et al.*, 1993) : à gauche, les variations sur les 1 500 premiers mètres, à droite, celles de 1 500 à 3 000 mètres. Une diminution de 1 ‰ en oxygène 18 (axe du bas) correspond, approximativement, à un refroidissement de 1,5 °C. Il y a un remarquable contraste entre la stabilité de l'enregistrement au cours des 10 000 dernières années (à gauche) et le caractère très chahuté des 200 000 ans qui les ont précédées⁴. C'est cette notion d'instabilité qui va bien au-delà de la notion de température illustrée par l'enregistrement isotopique que nous présentons ici brièvement, en remontant dans le temps.

La dernière déglaciation est fort bien documentée à travers divers enregistrements ; elle est caractérisée par une première période de réchauffement suivie par un retour temporaire vers des conditions froides (le Dryas récent) très marqué dans l'Atlantique nord et

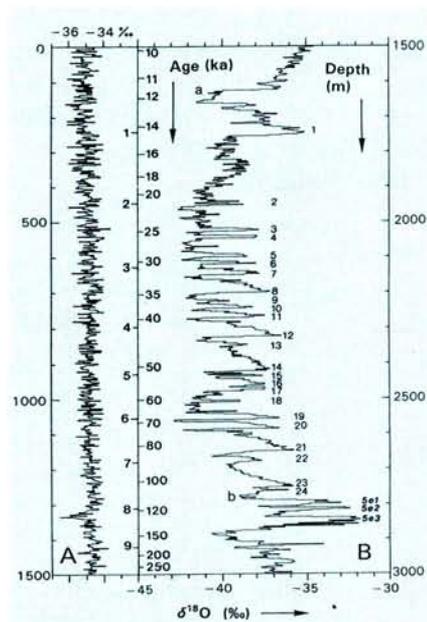


Figure 4 - Teneur en oxygène 18 le long des 3 km du forage GRIP. À gauche, les variations sur les 1 500 premiers mètres. À droite, celles de 1 500 à 3 000 mètres. Les échelles de profondeur (linéaires) sont reportées sur les axes de gauche et de droite respectivement. La partie gauche couvre les 10 000 dernières années et la partie droite la période allant de -10 000 à -250 000 ans (axes centraux).

les régions continentales adjacentes. Ce qui frappe, c'est la rapidité de la transition qui à la fin du Dryas récent, il y a 11 500 ans, a conduit vers le climat actuel. Les forages GRIP et GISP2 (Johnsen *et al.*, 1992, Grootes *et al.*, 1993) confirment pleinement les résultats de celui de Dye 3 : nous estimons qu'au Groenland le climat s'est alors réchauffé de 7 °C en une cinquantaine d'années et même si les changements sont amplifiés aux hautes latitudes par rapport à l'ensemble du globe, il s'agit là d'un changement climatique majeur.

Quelques décennies, cela paraît bien court. Et pourtant certaines caractéristiques peuvent être modifiées encore plus rapidement. Nos collègues américains se sont attachés à scruter de façon très détaillée d'autres indices qui en témoignent. À la fin du Dryas récent, il a fallu seulement 5 ans pour que le contenu en poussières, témoin direct du transport atmosphérique et donc de l'intensité des vents, passe de valeurs élevées de type glaciaire

à des valeurs beaucoup plus faibles caractéristiques du climat actuel (Taylor *et al.*, 1993). Au cours de cette même transition, l'accumulation a doublé mais ceci quasi-instantanément, en 3 ans et peut-être même d'une année sur l'autre (Alley *et al.*, 1993). S'il est possible que le changement de l'intensité des vents ait un caractère local, cela n'est guère envisageable pour l'accumulation et une telle rapidité laisse perplexes.

En fait, la notion de changement rapide était déjà indissociablement associée aux glaces du Groenland depuis le forage de Dye 3 et la découverte d'une série de fluctuations en période glaciaire. En quelques dizaines d'années, le climat passe d'un état glaciaire à des conditions plus clémentes intermédiaires entre un climat glaciaire et le climat actuel. Au Groenland, le réchauffement associé est de 5 à 7 °C, la moitié de celui correspondant au passage du climat glaciaire vers le climat actuel. Le retour vers les conditions froides est d'abord lent puis relativement rapide. Ces séquences en "dent de scie" d'une durée de 500 à 2 000 ans se répètent une vingtaine de fois au cours de la dernière période glaciaire (figure 4).

Des résultats récents montrent que celles-ci ne sont pas limitées au Groenland. D'abord, leur structure et les variations de températures associées apparaissent extrêmement similaires à celles associées à des événements rapides récemment mis en évidence dans des sédiments marins de l'Atlantique Nord (Bond *et al.*, 1993). Ensuite, à chacune d'entre elles correspond généralement une augmentation significative (>100 ppbv) des teneurs en méthane ; celles-ci témoignent très probablement de variations du cycle hydrologique continental aux basses latitudes (la production du méthane est liée à l'étendue des zones inondées) et suggèrent que ces événements rapides ont influencé le climat de l'hémisphère nord dans son ensemble (Chappellaz *et al.*, 1993). De plus, l'analyse des sédiments marins montre qu'il y a un lien entre ces événements et la décharge massive d'icebergs provenant des grandes calottes qui existaient alors dans l'hémisphère Nord. Cette arrivée d'énormes quantités d'eau douce aurait

alors contribué à modifier la circulation océanique et par là même le climat, fournissant ainsi une explication raisonnable à l'existence d'instabilités climatiques en période glaciaire.

VARIATIONS RAPIDES EN CLIMAT "CHAUD" : FICTION OU RÉALITÉ ?

Plus que ces variations rapides de la dernière période glaciaire et de la fin de la déglaciation, c'est l'existence éventuelle d'instabilités au cours de la période chaude précédente (-140 000/-110 000 ans) qui, parmi les résultats des forages du centre Groenland, a jusqu'ici retenu l'attention. La variabilité de l'enregistrement isotopique, est durant cette période appelée Eémien, tout à fait inattendue. Ainsi à GRIP, les périodes chaudes (jusqu'à 4 °C de plus que le climat actuel) auraient été interrompues par des excursions vers des conditions intermédiaires entre climat actuel et une époque glaciaire (GRIP project members, 1993). Les transitions apparaissent très rapides (quelques dizaines d'années) et, dans un cas au moins, l'évène-

ment froid (changements de température associés de l'ordre de 10 °C) pourrait avoir été très bref : 70 ans pour celui survenu il y a ~ 115 000 ans (figure 5). Instabilité d'autant plus étonnante que là, plus question d'évoquer la décharge massive d'icebergs : les grandes calottes de l'hémisphère nord avaient disparu.

Les résultats du forage GISP2 (Grootes *et al.*, 1993) soulèvent des questions sur la validité de l'interprétation climatique de l'enregistrement isotopique obtenu à GRIP. Alors que l'accord entre GRIP et GISP2 est excellent jusqu'à environ -95 000 ans, les séries commencent à diverger au-delà indiquant que la stratigraphie des forages (ou au moins de l'un d'entre eux) à été modifiée du fait de distorsions liées à l'écoulement de la glace près du socle rocheux. Ces modifications, dont nous avons indiqué qu'elles sont liées à la proximité du socle rocheux, se traduisent en général par la présence de couches inclinées (Boulton, 1993). Or de telles couches ne sont observées à GRIP qu'au delà de 135 000 ans. Elles sont par contre visibles à GISP2 dès que les séries commencent à diverger (figure 5).

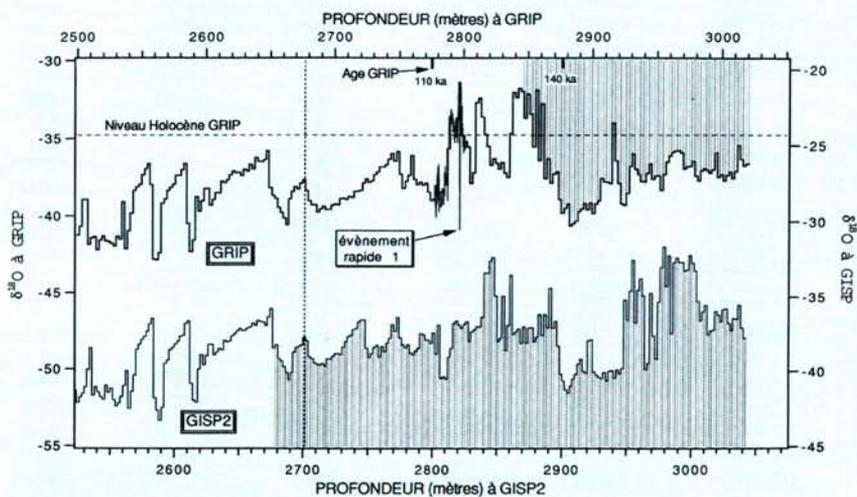


Figure 5 - Comparaison des enregistrements isotopiques GRIP et GISP2 pour la partie inférieure des forages en fonction de la profondeur. L'accord entre les deux enregistrements est excellent jusque vers 2 700 m (les échelles de profondeur ont été légèrement décalées pour bien mettre en évidence cet accord). Sur le profil GRIP, nous avons superposé, autour de 2 790 m, l'enregistrement plus détaillé de l'évènement rapide 1 dont l'analyse détaillée suggère qu'il a duré 70 ans (GRIP project members, 1993). Nous avons également indiqué les niveaux correspondant à GRIP (datation préliminaire) aux âges de -110 000 et -140 000 ans (Eémien) ainsi que la teneur isotopique moyenne de l'Holocène. Les zones hachurées correspondent aux profondeurs pour lesquelles des couches inclinées ont été observées dans chacune des carottes.

3. L'épaisseur annuelle qui en surface correspond au taux d'accumulation, soit un peu plus de 20 cm à GRIP, s'amointrit sous l'effet de l'écoulement à mesure que l'on s'enfonce. À GRIP, elle ne correspond, par exemple, plus qu'à un centimètre vers 2 500 m et à un millimètre vers 2 900 m. Cet amincissement explique que l'échelle de temps n'est pas linéaire en fonction de la profondeur (figure 4).

4. La chronologie du forage est fondée sur l'existence de variations saisonnières (teneur en poussières, composition chimique de la glace) jusque vers -40 000 ans. Elle est ensuite établie à partir d'un modèle glaciologique et devient, en fait, de plus en plus imprécise à mesure que l'on s'approche du socle rocheux.

GRIP est situé sur le dôme et GISP2 ne l'est pas, ce qui fournit une explication raisonnable de cette différence ; mais l'argument est fragile car la position du dôme est susceptible de s'être déplacée au cours du dernier cycle climatique.

Les différences entre les deux forages ne sont donc pas suffisantes pour remettre en cause l'interprétation de l'Eémien de GRIP. Il n'en reste pas moins qu'une confirmation de l'existence de ces variations rapides requiert que puisse y être faite la part entre signal climatique et perturbations éventuelles liée à l'écoulement. L'analyse de paramètres à caractère global tels que la composition de l'air occlus dans la glace et sa comparaison aux données du même type enregistrées à Vostok où la séquence de l'Eémien n'a certainement pas été perturbée (elle est actuellement à près de 2 km du socle rocheux) est une voie intéressante. Jusqu'à ce qu'elle ait été pleinement explorée et en l'absence d'une identification d'événements similaires dans d'autres enregistrements (qui seule constituerait une réelle confirmation de leur existence et de leur extension géographique éventuelle), ces variations rapides restent, pour nous, un très grand point d'interrogation.

ÉVOLUTION DU CLIMAT : UN EFFORT DE RECHERCHE DE GRANDE ENVERGURE

En aucun cas, nous ne voudrions laisser croire que la seule connaissance des climats du passé, même si elle était exempte de points d'interrogation – ce dont nous sommes fort loin – apporterait tous les éléments de réponse nécessaires à la prédiction du climat au cours des prochaines décennies.

La modélisation en est, bien sûr, l'outil privilégié. En fait, l'outil unique si l'on se tient à une définition pleine de ce terme et à l'objectif très ambitieux d'une prédiction à caractère régional qui s'appliquerait non seulement aux changements de la température, mais aussi à ceux du régime des vents et des précipitations, à l'avènement des sécheresses et plus généralement de situations climatiques

extrêmes. Il s'agit là d'un effort de très grande envergure dans lequel s'impliquent de nombreuses équipes de par le monde : modélisation de la circulation générale de l'atmosphère, de celle de l'océan, et de leur couplage mutuel ; modélisation de l'évolution et du rôle climatique de la végétation ; modélisation des cycles biogéochimiques⁵. Chacun de ces aspects est pris en compte autour de programmes à caractère international très marqué. Cet effort s'appuie, en outre, sur un réseau d'acquisition de données au jour le jour : celles-ci sont nécessaires à la fois pour faire tourner les modèles et en valider les résultats. Fondée essentiellement sur des méthodes classiques, cette acquisition de données devrait, de plus en plus, utiliser les moyens d'observation embarqués sur des satellites.

Un des défis majeurs des modélisateurs concerne la prise en compte du rôle de l'océan dans la prévision du climat du XXI^e siècle. Les simulations transitoires que nous avons citées au début de cet article s'appuient sur des modèles océaniques généralement très simplifiés qui font fi de l'éventualité de changements rapides au niveau de l'océan. Ce n'est que très récemment que des modèles dans lesquels est intégré l'océan profond sont utilisés. De premières expériences⁶ (Manabe *et al.*) suggèrent que la stabilité de la circulation océanique pourrait être affectée dans le cas d'un réchauffement climatique. D'autres simulations de ce type sont nécessaires pour que cette possibilité puisse être sérieusement prise en compte. Mais il est indéniable que si la circulation océanique pouvait effectivement se modifier rapidement, les incertitudes sur les prédictions du climat des prochaines décennies en seraient amplifiées.

Ce serait, en particulier, le cas des prédictions faites à l'échelle régionale. Nul doute, par exemple, qu'un déplacement du Gulf-Stream aurait des conséquences importantes sur le climat de l'Europe. Ceci reste cependant au rang des hypothèses. Les seuls changements rapides dont nous soyons convaincus correspondent à des périodes, âge glaciaire et déglaciation, aux caractéristiques fort différentes de celles du climat actuel.

Nous venons de souligner que l'existence de refroidissements brusques en période chaude est loin d'être démontrée. Enfin, lorsque la notion d'instabilité de la circulation océanique globale est évoquée par les modélisateurs, ceux-ci ont à l'esprit des échelles de temps généralement plus longues que celle de la vie humaine.

La possibilité d'un réchauffement lié à l'augmentation des gaz à effet de serre est, par contre, quelque chose d'extrêmement tangible. Une des leçons du passé est que le réchauffement prévisible à l'horizon 2050 (un peu plus d'un degré en moyenne globale) constitue un changement climatique significatif. Pour illustration, le dernier maximum glaciaire n'était que de 4 à 5 °C plus froid que le climat actuel. Et surtout, si aucun effort n'était fait, le réchauffement continuerait au-delà de cet horizon. Sauf à parier sur l'existence de mécanismes compensateurs, celui-ci pourrait être de l'ordre de 2 °C à la fin du siècle prochain... Il serait extrêmement dangereux que l'émergence de nouvelles causes d'incertitudes – éventualité de variations climatiques rapides discutée ici, possibilité d'un effet de refroidissement lié à l'augmentation de la teneur en aérosols largement évoquée dans la communauté scientifique, autres aspects tel que le rôle potentiel de variations de l'activité solaire – fasse oublier l'urgence de décisions qui puissent conduire à une stabilisation de l'effet de serre.

Ce problème de l'évolution du climat en réponse à l'action de l'homme est au centre des débats du Groupe Intergouvernemental d'Étude du Changement climatique (GIEC/IPCC). Ce groupe réuni sous l'égide des Nations Unies et de l'Organisation Météorologique Mondiale est organisé suivant trois grands axes : évaluation scientifique ; impacts dans différents domaines d'un changement climatique éventuel et, enfin, mesures socio-économiques à prendre pour que ces impacts restent dans des limites acceptables pour nos sociétés, sont au centre des débats. Après une première série de rapports en 1990 (IPCC, 1990) et de mises à jour en 1992 et 1994, une seconde sera publiée l'an prochain. Sans préjuger les conclusions des

experts et les décisions qui pourraient en découler, il nous semble inéluctable que ce problème de changement climatique, et plus généralement de modification de notre environnement, soit une des composantes-clés de l'évolution socio-économique de notre planète au cours du siècle prochain. Il suffit pour s'en convaincre de noter que si aucune mesure n'était prise, les teneurs en gaz carbonique pourraient être, dans une centaine d'années, jusqu'à trois fois plus élevées que celles correspondant au niveau préindustriel.

Dans le contexte d'une science, celle de l'évolution du climat et de l'environnement global, aux multiples facettes, le témoignage du passé joue, et, nous en sommes convaincus, continuera à jouer, un rôle essentiel. De celui transmis par les archives glaciaires, nous retiendrons, en guise de conclusion, trois aspects :

- L'évolution parallèle de la concentration des gaz à effet de serre et du climat au cours du dernier cycle glaciaire interglaciaire témoigne du rôle climatique des variations naturelles de l'effet de serre. Ces données permettent d'accéder à la sensibilité climatique ; elles suggèrent que ce sont des mécanismes d'amplification, tels que ceux mis en évidence dans les modèles de circulation générale de l'atmosphère (IPCC, 1990, 1992), et non d'atténuation (tel qu'il a été suggéré, par exemple, par R. Lindzen en 1990), qui contribuent à modifier l'effet climatique direct des gaz à effet de serre.

- L'examen des données du passé ouvre de nouvelles pistes de recherche mettant en lumière les différents processus susceptibles d'intervenir dans le système climatique. Un exemple frappant, brièvement évoqué ici, concerne la stabilité de la circulation océanique. C'est à partir des résultats du forage de Dye 3 qu'a été sérieusement prise en compte l'hypothèse que cette circulation aurait deux façons d'être stable et qu'il pourrait suffire de perturbations relativement mineures pour passer d'un état à l'autre (Broecker *et al.*, 1985). L'océan joue un rôle climatique majeur aux échelles de temps qui sont celles de la prédiction du climat ; stabilité de la circulation océanique et interactions océan-atmosphère

constituent désormais des aspects cruciaux de cette prédiction.

- L'existence de variations climatiques rapides (qui illustrent, à la fois, ce rôle-clé de l'océan et celui de l'instabilité des grandes calottes polaires) est pertinente vis-à-vis du climat du futur car, au moins pour ce qui concerne la dernière période glaciaire et la fin de la transition, elles ont une large extension géographique et affectent, à l'échelle d'une vie humaine, ou moins, l'ensemble des variables climatiques.

Cette pertinence deviendrait encore plus directe s'il était effectivement confirmé que de telles instabilités peuvent être survenues lorsque le climat était légèrement plus chaud que celui que nous connaissons actuellement. Même en l'absence d'une telle confirmation, ou s'il était démontré que les excursions "froides" enregistrées dans le forage GRIP au cours de l'Eémien ne sont pas d'origine climatique, ces résultats, tout comme ceux de Vostok relatifs au rôle des gaz à effet de serre, nous invitent à réfléchir à la fragilité de notre climat et à souhaiter que nous nous éloignions le moins possible des conditions que nous connaissons actuellement. À partager, en quelque sorte, le sentiment d'un de nos collègues (White, 1993) qui, commentant les résultats du forage GRIP, écrit à propos de la machine climatique : « Ne touchons pas les boutons ».

Remerciements : Nous remercions tous les participants aux programmes Vostok, GRIP et GISP2 et tous les organismes, qui à différents titres ont soutenu ces programmes.

(Reçu le 6 mai 1994).

Références

- Alley R. B., Meese D. A., Shuman C. A., Gow A. J., Taylor K. C., Grootes P. M., White J. W. C., Ram M., Waddington E. D., Mayewski P. A. and Zielinski G. A. (1993). Abrupt increase in Greenland snow accumulation at the end of the Younger Dryas event, *Nature*, 362, 527-529.
- Barnola J.-M., Raynaud D., Korotkevich Y. S. and Lorius C. (1987). Vostok ice core provides 160,000-year record of atmospheric CO₂, *Nature*, 329, 408-414.
- Berger A., Gallée H. and Tricot C. (1993). Glaciation and deglaciation in a coupled two-dimensional climate-ice-sheet-model, *Journal of Glaciology*, 39 (131), 45-49.
- Bond G., Broecker W. S., Johnsen S. J., McManus J., Labeyrie L. D., Jouzel J. and Bonani G. (1993). Correlations between climate records from North Atlantic sediments and Greenland ice, *Nature*, 365, 143-147.

5. Dont un des objectifs est de prévoir, en fonction des productions liées à l'activité humaine mais aussi des interactions qui interviennent dans chacun des grands réservoirs, atmosphère, océan, biosphère, et de l'évolution du climat elle-même (tous ces phénomènes étant étroitement interactifs), à quel rythme va augmenter l'effet de serre au cours des prochaines décennies. Notons, à l'inverse, que les climats du passé sont source unique d'information sur la façon dont ces cycles biogéochimiques réagissent vis-à-vis d'un changement climatique.

6. Expérience dans laquelle sont analysées les conséquences sur la circulation océanique d'un réchauffement qui résulterait d'un quadruplement des teneurs en gaz carbonique.

- Boulton G. (1993). Two cores are better than one, *Nature*, 366, 507-508.
- Broecker W.S., Peteet D.M. and Rind D. (1985). Does the ocean-atmosphere system has more than one stable mode of operation?, *Nature*, 315, 21-25.
- Chappellaz J., Barnola J.-M., Raynaud D., Korotkevich Y. S. and Lorius C. (1990). Ice core record of atmospheric methane over the past 160,000 years, *Nature*, 345, 127-131.
- Chappellaz J., Blunier T., Raynaud D., Barnola J.-M., Schwander J. and Stauffer B. (1993). Synchronous changes in atmospheric CH₄ and Greenland climate between 40 and 8 kyr BP, *Nature*, 366, 443-445.
- Dansgaard W., Johnsen S. J., Clausen H. B., Dahl-Jensen D., Gundestrup N. S., Hammer C. U., Steffensen J. P., Sveinbjörnsdóttir A., Jouzel J. and Bond G. (1993). Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record, *Nature*, 364, 218-220.
- GRIP project members (1993). Climatic instability during the last interglacial period revealed in the Greenland summit ice core, *Nature*, 364, 203-207.
- Groote P. M., Stuiver M., White J. W. C., Johnsen S. J. and Jouzel J. (1993). Comparison of the oxygen isotope records from the GISP2 and GRIP Greenland ice cores, *Nature*, 366, 552-554.
- IPCC (1990). *Climate change : The scientific assessment*, J.T.Houghton, G.J.Jenkins and J.J.Ephraums (Eds), Cambridge University press, Cambridge UK.
- IPCC, *Climate change 1992 (1992)*. The supplementary report to the IPCC Scientific assessment, J.T. Houghton B.A. Callendar and S.K.Varney (Eds), Cambridge University press, Cambridge UK.
- Johnsen S. J., Clausen H. B., Dansgaard W., Fuhrer K., Gundestrup N. S., Hammer C. U., Iversen P., Jouzel J., Stauffer B. and Steffensen J. P. (1992). Irregular glacial interstadials recorded in a new Greenland ice core, *Nature*, 359, 311-313.
- Jouzel J., Barkov N. I., Barnola J.-M., Bender M., Chappellaz J., Genthon C., Kotlyakov V. M., Lipenkov V., Lorius C., Petit J. R., Raynaud D., Raisbeck G., Ritz C., Sowers T., Stievenard, F. Yiou M. and Yiou P. (1993). Vostok ice cores : extending the climatic signal over the penultimate glacial period, *Nature*, 364, 407-412.
- Leuenberger M. and Siegenthaler U.(1992). Ice age atmospheric concentration of nitrous oxide from an Antarctic ice core, *Nature*, 360, 449-451.
- Lindzen R.S. (1990). Some coolness concerning global warming, *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 71, 288-299.
- Lorius C., Jouzel J., Raynaud D., Hansen J. and Le Treut H. (1990). Greenhouse warming, climate sensitivity and ice-core data, *Nature*, 347, 139-145.
- Mitchell J.F.B. (1989). The "Greenhouse" effect and climate change, *Reviews of Geophysics*, 27, (1), 115-139.
- Taylor K. C., Lamorey G. W., Doyle G. A., Alley R. B., Groote P. M., Mayewski P. A., C. White J. W. and Barlow L. K. (1993). The «flickering switch» of late Pleistocene climate change, *Nature*, 361, 432-436.
- White J.W.C. (1993). Don't touch the dial, *Nature*, 364, 186.

ABSTRACT : The future of climate : witness of the past

Human activities are substantially increasing the atmospheric concentrations of greenhouse gases. Such increase may induce a significant warming over the next decades. Beyond complex predictive climate models, the archives of past climate contain information relevant to this future of our climate. It concerns, in particular, the link between climate and greenhouse gases in the past and the natural variability of the Earth's climate. Both are recorded in polar ice which thus provides records essential for better understanding of the behaviour of the climate system. This is examined from results recently obtained along deep ice cores from Greenland and Antarctica.