

# **Evolution et rotation de la Terre : effets sur le climat**

---

**d'après l'enregistrement de l'exposé donné le 20 janvier 1993  
dans le cadre des Cours Publics du MURS  
par André BERGER**

Ensemble nous allons essayer de comprendre quelle est la variabilité du climat de la Terre à l'échelle géologique sans nous arrêter à trop de détails susceptibles de nous égarer dans le dédale d'une approche plus fondamentale.

Cet exposé sera divisé en trois grandes parties. Une première partie traitera des variations naturelles du système climatique à l'échelle astronomique. La deuxième parlera de la théorie astronomique des paléoclimats et la troisième présentera les résultats préliminaires obtenus en modélisant cette théorie et en essayant de quantifier les événements décrits en deuxième partie. En guise de conclusion, je montrerai qu'il existe une interaction possible entre les activités humaines à l'échelle de la décennie ou du siècle et l'évolution naturelle du système climatique à l'échelle de la centaine de milliers d'années.

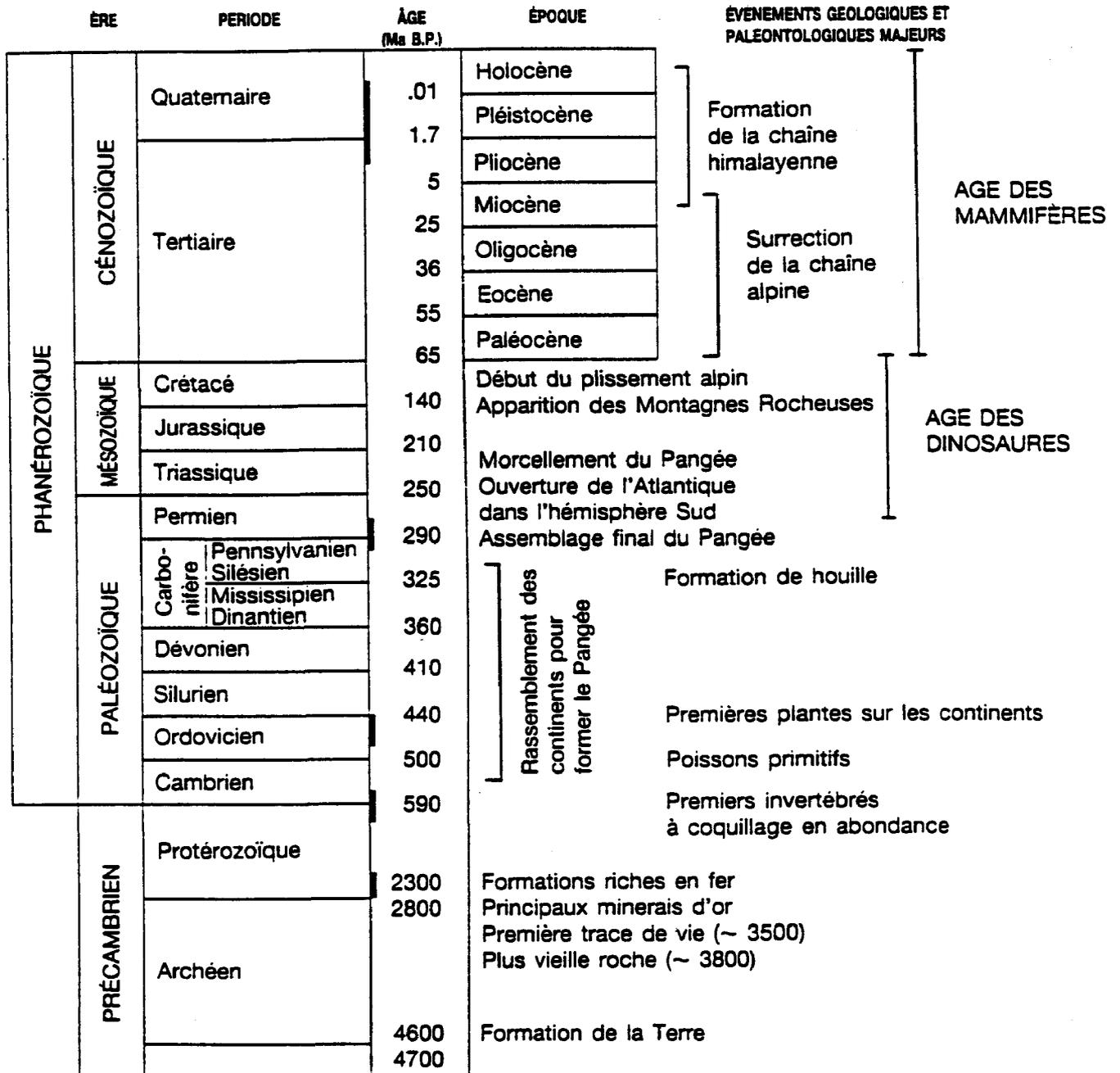


Figure 1

**Variations du climat depuis l'origine de la Terre jusqu'à nos jours**  
 (les ages glaciaires sont marqués par un épaississement)

extrait de A. Berger, 1992 ; Le climat de la Terre, un passé pour quel avenir ?  
 (Editions De Boeck, Bruxelles)

## *I - Variations naturelles du système climatique à l'échelle astronomique.*

La Terre, personne d'entre vous ne l'ignore, est née il y a environ 4 milliards 800 millions d'années. Tout au long de son histoire, le climat a en général été beaucoup plus chaud que celui que nous connaissons à l'heure actuelle : la température moyenne à la surface de la Terre était de l'ordre d'une dizaine, voire d'une quinzaine de degrés Celsius, supérieure à celle que nous connaissons à l'heure actuelle. Ce n'est que sur 10% (dix pour cent) de la durée de l'histoire de la Terre que cette même planète a été plongée dans ce que l'on appelle des âges glaciaires. Ceux-ci possèdent une double caractéristique : leur température moyenne est un peu inférieure à celle que nous connaissons à l'heure actuelle et leur climat varie de manière importante entre deux états extrêmes que l'on appelle d'un côté, un interglaciaire (ce que nous sommes en train de vivre), et de l'autre (malheureusement la terminologie française n'est pas très claire), un glaciaire.

La figure 1 montre les époques particulières pendant lesquelles on a des preuves géologiques de l'existence d'un âge glaciaire. On en compte 4 ou 5 au Précambrien. Il est évident que pour une époque aussi éloignée, les traces que nous en avons sont extrêmement peu nombreuses. Il en résulte qu'il est très difficile de matérialiser la longueur et l'intensité de ces âges glaciaires du Précambrien. Deux autres âges glaciaires postérieurs sont par contre un peu mieux connus. C'est d'abord celui de l'Ordovicien, il y a à peu près 450 millions d'années. Ensuite plus près de nous encore, c'est celui du Carbonifère ou de la fin du Carbonifère et du début du Permien il y a à peu près 290 millions d'années. Aujourd'hui, nous vivons une époque très particulière de l'histoire de la Terre qui s'appelle le Quaternaire et qui est aussi un âge glaciaire.

Pour ceux qui ne sont pas rompus à nos disciplines, parler en milliards d'années n'est guère familier. Quelques dates cependant jalonnent ces temps immémoriaux : par exemple les premières traces de vie remontent vraisemblablement à 3 milliards et demi d'années. Autre repère intéressant : les premières plantes sur les terres émergées sont apparues au moment du Silurien, il y a 400 millions d'années environ. Les grandes extensions carbonifères se situent vers 300 millions d'années avant notre ère. Quant au Pangée, gros bloc monolithique

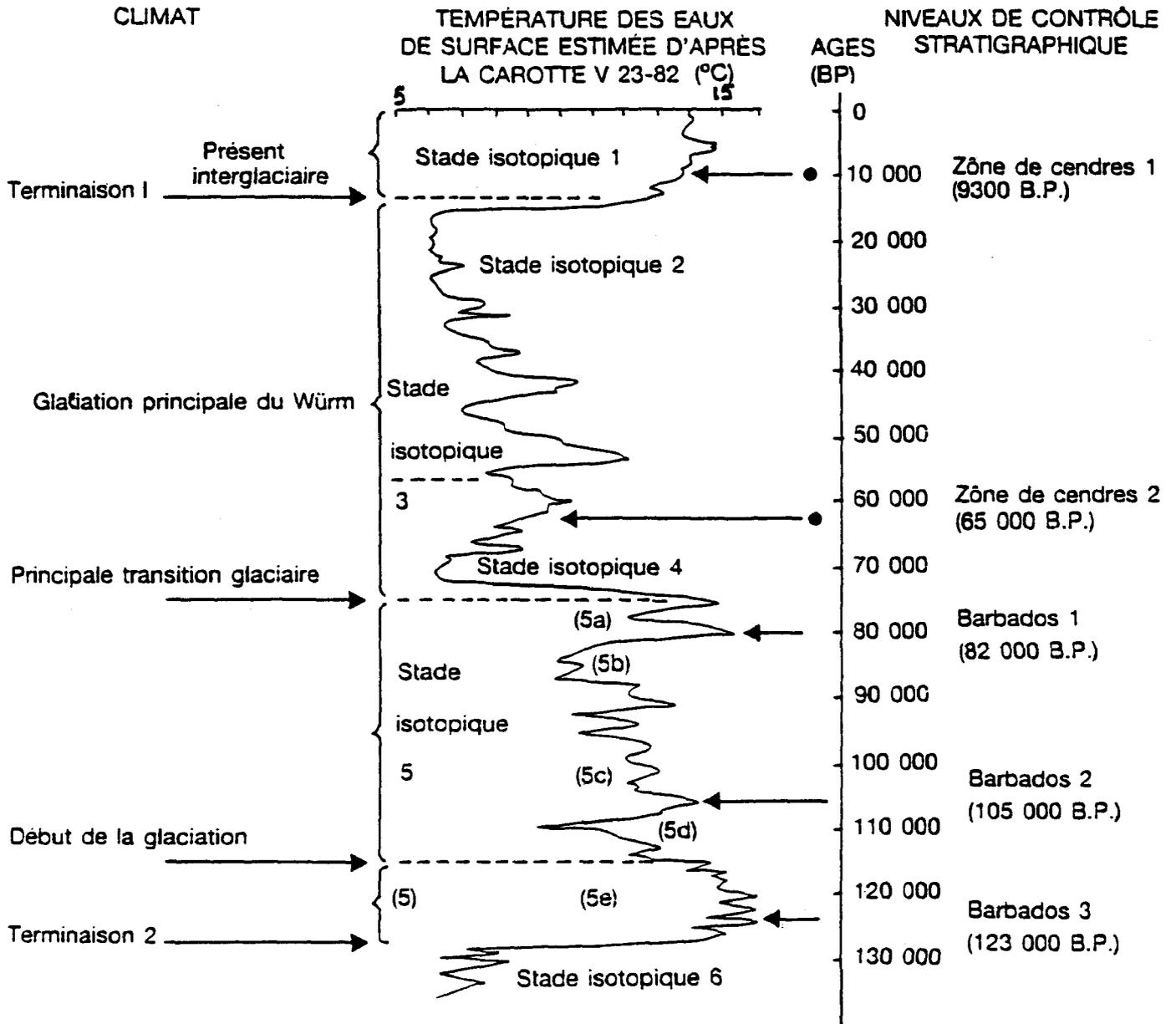


Figure 2

Le climat des 130.000 dernières années

(extrait de A. Berger, 1992, voir figure 1)

continental, il a commencé à se fractionner pour donner naissance aux continents que nous connaissons il y a 200 millions d'années. Ce fractionnement est essentiellement expliqué par la théorie des plaques tectoniques. C'est aussi à ce moment qu'a débuté l'âge des dinosaures, lesquels ainsi d'ailleurs que près de 80% des espèces alors vivantes, ont disparu il y a 65 millions d'années laissant la place à l'âge des mammifères.

Comment matérialiser l'évolution du climat au cours de notre âge glaciaire ? Mon collègue et ami, Jean Claude Duplessy \* vous a précisément donné en janvier 1991 une conférence sur la détermination des climats au cours du Quaternaire. Les connaissances récemment acquises nous permettent de matérialiser par une courbe (**figure 2**) l'évolution du volume total de glace qui existe sur la Terre au cours de ce dernier millions d'années. Le tracé obtenu fait apparaître des fluctuations qui vont de maxima de la courbe, correspondant à un minimum de volume de glace, à des minima de la courbe, traduisant un maximum d'extension du volume de glace. Sans entrer dans le détail, le point qui se trouve à 20.000 ans à peine du présent est un point caractéristique extrêmement important parce qu'il représente la dernière avancée glaciaire maximale.

Décrire le climat de cette époque est relativement simple en quelques chiffres : on estimait à 50 millions de km<sup>3</sup> de plus qu'aujourd'hui la glace sur les continents. Cela signifie qu'à la verticale de ce qui est actuellement Stockholm, l'épaisseur de glace atteignait 2 km à 2 km et demi, de même que sur toute la partie nord des Etats-Unis et sur le Canada. Cette quantité de glace s'étendait jusqu'à New-York ; en Europe, elle s'étalait jusqu'à Londres et le climat du nord de la France, de la Belgique, de la Hollande ressemblait étrangement au climat de la Sibérie actuelle. Pour accumuler cette énorme masse, il a fallu évidemment pomper de l'eau aux océans et leur niveau moyen a baissé à cette époque d'à peu près 100 à 130 mètres.

On pourrait évidemment décrire pour chacune des dates de ce dernier million d'années, peut-être avec moins de précision, la disparité des climats

---

\* Cahier du MURS "Environnement, actualité et perspectives" n° spécial 1992

## A. BERGER

successifs de cet âge glaciaire. Nous allons plus simplement dénombrer les grandes oscillations enregistrées au cours de cette période : on en trouvera une dizaine. Dix fois la Terre est entrée dans ce qu'on appelle un cycle glaciaire inter-glaciaire et chaque cycle est lui-même caractérisé par une évolution en dent de scie. Autrement dit, on entre progressivement dans un âge glaciaire, en mettant à peu près 80.000 ans pour atteindre le maximum d'extension des glaces. Par contre, la déglaciation est relativement rapide et prend en général 10 bons milliers d'années. Le chiffre de 100.000 ans comme périodicité moyenne de ces cycles glaciaire-interglaciaire est intimement lié à la théorie astronomique des paléoclimats.

On peut examiner d'un peu plus près les oscillations climatiques des dernières 125.000 années et remarquer que la classification en est basée sur ce que l'on appelle l'analyse des isotopes de l'oxygène. Celle-ci se pratique sur les structures de squelettes d'anciens animaux qui vivaient dans les océans et que l'on appelle les foraminifères : planctoniques s'ils vivent à la surface, benthiques s'ils vivent au fond des océans (cf l'exposé de Jean-Claude Duplessy). En fonction de cette analyse, on a pu reconstituer avec grande fidélité l'évolution de la masse totale de glace sur la planète Terre. Les subdivisions que l'on a obtenues ont été classées de manière fort simple par des chiffres et des lettres. Le dernier maximum interglaciaire, l'**Eemian** en Europe, porte ainsi le nom de stade isotopique **5** et est qualifié par une lettre **e**. Ensuite, apparaît un refroidissement au stade isotopique 5d, puis de nouveau un léger réchauffement avec le stade isotopique 5c, un refroidissement 5b, enfin un réchauffement 5a. On plonge par la suite dans un refroidissement beaucoup plus important, c'est le stade isotopique 4. Il convient de se rappeler de la structure générale de cette évolution parce que c'est elle que dans la troisième partie de cet exposé on essaiera de simuler à partir de modèles physico-mathématiques sophistiqués. On y verra réapparaître cette structure en fonction de la théorie astronomique. En continuant, on arrive au stade isotopique 3, puis au stade isotopique 2 siège de cette avance glaciaire maximale qui s'est produite il y a 20.000 ans et dont on a déjà parlé. La déglaciation culmine au stade 1 que nous vivons présentement.

On peut à l'appui procéder à une analyse spectrale. De quoi s'agit-il ? l'analyse spectrale est une technique mathématique relativement sophistiquée qui

permet dans une série temporelle de déceler les périodicités principales. Dans la série chronologique telle qu'établie pour représenter le volume de glace, on peut, par ce procédé, détecter de telles périodicités. Je vous en ai déjà signalé une, celle de 100.000 ans. Si l'on utilise le modèle mathématique adéquat, on s'apercevra qu'existent en plus trois autres périodes fondamentales. Lorsque l'on dispose d'une bonne information géologique datée sur le dernier million d'années, on trouve de manière préférentielle tous les 18.000, 23.000, 41.000 et 100.000 ans, un phénomène climatique important. Voilà bien le message essentiel à retenir. On constate parallèlement que ces périodicités sont intimement liées aux variations des éléments de l'orbite de la Terre autour du soleil et de l'axe de rotation de la Terre. Les chercheurs qui, les premiers, ont été confrontés avec ces résultats, se sont posés la question de savoir si effectivement les changements de l'orbite de la Terre autour du soleil dans le temps et de l'axe de rotation de la Terre à la fois dans le temps et dans l'espace, étaient liés ou non aux variations climatiques au cours du dernier million d'années. La question posée a donné naissance à ce qu'on appelle la théorie astronomique des paléoclimats.

## *II - La théorie astronomique des paléoclimats*

Cette théorie astronomique des paléoclimats ne date pas d'aujourd'hui. Même si les scientifiques qui nous ont précédé ne disposaient pas des technologies que nous avons aujourd'hui pour reconstituer les climats anciens, ils avaient essayé, au moins de manière théorique, d'imaginer quelle influence ces variations des éléments de l'orbite de la Terre pouvaient exercer sur le climat. Les premiers à en parler ont été des astronomes mathématiciens au début du 18ème siècle, mais ce n'est qu'au 20ème siècle qu'un serbo-croate, M. Milankovitch a réellement intégré l'ensemble de nos connaissances en astronomie, en mathématiques et en climatologie pour la première fois et quantifié cette théorie astronomique des paléoclimats.

Né en 1879 il est mort en 1958 : ses écrits sont restés célèbres et comme notre langue était extrêmement importante au début du 20ème siècle dans la littérature scientifique, ce serbo-croate a écrit son premier mémoire en français. Edité par Gauthier et Villars au nom de l'Académie Serbe des sciences il porte le titre de "*Théorie mathématique des phénomènes thermiques produits*

*par la radiation solaire*". Daté de 1920, il contient pratiquement la totalité de ce que l'on doit savoir si l'on s'intéresse au sujet.

Cet ouvrage marque le début de la carrière de Milankovitch qui par la suite n'a cessé d'intensifier ses recherches dans ce domaine pour finalement publier l'ensemble de ses oeuvres, cette fois-ci en allemand, dans les années 1940, sous le titre "*Kanon der Erdbestrahlung*" ouvrage resté pratiquement inconnu de la plupart des scientifiques jusque dans les années 1960. Ne parlant pas l'allemand, j'ai été amené à l'aide d'un dictionnaire à le traduire pratiquement mot par mot pour pouvoir aborder mon travail scientifique des années 1965.

C'est au même moment, à mon insu évidemment, que "l'US Department of Commerce" aux Etats-Unis a commencé à s'intéresser à ce genre de théories et à payer des étudiants israéliens engagés dans le programme "*Israël Programm for scientific translation*" pour traduire l'oeuvre de Milankovitch en anglais. Cette traduction est malheureusement introuvable, plus introuvable encore que les publications originales de Milankovitch.

Il est intéressant de signaler que Milankovitch a vécu à une époque où d'autres scientifiques aujourd'hui célèbres étaient tout aussi méconnus que lui. Je pense à Alfred Wegener avec lequel Milankovitch a été mis en contact par Vladimir Köppen, père d'Elsa Köppen, épouse de Wegener.

Je saisis l'occasion de rappeler que Köppen a donné naissance à cette fameuse classification des climats qui fait probablement encore souffrir pas mal d'étudiants étant donné le "savoir par coeur" qu'on est obligé d'en acquérir dans plusieurs disciplines.

Plus récemment, deux livres ont été publiés sur la théorie astronomique des paléoclimats. Citons d'abord le livre de vulgarisation écrit par notre collègue américain John Imbrie et sa fille, "*Ice Ages, Solving the Mystery*". Il a été question de le traduire en français : malheureusement les maisons d'édition françaises n'ont pas donné suite à la demande. C'est un livre extrêmement populaire, traduit en plusieurs langues. Il date de 1979. L'autre livre est beaucoup plus technique. Je l'ai édité avec quelques uns de mes collègues, dont Imbrie, il y

a moins d'une dizaine d'années. Il réalise la synthèse de l'ensemble des résultats théoriques que nous avons obtenus au cours des vingt dernières années dans ce domaine.

Tel est le cadre historique au sein duquel se situe la contribution de celui qui est considéré comme le père de la théorie astronomique des paléoclimats. Résumons à présent l'esprit de sa théorie. En fait l'idée de Milankovitch était extrêmement simple et il émettait les hypothèses suivantes : pour avoir un glaciaire, il suffit que la neige qui s'accumule pendant l'hiver ne fonde pas en été. Si elle ne fond pas en été, l'année suivante présente automatiquement un bilan positif de neige stockée. Une calotte polaire s'étend, le pouvoir réflecteur de la surface de la Terre augmente, réduisant la part transformable en chaleur de l'insolation et l'année suivante, le bilan de neige en voie de glaciation sera d'autant plus positif. C'est ce qu'on appelle en mathématique et en physique une contre-réaction positive. Une fois amorcée cette boucle de rétroaction, les choses ne font qu'empirer du point de vue du climat et d'énormes calottes polaires commencent à se former.

En notant un certain nombre de conditions nécessaires, c'est-à-dire en supposant que la place des continents il y a deux à trois millions d'années ait été exactement celle que nous connaissons à l'heure actuelle (c'est très sensiblement le cas) et en supposant que le pouvoir d'émission du Soleil soit resté plus ou moins constant, c'est-à-dire que la constante solaire soit restée voisine des 1360 Watts par m<sup>2</sup> que nous mesurons de nos jours, on peut affiner l'analyse.

Il y a moyen au prix de deux hypothèses de transformer la théorie de Milankovitch en termes de calcul de l'insolation, c'est-à-dire de l'énergie que nous recevons du Soleil. Les deux hypothèses requises sont :

- primo que la température de l'air à la surface de la Terre soit directement liée à l'insolation disponible pour une atmosphère complètement transparente.
- secundo que les hautes latitudes de l'hémisphère nord soient les plus sensibles au changement climatique.

Si vous retenez ces hypothèses et si vous reprenez la théorie de Milankovitch,

## A. BERGER

vous pouvez la formuler d'une autre manière en disant qu'un glaciaire apparaîtra chaque fois qu'apparaîtront des étés frais aux hautes latitudes de l'hémisphère nord.

En conséquence, Milankovitch se mit avec l'aide d'astronomes français et russes de l'époque, à calculer pour la première fois, les éléments orbitaux de la Terre avec une certaine précision et à transformer les variations de ces éléments en variation d'insolation en été aux hautes latitudes de l'hémisphère nord, plus précisément par  $65^\circ$  de latitude nord. La courbe obtenue sur 600.000 ans, sans reproduire rigoureusement les variations du climat qui ont été mises en évidence par d'autres recherches, présente toutefois des oscillations qui ne sont pas sans rappeler ces variations. Toutefois les imprécisions de la théorie, évaluées par Milankovitch lui-même, étaient relativement importantes. Il y avait donc en fait peu d'espoir que la courbe initialement obtenue représente effectivement la réalité. Mais l'idée fondamentale est restée pour l'essentiel la même que celle énoncée, dès 1920, par Milankovitch.

En termes d'éléments orbitaux eux-mêmes, on peut démontrer que pour avoir des étés frais aux hautes latitudes polaires de l'hémisphère nord, il faut que l'obliquité de l'écliptique soit faible ; il faut également que la précession soit telle que l'été de l'hémisphère nord se présente au moment où la Terre est le plus loin du soleil c'est-à-dire à l'aphélie. Il faut en outre que l'excentricité de l'orbite de la Terre soit grande. Essayons de pallier une insuffisance éventuellement bien excusable des connaissances en astronomie du lecteur en exposant succinctement ce qu'est cette obliquité de l'écliptique et la précession climatique, combinaison de l'excentricité et de la longitude du périhélie.

Une bonne compréhension de la théorie astronomique des paléoclimats exige de bien définir ces éléments qui en sont à la base. L'obliquité de l'écliptique exprime l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre par rapport à une perpendiculaire au plan de l'écliptique. Autrement dit c'est le même angle que celui qui est formé entre le plan de l'équateur et le plan dans lequel la Terre tourne autour du soleil. C'est ce même angle qui permet de définir le cercle polaire et les tropiques. A l'heure actuelle il vaut  $23^\circ 27'$  ; c'est la latitude des tropiques du Cancer et du Capricorne. L'obliquité oscille suivant une période principale de l'ordre de 41.000 ans. Les données géologiques montrent également un signal à 41.000 ans.

L'autre élément que nous devons considérer est l'excentricité, c'est-à-dire la forme de l'orbite de la Terre. Une ellipse peut se rapprocher d'un cercle et même se confondre avec lui auquel cas l'excentricité est égale à 0. Elle peut aussi se déformer de manière importante l'excentricité devenant alors d'autant plus grande. Il y a donc intérêt à prendre en compte ce paramètre parce que la distance entre le soleil qui se trouve à un des foyers de l'ellipse et le point de l'orbite qui en est le plus éloigné -l'aphélie- est d'autant plus grande que l'excentricité est grande. On peut en déduire que si la Terre est loin du soleil à un moment donné et que si au même moment c'est l'été dans l'hémisphère nord, cet été de l'hémisphère nord sera d'autant moins ensoleillé. La formule qui donne l'évolution dans le temps de l'excentricité de la Terre montre qu'une des périodes principales de sa variation est d'environ 100.000 ans.

Le troisième paramètre est malheureusement un peu plus compliqué sans toutefois poser de problème pour les astronomes. Il s'agit de la longitude du périhélie, qui est l'angle de positionnement des saisons par rapport au périhélie et à l'aphélie. Cet angle varie dans le temps. A l'heure actuelle, nous savons que l'hiver de l'hémisphère nord se présente aux alentours du 22 décembre. Il se fait, par accident de la nature, que le point où la Terre est la plus proche du soleil se situe au 4 janvier. Au moment où nous vivons l'hiver dans l'hémisphère nord, nous sommes donc proches du soleil, bien plus proches que pendant l'été, car l'été se situe au moment où la Terre est pratiquement au plus loin du soleil. Si cet angle varie, la position des saisons variera dans le temps par rapport au périhélie et par conséquent la distance Terre-Soleil au périhélie. Les oscillations principales que l'on trouve se situent cette fois-ci aux environs de 19.000 et 23.000 ans, ce qui correspond aux deux dernières périodes dont on a vu apparaître les signaux importants dans le passé géologique.

Rappelons que dans un passé récent la France a joué un rôle important dans l'élaboration de la théorie. C'est grâce à une collaboration avec Pierre Bretagnon, astronome au Bureau des Longitudes qu'on a publié pour la première fois en 1974 un tableau établi avec une grande précision de ces éléments orbitaux et c'est à nouveau avec un de ses collaborateurs, Jacques Lascar, qu'en 1988, nous avons trouvé une deuxième solution améliorant la précédente surtout pour

le passé éloigné de plus d'un million d'années. Ce nouveau tableau nous permet désormais de remonter jusqu'à 3 millions d'années dans le passé de l'histoire de la Terre.

Comme les informations géologiques disponibles à ce jour présentent le maximum de précisions pour les 125.000 dernières années seulement, nous nous restreindrons à l'analyse de ces 125.000 dernières années c'est-à-dire le dernier cycle glaciaire-inter-glaciaire. Le concernant, examinons corrélativement l'évolution de l'excentricité, l'évolution de l'obliquité et celle de la précession climatique. Appliquant strictement la théorie de Milankovitch, on devrait trouver des dates où l'on obtienne en concordance une valeur minimale de l'obliquité, une valeur de l'excentricité maximale et une valeur de la précession climatique telle que les étés de l'hémisphère nord se passent loin du Soleil. Pour matérialiser cette théorie, nous observons qu'il y a 22.000 ans, les étés dans l'hémisphère nord survenaient au moment où la Terre était loin du soleil, situation d'ailleurs à peu près identique à celle d'aujourd'hui. De son côté l'obliquité était plus faible qu'à présent il y a 22 à 23.000 ans. Heureusement, car dans le cas contraire nous ne pourrions pas voir la différence entre cette époque marquée par une avancée glaciaire extraordinairement importante et l'époque actuelle caractérisée par ce qu'on appelle un inter-glaciaire. Quand au troisième paramètre, l'excentricité, contrairement à ce que Milankovitch exigeait, elle est manifestement faible. Elle était beaucoup plus importante il y a 125.000 ans.

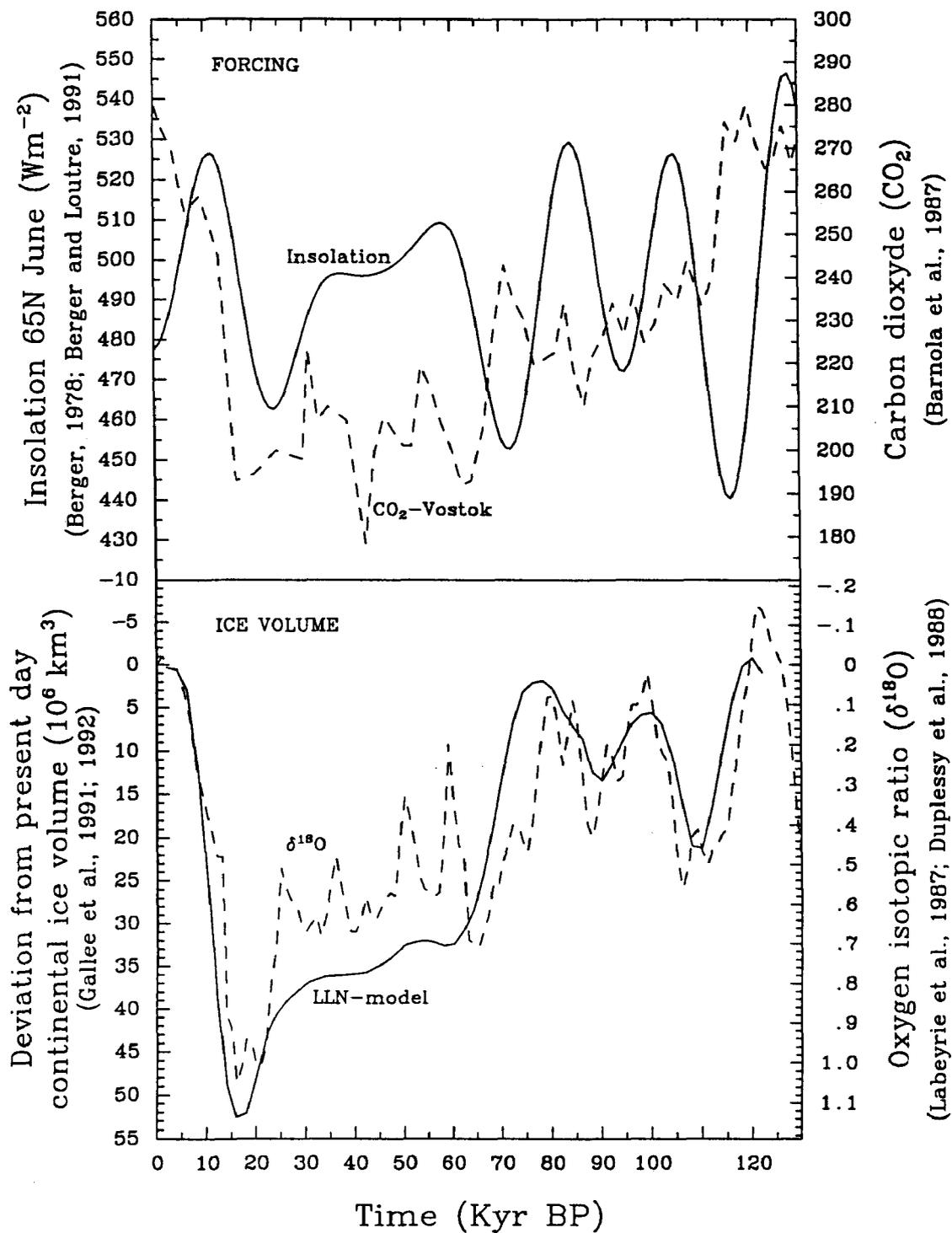
Il y a 20.000 ans, deux des conditions de la théorie de Milankovitch étaient donc réunies : obliquité faible et survenance des étés dans l'hémisphère nord au moment où la Terre est loin du soleil. Disposant de cette formulation, il n'est pas compliqué de calculer l'énergie qui nous vient du Soleil pour chacun des jours de l'année et pour chacune de latitudes de la Terre. On s'aperçoit alors qu'il y a 125.000 ans les hautes latitudes polaires recevaient beaucoup plus d'énergie en été qu'à l'heure actuelle (10 à 12% en plus) ; à moins d'énergie il y a à peu près 22.000 ans a succédé un maximum d'énergie il y a 10.000 ans. A l'heure actuelle, aux alentours de 500 Watts/m<sup>2</sup> sont recueillis par 70° de latitude nord au mois de juin. Une autre possibilité intéressante est de calculer la longueur des saisons et en particulier la longueur de l'été dans l'hémisphère nord. Cette longueur n'est pas fixe : c'est toujours en fonction de ces éléments de l'orbite de la Terre et en particulier de la précession

climatique que ces saisons varient. Leur durée moyenne est évidemment d'un quart d'année, c'est-à-dire 91 jours, mais cette longueur des saisons peut varier entre 82 jours et 100 jours. Autrement dit, l'été qui à l'heure actuelle dure environ 93 jours a pu à un moment donné avoir été plus court d'une dizaine de jours ou plus long de plus de deux semaines. Il faut donc tenir compte de cet ensemble d'informations lorsqu'on est amené à modéliser l'impact des variations des éléments de l'orbite de la Terre sur le climat.

Sans entrer dans le détail, on peut maintenant pour les 125.000 dernières années représenter l'écart, pour un mois donné, de l'énergie reçue par rapport à celle qu'on reçoit à notre époque (**figure 3**, panneau supérieur). Il est remarquable de voir qu'il y a 20.000 ans, moment où l'on avait une extension glaciaire maximale, le mois de juin était sous-enseulé pratiquement partout du pôle nord au pôle sud. Par contre, il y a 10.000 ans, au moment où nous sommes passés dans une autre phase extrême l'inter-glaciaire de l'Holocène, pratiquement toutes les latitudes du pôle nord au pôle sud, au mois de juillet, recevaient plus d'énergie qu'elles n'en reçoivent à l'heure actuelle. En conséquence, la théorie astronomique semble en bon accord avec l'observation de l'évolution climatique au cours des 125.000 dernières années. Encore faut-il que cet accord apparent passe au crible du calcul beaucoup plus rigoureux et beaucoup plus difficile à effectuer qu'est le calcul de la modélisation du système climatique.

### ***III - La modélisation***

La troisième partie de mon exposé va montrer comment on peut, à partir de modèles de prévision du climat, essayer de calculer la réponse de ce système climatique aux variations d'insolation et donc aux variations des éléments de l'orbite ainsi que de l'axe de rotation de la Terre. Il existe à ce jour deux grands types de modèles climatiques. Les modèles les plus sophistiqués sont les modèles qui sont écrits à trois dimensions, c'est-à-dire où la réalité spatiale des composantes est totalement prise en considération. Ces trois dimensions sont la latitude, la longitude et l'altitude. Malheureusement, ces modèles sont d'une telle complexité mathématique que nous ne pouvons pas écrire toutes les équations qui gouvernent le comportement de l'océan, de l'atmosphère, des



**Figure 3**  
**Variation au cours des 125.000 dernières années :**

1. de l'insolation à 65°N en juin et de la concentration en CO<sub>2</sub> dans l'air
2. du volume de glace simulé par le modèle de Louvain-la-Neuve et reconstruit à partir des données isotopiques de Gif-sur-Yvette

calottes de glace, des surfaces continentales et de la biosphère. Aucun ordinateur n'est suffisamment puissant à l'heure actuelle pour pouvoir recevoir en bloc toutes ces équations. Deux solutions s'offrent : ou bien on simplifie le système dans son ensemble, ou bien on élimine une partie du système climatique. Éliminer une partie du système climatique n'est pas très judicieux parce que comme on l'a vu, le climat n'est pas uniquement représenté par l'atmosphère mais dépend également des volumes considérables de glace. Nous devons évidemment en intégrer l'évolution dans le modèle ; de plus, pour former cette glace, il a bien fallu évaporer l'eau des océans. Par conséquent les océans aussi doivent constamment être présents dans ce système. La solution choisie dans mon laboratoire a donc été de simplifier mathématiquement les équations pour obtenir un modèle que l'on appelle "modèle à deux dimensions et demie".

Cela étant, l'essentiel est de retenir que ce modèle possède en fait de manière schématique une atmosphère, un océan, que la surface de l'océan peut être libre de glace, ou couverte de glace marine et qu'au sein même de ces glaces, nous sommes capables de représenter ce que l'on appelle les chenaux. Ces chenaux sont importants parce que la glace a une température voisine de 0°C, alors que l'atmosphère au-dessus d'elle peut avoir une température de -50°C. Si nous constatons l'apparition d'un chenal au milieu de cette glace c'est la preuve que la température de surface de l'océan est de quelques degrés alors que celle de l'air qui le recouvre est -40 à -50 degrés. Il existe donc des contrastes importants entre les deux parties principales du système et évidemment ces contrastes doivent être pris en compte, car ils ont une influence sur l'extension même de la surface de la glace polaire.

Sur les continents nous avons à représenter, d'une part, un sol classique avec la possibilité d'un couvert forestier et, d'autre part, des champs de neige avec des précipitations soit neigeuses soit simplement liquides, qui finissent par construire ces calottes glaciaires dont je vous ai décrit l'évolution au cours des 20.000 dernières années. Les modèles de ce deuxième type, même s'ils paraissent plus simples, sont d'une complexité relativement grande et suffisante pour déjà à eux seuls saturer les ordinateurs en service actuellement. Il faut à ce propos noter que les climatologues sont, exception faite des militaires, les plus grands utilisateurs d'ordinateurs du moment.

Une fois construit un tel modèle, on va étudier sa réponse lorsqu'il est forcé par les variations d'insolation précédemment définies. Sans entrer dans le détail, on voit qu'uniquement à partir de ces variations d'insolation, il est possible de représenter les grandes allures de l'évolution du volume total de glace au cours des 130.000 dernières années. Il faut toutefois faire remarquer que nous ne parvenons pas à former toute la glace telle qu'elle a été estimée il y a 20.000 ans par les géologues. En fait l'évolution de l'insolation et des éléments de l'orbite de la Terre ne permet d'expliquer que les 2/3 du volume total de glace effectivement constaté.

Soulignons que le modèle est capable non seulement de reproduire le volume total de glace, mais également le volume de chacune des calottes glaciaires prises séparément. Il y a 20.000 ans, par exemple, le modèle simule une énorme calotte de glace sur le nord de l'Europe et de l'Asie, une autre telle que nous la connaissons au Groënland et une troisième sur le nord des Etats-Unis et sur le Canada.

De ce qui précède, on peut retenir que les éléments de l'orbite de la Terre peuvent engendrer des variations climatiques, mais qu'à eux seuls ils ne sont pas capables de rendre compte de l'ampleur totale des variations constatées. En particulier si on représente, à partir de ces éléments seulement, l'évolution de la température au cours des 120.000 dernières années pour tout l'hémisphère nord on s'aperçoit qu'au moment de l'extension maximale de la glace il y a 20.000 ans, cette température n'aurait été que de 2° à peine plus basse qu'à l'heure actuelle alors que l'observation montre qu'elle était de l'ordre de 5° inférieure à celle que nous connaissons aujourd'hui. Nous avons ainsi fait apparaître une des déficiences du modèle dont nous allons essayer de détecter la raison.

Cette déficience n'est pas la seule : les calottes polaires et en particulier la calotte polaire du nord des Etats-Unis ne s'étendent pas suffisamment vers le sud au moment du dernier maximum glaciaire. La simulation fait apparaître une extension jusqu'à 60° de latitude nord alors que l'observation montre une extension jusqu'à la latitude de New-York (environ 40°). Comment y remédier? Il faut avoir présent à l'esprit que dans le modèle retenu, on n'a fait varier que l'insolation en fonction des éléments de l'orbite de la Terre. Or nous savons

depuis plusieurs années grâce à l'équipe de Grenoble, que le contenu en gaz carbonique de l'air a également changé au cours des 125.000 dernières années. Effectivement, il y a 125.000 ans, la concentration en CO<sub>2</sub> dans l'air était de l'ordre de 290 parties par million en volume, ce qu'elle était également au début de la révolution industrielle vers le milieu du 18ème siècle. Cette concentration en CO<sub>2</sub> a diminué progressivement pour atteindre un minimum de l'ordre de 200 parties par million en volume il y a à peu près 20.000 ans. A l'heure actuelle, la concentration en CO<sub>2</sub> dans l'air suite aux activités humaines et à l'industrialisation est remontée à 360 parties par million en volume. Il n'est pas sans intérêt de noter qu'il a fallu 80.000 ans à peu près à la nature pour faire passer la concentration de 290 à 200 ppmv (partie par million en volume), ensuite il a fallu 10.000 ans pour repasser de 200 à 280 ppmv, mais 200 ans ont suffi aux activités humaines pour la faire grimper de 280 à 360. L'évolution de la concentration en CO<sub>2</sub> dans l'air au cours des 200 dernières années est donc 100 fois plus rapide que l'évolution naturelle dans le système à l'échelle géologique. De toute façon, cette évolution de la concentration en CO<sub>2</sub> dans l'air doit être prise en considération et lorsqu'on l'introduit dans la modélisation, en plus de la variation d'insolation, nous réussissons à mieux simuler la réalité, en particulier, il y a 20.000 ans, époque où le volume total de glace évalué par la simulation est de l'ordre de 50 millions de km<sup>3</sup> en plus de ce que nous avons à l'heure actuelle, ce qui correspond grosso modo à la réalité observée.

De même, si on simule le volume des trois calottes glaciaires constituantes, celle de l'Amérique du Nord, celle de l'Europe et de l'Asie et celle du Groënland, il faut remarquer qu'en Europe, il y a 100.000 ans et il y a 75.000 ans, cette calotte glaciaire avait disparu. Pratiquement ce sont, avec l'époque actuelle, les seuls moments où le nord de l'Europe était libre de glace. Il n'en va pas de même de la calotte nord-américaine. Finalement, la simulation a aussi montré très nettement que lors de la déglaciation d'il y a 10.000 ans, la disparition de la calotte du nord de l'Europe et de l'Asie a eu lieu avant la disparition de la calotte de l'Amérique du Nord, ce que l'observation semble effectivement confirmer.

En définitive, on semble bien avoir mieux approché la réalité des choses en tenant compte de deux facteurs :

## A. BERGER

1) le facteur qui est à la base de la théorie astronomique, la variation des éléments de l'orbite de la Terre et de l'insolation ;

2) la variation de la concentration en  $\text{CO}_2$  dans l'air telle qu'elle a été mise en évidence par l'équipe de Grenoble.

Non seulement le volume de glace est alors beaucoup mieux représenté, mais l'évolution de la température au cours des 130.000 dernières années pour l'hémisphère nord fait apparaître une diminution de l'ordre de  $4^\circ\text{C}$  il y a 20.000 ans, diminution qui est beaucoup plus en accord avec la réalité observée. Finalement, cette simulation montre également très nettement une extension beaucoup plus vers le Sud de la calotte glaciaire américaine, extension qui se rapproche sensiblement de  $50^\circ$  de latitude nord. Même si ce n'est pas encore la latitude de New-York, l'amélioration est relativement importante.

Dans le contexte de la question fondamentale posée à l'heure actuelle, à savoir les activités humaines et en particulier l'augmentation de la concentration en  $\text{CO}_2$  dans l'air vont-elles changer le climat du XXIème siècle, il est intéressant de savoir quelle est la partie de la variation des climats due à l'insolation et quelle est la partie due à l'évolution de la concentration en  $\text{CO}_2$  dans l'air. Cette analyse mathématique débouche sur un ensemble de chiffres dont nous allons essayer d'en décomposer la complexité de manière relativement simple. En maintenant le gaz carbonique en concentration fixe au cours des 125.000 dernières années, la diminution de la température en fonction de la théorie astronomique il y a 20.000 ans serait de  $3,2^\circ$ . Si la concentration en  $\text{CO}_2$  varie telle que l'observation le montre, soit à prendre en compte il y a 20.000 ans une concentration en  $\text{CO}_2$  de l'ordre de 200 parties par million en volume, la diminution en température est alors de l'ordre de  $4,5^\circ$ . Cela permet de distinguer quelle est la partie de la variation du climat expliquée par la théorie astronomique, d'une part, et uniquement par le  $\text{CO}_2$ , d'autre part. La partie expliquée par la théorie astronomique représente à peu près les  $2/3$  de la variation globale alors que la contribution due à la variation du gaz carbonique est, elle, de l'ordre de 33%.

En allant un peu plus profondément, on peut également analyser quelle est la partie intrinsèquement liée à la variation secondaire de la concentration

en vapeur d'eau dans l'air. Celle-ci survient de manière relativement simple indépendamment de l'action directe de l'homme. Pourquoi ? Simplement parce que si la surface de la Terre se réchauffe, il est évident que l'évaporation augmente et que, par conséquent, davantage de vapeur d'eau se retrouve dans l'atmosphère. Cette vapeur d'eau est un gaz à effet de serre extraordinairement puissant, plus puissant que le CO<sub>2</sub>. Il faut donc impérativement tenir compte de cette évolution même si elle ne se fait qu'indirectement.

Cela permet de répondre à la question fondamentale, aliment d'un des grands débats actuels du monde scientifique, de savoir si oui ou non le changement du climat imputable aux activités humaines sera important au cours du XXIème siècle. Il est évident que le CO<sub>2</sub> et la vapeur d'eau jouent un rôle clef. Nous avons dès lors étendu ces calculs aux 200.000 dernières années pour pouvoir schématiser l'évolution du volume total de glace au cours de deux cycles glaciaire-interglaciaire. Si nous comparons le résultat avec les données géologiques, il faut, admettre qu'il existe un parallélisme entre le volume total de glace déduit des données géologiques et celui avancé par la simulation. Manifestement, la théorie astronomique et l'évolution des gaz à effet de serre conjugués sont capables de représenter l'évolution du climat telle qu'elle est donnée par les géologues.

Si nous avons réussi à obtenir un modèle physico-mathématique apte à représenter de façon suffisamment acceptable les climats du passé, il est tentant d'utiliser ce même modèle pour extrapoler dans le futur et essayer de prévoir quel sera le climat des prochains millénaires. C'est une chose que l'on peut faire facilement pour deux raisons : la première, le modèle existe. La deuxième : la mécanique céleste fournit la théorie astronomique sur laquelle s'appuyer pour calculer les éléments de l'orbite de la Terre dans le passé mais également dans le futur. Cette théorie d'une extrême précision est suffisante pour permettre une extrapolation sur les 100.000 prochaines années. Connaissant les variations d'insolation et disposant d'un modèle, cette extrapolation prévoit, en fixant la concentration en CO<sub>2</sub> à sa valeur pré-industrielle, qu'il va se former de plus en plus de glace pour aboutir dans à peu près 55.000 ans à 26 millions de km<sup>3</sup> de glace de plus dans l'hémisphère nord qu'il n'y en a maintenant. Autrement dit, nous allons à l'échelle naturelle géologique progressivement vers un nouvel âge glaciaire comparable à celui survenu il y a 20.000 ans.

Toutefois, l'évolution du climat au cours du XXIème siècle suite aux activités humaines, si réchauffement il y a, ne serait-il pas capable de perturber cette évolution naturelle du système climatique ? C'est une question fondamentale pour deux raisons :

1) parce qu'elle montrerait que pour la première fois dans l'histoire de la planète Terre, l'Homme serait capable d'interférer avec l'évolution naturelle du système. La question qui se poserait alors automatiquement est : l'homme a-t-il le droit, en tant qu'être extrêmement fugitif dans l'histoire du climat de la Terre, de perturber suffisamment l'évolution future du système de telle sorte que celui-ci devienne différent et compromette sa survie ?

2) Parce qu'elle permettrait de déceler une interférence possible de l'évolution des climats avec la stabilité des sites où l'on prévoit d'entreposer les déchets en provenance des centrales nucléaires. Le problème majeur des centrales nucléaires en l'état présent n'est pas leur sécurité. La sécurité des centrales nucléaires est certes un problème en Russie, mais ce n'en est pas un en Europe de l'Ouest ni aux Etats-Unis d'Amérique. L'important est de savoir ce que l'on va faire avec les déchets des centrales nucléaires et comment on va démonter les installations obsolètes. De toute façon ces déchets et les décombres industriels devront être stockés pendant un nombre important d'années qui correspond à la décroissance de la radioactivité de ces éléments ( de 10.000 à 100.000 ans). Par conséquent, il faut repérer des sites où pendant 10.000 à 100.000 ans, on est plus ou moins certain que rien de majeur ne va se passer. Quels facteurs pourraient perturber un site de stockage des déchets nucléaires ? Il en existe plusieurs : le premier, c'est l'activité sismique et volcanique. Le deuxième c'est un envahissement par l'eau, qu'il s'agisse d'inondations dues à des pluies torrentielles ou d'élévation du niveau de la mer. Le troisième, c'est la formation d'une énorme calotte polaire à proximité immédiate ou au-dessus du site, ce qui pourrait comprimer ce dernier suffisamment pour diffuser à l'air libre les éléments radioactifs entreposés.

On voit bien que le climat est un des éléments qu'il faut connaître à long terme, c'est-à-dire à l'échelle de la théorie astronomique, pour pouvoir décider si un site est apte à l'entreposage des déchets nucléaires pour une durée de 10.000 à 100.000 ans. C'est la raison pour laquelle cette théorie qui initialement

relevait d'une recherche fondamentale dont on percevait à peine l'intérêt pour la société, est devenue maintenant une théorie très sollicitée en particulier par tous ceux qui s'occupent des déchets nucléaires. En France, le Commissariat à l'Energie Atomique est sensibilisé à ce genre de simulations. Par conséquent, l'extrapolation que nous avons effectuée offre certainement un intérêt dans l'hypothèse que je viens d'évoquer mais l'intérêt n'est pas moindre dans celle d'une évolution du climat vers un réchauffement. En se réchauffant, le climat pourrait, par exemple, faire fondre la calotte groënlandaise, éventuellement la calotte polaire antarctique, et également rejeter dans l'atmosphère des quantités importantes de gaz carbonique, lesquelles évidemment mettraient un certain temps avant de disparaître de l'atmosphère. Elles contribueraient donc éventuellement à perturber le climat au cours de milliers, voire de dizaines de milliers d'années. Pour en évaluer les effets, nous avons supposé que la température allait augmenter de plusieurs degrés, (4 à 5 degrés) au cours de la période allant du XXIème au XXIVème siècles et que la calotte groënlandaise allait disparaître. Comment alors évoluerait le climat à l'échelle des 100.000 prochaines années ? Contrairement à l'évolution naturelle, pendant à peu près 15.000 ans nous n'assisterions plus à la formation de glace sur la planète dans l'hémisphère nord. Au rythme de l'évolution naturelle, dans 15.000 ans, nous devrions avoir 10 millions de km<sup>3</sup> de glace en plus. Dans l'hypothèse d'un réchauffement du climat au cours des prochains siècles, la glace ne commencerait à se former que dans 15.000 ans environ pour atteindre un maximum dans 60.000 ans, lequel maximum serait de l'ordre de 18 millions de km<sup>3</sup> au lieu des 26 millions de km<sup>3</sup> attendus par la simulation du cas où ce réchauffement n'aurait pas lieu. Répétons qu'il ne s'agit là que de résultats provisoires.

Le modèle ne prétend pas décrire la réalité absolue des choses. Il faudra faire beaucoup d'autres recherches et surtout que beaucoup d'autres modèles confirment ces résultats avant qu'ils ne soient pleinement pris en compte. De toute façon, cela montre qu'il existe une probabilité non négligeable que le réchauffement des siècles à venir, s'il a lieu, interfère réellement avec l'évolution naturelle du système climatique, y compris à l'échelle géologique. Un changement à l'échelle séculaire pourrait donc induire un changement important du comportement du climat à l'échelle de la théorie astronomique. C'est là qu'apparaît la complexité du système climatique : non seulement l'astronomie intervient, les mathématiques sont nécessaires mais également la totalité des sciences qui

**A. BERGER**

font appel à l'atmosphère, à l'océan, à la biosphère, à la lithosphère, à la couverture de la surface des continents et à la cryosphère. Voilà la raison pour laquelle on peut avoir l'impression que peu de progrès quantitatifs ont été faits au cours de ces vingt dernières années. En fait toute la communauté scientifique est concernée. Malheureusement, il faut bien l'avouer, peu de chercheurs face à la besogne qui nous attend, nous rejoignent étant plus attirés par les sciences qui sont plus appliquées et rémunératrices que la recherche fondamentale sur le climat de la Terre.

**André BERGER**  
**Docteur en sciences**  
**Professeur à l'Université Catholique de Louvain-la-Neuve**