

A propos d'un bicentenaire : les débuts de la paléoclimatologie

Alain Foucault

Muséum national d'histoire naturelle, Paris

La plus grande partie de la masse de l'atmosphère est contenue dans ses premiers 10 km soit moins de 1 % du diamètre de la Terre. A l'échelle d'une orange, cela ne ferait même pas un millimètre. Ce millimètre est pourtant vital pour nous qui sommes dépendants de sa composition, de sa température, de ses mouvements. Prendre conscience de cette faible épaisseur relative doit nous rendre palpable l'extrême difficulté qu'il y a de prévoir les mouvements de détail d'une pellicule aussi mince, aussi ténue, aussi instable. Mais si ces mouvements de détail sont pratiquement imprévisibles au-delà de quelques jours, les mouvements d'ensemble sont bien plus saisissables : c'est ce qui fait la différence entre la météorologie, qui s'intéresse aux premiers, et la climatologie, qui traite des seconds.

Le climat, en effet, comprend les variations d'ensemble des paramètres physiques de l'atmosphère. Ceux-ci sont déterminés par les échanges entre les différents éléments du système climatique (atmosphère, biosphère, géosphère, océan), le moteur énergétique principal de cette machine étant le rayonnement solaire.

C'est d'ailleurs à l'inclinaison des rayons du soleil que le terme de climat se réfère, l'origine de ces deux termes se trouvant dans la même racine grecque. De fait, les climats régionaux terrestres dépendent, au premier chef, de la longitude des régions, laquelle conditionne l'inclinaison plus ou moins grande des rayons du soleil au cours de l'année.

Mais, vu de cette façon, le climat ne peut varier que si l'on se déplace selon un méridien, et rien n'indique qu'il puisse varier au cours du temps.

La notion de variation du climat en fonction du temps est en effet récente et, curieusement, alors que cette variation s'est fait sentir pendant toute la préhistoire, rien, dans la mémoire de l'humanité, ne semble y avoir laissé trace.

Pour en prendre conscience, il a fallu attendre le début du XIX^e siècle. Comme il est habituel, en matière de découverte scientifique, l'idée est venue sans qu'on s'y attende le moins du monde. Une chaîne d'observations a amené à cette découverte, qui nous semble aujourd'hui capitale, et à laquelle est attaché le nom d'un naturaliste exemplaire né il y a juste deux siècles : Louis Agassiz.

Louis Agassiz (1807-1873) était né à Môtier, entre Neuchâtel et Berne, d'une famille de pasteurs protestants.

Selon un de ses biographes, Ernest Fabre, il était «grand, bien fait, doué d'une santé excellente, d'une figure aimable et d'un regard qui brillait d'une intelligence peu commune, [gagnant] la sympathie de tous ceux qui l'approchaient. Sa physionomie était franche et ouverte, son caractère attachant. [...] Toujours prêt à créer des théories, à les discuter, à exposer des idées nouvelles, il captivait ses auditeurs par la verve et la clarté de son exposition». Ce portrait flatteur est attesté par bien d'autres témoignages.

Il avait, très tôt, été attiré par l'histoire naturelle. Le lac de Murten (ou de Morat), tout près de la maison paternelle, lui avait donné l'occasion de s'intéresser à la faune aquatique et en particulier aux poissons. Venu à Paris en 1831, après des études de médecine, il y rencontra Cuvier, son aîné de près de 40 ans, qui lui confia, un an avant sa mort, l'étude d'une collection de poissons fossiles. Cette marque de confiance décida de sa carrière puisqu'il publia, de 1833 à 1844, des *Recherches sur les poissons fossiles*, en 5 volumes et 384 planches, qui sont encore utilisées aujourd'hui, avec les principes de la classification qu'il y avait élaborée. Cette publication assura sa notoriété. C'est donc la paléontologie des poissons qui constitua le vrai métier d'Agassiz. Pourtant, comme il arrive souvent en science, c'est dans un tout autre domaine, celui des glaciers, qu'il a été à l'origine d'une avancée considérable faisant de lui le père de la paléoclimatologie.

En 1834, il avait donc alors 27 ans, assistant à une réunion de la Société helvétique des sciences naturelles, il entendit une communication du géologue Jean de Charpentier, scientifique réputé et directeur des mines du canton de Vaud, portant sur «La cause probable du transport des blocs erratiques de la Suisse». Quel était le problème ? Depuis des années, on avait observé, sur une grande partie du Jura et dans la plaine suisse, des blocs rocheux de tailles diverses, certains pouvant atteindre plusieurs mètres de haut, dont on ne savait au juste pourquoi ils étaient plantés là.

Une chose était certaine aux yeux de tous : ces blocs venaient de loin parce qu'ils n'étaient pas de même nature que le substratum sur lequel ils étaient posés. Pour certains, on ne pouvait même les identifier qu'avec des roches connues dans les Alpes, des granites, par exemple,

absents dans le Jura, ce qui obligeait à imaginer qu'ils avaient fait un parcours de plusieurs dizaines ou centaines de kilomètres.

Quel était le phénomène mystérieux qui avait transporté ces blocs, qualifiés d'erratiques ? La question avait reçu beaucoup d'explications, aucune satisfaisante. On avait, par exemple, proposé que de violentes explosions aient projeté ces blocs à des distances considérables, qu'une retraite rapide et violente de la mer, consécutive à la brutale émergence des Alpes, les aient charriés, qu'ils aient glissé sur la glace, qu'ils aient été entraînés sous des icebergs, etc. L'hypothèse dominante, cependant, était qu'ils avaient été arrachés au domaine alpin par des torrents boueux qui les avaient ensuite déposés là où ils sont aujourd'hui.

Il est vrai que l'on voit, lors de fortes pluies, les eaux turbides des torrents transporter des blocs comme des fétus. Mais la dimension du phénomène invoqué nécessitait des mécanismes particuliers comme la rupture simultanée de lacs immenses, la fonte soudaine des glaciers sous l'influence d'une chaleur volcanique, ou un brusque soulèvement du massif du mont Blanc.

Pour de Charpentier, l'explication était toute autre : ces blocs erratiques auraient été entraînés, jusque dans les endroits où ils étaient, par les glaciers qui occupent aujourd'hui les hautes vallées alpines mais qui auraient eu, auparavant, une beaucoup plus grande extension.

A vrai dire, Charpentier n'avait fait que reprendre, en la généralisant, une idée qu'il reconnaît avoir entendue dès 1815 dans la bouche d'un paysan nommé Jean-Pierre Perraudin (1767-1858) habitant le hameau de Lourtier, dans la vallée de Bagnes, qui débouche dans celle du Rhône à la hauteur de Martigny. Ce hameau a rendu justice à son concitoyen : une plaque y rappelle sa mémoire et le désigne comme l'inventeur de la «théorie des glaciers» ; on y a conservé son chalet, aménagé en un petit musée de la glaciologie : on peut encore y voir ses initiales, gravées sur une poutre ou formant relief sur le poêle.

Nous connaissons bien l'apport de Perraudin parce que, paysan instruit, il a laissé un témoignage écrit de ses observations faites notamment lors de ses nombreuses chasses aux chamois. Ce texte a été rédigé sur le carnet de notes d'un visiteur de la vallée, Henri Gilliéron, qui y était monté en 1818 pour se rendre compte des dégâts causés par une inondation due à la rupture, en amont de Lourtier, d'un barrage de glace derrière lequel s'était formé un lac. Ce texte est ainsi rédigé : «Observations faites par un paysan de Lourtier. Ayant depuis longtemps observé des marques ou cicatrices (elles sont toutes dans la direction des vallons) faites sur du roc vif et qui ne se décompose pas, et dont je ne connaissais pas la cause, j'ai enfin, en m'approchant des glaciers, jugé qu'elles étaient faites par la pression ou pesanteur des dites masses dont je trouve des marques au moins jusqu'à Champsec. Cela me fait croire qu'autrefois la grande masse de glace remplissait toute la vallée de Bagne et je m'offre à le prouver aux curieux par l'évidence, en rapprochant les dites traces

de celle que les glaciers découvrent à présent. Par l'observateur Jean Pierre Perraudin.»

On avait bien essayé d'éviter la catastrophe en perçant un tunnel pour vider le lac, mais seulement une partie de l'eau avait pu être évacuée avant la rupture du barrage de glace, évitant cependant une catastrophe plus grande encore. L'ingénieur qui s'était occupé de ces travaux s'appelait Ignace Venetz. Il avait rencontré Perraudin, avait d'abord accueilli ses idées avec scepticisme puis avait été convaincu par les preuves que lui avait fait voir celui-ci, tant et si bien qu'il avait repris ses idées à son compte et les avait exposées, en 1821, à la Société helvétique des sciences naturelles.

De Charpentier avait entendu l'exposé de son collègue et ami Venetz, mais n'y avait pas cru davantage qu'aux dires de Perraudin. Mais c'est par des observations faites sur le terrain qu'il s'était, peu à peu, rendu compte de la valeur de cette idée et qu'il s'en était, à son tour, fait le défenseur.

La même chose se produisit pour Agassiz, quatrième maillon de la chaîne des conversions successives. La communication de Charpentier ne l'avait pas du tout convaincu, mais le personnage était sympathique et Agassiz vint passer cinq mois, en 1836, dans son village, près de Bex, où Charpentier résidait et recevait volontiers. Agassiz écrit lui-même : «... je me flattais même qu'en allant attaquer M. de Charpentier sur son terrain, je le ramènerais peut-être de ses idées qui me paraissaient extravagantes...». Ils firent ensemble de nombreuses excursions et, peu à peu, Agassiz, devant la force probante des observations que lui présentait Charpentier, fut convaincu à son tour, et à son tour voulu faire partager ses convictions. Il eut l'occasion de le faire très vite. Désigné, en 1837, président de la Société helvétique des sciences naturelles, il fit de l'origine des blocs erratiques et de l'avancée ancienne des glaciers le thème de son discours inaugural.

Allant au-delà des conclusions de Venetz et de Charpentier, il dressa l'image de vallées entièrement remplies par la glace, allant jusqu'à proposer un refroidissement général du climat pour expliquer cet état. Dans un ouvrage complet qu'il publie en 1840 il écrit : «Il n'y a, je crois, qu'une manière de rendre compte de tous ces faits et de les lier avec l'ensemble des phénomènes géologiques connus, c'est d'admettre qu'à la fin de l'époque géologique qui a précédé le soulèvement des Alpes, la Terre s'est couverte d'une immense nappe de glace, [...] remplissant la mer Baltique, tous les lacs du nord de l'Allemagne et de la Suisse, s'étendant au-delà des rives de la Méditerranée et de l'océan Atlantique et recouvrant même toute l'Amérique septentrionale et la Russie asiatique.» Manifestement, l'enthousiasme d'Agassiz lui avait largement fait dépasser les conclusions de Charpentier et, d'une vision suisse, passer à une vision mondiale ; on parla bientôt d'un «âge de la glace».

Quelques années plus tard, Agassiz quittait le Vieux Continent pour les Etats-Unis, où il mena une brillante

carrière, dont la trace subsiste aujourd'hui, notamment à Cambridge (Massachusetts) où il est enterré.

La vision d'Agassiz, a été, depuis, complétée. Les études portant sur les traces laissées par les glaciers dans les Alpes, notamment leurs moraines, ont d'abord permis de caractériser plusieurs grandes phases glaciaires (ou glaciations) successives, deux dans le Tertiaire supérieur (nommées Biber et Donau), quatre dans le Quaternaire (dans l'ordre chronologique Günz, Mindel, Riss et Würm). Ces glaciations ont été repérées en Europe du Nord au bord sud de l'inlandsis scandinave, ainsi qu'en Amérique du Nord au bord sud de l'inlandsis canadien.

Grâce aux carottages effectués depuis une quarantaine d'années dans les glaciers de l'Antarctique et du Groenland, et grâce à l'étude des sédiments marins, on a largement nuancé cette vision en montrant que, depuis deux millions d'années, c'était sur une vingtaine d'alternances glaciaire-interglaciaire qu'il fallait compter. Mais comment expliquer ces alternances dont le caractère rythmique est aujourd'hui reconnu ?

Le nom du mathématicien serbe Milutin Milankovitch (1879-1959) est indissolublement lié à la compréhension de ce phénomène. Dès 1920, Milankovitch a publié, en français, une étude complète des effets que pouvaient avoir sur le climat les particularités du mouvement de la Terre autour du Soleil. Depuis longtemps, en effet, on soupçonnait qu'elles engendraient des variations climatiques ; mais quelles sont au juste ces particularités ?

C'est Kepler (1571-1630) qui, le premier, a réduit le mouvement des planètes à des lois simples qui portent aujourd'hui son nom. Elles sont au nombre de trois, les deux premières énoncées en 1609, la troisième dix ans plus tard. La première loi est que les orbites des planètes sont des ellipses dont le Soleil occupe un des foyers ; la seconde est que le rayon vecteur (segment allant de la planète au Soleil) balaye des aires proportionnelles aux temps ; la troisième que les carrés des temps des révolutions sont proportionnels aux cubes des grands axes des orbites. Ces lois, qui sont des approximations idéales, ont été confirmées par la suite et en quelque sorte résumées dans le principe fondamental de la dynamique de Newton qui est qu'une masse connaît une accélération proportionnelle à la force qui lui est appliquée ($F=mg$). Elles permettent de savoir comment est réparti le rayonnement solaire à la surface de la Terre.

On sait que la Terre tourne sur son axe par rapport au Soleil, un peu comme un poulet sur une broche, en une journée. Si la broche, c'est-à-dire l'axe de rotation de la Terre sur elle-même, était perpendiculaire aux rayons du Soleil, c'est-à-dire perpendiculaire au plan de l'écliptique, qui est le plan dans lequel se trouve l'orbite de la Terre, la durée du jour serait toujours égale à la durée de la nuit, et cela quelle que soit l'époque de l'année. En effet, le cercle qui limite la moitié de la Terre éclairée par le Soleil de la moitié dans l'ombre, que l'on appelle cercle d'illumination ou terminateur, passerait alors par les pôles. Tous les points de la Terre décriraient, en une

journée, un cercle dont une moitié, parcourue en douze heures exactement, serait dans l'ombre et l'autre moitié, parcourue dans le même temps, dans la lumière. Partout, sur la planète, les jours et les nuits dureraient invariablement douze heures.

Dans la réalité, les choses ne sont pas si monotones parce que l'axe de rotation de la Terre n'est pas perpendiculaire au plan de l'écliptique. Le terminateur ne passe alors en général plus par les pôles, sauf à deux moments de l'année lorsque l'axe des pôles, toujours parallèle à lui-même, est perpendiculaire aux rayons du Soleil : ce sont alors les équinoxes, de printemps et d'automne, où les nuits sont égales aux jours. Pour les autres moments de l'année, des cercles que décrivent chaque point de la Terre en une journée, la partie éclairée sera soit plus grande, soit plus petite que la partie obscure, et le jour sera soit plus long, soit plus court que la nuit. Dans le premier cas, où le pôle est toujours éclairé, c'est le printemps ou l'été, la limite entre ces deux saisons étant le solstice d'été, correspondant au jour le plus long de l'année ; dans le second cas, où le pôle est toujours dans la nuit, c'est l'automne ou l'hiver, la limite entre ces deux saisons étant le solstice d'hiver, correspondant au jour le plus court de l'année. À noter que les situations sont pratiquement symétriques pour les hémisphères nord et sud, à condition de se décaler de deux saisons puisque, alors que c'est le printemps, l'été, l'automne ou l'hiver dans l'hémisphère nord, c'est respectivement l'automne, l'hiver, le printemps ou l'été dans l'hémisphère sud.

Si l'on regarde maintenant la Terre de très loin parcourir en un an son chemin autour du Soleil, on va la voir passer par quatre points particuliers correspondant respectivement à l'équinoxe de printemps boréal (on nomme ce point le point vernal ou point gamma, désigné par la lettre grecque γ), le solstice d'été, l'équinoxe d'automne et le solstice d'hiver. Ces points sont déterminés uniquement par la façon dont est incliné l'axe de rotation terrestre qui, en un an, reste, rappelons-le, toujours parallèle à lui-même.

Tout cela a l'air très tranquille et immuable, et c'est vrai à l'échelle de la vie humaine où l'on peut considérer comme constants le rythme des saisons et la position des tropiques ou des cercles polaires. Mais cela ne l'est plus du tout si l'on se place à l'échelle géologique, même celle, très courte cependant, où l'on envisage des durées de quelques millénaires. Alors, les paramètres qui définissent les caractéristiques de l'orbite terrestre ne peuvent plus être considérés comme constants. Quels sont ces paramètres ? D'abord l'obliquité de l'écliptique, dont on vient de parler, définie comme l'angle que fait l'axe de rotation de la Terre avec le plan de l'écliptique. Ensuite la précession des équinoxes, notion qui demande que l'on s'y arrête un peu.

On a vu que les équinoxes correspondaient au moment où l'axe de rotation de la Terre était dans un plan perpendiculaire aux rayons du Soleil : le cercle d'illumination passe alors par les pôles ; le jour et la nuit durent

également douze heures. Dans son parcours annuel sur son orbite, la Terre se trouve alors au point gamma (γ) à l'équinoxe de printemps boréal ; à l'équinoxe d'automne, elle se trouve au point opposé par rapport au Soleil, nommé le point gamma prime (γ').

La position de ces points dépend de la façon dont l'axe de rotation de la Terre est orienté par rapport aux étoiles ; or cette orientation change. Voilà très longtemps qu'on le sait, cette découverte étant attribuée à l'astronome grec Hipparque, plus d'un siècle avant notre ère. Se fondant sur ses observations d'étoiles, réputées fixes, et sur celles de ses prédécesseurs Timocharis et Aristylle, faites un siècle et demi auparavant, il s'aperçut que ces étoiles s'étaient déplacées ensemble dans le ciel. Cela s'explique bien en considérant que c'est l'axe de rotation de la Terre qui, à cette échelle de temps, ne reste pas parallèle à lui-même mais décrit un cône par rapport aux étoiles et ceci en environ 25 000 ans. Ainsi, l'étoile dite polaire, vers laquelle cet axe pointe dans le ciel, n'est pas toujours la même mais c'est telle ou telle autre, disposée sur un cercle de la voûte étoilée, cercle un peu déformé du fait de la variation de l'obliquité. Cela a une conséquence : par rapport à l'orbite elliptique de la Terre, le point vernal, ou point gamma recule un peu tous les ans en sens inverse du mouvement annuel de la Terre et fait le tour de l'orbite terrestre en environ 21 000 ans. Noter que cette valeur est un peu différente de celle de la précession définie plus haut parce que le plan de l'écliptique n'est pas tout à fait fixe par rapport aux étoiles ; c'est pourquoi on désigne le mouvement du point gamma sur l'orbite par le terme de précession climatique.

Le troisième paramètre de l'orbite terrestre est son excentricité, c'est-à-dire son plus ou moins grand écartement d'un cercle parfait.

Les valeurs de ces trois paramètres, obliquité, précession, excentricité, changent au cours du temps. Les rythmes de ces changements leur sont imposés par les variations des attractions des planètes et de la Lune. On se doute qu'elles doivent être complexes. Si on veut les calculer exactement, il faut, pour chaque paramètre, constituer une série trigonométrique comportant des dizaines de termes, mais si on veut en donner une image simple et suffisante pour notre propos, on peut, pour chacun, donner la durée moyenne qui s'écoule au cours d'un certain nombre de cycles de leurs variations, et que l'on nomme période moyenne.

En ce qui concerne l'obliquité, la période moyenne est d'environ 40 000 ans. Autrement dit, pendant cette durée, la valeur de l'obliquité croît, passe par un maximum, décroît, passe par un minimum, et revient à sa valeur d'origine. Durant les cinq derniers millions d'années, elle a été au minimum de $22^{\circ} 22'$ et au maximum de $24^{\circ} 30'$. Actuellement, sa valeur est de $23^{\circ} 27'$. Autrement dit, les tropiques se sont promenés entre les latitudes de $22^{\circ} 02'$ et de $24^{\circ} 30'$, soit une variation d'environ 5° pour la largeur de la zone intertropicale, ce qui fait environ 550 km. De même pour les cercles polaires

qui, chacun, ont avancé ou reculé de 250 km. Ces variations ont évidemment un effet climatique, notamment aux hautes latitudes.

En ce qui concerne les deux autres paramètres, la précession et l'excentricité, les choses sont un peu moins simples, car leurs effets dépendent de leurs combinaisons. Cela découle de la deuxième loi de Kepler. Prenons d'abord le cas où l'excentricité est nulle, c'est-à-dire où l'orbite terrestre est circulaire. Le rayon vecteur, auquel fait référence cette loi, et qui relie le Soleil à la Terre, est alors un rayon de cette orbite circulaire. Il va balayer des aires proportionnelles aux angles dont il tourne, et donc des angles égaux seront parcourus en des temps égaux : le mouvement orbital de la Terre est circulaire uniforme. En particulier, les quatre saisons, auxquelles correspond un angle de balayage du rayon vecteur de 90° , auront des durées exactement égales.

Si nous prenons maintenant le cas où l'excentricité n'est pas nulle, le rayon vecteur, qui ira alors du foyer de l'ellipse où se trouve le Soleil à la Terre, va balayer non des secteurs de cercle mais des secteurs d'ellipse qui - c'est essentiel - n'auront pas, pour un même angle balayé, la même surface, et qui ne seront donc pas parcourus en des temps égaux. Pour un angle donné, un secteur situé du côté du périhélie (point de l'ellipse le plus proche du foyer où se trouve le Soleil) sera parcouru plus rapidement qu'un secteur situé du côté de l'aphélie (point de l'ellipse le plus éloigné du foyer où se trouve le Soleil), la surface du premier secteur étant plus petite que la surface du second. En conséquence, les saisons n'auront pas, en général, la même durée.

C'est là qu'intervient la précession des équinoxes puisque, on l'a vu, le point vernal, ou point gamma, comme le point gamma prime et les points fixant les solstices, font le tour de l'orbite terrestre en quelque 21 000 ans, passant tour à tour par le périhélie et l'aphélie.

Prenons le cas où le solstice d'hiver se produit lorsque la Terre est au périhélie. La surface balayée par le rayon vecteur pendant ce que nous nommerons la saison froide (automne et hiver) sera la plus petite possible ; celle balayée pendant la saison chaude (printemps et été) sera la plus grande possible. La conséquence est que la durée de la saison froide sera la plus petite possible pour cette excentricité et celle de la saison chaude la plus longue possible. C'est évidemment l'inverse si la Terre se trouve au périhélie lors du solstice d'été : la saison chaude sera la plus courte qu'il est possible pour cette excentricité, et la saison froide la plus longue possible. Noter que cela est vrai aussi bien pour l'hémisphère nord que pour l'hémisphère sud, à condition de se souvenir que le solstice d'hiver de l'un est le solstice d'été de l'autre. Ces différences de durées sont loin d'être négligeables puisque, dans les conditions habituelles, elles peuvent atteindre trente jours entre la saison froide et la saison chaude.

Ainsi, lorsque l'excentricité n'est pas nulle, non seulement les saisons sont de durée inégale, mais ces durées varient au rythme de la précession des équinoxes. L'éten-

due de ces variations dépend de la valeur de l'excentricité : nulle si elle est nulle, grande si elle est grande. Comme les périodicités les plus importantes de l'excentricité sont d'environ 100 000 ans et 400 000 ans, ce sont ces rythmes qui moduleront les amplitudes des courbes de 21 000 ans et en donneront l'enveloppe générale.

Pour donner une idée globale de l'effet que peuvent avoir ces effets astronomiques sur les climats, il faut savoir que, par le calcul, on montre que la Terre reçoit du Soleil toujours la même énergie pendant la saison chaude et qu'il en va de même pendant la saison froide. Ces quantités d'énergie sont réparties sur la durée de ces saisons ; ainsi, plus ces saisons seront longues, moins chacune de leurs journées recevra d'énergie du Soleil ; plus elles seront courtes, plus chacune de leurs journées recevra d'énergie.

Pour illustrer cette très importante conséquence, et bien fixer les idées, détaillons des cas typiques, en utilisant le terme de «chaud» dans un sens très large :

- solstice d'été au périhélie : saison chaude courte avec jours chauds ; saison froide longue avec jours froids ;
- solstice d'hiver au périhélie : saison froide courte et jours peu froids ; saison chaude longue et jours peu chauds.

Milankovitch avait développé l'idée que les glaciations devaient se produire dans la seconde situation plutôt que dans la première. Pour lui, en effet, une saison chaude où les températures restaient modérées, conduirait à une fonte limitée des masses neigeuses qui pourraient ainsi s'accumuler d'année en année, alimentant des glaciers en croissance. Effectivement, une telle situation s'est produite il y a 22 000 ans, alors que le maximum de la dernière glaciation est daté d'environ 20 000 ans.

L'hypothèse de Milankovitch n'a pu, de son vivant, être confirmée, faute de preuves et, notamment, faute de moyens de datation précis des temps géologiques. Depuis, ces preuves se sont accumulées et la liaison entre les variations climatiques naturelles à longue échéance et les rythmes de l'orbite terrestre est reconnue. Il faut cependant ajouter que, pour une bonne utilisation des idées de Milankovitch, il faut tenir compte du comportement du système climatique dont les différents éléments réagissent plus ou moins vite aux sollicitations de l'inso-

lation. Cela est particulièrement vrai durant les périodes glaciaires, les masses de glace pouvant, par leur inertie, introduire des retards de plusieurs milliers d'années dans les effets climatiques.

Ainsi, selon les moments et selon les objets, telle ou telle périodicité astronomique a pu prendre plus ou moins d'importance. Par exemple, pendant les derniers 800 000 ans, les maximums glaciaires se succèdent au rythme de 100 000 ans qui se rattache à l'excentricité ; il y a quelques millions d'années, des rythmes de 20 000 ans (précession) et de 40 000 ans (obliquité) laissaient une trace bien reconnaissable dans les sédiments marins.

Une application de cette liaison climat-périodes orbitales est la possibilité d'établir une échelle des temps géologiques basée sur ces rythmes : cela a déjà été fait pour les derniers millions d'années.

Ainsi, grâce à Agassiz, s'est imposée l'idée de changements climatiques assez importants pour entraîner de grandes glaciations, et c'est à Milankovitch que l'on doit de comprendre leur rythmicité. Ces stress répétés ont évidemment agit sur le vivant, mais les conséquences de ces actions restent encore en grande partie à déchiffrer.

Si ces phénomènes constituent une cause de variations climatiques, ils ne sont pas les seuls à entrer en jeu. D'autres causes naturelles sont aussi à prendre en compte, moins saisissables, comme les mouvements des continents, à très long terme, le volcanisme, soupçonné de ravages dans la biodiversité, ou encore les variations de l'activité solaire, sujet controversé. Enfin entrent en jeu, on le sait, des causes liées à l'activité humaine, encore insoupçonnables du temps d'Agassiz, mais qui, aujourd'hui, constituent une préoccupation fondamentale.

Références

FOUCAULT A., *Climat*, Fayard éd., Paris,

FOUCAULT A., *La Terre, planète vivante*, Vuibert éd., Paris, .

Alain Foucault

MNHN, 43 rue Buffon, 75005 Paris

foucault@mnhn.fr