

Variabilité et histoire à long terme du climat

Jean-Claude DUPLESSY

Un changement climatique est pour un scientifique un phénomène passionnant, rendu plus passionnant encore par l'imminence du changement climatique qui semble se préparer.

Un regard en arrière permet de s'en convaincre. Un tableau de Bruegel peint peu après l'hiver extrêmement rigoureux de 1564 est le premier témoignage connu d'un changement climatique susceptible de perturber profondément le mode de vie de ses contemporains.

Cet hiver rigoureux a marqué le début d'une succession de périodes globalement froides si durement perçues à l'époque qu'on a par la suite parlé à leur propos de «petit âge glaciaire». Celui-ci a duré près de trois siècles et les Alpes en ont conservé des traces bien identifiées. Peintures et dessins d'époque confrontés aux vues d'aujourd'hui montrent par exemple le spectaculaire recul du

glacier qui donne naissance au Rhône. Un siècle de réchauffement, conséquence d'un changement climatique, en somme modeste, a suffi pour entraîner la disparition de nombreux petits glaciers des Alpes.

Les changements climatiques passés, objets de l'analyse qui va suivre sont de beaucoup plus grande ampleur. Celui que présente la **figure 1** ne se limite pas à une petite avancée de glacier de montagne, il s'agit du développement d'une calotte glaciaire, c'est-à-dire, d'une montagne de glace (4.000m d'altitude dans la partie la plus haute à l'ouest et de l'autre côté de l'Atlantique environ 3.000 m).

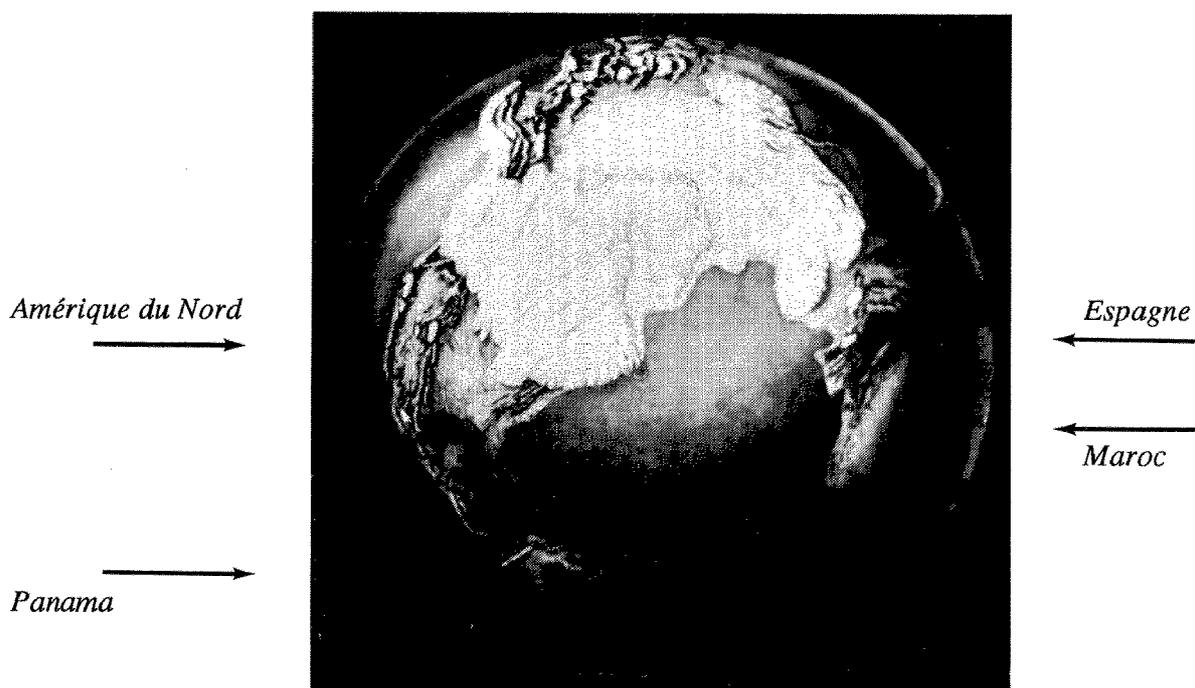


Figure 1

*Représentation des conditions géographiques
lors du dernier maximum glaciaire datant de 18.000 ans*

Si on se reporte à la géographie actuelle pour délimiter le domaine de cette calotte on reconnaît l'Océan Atlantique, le continent nord américain, l'Europe et l'Afrique. De celle-ci, ce qui apparaît le plus distinctement, c'est l'Espagne. Par contre les contours de la Bretagne ont quasiment disparu. Cela n'a rien de surprenant car pour accumuler cette énorme masse de glace sur les continents, il fallait bien

puiser de l'eau quelque part : en fait dans l'océan. Ainsi le niveau de la mer avait baissé de 120m (ce dont on est sûr aujourd'hui) et par conséquent la géographie des terres émergées s'en était trouvée considérablement modifiée. Il était devenu possible de se rendre à pied sec en Angleterre... On s'aperçoit que nombre des rivières et des fleuves de l'Europe occidentale tels que le Rhin et la Seine, se déversaient directement dans l'Atlantique comme la Loire. Le détroit de Gibraltar, lui, existait toujours car il comporte des fonds de 300 à 400 m. On a pu déterminer les limites de cette calotte glaciaire : d'un côté elles passent par New-York, les grands Lacs, de l'autre elles mordent sur l'Irlande, la Grande Bretagne et englobent au-delà toutes les plaines d'Allemagne, de Pologne et de Russie jusqu'à l'Oural.

Comment se livrer à une étude plus approfondie ? Essentiellement grâce à ces êtres minuscules, qu'on appelle les foraminifères. Voici comment.

Si on traîne derrière un bateau une sorte de grand filet à papillons, qu'on appelle filet à plancton, on ramène une moisson de ces minuscules foraminifères actuellement vivants. Ces animaux possèdent une coquille calcaire. Elle mesure environ 2 mm et tous les festons qui apparaissent autour sont de la matière vivante maintenue par de longs rayons de matière organique. En paix l'animal sort ses rayons et sa matière organique s'étale ; un peu d'agitation fait rentrer le tout dans la coquille.

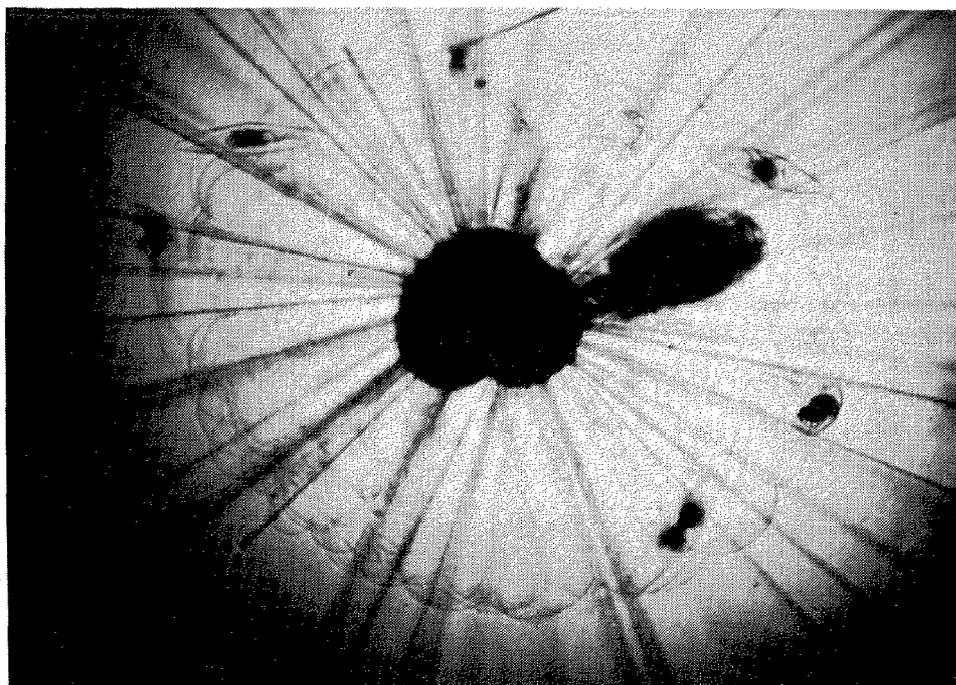


Figure 2

Un foraminifère photographié vivant ; remarquez la coquille calcaire au centre et la proie qu'il dévore (sur le côté)

Sur la **figure 2** on distingue, comme faisant partie temporairement de l'animal, une espèce de puce d'eau qu'il vient de capturer pour s'en nourrir. En 3-4 heures il aura complètement sucé la totalité de ce qui est comestible. Au foraminifère sont associées des algues qui vivent en parfaite entente avec lui ; on dit qu'il s'agit d'une symbiose. Cette symbiose entre les algues et le foraminifère contribue au bon équilibre de son existence et à la prolifération de son espèce au sein des eaux superficielles de l'océan.

La durée de vie d'un foraminifère est brève et au bout de 3 semaines environ il meurt. Sa coquille tombe alors au fond de l'océan où elle va constituer l'un des éléments du sédiment. On peut en mer prélever avec une sonde appropriée un peu de sédiment superficiel et le ramener en surface. On constate alors qu'il est constitué de couches bien parallèles, de plus en plus anciennes au fur et à mesure qu'on s'enfonce. Si nous sommes capables d'analyser finement ces couches successives on va disposer d'un enregistrement des conditions qui ont donné naissance à ce sédiment. A partir de là, on peut en tirer informations, explications et conclusions.

Si on tamise une petite quantité du sédiment recueilli, on trouve en surface tout un tas de coquilles. Elles ont appartenu à des foraminifères. Elles ne sont ni partout, ni toujours les mêmes. Certaines formes sont très caractéristiques par exemple, d'eau chaude (**figure 3**). Leur présence dans un échantillon prouve que l'eau à un moment ou à un autre de la saison dépasse les 25° ou au moins les 20°. Par contre les formes qui apparaissent dans un autre échantillon appartiennent à une espèce qui vit exclusivement dans de l'eau dont la température est inférieure à 8-10° et même, en général, à 6° (**figure 4**). Elle est la seule à résister dans ces conditions. Jamais l'ensemble de ces formes n'est représenté dans un seul échantillon naturel. Pour les réunir, il faudra récupérer des sédiments de diverses provenances. Par contre, une analyse méticuleuse, offre la possibilité de mettre en évidence que les différentes formes ont chacune une répartition géographique très marquée qui reflète de très près la température de l'eau où elles vivent.

Sur la **figure 5**, on a défini ce qu'on a appelé des assemblages, c'est-à-dire des groupes de ces petits animaux qui vivent de la même façon. Le grisé correspond à un assemblage qui ne comporte en tout et pour tout qu'une seule espèce dont il a été question plus haut. On est alors dans la limite des eaux inférieures à 6°. On passe progressivement à des assemblages plus différenciés qui délimitent les domaines de groupes différents caractérisés pour nous de façon

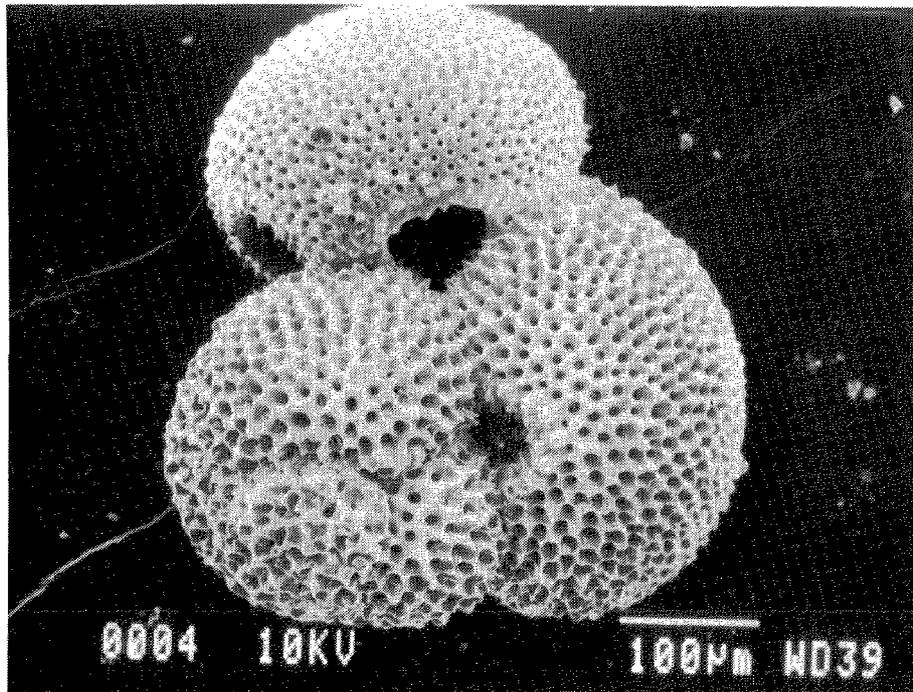


Figure 3
Globigerinoides ruber, foraminifère d'eau chaude

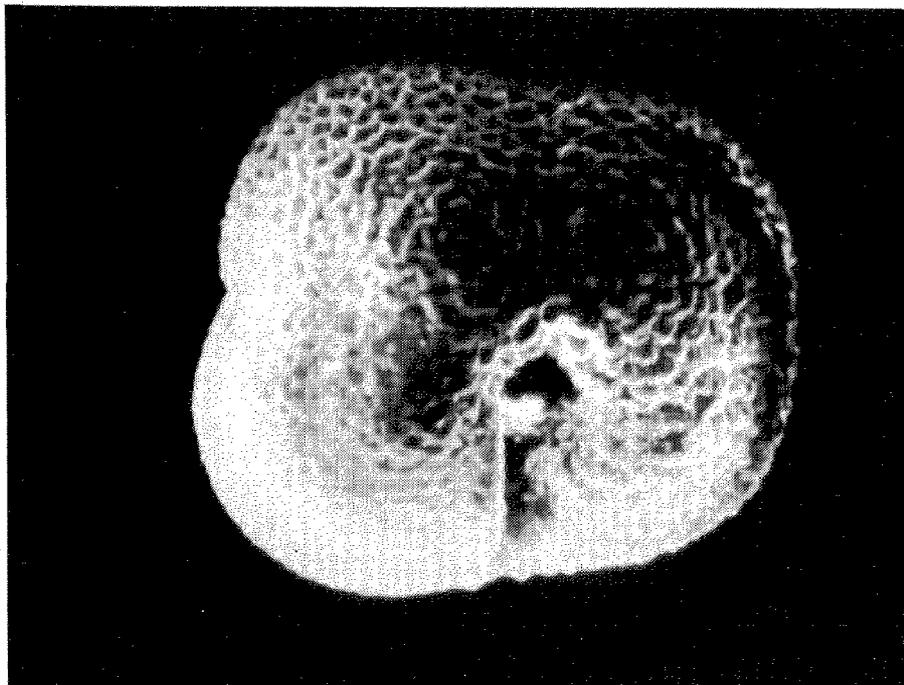


Figure 4
Neogloboquadrina pachyderma, foraminifère d'eau froide

très prosaïque par des coquilles différentes. Les eaux les plus chaudes (qu'on rencontre au voisinage de l'Indonésie) sont celles où l'on rencontre aussi les assemblages les plus chauds, très caractéristiques. On s'aperçoit ainsi, en faisant de la science naturelle sous la forme la plus élémentaire, que la répartition des foraminifères dans l'océan est directement liée à la température de l'eau de surface.

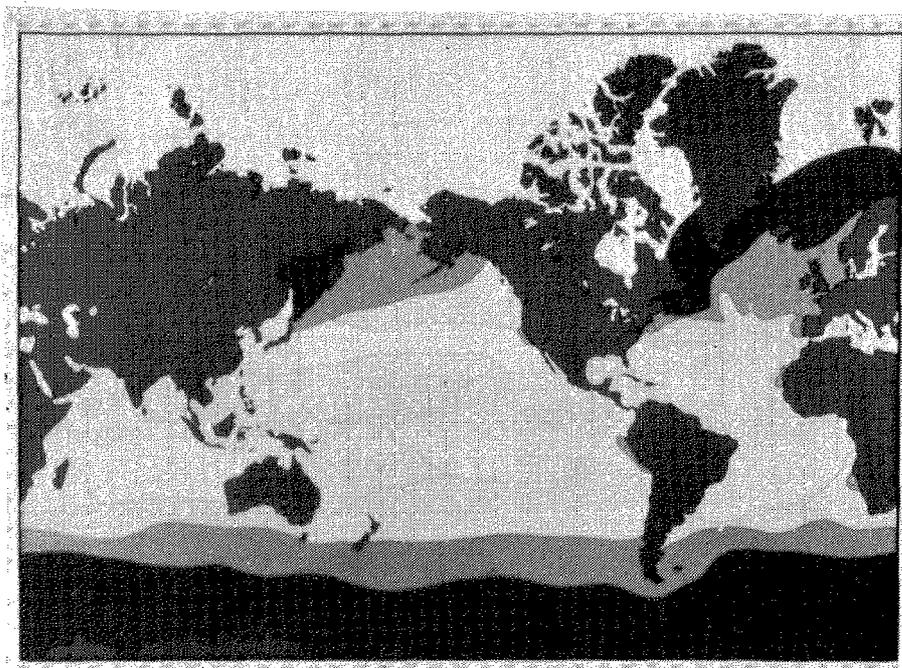


Figure 5

Répartition géographique des divers assemblages de foraminifères

grisé : eaux froides blanc : autres zones

C'est un premier point. Des investigations plus poussées consistent à prélever au moyen d'un carottier de très longues carottes dans le sédiment. Le tube du carottier (qui fonctionne comme un emporte-pièce) peut opérer aujourd'hui sur une profondeur allant jusqu'à 50m. A partir de ce matériel de base on tente de reconstituer l'évolution du climat. Pour aboutir à une reconstitution climatique la première condition est de disposer d'un indicateur aussi astucieux que possible, et qui soit très caractéristique de l'époque du dépôt, c'est ce qu'il est convenu d'appeler de la stratigraphie. Il nous faut une stratigraphie globale : elle nous est fournie par le climat lui-même.

La **figure 6** montre en gros ce qui se passe. En replaçant d'abord dans les **conditions actuelles** on est en présence d'une période de climat chaud. Le niveau de la mer est ce qu'il est, il existe de petites calottes glaciaires sur les continents et le seul vestige de l'énorme masse accumulée au moment de la glaciation est le Groënland. Ces glaces sont extrêmement pauvres en oxygène lourd, ^{18}O , isotope de l'oxygène. La raison en est que pour apporter cette neige qui se transforme ensuite en glace il y a transfert de l'eau par évaporation. Au cours des processus d'évaporation et de condensation fractionnée, c'est toujours l'isotope léger qui va rester préférentiellement, l'isotope lourd précipitant plus facilement. Résultat : les neiges qui tombent aujourd'hui au Groënland ou en Antarctique sont extrêmement pauvres en isotope lourd dans la molécule H_2O . Celle-ci est donc très riche en isotope H_2^{16}O et relativement pauvre en H_2^{18}O .

Que se passe-t-il en période glaciaire ? le phénomène se renforce. Il y a baisse du niveau de la mer conséquence de la formation des grosses calottes glaciaires. Celles-ci emmagasinent une quantité de molécules d'eau extrêmement pauvre en H_2^{18}O mais essentiellement constituée de H_2^{16}O . L'eau de mer voit sa teneur en H_2^{18}O augmenter : donc elle s'enrichit en ^{18}O quand le niveau baisse au profit de la calotte glaciaire. On a donc là un indicateur physique intéressant, susceptible de mesure. Dans le passé, le phénomène est encore plus intéressant parce que les foraminifères qui fabriquent leur coquille de calcaire l'enregistrent exactement. L'analyse du rapport Oxygène 18 sur Oxygène 16 des séquences de carbonate incluses dans le sédiment, fournit un indicateur de glaciation.

L'analyse d'une carotte de 15m de long (ce qui est loin de constituer un record) prise pour exemple permet de déterminer la teneur en Oxygène 18 en fonction de la profondeur. Au sommet de la carotte ce sont les conditions actuelles puis en s'enfonçant on constate que les concentrations en Oxygène 18 dans les coquilles augmentent et passent par un maximum. Ensuite il y a des oscillations qui aboutissent à des valeurs quasi-comparables à celles d'aujourd'hui. On repart ensuite à nouveau dans une glaciation. On aboutit ainsi à une première reconstitution du dernier cycle glaciaire/interglaciaire.

A partir de cette information il devenait possible de tenter une reconstitution des conditions climatiques dans l'océan. Pour y parvenir il fallait faire deux choses :

- a) prendre des carottes sédimentaires partout dans l'océan,

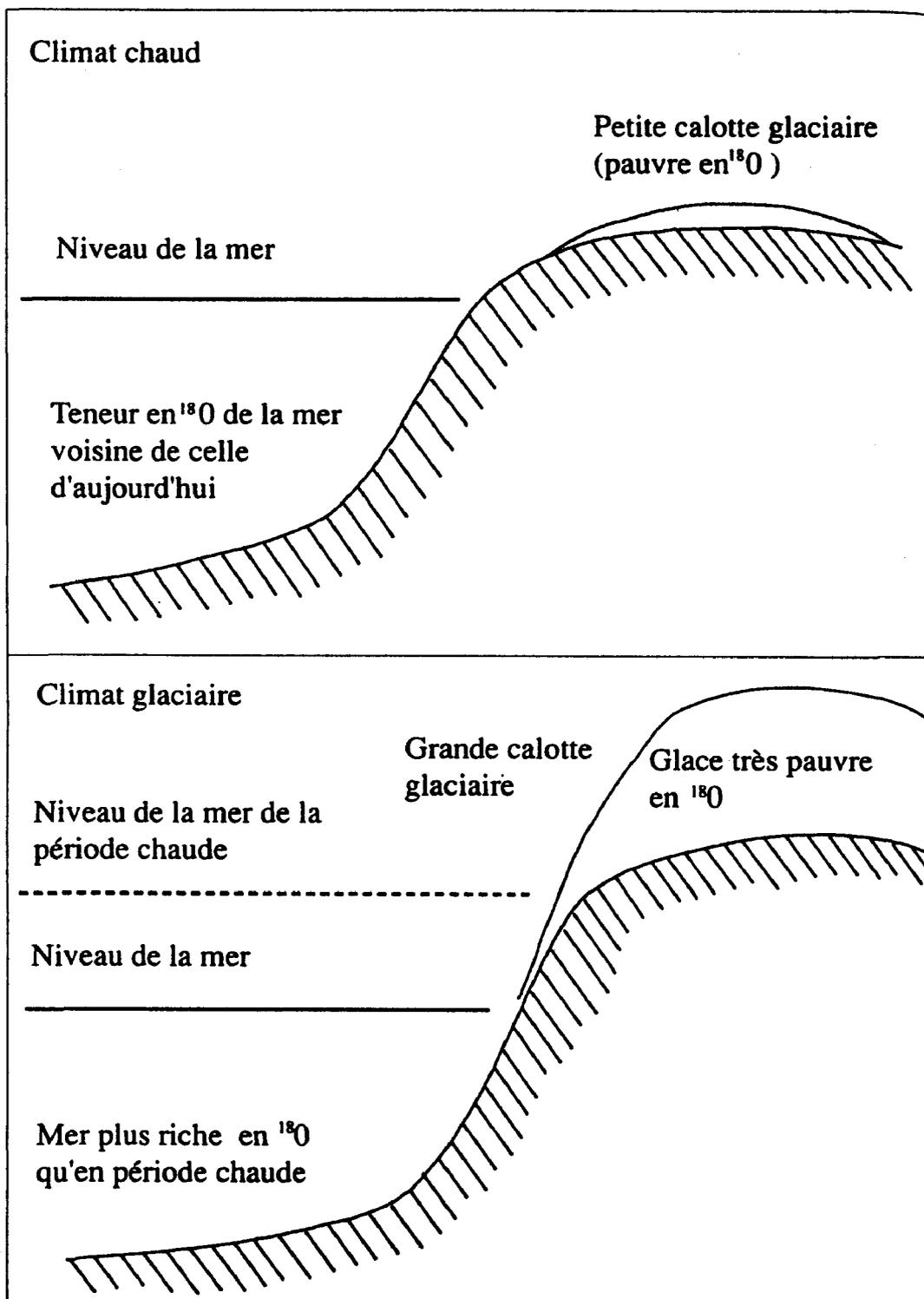


Figure 6

*Schéma montrant la relation entre le volume des glaces continentales, le niveau de la mer et la composition isotopique moyenne de l'oxygène de l'eau de mer. Les glaces étant très pauvres en ^{18}O , plus les glaciers sont développés, plus la teneur en ^{18}O de l'eau de mer augmente. **

** (voir Duplessy et Morel, "Gros temps sur la planète" pages 51-56)*

b) procéder dans ces carottes à une stratigraphie isotopique, c'est-à-dire mesurer les variations de composition isotopique des foraminifères et reconnaître le premier maximum correspondant au maximum de glaciation. Cela permettait d'identifier les sédiments déposés pendant la période où il y avait le plus de glace gelée sur les continents,

c) une troisième étape consistait alors à analyser les coquillages qui se trouvaient là, à caractériser les diverses faunes, en faire une analyse statistique un peu complexe.

A partir de tout cela, il devenait possible d'estimer ce qu'était la température d'été et d'hiver des eaux océaniques en prenant comme référence les conditions actuelles. Ce fut l'objet du programme international CLIMAP (**figure 7**). On s'aperçoit ainsi qu'un climat glaciaire ne signifie pas qu'il fait froid partout : il y a des zones très froides dans les hautes latitudes et des zones toujours aussi chaudes dans les Tropiques. Quand le climat change il ne change pas de la même façon partout. Il y a des zones où cela ne change pas beaucoup et des zones où cela change beaucoup. C'est une caractéristique tout à fait curieuse des changements climatiques. Cela dépend de la façon dont la circulation océanique joue. Qui dit changement de l'océan peut dire changement de température. Un refroidissement global ne signifie pas un refroidissement partout.

On peut aussi procéder par analyses de pollen (**figure 8**) et reconstituer grâce aux résultats obtenus, les variations de la végétation continentale. On en déduit celles de la température de l'air et des précipitations à l'endroit où s'est formée une tourbière. Ce type d'étude a été effectué dans un site des environs de Lyon. On s'aperçoit qu'au maximum de la glaciation qui date de 18.000 ans, les températures avaient baissé d'à peu près 12°C et que les précipitations étaient réduites d'à peu près 60 cm. Ces chiffres traduisent une moyenne de 0° dans la région considérée avec seulement 20 à 30 cm de précipitations annuelles (pluies et neiges). Il s'agit bien sûr de changements majeurs. Si, à partir d'études identiques effectuées sur les différents continents, on calcule la totalité du refroidissement sur les continents tout en faisant de même pour l'océan, on arrive à la conclusion que l'énorme changement climatique en cause correspond à une baisse de température moyenne de 4°C seulement.

Entendre dire que la conséquence d'un réchauffement dû à un doublement du CO₂ provoquera un changement de température moyenne de la planète de 4°, ne signifie en soi pas grand chose. Mais si l'on a connaissance de ce qui s'est passé au cours du dernier maximum glaciaire on peut sans tarder tirer le signal d'alarme. Le changement climatique estimé serait aussi grand que celui qui a permis à la Terre de passer d'une période glaciaire à l'époque actuelle.

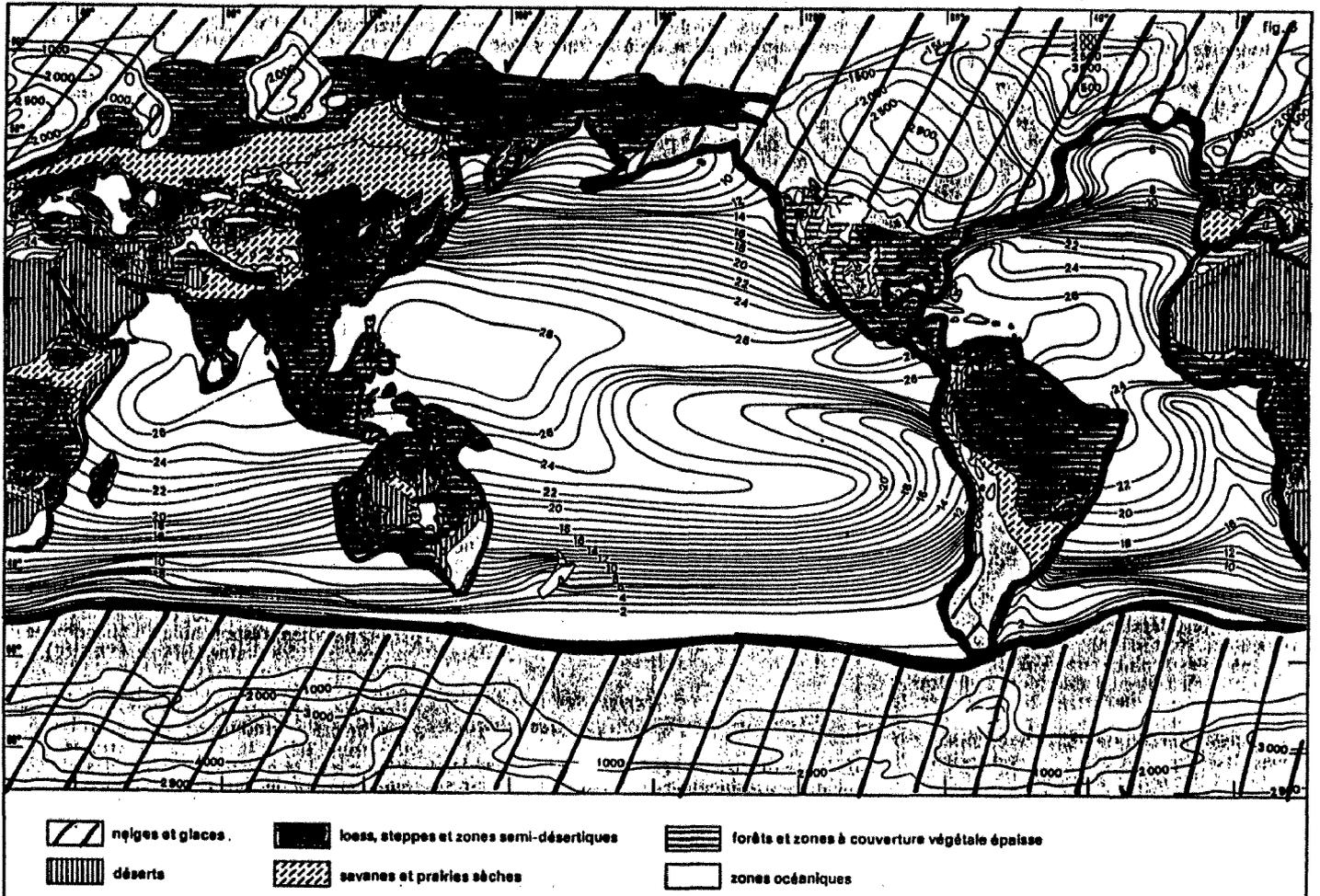


Figure 7

Le monde glaciaire

Reconstitution de la surface du globe il y a 18.000 ans, en août. Les contours des continents sont représentés pour une baisse du niveau des mers de 85 m par rapport au niveau actuel. Les isothermes de surface (en °C) sont portés sur les zones océaniques ; les altitudes des calottes glaciaires (en mètres) sont également indiquées

(d'après CLIMAP Project Members, 1976)

Un changement de 4° de la température moyenne constitue bien un phénomène énorme générateur de conséquences encore difficiles à évaluer avec précision mais qui seront, à coup sûr, majeures.

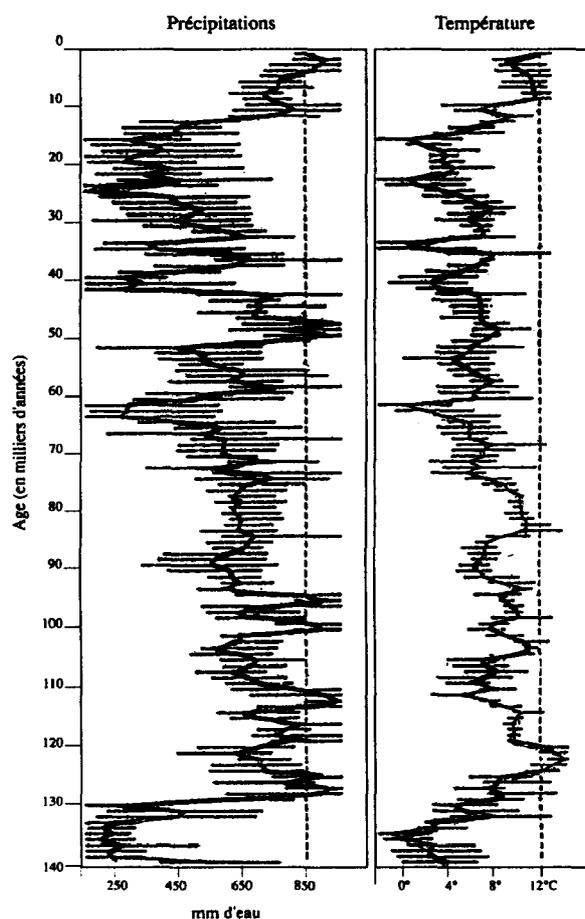


Figure 8

Reconstitution des variations de température et de précipitation dans la région de Lyon à partir des données polliniques (Guit et al. 1988). Les lignes pointillées correspondent aux conditions actuelles (température moyenne annuelle 12°C, précipitations 850 mm)

Un autre phénomène intéressant lié au changement de climat est le fait que la concentration en gaz carbonique de l'atmosphère a subi elle aussi des variations majeures. Les résultats d'un sondage étudié par une équipe de Grenoble grâce à une carotte recueillie par les Russes sur leur base de Vostok en Antarctique et ramenée en France sont matérialisés sur la **figure 9**. L'une des courbes représente les

variations de la température de l'air sur 150.000 ans. Il fait chaud -c'est une façon de parler-, -55° à Vostok à l'époque actuelle mais il faisait -65° il y a 20.000 ans ou il y a 150.000 ans et l'on retrouve la période inter-glaciaire donc le même genre de scenario que celui intervenu pour l'océan. L'autre courbe retrace la concentration en gaz carbonique de l'air au cours de la période en partant de l'analyse des petites bulles d'air microscopiques piégées dans la glace. Cela nous apprend -et c'est d'un grand intérêt- qu'en période pré-industrielle, il y a presque 270 à 280 parties par million * de gaz carbonique et en période glaciaire il n'y en a que tout juste 200. On constate des oscillations et quand il fait chaud on retrouve les 280 parties par million de gaz carbonique. C'est une illustration de plus du fait que l'effet de serre constitue un des phénomènes majeurs de notre climat.

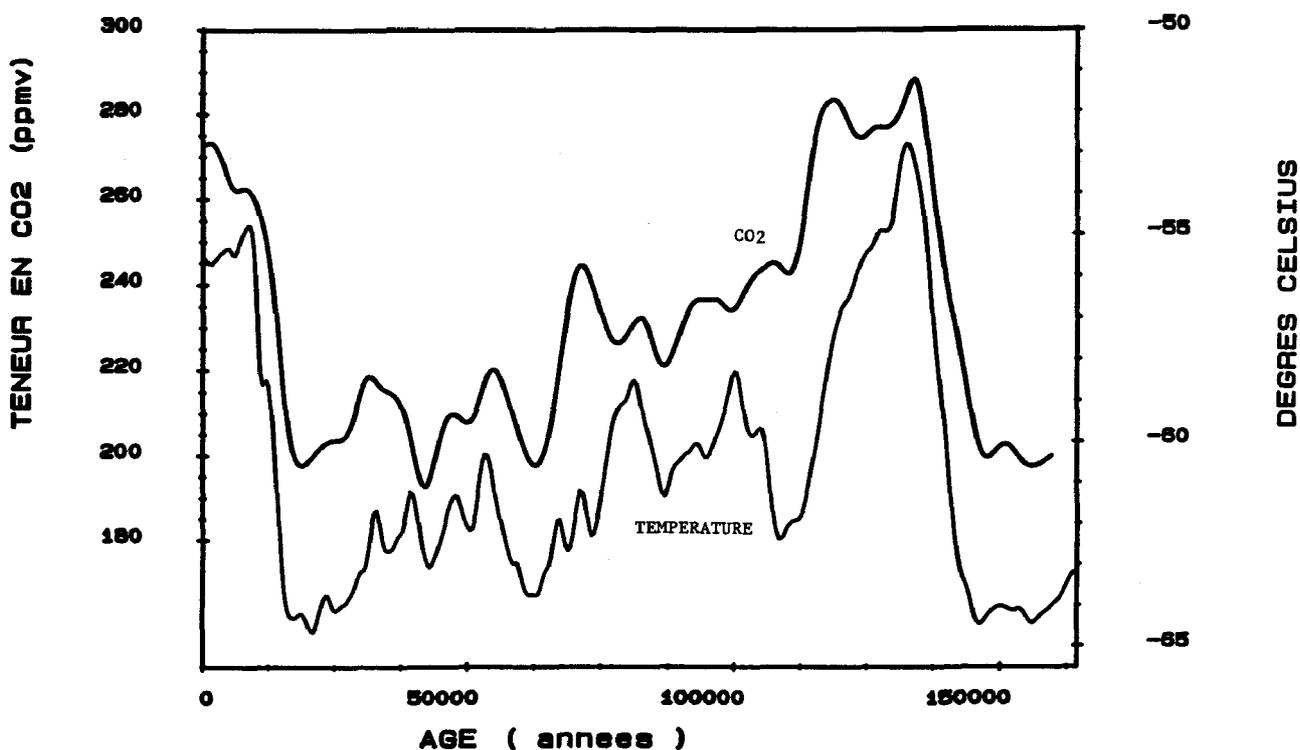


Figure 9
CO₂ atmosphérique et température à Vostok
(sur 160.000 ans)

Evidemment le CO₂ n'est pas seul responsable du changement climatique. D'autres facteurs interviennent car il n'y a aucune raison que le CO₂ change tout

* ppm : partie par million ppmv : partie par million en volume

seul. La circulation océanique est un autre responsable. En gros, elle est actuellement caractérisée par le fait que des eaux de surface finalement ramenées du côté de la mer de Norvège et de l'Atlantique nord plongent dans ces zones d'où elles repartent en profondeur en sens inverse. Elles vont alors jusque dans l'océan Indien et dans l'océan Pacifique Nord où elles sont bien obligées de remonter avant de repartir. On se trouve en présence d'une sorte de gigantesque "tapis roulant" qui ramène de l'eau chaude et relativement peu salée appelée à se saler en surface au fur et à mesure qu'elle circule pour revenir dans l'Atlantique Nord.

Le cycle a pu être suivi grâce au tritium lâché dans les années 60 avec les explosions nucléaires. Les traces de cet élément permettent d'assister au départ du tapis roulant dans l'Atlantique Nord puis de suivre jusqu'aux environs de 40° Nord sa plongée par 4 à 5 km de profondeur. Au delà de 40° Nord s'étendent des eaux non encore polluées.

Il existe au demeurant d'autres traceurs pour reconstituer ce tapis roulant, par exemple un isotope de carbone. Les eaux dans l'océan sont au moment où elles amorcent leur plongée, relativement riches en carbone 13. Par la suite, en circulant, leur teneur en carbone 13 diminue. Cela se produit pour une raison simple : depuis la surface des matières organiques tombent au fond de l'océan et sont attaquées par des bactéries qui oxydent cette matière organique et relâchent du gaz carbonique dans le milieu. Les matières organiques vivantes contiennent moins de carbone 13 que le reste. En conséquence, on constate au fur et à mesure de l'avancement du «tapis roulant» une diminution de la teneur en carbone 13 de l'Atlantique Nord à l'Océan Austral puis dans le Pacifique. Quel était le processus au moment de la glaciation ? Toujours grâce aux foraminifères et à leur coquille en carbonate de calcium on peut en reconstituer le schéma. Au lieu de l'oxygène 18 on peut, pour y parvenir, exploiter le carbone 13 de la molécule CaCO_3 . La teneur en carbone 13 des foraminifères nous renseigne sur la teneur en carbone 13 de l'eau de mer. Il faut alors savoir qu'il existe des foraminifères vivant en profondeur à 2.000, 3.000, 4.000 m ; en les analysant spécifiquement on peut donc procéder à une reconstitution semblable à celle que l'on fait actuellement en analysant des échantillons d'eau. Les indices de cette circulation Qu'on a pu recueillir témoignent d'un changement majeur. Par ailleurs la température de l'eau profonde a varié dans le passé, et sa courbe de variation en fonction du temps ressemble comme «deux gouttes d'eau» à la courbe de gaz carbonique. Sans que nous soyons capables de l'expliquer, cela laisse à entendre que la circulation océanique est le phénomène

qui gouverne le gaz carbonique. Dans quelques années peut-être en serons nous capables : on peut l'espérer.

Il est intéressant d'étudier un changement climatique en régime transitoire c'est-à-dire de regarder comment fonctionne le système quand on passe d'un climat glaciaire à un climat de type actuel. On y est parvenu là aussi par des analyses de sédiments en recherchant des zones où la multiplicité des dépôts permette de faire le plein de renseignements comme ce serait le cas avec un enregistreur défilant vite. Une carotte prélevée au large du Portugal a répondu à cette exigence et a permis d'établir qu'un réchauffement dépassant la dizaine de degrés s'est produit en moins de 4 siècles et peut-être même beaucoup moins, c'est-à-dire de façon extrêmement brutale.

Le processus du changement entre le point de départ (le temps dans le passé) et le point d'arrivée (le temps dans le présent) peut se décrire de la façon suivante : depuis 30.000 ans quelque chose changeait : la quantité de soleil tombant sur l'hémisphère Nord. Suivant le minimum d'insolation se produisait le développement majeur des eaux froides dans l'Atlantique Nord - c'est-à-dire la glaciation. Puis on s'aperçoit que l'insolation augmente beaucoup sans avoir aucun effet direct au début : au contraire, cette augmentation va correspondre à un maximum de glaciation du moins jusqu'à ce que le phénomène se déroulant, le système se mette à répondre. Il le fait alors d'un seul coup et des conditions chaudes s'installent au large du Portugal. Cependant, fait curieux, à peine arrivées ces eaux chaudes ne s'y maintiennent pas. Un refroidissement extrêmement brutal, lui aussi, -de l'ordre du siècle- démarre et cette nouvelle période très froide se prolonge un bon millénaire. Un nouveau réchauffement lui succède puis, enfin, le climat se stabilise. De la même façon le volume des glaces présente une phase de fonte. Un coup de froid survient et la fonte ralentit, bientôt suivie d'une deuxième phase de dégel global au moment de la deuxième avancée des eaux chaudes.

En résumé une transition climatique est un phénomène que les physiciens qualifient de hautement non linéaire. Le facteur de forçage est l'insolation mais le système qu'il trouve en face de lui répond comme il peut et comme il veut avec une inertie, avec des «flip-flop» extrêmement brutaux et des phénomènes abrupts dont nous ne maîtrisons absolument pas l'explication qu'il faut tenter de trouver.

On pense actuellement pour parvenir à cette explication à un système mo-

dulant le «tapis roulant» qui ramène des eaux chaudes vers le Nord, pour ensuite les faire plonger quand elles se refroidissent. Pour obtenir cette modulation, il suffit pense-t-on, de moduler un petit peu le régime des pluies sur l'océan Atlantique Nord. Dans cette hypothèse, plus il pleuvra sur l'Atlantique Nord moins les eaux seront salées, moins elles seront denses et moins elles auront tendance à plonger. Un phénomène modulateur de ce genre, extraordinairement modeste, va moduler un phénomène de bien plus grande dimension à savoir la circulation océanique, exactement de la même façon qu'en appuyant sur la pédale de votre accélérateur, vous faites avancer plus ou moins votre voiture. Ce même courant chaud est responsable du contraste thermique que nous connaissons tous entre le Canada et la France (il fait plus chaud en France qu'au Canada). Si le fonctionnement du «tapis roulant» est perturbé, le contraste va l'être à son tour et une période froide s'installera. Cette influence de multiples phénomènes météorologiques et climatiques relativement modestes (en l'occurrence un peu plus de pluie) peut induire une perturbation relativement importante du système. Ce sont ces idées que l'on creuse actuellement et sur lesquelles on travaille.

Au terme d'une conférence sur les climats une question est toujours posée: pourquoi le climat change-t-il ? Il faut essayer de donner la réponse à cette interrogation sans attendre que l'auditoire la renouvelle.

La projection d'un enregistrement climatique isotopique -donc moyennement l'évolution des glaciations au cours des âges. Sur 600.000 ans, on constate, précédant l'actuel climat chaud, une glaciation puis des oscillations, à nouveau une glaciation, une autre encore etc... Autrement dit, on s'aperçoit que l'évolution climatique sur quelques 600.000 ans présente une succession de périodes alternativement chaudes et froides, en gros à intervalles de 100.000 ans. Si on remonte plus loin dans le passé, on assiste au même scénario jusqu'à 2 ou 3 millions d'années en arrière avec une périodicité du même ordre de 100.000 ans .

L'évolution du climat se traduit donc par une succession de périodes alternativement chaudes et froides. La cause de cette variation ? C'est la façon dont le globe terrestre intercepte le rayonnement du soleil. Il importe qu'il soit bien clair que , dans cette théorie à laquelle on accorde actuellement beaucoup de crédit parce qu'on a pu la tester, le soleil n'est pour rien. Il envoie toujours la même quantité de chaleur par unité de temps et son rayonnement n'est pas capricieux. Le changement vient de la Terre. Notre planète tourne autour du soleil en décrivant

une ellipse. Il y a donc des moments où la Terre est proche du soleil, d'autres où elle en est loin. Mais d'autres éléments sont à prendre en compte dans le mouvement de la Terre autour du soleil. En janvier (donc hiver boréal) la Terre est tout près du soleil et en juillet (été boréal) à l'autre bout de l'ellipse, loin du soleil. Il en résulte qu'en ce moment (en hiver) l'hémisphère nord reçoit malgré tout plus de chaleur qu'il n'en recevrait si la Terre était dans une autre portion de l'ellipse, c'est-à-dire moins près du soleil. Il n'en a pas toujours été ainsi. La position de la terre sur l'orbite se déplace. Il y a 11.000 ans c'était le contraire et la terre se trouvait loin du soleil en janvier. On est en présence d'un phénomène complexe dépendant de nombreux facteurs d'où son caractère purement pseudo-périodique. Globalement on perçoit deux périodicités majeures dans ce déplacement, l'une de 19.000 ans, l'autre de 23.000 ans. La situation, qui existait il y a 11.000 ans, correspond au moment de la fin de la glaciation. Nous ne jouons plus sur le bilan thermique annuel, nous jouons sur la «saisonnalité» de l'insolation.

A cela s'ajoute -et c'est un élément de complexité accrue- la variation, l'excentricité de cette ellipse, variation affectée d'une périodicité de l'ordre de 100.000 ans. De temps en temps l'orbite est quasi-circulaire ; de temps en temps, elle présente une excentricité qui peut atteindre 6%. Cette variation d'une périodicité de 100.000 ans va évidemment affecter à son tour la répartition saisonnière de l'insolation. Celle-ci sera encore perturbée par un dernier facteur : l'inclinaison (en anglais tilt) du globe terrestre sur le plan de l'écliptique. Actuellement l'inclinaison est de $23^{\circ}27'$ et la conséquence en est que l'hémisphère d'hiver ne reçoit pas d'énergie du tout aux pôles et que l'hémisphère d'été au contraire en reçoit une quantité significative. Si l'inclinaison était nulle, il n'arriverait évidemment aucune énergie aux pôles quelle que soit la saison. Par contre, si on amplifie l'inclinaison, pendant l'été, les zones polaires vont recevoir davantage d'énergie et pendant l'hiver elles en recevront encore moins. Voici donc un mécanisme de plus susceptible de moduler le changement climatique. La périodicité dans ce dernier cas (variation de l'inclinaison sur l'écliptique) est de l'ordre de 41.000 ans (**figure 10 a**).

En résumé, si on procède à une analyse spectrale des variations du climat sur 5 ou 600.000 ans, on obtient les courbes de la **figure 10 b** qui présentent des oscillations (auxquelles on est toujours tenté de trouver une périodicité). En faisant un spectre de Fourier de façon à voir quelles sont les périodicités dominantes on voit apparaître dans les enregistrements 100, 43, 24, 19

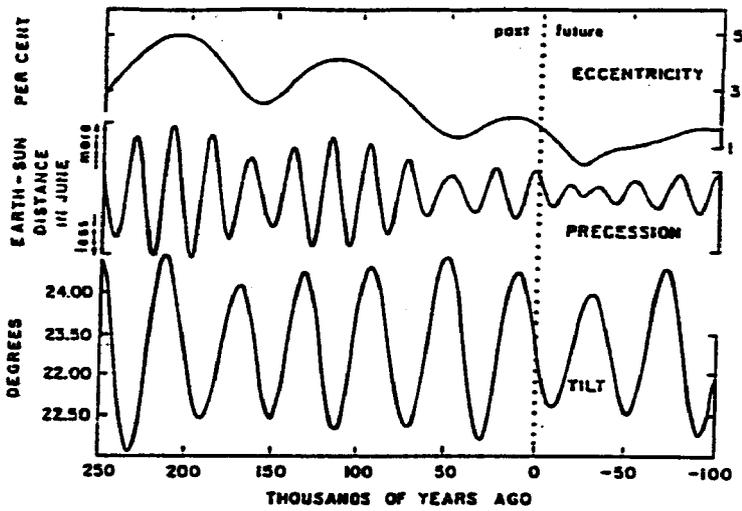


Figure 10 a

Changes in eccentricity, tilt, and precession. Planetary movements give rise to variations in the gravitational field, which in turn cause changes in the geometry of the earth's orbit. These changes can be calculated for past and future times. (Data from A. Berger.)

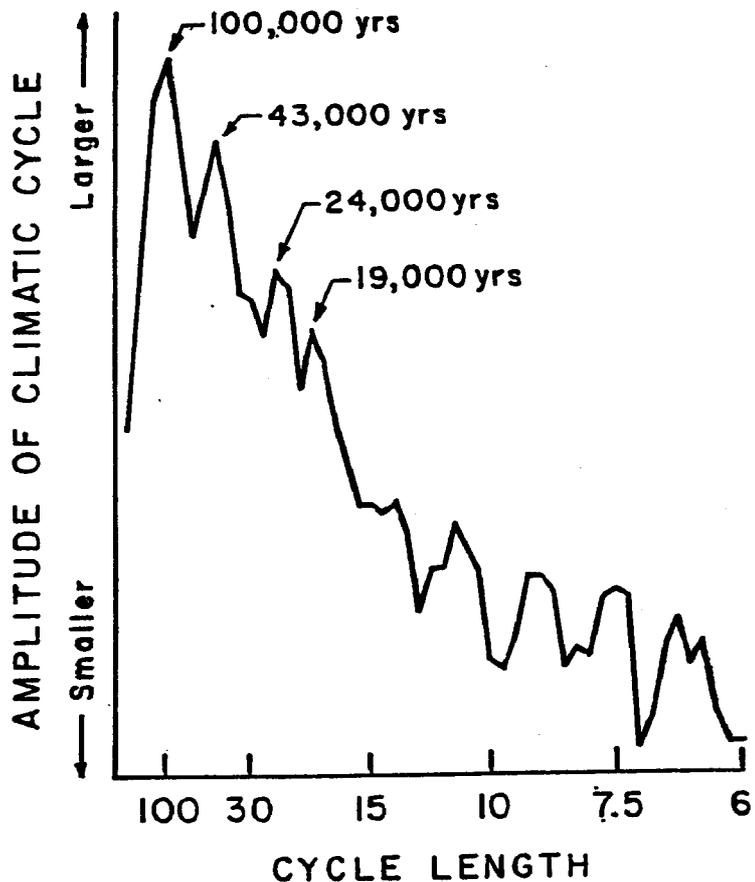


Figure 10 b

(THOUSANDS OF YEARS)
 Spectrum of climatic variation over the past half-million years. This graph—showing the relative importance of different climatic cycles in the isotopic record of two Indian Ocean cores—confirmed many predictions of the Milankovitch theory. (Data from J.D. Hays et al. 1976.)

milliers d'années. C'est un véritable miracle : ce sont exactement les chiffres que les astronomes sont susceptibles de calculer pour les variations d'insolation sur la Terre.

En conclusion : la Terre est susceptible de changer de climat. Ces variations sont importantes. Elles sont modulées par les facteurs absolument infimes que sont les variations d'insolation et la façon dont la Terre va intercepter le rayonnement que le Soleil nous envoie. A leur suite interviennent toute une série de mécanismes amplificateurs qu'on ne contrôle pas encore. On en connaît quelques-uns dont le CO₂, les précipitations, la circulation océanique. L'ensemble est susceptible de s'en-granger dans une espèce d'enchaînement cohérent dont le résultat s'inscrira en modifications majeures. Je dois dire que lorsqu'on a commencé à travailler dans ce domaine, on ignorait que le CO₂ était susceptible de changer, on ne savait pas ce qu'était un changement climatique. Aujourd'hui nous devons à cet effort qui est très largement international, la compréhension de ce qu'est un changement de climat. Cela ne donne-t-il pas envie à l'occasion du changement de climat qui semble actuellement s'amorcer, de progresser vers une compréhension encore plus poussée du phénomène ?

**Jean-Claude DUPLESSY
Centre des Faibles Radioactivités
Laboratoire mixte CNRS-CEA**