



# Les climats du passé

Marc Boulanger (\*)

*Pour comprendre le climat du présent et ses excès (comme la récente sécheresse qui a affecté l'Europe durant l'année 1976), et pour éclairer celui de l'avenir, il faut savoir étudier les oscillations climatiques du passé lointain. C'est l'objectif d'une discipline scientifique qui a pris pour nom la paléoclimatologie et qui couvre les 1 800 000 dernières années de la Terre. Voici un cas de plus où l'histoire longue et la prospective se donnent la main.*

Les travaux dans ce domaine ont porté essentiellement sur l'ère quaternaire, parce que la recherche y est plus aisée (meilleure conservation des indicateurs paléoclimatiques, effet négligeable de la dérive des continents et des grands mouvements tectoniques, datation plus exacte, etc.). Les variations climatiques se rapportent principalement aux paléotempératures, qui sont les paramètres les plus aisés à mesurer.

## Les outils de la recherche.

La science paléoclimatologique repose sur trois grands moyens d'investigation, que nous examinons ci-après.

**Analyse isotopique :** les isotopes d'un élément ont tous les mêmes propriétés chimiques mais diffèrent par leur masse atomique. On les appelle isotopes car ils occupent la même place dans la table périodique des éléments. En 1947, Urey a eu, le premier, l'idée d'utiliser comme thermomètre la variation en fonction de la température des rapports isotopiques de l'oxygène contenu dans les carbonates. On a, en effet, mis en évidence que le rapport  $O^{18}/O^{16}$  de s foraminifères était une fonction de la température de l'eau de mer au moment où vivaient ces animaux pélagiques (1).

On a également cherché à étendre la mesure de ce paramètre physique température aux précipitations fossiles stockées sous forme de glaces (figure 1). En effet, il a été montré que les rapports isotopiques des précipitations reflétaient les températures moyennes annuelles des lieux de prélèvement.

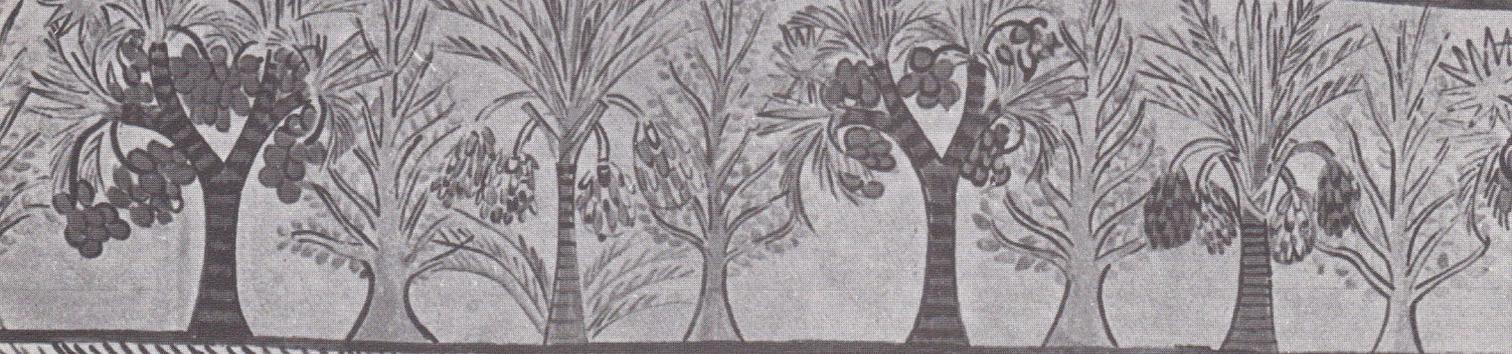
La mesure du rapport isotopique

$O^{18}/O^{16}$  des carbonates a également été appliquée plus récemment aux concrétions des cavernes. Elle permet l'évaluation des variations de température qui se sont produites au-dessus de la grotte.

**Paléontologie :** l'étude des variations du climat à partir des vestiges d'animaux ou de végétaux relève du principe de l'actualisme, c'est-à-dire que l'on postule que les mêmes organismes vivaient autrefois dans les mêmes conditions d'ambiance qu'aujourd'hui. Cette idée peut être critiquée dans certains cas particuliers où l'on a noté une grande facilité d'adaptation des organismes, mais elle est généralement applicable avec un bon degré de certitude. Lorsqu'on se trouve en présence d'une association d'animaux ou de végétaux et que l'on connaît les conditions d'existence de chacun d'eux, il est possible de déterminer certains paramètres physiques compatibles avec la vie de tous ces êtres. Cette méthode, qui paraît a priori moins rigoureuse qu'une mesure physique comme l'analyse isotopique, donne en fait des résultats surprenants de précision. Ce mode d'investigation a été appliqué principalement aux organismes pélagiques dans les océans (particulièrement aux foraminifères) et aux pollens sur les continents. On a également

(1) En fait, il semblerait, d'après de récentes études, que ces rapports isotopiques soient le reflet de la composition isotopique de l'eau plutôt que sa température. D'une façon indirecte, ces deux paramètres sont semblables puisque la composition isotopique de l'océan dépend de la plus ou moins grande extension de la calotte glaciaire, donc de la température. Les études et les analyses antérieures gardent donc une certaine valeur. Cependant, dans les régions équatoriales, les variations de température pourraient être beaucoup plus faibles qu'on ne l'avait annoncé, compte tenu du fait que le rapport  $O^{18}/O^{16}$  serait un indicateur du climat global et non local.

(\*) Établissement d'Études et de Recherches Météorologiques - Paris.



reconstitué, quand c'était possible, les limites de forêts et les répartitions de chaque espèce végétale, ce qui a permis de déterminer certaines caractéristiques des climats anciens. Cependant, il faut tenir compte des spécificités de chaque espèce — température, humidité, insolation, qualité des sols, etc. Les arbres peuvent apporter également des renseignements précieux si l'on étudie leur structure interne : l'analyse des cernes permet ainsi, sur des périodes historiques, de reconstituer des fluctuations climatiques avec une très bonne précision quant à la date. Malheureusement ces reconstitutions ne peuvent être faites que pour des périodes végétatives (printemps, été).

#### Analyse géologique.

Les varves lacustres ont été également abondamment étudiées. Ce sont des alternances de dépôts détritiques d'hiver et de dépôts d'été plus riches en matière organique. L'analyse des végétaux fossiles permet de reconstituer les paramètres thermiques et la pluviosité de la saison. On peut aussi d'après l'épaisseur et la nature des différentes sédimentations apprécier le passé climatique. L'étude de la variation du niveau des lacs offre également la possibilité de reconstituer les variations de la pluviosité.

D'autres méthodes relevant de la géologie ont été utilisées mais plus rarement. On (1) a notamment analysé la granulométrie de particules quartzeuses dans des carottes de forage : les alizées avaient probablement été plus intenses pendant les périodes glaciaires. On (2) a aussi utilisé les argiles marines comme indicateur paléoclimatique. Ces argiles d'origine continentale sont un reflet du climat qui régnait à l'époque sur les lieux où ils ont été façonnés. Les variations climatiques sont reconstituées dans ce cas par l'examen des changements dans l'assemblage argileux des sédiments, changements caractérisés par une plus ou moins grande abondance de tel ou tel minéral.

#### Les paléoclimats : quatre ou dix glaciations ?

Nous ne présenterons pas ici une énumération complète des résultats souvent ponctuels obtenus dans l'étude des paléoclimats. Nous tenterons plutôt d'en établir une synthèse et de retracer à gros traits les caractéristiques des périodes glaciaires et interglaciaires.

Aussi loin que le permet l'état de conservation des structures géologiques, on a pu mettre en évidence des périodes glaciai-

res. Mais, pour des raisons que nous avons citées au début de l'article, les études paléoclimatiques ont essentiellement porté sur le Quaternaire (période couvrant les 1 800 000 dernières années). Le milieu océanique qui subit une sédimentation continue s'est révélé plus propice à l'élaboration d'une échelle climatique que le milieu continental. C'est ainsi qu'en, lors des 800 000 dernières années, les chercheurs n'ont pu découvrir sur les continents que quatre glaciations, alors qu'à l'aide des carottages effectués dans les accumulations sédimentaires océaniques, il a été possible de montrer que dix glaciations avaient couvert cette période. Les caractéristiques de ces oscillations du climat commencent à être connues précisément. Il apparaît en effet, au travers de multiples mesures, que les glaciations se sont produites simultanément dans les deux hémisphères. On a établi d'autre part qu'à une fluctuation climatique était liée une variation du niveau de la mer de 100 m environ. En ce qui concerne la modification de température à la surface du globe entre une période chaude et froide, il apparaît, à la lumière de résultats récents qu'elle dépend du lieu géographique : elle est d'une part fonction de la latitude et d'autre part elle est différente selon qu'on la mesure en milieu primitivement marin ou continental.

Ainsi, on a montré que la différence de température à la surface de la mer entre la période froide située 16 000 ans avant Jésus-Christ et la période actuelle pouvait atteindre 10 °C dans les moyennes latitudes, alors que dans les régions équatoriales, elle était de l'ordre de — 2 °C. De plus le pouvoir d'inertie calorifique de l'océan contribue à amoindrir l'amplitude de température à la surface des mers par rapport aux continents.

Ces variations du climat ne sont pas progressives comme on pourrait l'imaginer. Les chercheurs ont été frappés au contraire par la soudaineté (au sens géologique du terme) des invasions brutales du froid. On peut interpréter cette observation de deux manières : ou bien un événement subit a provoqué cette variation brusque du climat, ou bien l'atmosphère, grâce à un ou plusieurs phénomènes évoluant lentement, a changé d'état d'équilibre.

Il semble de plus que, de manière générale, à ces époques, la pluviosité était moindre, mais que les vents étaient plus forts. Ces phénomènes étaient liés à une extension de la banquise et des eaux subpolaires.

Une synthèse des résultats quantitatifs de la paléoclimatologie est difficile à conduire à partir de la grande quantité de résultats souvent ponctuels et parfois contradictoires des mesures. Les spécialistes l'ont compris et ont entrepris le vaste pro-

jet CLIMAP dont le but est de reconstituer l'océanographie de surface de la totalité du globe pour des périodes particulières des 700 000 dernières années.

#### Variations climatiques : à cause du soleil ?

On a vu fleurir depuis plus d'un siècle une multitude d'explications, plus ou moins plausibles, des oscillations climatiques.

Il convient donc de ne présenter les hypothèses les plus raisonnables qu'avec circonspection. On peut les regrouper en plusieurs grandes classes : la variation de l'activité solaire, les variations de l'orbite terrestre, les variations du champ magnétique, l'activité volcanique, l'autovariation de l'atmosphère terrestre. La plus grande partie des hypothèses ne sont pas des théories à proprement parler, car elles se réduisent souvent à de simples corrélations plus ou moins fortes entre deux ordres de phénomènes.

La première idée qui vient à l'esprit pour expliquer les variations du climat est d'imaginer des modifications ou des oscillations du moteur de la circulation atmosphérique : le soleil. On a donc tenté de savoir si le soleil pouvait subir des modifications même minimes dans son activité. Depuis quelques années des mesures de la « constante solaire » ont été effectuées à l'aide de ballons plafonnant à une trentaine de kilomètres. Des fluctuations de l'ordre de 1 à 2 % ont été enregistrées, en relation avec le nombre de taches solaires. Malheureusement, l'altitude des ballons est encore trop faible pour que la mesure ne soit pas polluée par des phénomènes terrestres et aucune conclusion n'a pu être tirée de ces observations. Des mesures par satellites semblent théoriquement plus prometteuses et permettront peut-être d'établir l'influence réelle de ces phénomènes de taches solaires. Ces dernières qui sont à la source de bien des spéculations, apparaissent à la surface du soleil avec une périodicité moyenne de 11 ans. Des études multiples de corrélation ont été tentées entre le nombre de ces taches et la température ou la pluviosité en divers points du globe terrestre (3). Ces travaux, quoique intéressants, doivent être prudemment interprétés. De toutes façons les phénomènes énumérés plus haut ne sauraient expliquer les grandes glaciations quaternaires et il semble bien difficile actuellement de savoir si le soleil a pu subir des modifications sensibles au cours de ces périodes passées.

(1) Parkin.

(2) Chamley.

(3) King, notamment, a mis en évidence des corrélations étroites entre la pluviosité de plusieurs stations et ce cycle. Il semble cependant que ces comparaisons ne soient valables que dans certains cas et pour des périodes couvrant au mieux quelques cycles.

*Blé, céréales et dattes : image de l'abondance dans la douceur du climat égyptien.*

Une autre idée, déjà ancienne, attire plus les paléoclimatologistes. Elle est connue sous le nom de « théorie de Milankovitch », et se propose d'expliquer les oscillations climatiques par des variations petites des caractéristiques de l'orbite terrestre. Nous ne détaillerons pas ici cette théorie mais nous rappellerons simplement que les paramètres définissant le mouvement spatial de notre planète comme la précession, l'excentricité et l'inclinaison oscillent chacune avec des périodes différentes (21 000 ans pour la précession, de l'ordre de 95 000 ans pour l'excentricité de l'orbite, 40 000 ans pour l'inclinaison). La modification de chacun de ces paramètres entraîne des variations du flux

solaire pour un point donné du globe. La lieraient ces deux phénomènes, on peut néanmoins s'interroger sur certains faits troublants. En effet, si l'on examine les courbes établies, on peut se rendre compte que les variations de l'intensité magnétique accompagnent les variations de température quelle que soit l'échelle de temps considérée. On voit, d'autre part, que plus l'intensité magnétique est forte plus la température est basse ; et, par ailleurs, les variations du champ magnétique précèdent celles de la température moyenne (2). Ces conclusions passionnantes méritent qu'on s'y attarde et des études plus poussées devraient être entreprises dans le cadre de la prévision à longue échéance.

La dernière éruption volcanique importante, celle de l'Agung en 1963, a quelques évolutifs ont été élaborés, seul capables de simuler ces interactions complexes. On se heurte malheureusement à de nombreuses difficultés, notamment au temps de calcul extrêmement long qu'il faudrait pour simuler les oscillations climatiques à long terme. On se limite donc à des expériences plus simples, en modifiant par exemple des conditions limites comme l'albedo de la surface terrestre, la composition chimique de l'atmosphère, etc...

Ainsi, par la mesure et la modélisation en interaction continue, se construit l'image du climat passé, qui peut aider à comprendre le climat futur.

M. B.



combinaison de ces trois mouvements permet donc d'établir une courbe de variation de l'insolation et ainsi les périodes favorables aux glaciations.

On a comparé la courbe obtenue avec des résultats expérimentaux issus de l'analyse isotopique notamment. Une corrélation semble exister, mais l'étude fine ne permet pas d'affirmer que la théorie de Milankovitch est le moteur unique des oscillations climatiques. On a montré d'autre part que les variations d'énergie mises en jeu à la suite de ce phénomène étaient insuffisantes pour provoquer une glaciation. Cette hypothèse est néanmoins séduisante et peut être considérée comme l'une des plus solides actuellement. Il faut se rappeler que la machine atmosphérique est extrêmement complexe et que des apports, même petits, d'énergie peuvent être suffisants à déplacer un équilibre.

Des études récentes entreprises par quelques chercheurs (1) ont permis de montrer qu'il y avait une corrélation étroite entre les variations de température et l'intensité magnétique en un lieu donné. Sans qu'il soit possible encore de déterminer les causes physiques éventuelles qui re-

montré que de grandes quantités de particules pouvaient être injectées jusque dans la stratosphère et former à cet endroit une véritable couche d'aérosols, qui modifie plus ou moins la température de ces niveaux. A la suite de cet événement, on a noté certains phénomènes particuliers affectant le rayonnement solaire à la surface du globe mais pas de conséquences mesurables sur la température au sol. Certains chercheurs considèrent cependant qu'une augmentation de l'activité volcanique, telle qu'elle a été mise en évidence pour le Quaternaire, pouvait être la cause ou une des causes des oscillations climatiques dont cette période a été particulièrement pourvue.

Quoiqu'il en soit, il ne faut pas négliger une possibilité importante de modification du climat : l'autovariation de l'atmosphère. Le système atmosphérique est en effet l'assemblage de phénomènes qui possèdent des temps caractéristiques très différents. La superposition de ces processus qui interagissent de façon non linéaire peut être un moteur puissant de changement de notre environnement. Dans l'optique de telles études, des modèles climati-

*Les 800 000 dernières années : 4 ou 10 glaciations ? (Gravure de Zdenek Burian).*

#### Bibliographie succincte

Colloque international du CNRS n° 219, « Les méthodes quantitatives d'étude des variations du climat au cours du Pléistocène » 5-9 juin 1973.

Proceedings of the WMO-IAMAP « Symposium on long-term climatic fluctuations » Norwich 1975. Note WMO n° 421.

The physical basis of climate and climate modelling. GARP Publication Series n° 16.

Société Hydrotechnique de France — Compte rendu des XIII<sup>e</sup> journées de l'hydraulique. « Influence des activités de l'homme sur le cycle hydrométéorologique », Septembre 1974.

(1) Wolin et Ericson notamment.

(2) Ces résultats ne sont cependant pas tout à fait isolés puisque Bucha, en Tchécoslovaquie, a mis en évidence également des corrélations assez étonnantes entre des indices Ci d'activité géomagnétique et les déviations de température pour Prague sur les 25 dernières années.