



HAL
open science

Les évolutions climatiques et l'environnement

A. Foucault, Didier Galop

► **To cite this version:**

A. Foucault, Didier Galop. Les évolutions climatiques et l'environnement. Encyclopédie clarté, Editions techniques, pp.1-16, 2002. halshs-00965658

HAL Id: halshs-00965658

<https://shs.hal.science/halshs-00965658>

Submitted on 25 Mar 2014

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

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

Les évolutions climatiques et l'environnement

FOUCAULT A. et GALOP D.

Le climat est le résultat d'actions et de réactions d'une multitude d'éléments physiques impliquant les enveloppes terrestres – gazeuse, liquide ou solide – de la Terre qui, ensemble, constituent de ce point de vue le système climatique. Deux sources d'énergie alimentent ce système : l'une provient de l'intérieur de la Terre, c'est l'énergie géothermique ; l'autre, de l'extérieur, c'est le rayonnement solaire.

L'énergie géothermique est fournie par les réactions de désintégration nucléaire des éléments naturellement radioactifs, essentiellement l'uranium et le thorium, contenus dans le globe terrestre. La chaleur ainsi produite s'évacue vers l'extérieur en donnant un flux thermique en moyenne puissant de 0,05 watt par mètre carré.

C'est très peu si l'on le compare à l'énergie fournie par le rayonnement solaire, caractérisé par la constante solaire qui est la puissance reçue par une surface plane tournée vers le Soleil, juste à l'extérieur de l'atmosphère, et qui est de 1368 watts par mètre carré. Si, à partir de cette valeur on calcule le rayonnement reçu par notre planète, en tenant compte de sa rotation du fait qu'une moitié seulement est éclairée, et de sa forme sphérique, on trouve en moyenne 342 watts par mètre carré, soit 10 000 fois plus que le flux géothermique. On peut donc dire, *a priori*, que le système climatique est alimenté presque uniquement par le Soleil. On verra cependant que l'énergie géothermique a un rôle non négligeable par le biais du volcanisme et du mouvement des plaques lithosphériques dont il est responsable.

Rayonnement et effet de serre

Chauffés, les corps émettent des rayonnements électromagnétiques, dont la lumière fait partie. Les lois de ces émissions sont très simples pour ce que l'on nomme le corps noir (corps idéal qui absorbe tout le rayonnement qu'il reçoit) et qui, selon la loi de Wien, émet un rayonnement dont la longueur d'onde du maximum est inversement

proportionnelle à la température absolue. Ainsi, on peut connaître à distance la température de ce corps en mesurant la longueur d'onde du rayonnement émis – pratique courante aujourd'hui (télédétecteur, thermomètres médicaux, etc.). Ainsi, un corps chauffé à partir du zéro absolu émet d'abord un rayonnement non visible, qui est de l'infrarouge ; à plus forte température, il émet un rayonnement visible, d'abord rouge très sombre, ensuite de plus en plus clair pour atteindre un blanc brillant ; enfin, à plus haute température encore, il émet de l'ultraviolet, non visible.

Les corps réels ont des propriétés qui les éloignent parfois beaucoup du corps noir, car ils renvoient généralement une proportion non négligeable de l'énergie lumineuse qu'ils reçoivent (cette proportion est appelée albédo) ; mais on peut utiliser cette référence en première approximation pour expliquer ce qu'est le phénomène essentiel de l'effet de serre. Ainsi, la partie extérieure du soleil, la photosphère, se trouve à une température d'environ 6000 °C. Elle envoie une lumière blanche, composée d'un mélange de rayonnements visibles centrés sur le bleu vert, dont la longueur d'onde est de 0,48 micromètre. Cette énergie lumineuse, arrivée sur Terre, est absorbée par les sols, la végétation, les eaux marines, sauf une partie, qui est directement renvoyée en fonction de ce que nous avons défini plus haut comme étant l'albédo de ces différentes surfaces. La partie absorbée est utilisée pour échauffer les corps ainsi éclairés et, conformément à la loi de Wien, ces corps vont rayonner de l'énergie dans des longueurs d'onde correspondant aux températures qu'ils ont atteintes. Ces dernières seront évidemment loin d'avoir la température de la photosphère et, restant proche de 0 °C, entraîneront l'émission d'infrarouges.

La quantité d'énergie ainsi émise croît comme la puissance quatre de la température (c'est la loi de Stefan), et un équilibre entre le rayonnement absorbé et le rayonnement réémis finira par s'établir, fixant la température de la surface du globe terrestre. Si l'atmosphère n'existait pas, cette température serait, en moyenne, de moins 18 °C, alors

que, heureusement, elle est actuellement de +15 °C. Cette différence s'explique par la présence, dans l'atmosphère, de gaz à effet de serre.

Dans une serre, le rayonnement solaire qui chauffe le sol est absorbé par celui-ci, qui rayonne des infrarouges selon le processus que l'on vient de voir. Mais ce rayonnement infrarouge ne peut aisément retourner à l'extérieur car les parois vitrées de la serre, transparentes aux rayons visibles, le sont beaucoup moins aux infrarouges, qui sont en grande partie renvoyés à l'intérieur de la serre. Il s'ensuit une élévation supplémentaire de la température à l'intérieur de la serre, qui ne cesse que lorsque l'équilibre s'est établi entre énergie entrante et énergie sortante. Les gaz à effet de serre contenus dans l'atmosphère – qui sont essentiellement la vapeur d'eau (c'est-à-dire l'eau sous sa forme gazeuse), le gaz carbonique, le méthane et l'ozone – jouent pour la Terre le rôle des parois vitrées de la serre : transparents aux rayons visibles, ils sont absorbants pour l'infrarouge. Il s'ensuit une élévation de la température de la basse atmosphère. On conçoit que la concentration en gaz à effet de serre de l'atmosphère ait un effet considérable sur la température de la surface du globe.

Comment sont enregistrées les variations climatiques

Pour étudier les changements climatiques du passé, encore faut-il que la trace en ait été conservée.

Les données historiques

À l'échelle de quelques générations humaines, l'histoire en a gardé quelques témoignages, souvent bien imprécis car les relevés systématiques de pluviométrie ou de température ne datent que de quelques décennies. Pour plus de renseignements, il faut aller fouiller dans les archives pour y trouver des indications – parfois très indirectes – que l'imagination fertile des historiens permet de relier à des paramètres climatiques : date des vendanges, date à laquelle certains ports sont libres de glaces, date de la floraison des cerisiers au Japon, hauteur des crues du Nil (connue depuis plus de cinq mille ans), avancées et reculs des glaciers (connus par les actes indiquant les chalets qu'ils ont emportés ou les terres qu'ils ont recouvertes au grand dam de leurs propriétaires), etc. Ces approches sont de maniement délicat mais elles ont cependant permis, entre autres, de montrer

l'existence, pendant les ^{xvii}e et ^{xviii}e siècles, d'une période de froid intense, connue sous le nom de « petit âge glaciaire », caractérisée par une avancée importante des glaciers des montagnes alpines et par des années particulièrement froides durant lesquelles beaucoup de rivières se sont trouvées gelées pendant de longues semaines.

Les traces et les dépôts glaciaires

Si l'on veut étudier des périodes antérieures à l'histoire, il faut recourir à d'autres moyens et trouver, dans quelque matériau naturel, l'enregistrement des variations climatiques. Parmi ces enregistrements, une place spéciale doit être faite aux traces laissées par les glaciers. Historiquement, ce sont elles qui ont été d'abord invoquées pour affirmer l'idée de l'existence, au cours des temps, de grandes variations climatiques. Au tout début du ^{xix}e siècle, un paysan de Lourtier, village situé dans le val de Bagnes, vallée débouchant dans le Rhône près de la ville suisse de Martigny, Jean-Pierre Perraudin, déclarait à qui voulait l'entendre que les stries visibles sur les versants de cette vallée avaient été faites par le frottement des glaciers qui auraient donc été, jadis, beaucoup plus étendus qu'aujourd'hui. Ces propos et les traces laissées par les glaces ont fini par convertir quelques personnes cultivées en matière de géologie, notamment un ingénieur des mines, Ignace Venetz, le directeur des salines de Bex, Jean de Charpentier, et, surtout, un jeune et ardent paléontologiste, Louis Agassiz, que l'on peut désigner comme sinon le père, du moins le parrain de la science des climats du passé, la paléoclimatologie. Agassiz avait conclu à l'existence, dans le passé, d'un véritable « âge glaciaire », période froide exceptionnelle au cours de laquelle toutes les vallées alpines, et bien d'autres régions, avaient été envahies par les glaces. Ces idées persistent aujourd'hui, très nuancées comme on le verra.

Les principaux critères permettant de certifier l'existence de glaciers depuis longtemps disparus reposent sur les traces érosives particulières qu'ils laissent et sur des dépôts, eux aussi particuliers. Concernant les traces, on retiendra les stries ou les cannelures visibles sur le substratum rocheux des glaciers, parfois poli en roches moutonnées. Ces traces peuvent rester visibles très longtemps ; certaines, protégées par des sédiments déposés postérieurement, datent de plus de deux milliards d'années. Les dépôts glaciaires peuvent aussi être conservés très longtemps. Typiquement, il s'agit de moraines, qui sont des amoncellements de blocs rocheux, souvent eux aussi striés, ayant été entraî-



Glacier alpin du Val Ferret (massif du Mont-Blanc).

On voit que la langue glaciaire a reculé récemment, laissant devant elle des débris rocheux formant sa moraine frontale. Par ailleurs, les deux versants de la vallée, très abrupts, ont été façonnés par ce glacier dans une période plus ancienne où il était plus développé qu'aujourd'hui.

(photo : J.-Ph. Delobelle / Bios)

nés par les glaciers soit sur ses bords (moraines latérales), soit sous lui (moraine de fond), soit à l'avant (moraine frontale). Ce dernier type de moraine renseigne particulièrement sur l'extension maximale qu'a pu avoir un glacier, car la moraine frontale que laisse la langue glaciaire lorsqu'elle régresse forme une colline arquée (amphithéâtre morainique) très caractéristique. Si l'on a affaire à un inlandsis, qui est un immense glacier recouvrant entièrement un continent, son avancée maximale laisse comme trace un alignement festonné de collines, qui peut s'allonger sur des milliers de kilomètres. Mais on connaît aussi des dépôts fluvio-glaciaires, qui sont des moraines remaniées par les rivières, émissaires issus de la fonte saisonnière des glaces. Ces dépôts sont d'autant plus fins que l'on s'éloigne des glaciers et, souvent, lorsque ces émissaires débouchent dans des lacs ils donnent des varves, couches argilo-sableuses où le rythme des saisons fait alterner particules fines, en hiver, et particules plus grossières, au printemps.

Les dépôts sédimentaires

Les sédiments, lacustres ou marins, constituent des archives qui peuvent être largement utilisées pour étudier l'évolution des climats sur de grandes échelles de temps. Trois principaux types de messages sédimentaires peuvent être distingués : l'un concerne la composition même de ce sédiment ; un autre, son contenu biologique ; un troisième, ses caractéristiques géochimiques.

La composition même du sédiment peut donner des indications importantes concernant le climat du moment de dépôt. C'est, par exemple, le cas des évaporites. Les évaporites sont des cortèges de roches sédimentaires composées de minéraux – gypse, anhydrite, halite (sel gemme), minéraux des potasses – déposés par l'évaporation des eaux où ces substances étaient dissoutes. Ces dépôts correspondent à des moments où l'évaporation était intense dans des bassins marins et ils sont généralement interprétés, lorsqu'ils sont abondants, comme les marqueurs des périodes d'aridité. On

en connaît de beaux exemples au Permien et au Trias (entre 204 et 210 millions d'années). Un autre type de sédiment pouvant donner des indications paléoclimatiques est celui des dépôts dunaires, très reconnaissables par la stratification entrecroisée des sables qui les constituent et dont les grains ont, de surcroît, une allure piquetée caractéristique lorsqu'on les examine à la loupe : ces sédiments indiquent des régions arides et donnent des renseignements sur les vents qui les parcouraient. Enfin on a vu, plus haut, combien étaient typiques les dépôts liés à des glaciers.

Les fossiles

Le contenu des sédiments en organismes fossiles est un puissant outil de reconstitution paléoclimatique. De façon qualitative, on a fait grand usage de la répartition de certains végétaux ou animaux très typiques. Le fait que, au Crétacé (entre 65 et 130 millions d'années), on connaisse des palmiers largement répartis dans le monde entier jusque dans des régions proches des pôles d'alors laisse penser qu'il n'existait pratiquement pas de région froide à cette époque, la rendant très différente du monde actuel. La répartition des récifs coralliens, dont on sait qu'aujourd'hui ils ne se trouvent que dans une bande ne s'écartant guère de l'équateur que de 20° de latitude, permet de retrouver la trace de celui-ci au cours des périodes géologiques, malgré la valse des continents. L'abondance d'épaisses forêts fait penser à des périodes humides, au moins pour certaines régions : c'est une idée qui peut être appliquée pour le Carbonifère (de 290 à 360 millions d'années), au moins pour sa partie la plus récente au cours de laquelle ont proliféré les forêts houillères qui, fossilisées, fournissent aujourd'hui la plus grande part de nos charbons.

L'application des lois statistiques a permis, depuis une quinzaine d'années, d'utiliser de façon quantitative les données issues de l'étude des animaux et des végétaux fossiles contenus dans les sédiments, le principe de la méthode reposant en effet sur les analogies entre les faunes et les flores fossiles et actuelles. Pour cela, deux conditions, entre autres, doivent être remplies : que les espèces fossiles utilisées puissent trouver des termes de comparaison fiables dans la nature actuelle, ce qui restreint cette méthode à des périodes récentes (quelques dizaines ou centaines de milliers d'années) ; que les espèces comparées puissent être représentées, dans les échantillons étudiés, par un nombre d'individus suffisant pour que l'on puisse utiliser les méthodes statistiques, ce qui réduit les

investigations à des espèces microscopiques mais nombreuses dans les sédiments, tels les Foraminifères, les Diatomées, le pollen.

Grâce à ces méthodes, on peut soit montrer l'évolution de paramètres climatiques en un lieu donné pendant un certain temps (en étudiant des échantillons de sédiments prélevés sur une même coupe de terrain ou sur une même carotte de sédiments), soit dessiner des cartes donnant la répartition dans l'espace de paramètres paléoclimatiques (en étudiant, dans la région représentée par cette carte, des échantillons de sédiments ayant le même âge).

Les analyses physico-chimiques

Le progrès des techniques d'analyse physico-chimique a permis, depuis une trentaine d'années, d'utiliser des proportions infimes d'éléments ou de leurs variétés pour reconstituer certains aspects de notre passé climatique. Le moyen le plus utilisé est celui de l'analyse des isotopes stables.

La plupart des éléments chimiques ont en effet des isotopes, variétés ayant le même comportement chimique, leur atome possédant le même nombre de protons, mais un comportement physique un peu différent, leur atome possédant un nombre de neutrons différent. Certains de ces isotopes sont radioactifs (leur noyau se transformant spontanément), mais la plupart, au moins ceux qui n'ont pas été fabriqués artificiellement, sont stables. C'est ainsi que l'oxygène montre trois isotopes naturels stables : l'oxygène 16, l'oxygène 17, l'oxygène 18, ces chiffres donnant la masse atomique des atomes correspondants (c'est-à-dire la somme de leurs neutrons et de leurs protons). L'eau, on le sait, est composée d'hydrogène et d'oxygène, dont les molécules contiennent ces trois isotopes dans des proportions très inégales (respectivement 99,76 %, 0,04 % et 0,20 % en moyenne pour l'eau de mer). Pour qualifier ces proportions, les géochimistes utilisent généralement le delta isotopique, qui est la différence entre le rapport (Re) des concentrations de deux isotopes dans l'échantillon analysé (pour l'oxygène, habituellement oxygène 18 sur oxygène 16) et le rapport (Rs) des deux mêmes isotopes dans un échantillon type dit « standard » (l'eau de mer moyenne pour des échantillons des temps récents), le tout exprimé en millièmes de Rs :

$$\text{delta} = \frac{\text{Re} - \text{Rs}}{\text{Rs}} \times 1000$$

Les coquilles des animaux aquatiques sont généralement formées de carbonate de calcium (CO₃Ca), dont les éléments, y compris l'oxygène, sont

empruntés à l'eau. C'est le cas, par exemple, des Foraminifères. Or il se trouve que, dans le processus complexe de la fabrication de l'enveloppe calcaire de ces animaux microscopiques, les différents isotopes de l'oxygène ne sont pas intégrés dans les mêmes proportions que dans l'eau et que ces proportions dépendent, entre autres, de la température de l'eau : plus la température est basse, plus le carbonate des coquilles est riche en isotope lourd. Il suffit alors de trouver la règle qui lie la température de l'eau avec la façon dont les proportions de ces isotopes sont intégrées dans les Foraminifères pour, à partir de n'importe quel Foraminifère, actuel ou fossile, calculer la température de l'eau où il a vécu. C'est là un moyen puissant d'investigation sur les climats du passé et l'on a pu ainsi, par exemple, estimer les températures des océans sur quelques dizaines de millions d'années.

Mais la composition isotopique de l'eau de mer n'est pas constante. En effet, lorsque l'eau s'évapore, les molécules d'eau contenant les isotopes légers de l'oxygène s'évaporent préférentiellement et l'eau de mer se concentre donc en isotopes lourds. Cela n'a pas de conséquence si toute l'eau évaporée des océans y retourne par les pluies et par le drainage des rivières, puisque l'eau évaporée revient intégralement dans son réservoir d'origine. Mais si une glaciation se produit, l'eau évaporée se trouve en partie stockée dans les glaces, notamment dans les inlandsis polaires, et l'eau des océans s'enrichit en éléments lourds de l'oxygène. À température égale, les carbonates des coquilles seront donc alors plus riches en isotopes lourds. On arrive donc au résultat que, lorsque les coquilles de Foraminifères sont enrichies en isotopes lourds de l'oxygène (le delta isotopique augmentant alors), c'est le signe que soit la température des eaux où ils vivaient s'est abaissée, soit le stock de glaces continentales a augmenté, ce qui est, dans les deux cas, le signe d'un refroidissement du climat.

L'intérêt de ces techniques est leur généralité, puisqu'elles peuvent être utilisées dans tous les cas où il y a des transformations physiques (évaporations, cristallisations) et à toute époque géologique, puisque ces lois physiques ne dépendent pas du temps. Il faut cependant s'assurer que les échantillons que l'on analyse ont gardé leur composition isotopique depuis le moment où ils se sont formés et qu'ils n'ont pas été atteints par la diagenèse (modification plus ou moins intense des sédiments après leur dépôt).

Les méthodes permettant de reconstituer l'évolution des climats ne sont pas épuisées par les

exemples donnés plus haut. On citera encore, entre autres, la dendroclimatologie, qui lie les climats à l'épaisseur des anneaux annuels de croissance des arbres (dont on peut, par ailleurs, analyser la composition isotopique), et l'étude des varves (lits sédimentaires annuels au fond d'un lac), dont l'épaisseur est liée à la fonte plus ou moins grande des glaciers selon les années et, surtout, depuis une vingtaine d'années, les carottages dans les glaciers, notamment au Groenland et en Antarctique.

Causes des changements de climat

Les causes des changements de climat, dont on est loin de connaître le mécanisme, s'exercent sur des durées très diverses et peuvent donc jouer ensemble, mais à des échelles de temps variées. Certaines d'entre elles sont à rechercher à l'intérieur du globe, dans les mouvements des plaques de sa partie superficielle ainsi que dans le volcanisme. D'autres viennent de l'extérieur et sont essentiellement relatives à la répartition du rayonnement solaire.

Le déplacement des plaques lithosphériques

Le déplacement des continents à la surface de la Terre, idée développée dès 1912 par Alfred Wegener, est une cause de modification des climats. Wegener voyait ces continents flotter sur un substratum visqueux alors qu'aujourd'hui on croit qu'ils dérivent avec leur substratum dans lequel ils sont fichés, l'ensemble formant des plaques lithosphériques. Ces mouvements sont extrêmement lents, quelques centimètres par an tout au plus, et ne peuvent jouer que sur de longues périodes. Diverses conséquences en résultent : un point donné du globe pourra, au cours du temps, occuper des positions variées et donc être situé successivement dans des zones climatiques diverses ; un climat continental pourra cesser de l'être si une plaque vient à se couper en deux au milieu d'un continent ; l'inverse se produira si deux continents se soudent ; des courants marins pourront être bloqués, ou au contraire créés, si des communications marines se ferment, ou s'ouvrent ; des zones montagneuses pourront s'élever, modifiant ainsi des éléments météorologiques, etc.

Les variations de l'orbite terrestre

Une des causes des variations climatiques, peut-être la mieux assurée et dont le caractère est le

plus rigoureux, est liée aux irrégularités du déplacement de la Terre sur son orbite qui, si notre planète était seule à tourner autour du Soleil, serait une ellipse toute simple. Mais d'autres planètes sont en concurrence avec la nôtre dans le système solaire et, avec la Lune, perturbent son mouvement. De ces actions conjuguées, il résulte que le rayonnement solaire n'est pas toujours réparti de la même façon à la surface du globe. Dès 1920, un mathématicien yougoslave, Milutin Milankovitch, a développé l'idée que cette répartition dans le temps et dans l'espace déterminait largement l'évolution des climats et particulièrement celle des glaciations : c'est ce que l'on a appelé la théorie astronomique des climats. Trois paramètres permettent de définir les caractéristiques de l'orbite terrestre ayant une influence sur la répartition de l'insolation à la surface du globe : l'excentricité de l'orbite terrestre (plus ou moins grand aplatissement de sa trajectoire elliptique autour du Soleil) ; l'obliquité de son axe de rotation par rapport au plan de cette orbite ; la précession des équinoxes (position variable de la Terre sur son orbite à l'équinoxe du printemps : point gamma). Ces paramètres présentent des périodicités dont les principales sont : environ 400 000 ans et 100 000 ans pour l'excentricité, 40 000 ans pour l'obliquité et 20 000 ans pour la précession. Toutes ces périodicités se retrouvent dans les variations climatiques.

La composition de l'atmosphère

La composition de l'atmosphère et de son contenu en poussières et en aérosols est susceptible de provoquer des changements dans le climat. Ces actions peuvent s'exercer de deux façons. L'une comprend tous les phénomènes qui peuvent s'opposer à l'entrée du rayonnement solaire incident, comme les éruptions volcaniques qui projettent dans l'atmosphère des quantités parfois considérables de cendres volcaniques et d'aérosols dont l'impact climatique est encore difficile à évaluer ; l'autre regroupe tout ce qui, d'une manière ou d'une autre, fait obstacle au rayonnement infrarouge émis par le sol réchauffé et donc augmente l'effet de serre atmosphérique (concentration dans l'air de la vapeur d'eau et surtout du dioxyde de carbone ou d'autres gaz à effet de serre). Ces variations de concentration peuvent être naturelles ou artificielles ; dans ce dernier cas, elles sont essentiellement le fait de la consommation des combustibles fossiles – charbon et pétrole – dont les effets, très complexes et encore mal prévisibles dans le détail, sont de grande importance pour l'avenir de la planète.

L'activité solaire

On a souvent invoqué les variations cycliques de l'activité solaire, marquées par une recrudescence de ses taches tous les onze ans, pour expliquer des variations climatiques et, notamment, le petit âge glaciaire. Cependant, aucune preuve incontestable d'une telle influence n'a jusqu'ici été apportée.

Les débuts de l'atmosphère

L'histoire des climats débute au moment de la formation de l'atmosphère dont le rôle climatique est fondamental. Lors de la formation de la Terre, il y a de cela 4,6 milliards d'années, une atmosphère primitive a dû exister, formée par les gaz du nuage stellaire et par ceux issus d'un volca-



Stromatolithes du Précambrien en Bolivie.

Cette coupe transversale montre les couches successives formées par ces organismes constructeurs qui constituent les premiers témoignages de vie sur notre planète. Ils ont contribué à modifier considérablement son atmosphère primitive en y injectant de l'oxygène.

(photo : X. Pasco / Bios)

nisme sans doute très actif. Cette atmosphère, contenant essentiellement des gaz légers ou inertes (hydrogène, hélium, néon, argon, etc.), n'a pas survécu au refroidissement du globe, certains gaz étant chimiquement inclus dans des minéraux, d'autres échappant, dans l'espace, à la gravitation terrestre.

Une fois le globe suffisamment refroidi, l'atmosphère a dû se concentrer en vapeur d'eau (H_2O), gaz carbonique (dioxyde de carbone CO_2), azote (N_2) et hydrogène sulfuré (H_2S) fournis par les volcans. Elle était donc à l'époque pratiquement dépourvue d'oxygène, le peu qui s'y formait étant issu de la décomposition de la vapeur d'eau par les rayons ultraviolets solaires qui, de plus, en transformaient une partie en ozone filtrant peu à peu ces mêmes ultraviolets. La vapeur d'eau, en se condensant, a engendré les pluies qui sont à l'origine des océans. La vie a alors pu se développer, sans que l'on sache encore si elle est d'origine terrestre ou si elle est le résultat d'un apport extérieur.

Les premiers sédiments connus sont très transformés par le métamorphisme et on n'en a observé de bien conservés qu'à partir de 3,8 milliards d'années. Ils sont surtout représentés par des couches détritiques (grès, etc.). Les dépôts de sels, qui marquent aujourd'hui les zones arides, y sont absents mais pas forcément pour des raisons climatiques. En effet, la rareté de l'oxygène, à cette époque, peut expliquer ce fait, ces dépôts étant pour beaucoup composés de sulfates contenant justement de l'oxygène (anhydrite $CaSO_4$). Peut-être aussi la concentration des mers en sels dissous était-elle insuffisante pour donner lieu, par évaporation, à des précipitations. Les calcaires sont rares à cette époque et sont surtout représentés par des encroûtements mamelonnés construits par des algues bleues (qui sont en fait des Cyanobactéries), et que l'on nomme stromatolithes. Ces organismes constructeurs, qui constituent les premiers témoignages de la vie à la surface du globe (ils sont connus au Swaziland, Afrique, il y a 3,5 milliards d'années), ont traversé tous les temps géologiques puisqu'on en voit encore de nos jours dans des lacs de régions chaudes.

Plusieurs arguments tirés de l'étude des sédiments soutiennent l'hypothèse de l'absence d'oxygène dans l'atmosphère. L'un des arguments est que l'on observe souvent des roches contenant d'abondants débris de minéraux qui n'auraient pas dû subsister longtemps à la surface de la Terre en présence d'oxygène, car ils auraient été transformés par oxydation (cas de l'uraninite UO_2 et de la pyrite FeS_2). Un autre argument est la présence de formations sédimentaires marines très caracté-

ristiques de ces époques reculées, qui sont des minerais sédimentaires rubanés (itabirites, etc.). On pense en effet que le fer n'a pu être transporté en abondance par les fleuves que sous une forme peu oxydée soluble (fer ferreux), ce qui n'aurait été possible qu'en l'absence d'oxygène atmosphérique. Si le fer a été précipité dans les lacs et dans les mers, cette fois-ci sous forme de fer très oxydé (fer ferrique : magnétite Fe_3O_4 , sidérite $FeCO_3$), c'est que dans ces eaux une vie primitive commençait déjà, très localement, à fournir de l'oxygène par l'effet de la photosynthèse. Enfin, l'absence de l'oxygène atmosphérique est confirmée par le fait que les sédiments ne montrent nulle part de couches rouges, aujourd'hui déposées aux dépens de sols rouges formés sous climat chaud et dont la coloration est due à leur contenu en fer ferrique.

Ces couches rouges ne sont apparues qu'il y a 2 milliards d'années au moment où, justement, disparaissaient les minerais de fer rubanés et où se développaient largement, dans les océans, les végétaux (algues microscopiques essentiellement) qui, grâce à la photosynthèse, concentraient l'atmosphère en oxygène à partir de son gaz carbonique (CO_2). On a tendance à penser que ces périodes étaient relativement chaudes, bien que, dans cette atmosphère où abondaient donc vapeur d'eau et CO_2 , il est difficile de savoir si dominait l'effet de la nébulosité (obstacle aux rayons du Soleil, tendant donc à un refroidissement de la surface terrestre) ou l'effet de serre du CO_2 (tendant à un réchauffement).

Un climat chaud, normal pour la planète

Une fois la composition de l'atmosphère fixée avec des caractéristiques pas très différentes de celles de l'époque actuelle, le climat de la Terre a connu de grandes variations. Cependant, on peut dire qu'il a oscillé entre deux états : l'un chaud, ou même parfois très chaud, probablement parce que les gaz à effet de serre étaient concentrés dans l'atmosphère ; un autre où, au contraire, des glaciations témoignaient d'une température moyenne très basse. Ce dernier état n'a cependant été qu'épisodique, au cours de périodes peu nombreuses et relativement courtes, eu égard à la durée des périodes chaudes.

La période chaude type est celle qui a caractérisé le Secondaire et la plus grande partie du Tertiaire (il y a 245 à 15 millions d'années). Durant ce long intervalle, on trouve toute une collection de

dépôts évoquant des températures élevées et, souvent, des conditions arides (évaaporites, calcaires parfois récifaux...), les eaux océaniques reflétant ces conditions, comme il est attesté par les mesures des isotopes de l'oxygène stocké dans le carbonate des coquilles des animaux qui les peuplaient alors. Si l'on trouve encore des traces de glaciers au début de la période, elles sont tout à fait inconnues en son milieu durant le Crétacé (il y a 130 à 65 millions d'années). À cette époque, non seulement la Terre jouissait d'un climat chaud, mais les différences de température entre les régions (gradients thermiques) semblent avoir été très faibles, c'est-à-dire qu'aucun point de la Terre n'était vraiment froid. Cela fait évidemment penser à un effet de serre important et, de fait, il semble que l'atmosphère montre, à cette époque, une forte concentration de CO₂, peut être six ou huit fois celle d'aujourd'hui. Cela peut être relié à une activité volcanique importante qui a culminé à la fin du Crétacé et qui est peut-être la cause de la disparition, apparemment brutale, de beaucoup d'espèces vivantes aussi bien marines (Foraminifères, Ammonites, Bélemnites...) que terrestres (Dinosaures...). Les causes de ces disparitions sont encore controversées, bien des auteurs les expliquant plutôt (ou aussi) par la collision de la Terre par une grosse météorite ou par une comète. En toute hypothèse, à partir de cette époque, le climat se refroidit lentement. Des glaciers apparaissent vers la fin du Tertiaire, il y a 10 ou 15 millions d'années, d'abord localement puis en formant les inlandsis qui prendront une importance particulière au cours du Quaternaire, alors que l'homme occupe déjà la planète.

Les glaciations antéquaternaires

Avant le Quaternaire, plusieurs périodes glaciaires ont rythmé l'histoire du climat terrestre. La plus ancienne période glaciaire connue remonte à quelque 2,6 milliards d'années. On en a des traces surtout en Afrique du Sud, dans le Transvaal (Witwatersrand). Un peu plus tard, il y a 2,2 ou 2,3 milliards d'années, on trouve d'autres témoignages de glaciations dans la même région et leur extension est attestée en d'autres lieux, en particulier en Ontario (Canada), où l'on peut voir les plus belles traces glaciaires de tous les temps antéquaternaires puisqu'elles sont constituées non seulement par d'anciens dépôts glaciaires lithifiés (que l'on nomme des tillites) mais aussi par des blocs et des surfaces striés. Les affleurements sont assez déve-

loppés pour que l'on puisse avancer qu'il existait une vraie calotte glaciaire de 1500 kilomètres de diamètre au sud de la baie d'Hudson.

On ne connaît plus ensuite de dépôts glaciaires importants pendant 250 ou 350 millions d'années jusqu'au moment où l'on en repère trois épisodes consécutifs – il y a respectivement 950, 870 et 615 millions d'années – durant la période dite du Précambrien supérieur. Ces glaciations semblent s'être étendues largement sur la planète si bien que, pour certains, durant la dernière au moins, la Terre entière aurait été recouverte de glaces. Seul un effet de serre intense, résultant de l'accumulation de gaz carbonique volcanique pendant des millions d'années, semble pouvoir expliquer que cette carapace ait pu fondre.

On trouve d'abondants témoignages d'une autre période glaciaire aux environs de 450 millions d'années (fin de l'Ordovicien). La plupart de ces dépôts sont localisés sur ce qui est actuellement le Sahara et peuvent s'expliquer par sa situation d'alors au pôle Sud.

La même explication vaut pour des glaciations très importantes qui se sont produites autour de 300 millions d'années (Carbonifère supérieur-Permien inférieur). Le centre glaciaire se trouvait, cette fois-ci, sur le vaste continent que l'on nomme le Gondwana et qui réunissait alors en un même bloc l'Afrique, l'Inde, l'Australie, l'Amérique du Sud et l'Antarctique, cette dernière région étant alors, comme aujourd'hui, située au pôle Sud. Là aussi on est satisfait de trouver une bonne corrélation entre la position du pôle et celles des glaciers. Cependant, il est difficile d'admettre que cette proximité constitue une explication suffisante pour ces grandes glaciations puisque, pendant la période qui va de 450 à 300 millions d'années, on n'en a pas de trace en Afrique alors que ce continent a dû être traversé par le pôle Sud depuis l'Afrique du Nord jusqu'au cap de Bonne-Espérance (ou, si l'on préfère, s'est déplacé à l'inverse par rapport au pôle). Il y a là une obscurité qui nécessitera des études plus approfondies pour être dissipée. Mais une réponse se trouve peut-être dans la composition même de l'atmosphère. On a en effet des arguments pour dire que sa concentration en CO₂ s'est considérablement accrue entre la fin de la première période glaciaire mentionnée et le début de la seconde, doublant ou même triplant vers le milieu de cet intervalle, cette augmentation semblant elle-même correspondre à une importante activité volcanique. Compte tenu de l'effet de serre qui a dû en résulter, on peut penser que, même aux pôles, des glaciers avaient alors peu de chances de se développer.

Le climat du Quaternaire, au temps de l'homme

Agassiz et ses contemporains avaient défini un « âge glaciaire ». Leurs successeurs ont constaté que les glaciers avaient connu non pas un mais plusieurs stades d'avancée, chacun marqué par des moraines distinctes, alternant avec des stades de recul. Aux périodes d'avancée, on a donné le nom de périodes glaciaires, ou glaciations, et aux périodes de recul, le nom d'interglaciaires. On sait maintenant que ces rythmes sont commandés par les variations de l'orbite terrestre.

La succession de ces glaciations a été précisée par A. Penck et par E. Brückner dans leur ouvrage fondamental paru de 1901 à 1909 : *Die Alpen in Eiszeitalter (Les Alpes au temps des âges glaciaires)*. Ils ont défini quatre stades glaciaires nommés, du plus ancien au plus récent : le Günz, le Mindel, le Riss et le Würm. Ces noms, heureusement pour la mémoire rangés par ordre alphabétique, sont ceux d'affluents du Danube près desquels ces stades ont été caractérisés. Des travaux postérieurs ont montré que l'on pouvait distinguer encore deux glaciations plus anciennes nommées, dans l'ordre chronologique (et alphabétique), Biber et Donau (Danube), et subdiviser ces périodes en de nombreuses phases, elles aussi rythmées par l'orbite terrestre.

Des observations analogues ont été faites dans bien des régions du monde. Ainsi, dans les plaines du nord de l'Europe, particulièrement en Allemagne et en Pologne, des alignements de vallums morainiques très étendus ont été cartographiés. Ils forment plusieurs guirlandes allongées *grosso modo* est-ouest, presque parallèles les unes aux autres, et marquent les différents stades d'avancée du bord méridional d'un immense glacier s'étendant sur ces régions. De même, en Amérique du Nord, on a pu mettre en évidence l'avancée des glaciers depuis l'Arctique jusqu'à la latitude de ce qui est aujourd'hui New York.

On a évalué le volume des glaces des régions arctiques durant le dernier maximum glaciaire, il y a 20 000 ans, à 75 millions de kilomètres cubes, alors qu'il n'y en a plus que 30 millions actuellement. Cette eau ayant été soustraite aux domaines océaniques, il en est résulté, à chaque épisode glaciaire, une baisse du niveau marin de 120 mètres ou davantage : c'est ce que l'on nomme le glacio-eustatisme. Ainsi, pendant les derniers maximums glaciaires, bien des îles, dans le monde entier puisque c'est l'ensemble des océans qui a été ainsi affecté, ont été rattachées à un continent voisin. En conséquence, des animaux et des végétaux ont

pu se répandre dans des régions qu'ils n'avaient pas la possibilité d'atteindre jusque-là. Cela est vrai aussi pour l'homme puisqu'il a été le contemporain de ces phénomènes et que, par exemple, il a pu passer de l'Asie à l'Amérique du Nord par une bande de terre aujourd'hui coupée par le détroit de Béring, et se déplacer à pied sec parmi les îles de la Sonde, alors toutes réunies.

À titre d'illustration, nous détaillerons un peu ce qui s'est passé au maximum de la dernière glaciation (Würm), il y a quelque 20 000 ans, période pour laquelle les nombreuses recherches effectuées permettent de se faire une idée assez précise de l'état de la surface du globe.

Depuis longtemps déjà on a repéré l'extension des glaciers, notamment des inlandsis, grâce à leurs moraines. Tout le Canada, le nord des États-Unis, le Groenland, la Scandinavie et le nord de l'Europe étaient occupés par des calottes de glace dont l'épaisseur pouvait dépasser 4 kilomètres. Les banquises permanentes étaient largement étendues, notamment autour de l'Antarctique qui, faute de place, ne pouvait développer son inlandsis autant que les conditions climatiques le lui auraient permis. Le poids de ces glaces accumulées faisait lentement s'enfoncer les continents par isostasie (équilibre hydrostatique des continents et de leur substratum). Du fait de la baisse générale du niveau des océans par glacio-eustatisme, la Grande-Bretagne, ou plutôt ce qui en restait puisque la moitié nord était sous la glace, était reliée au continent. Les distributions des flores et des faunes étaient considérablement modifiées. En Europe, on avait des toundras et des steppes là où aujourd'hui croissent des forêts. Les zones aujourd'hui sèches (sud de l'Espagne et de l'Italie, Grèce, Turquie...) étaient, elles, couvertes de forêts qui s'étendaient aussi sur l'Afrique du Nord. Steppes et toundras étaient parcourues par des troupeaux de rennes, de bisons et de mammoths. Ils étaient chassés par l'homme d'alors, physiquement peu différent de nous, dont un représentant typique a été trouvé en 1868 au lieu-dit Cro-Magnon, dans la commune des Eyzies-de-Tayac (Dordogne). Ce chasseur, habitué des grottes et des abris rocheux, fabricant d'outils de pierre admirablement taillés, nous a laissé des sculptures, des gravures et des peintures parmi les plus belles de l'histoire de l'humanité, ces dernières particulièrement bien préservées dans les grottes de Lascaux (Dordogne), du pont d'Arc (Ardèche), d'Altamira (Espagne, province de Santander), et de bien d'autres.

À cette image continentale répond une image marine qu'il n'a été possible de préciser que depuis une quinzaine d'années. En comparant les asso-

ciations de Foraminifères des océans actuels et celles que l'on peut extraire des carottes océaniques selon les méthodes exposées plus haut, on a pu reconstituer la carte des températures des eaux océaniques de surface il y a 20 000 ans. On n'est pas surpris de relever, sur ces cartes, des températures généralement plus basses que celles que l'on mesure actuellement. Dans l'Atlantique Nord, par exemple, à la latitude de la France, on note des températures inférieures de 10 °C à 12 °C aux températures actuelles. En revanche, il est paradoxal de voir des zones plus chaudes qu'aujourd'hui au maximum de cette glaciation. C'est pourtant le cas vers 30° de latitude sud, aussi bien dans l'Atlantique que dans le Pacifique.

La fin de cette dernière glaciation a entraîné des modifications considérables dans les paysages : en Eurasie, les steppes ont fait place aux forêts et la plupart des grands Mammifères qui les parcouraient se sont éteints, incapables de s'adapter à des changements si rapides, sans que la pression de chasse semble responsable au premier chef. D'ailleurs, dans le monde entier, de telles disparitions ont été nombreuses entre -12 000 et -10 000 ans avant l'actuel. Cette dernière date marque, en chiffres ronds, une modification importante dans l'histoire de l'humanité qui va bientôt pratiquer largement l'agriculture et l'élevage.

Alain Foucault

Le climat au cours des douze derniers millénaires

Les chauds et froids de la planète à la fin du dernier épisode glaciaire

La glaciation s'achève il y a plus de vingt mille ans. S'amorce alors un nouvel épisode interglaciaire caractérisé par une tendance globale au réchauffement du climat sous les effets d'un forçage orbital qui offre à la planète une insolation maximale. Dans l'hémisphère Nord, les calottes laurentide et scandinave commencent à fondre. Tout d'abord progressive, la fonte des glaciers s'accélère vers 15 000 avant le présent, mais elle ne s'achèvera que plusieurs millénaires plus tard (la fonte de la calotte scandinave ne sera effective qu'entre 10 000 et 9 000 avant le présent ; tandis que celle installée sur l'Amérique du Nord disparaîtra plus récemment encore, entre 7 900 et 7 000 avant le présent). C'est à cette période (le Tardiglaciaire),

il y a plus de quinze mille ans, que les données isotopiques montrent clairement une réduction des glaces, tandis que le front polaire installé à la latitude de la péninsule Ibérique remonte rapidement vers l'Islande. Ce réchauffement global du climat, connu sous la dénomination d'interstade Bølling/Allerød, est extrêmement rapide. Il s'effectue en deux ou trois siècles. Cette durée sera suffisante pour que la température des eaux océaniques qui bordent l'Europe remonte d'une dizaine de degrés, passant de 6 °C à 13 °C. Sur les continents, le réchauffement se traduit par une élévation de 8 °C des températures estivales et de plus de 20 °C des températures hivernales. Il est probable que, durant cette période, le climat de nos régions ait été sensiblement aussi chaud que celui que nous connaissons à l'heure actuelle.

L'impact de cette modification rapide du climat sur l'environnement végétal fut important. Les données paléobotaniques, plus particulièrement les pollens fossiles contenus dans les sédiments lacustres ou dans les tourbes, montrent une progression rapide des forêts au détriment des formations steppiques qui prévalaient jusqu'alors. Les forêts colonisent progressivement les zones nouvellement déglacées à partir de zones refuges où elles s'étaient repliées durant l'époque glaciaire. Cette reforestation, quoique limitée par des conditions pédologiques particulièrement défavorables (absence ou faible développement des sols), est dominée par des espèces héliophiles pionnières telles que le genévrier, le bouleau et le pin. Un nouvel environnement se met en place.

Le Dryas récent : un retour vers des conditions extrêmes

À partir de 12 000 avant le présent, le climat se détériore brutalement et les données géochimiques recueillies dans les carottes glaciaires confirment une nette tendance au refroidissement. Cette dégradation culmine vers -13 000 avant le présent et se poursuit sur plus d'un millénaire. Cet épisode, appelé Dryas récent, correspond à l'installation rapide d'un climat proche des conditions glaciaires antérieures. Le front polaire redescend au niveau de la Galice, à une latitude voisine de celle qu'il occupait quelques millénaires auparavant, à la fin du maximum glaciaire. Les températures de surface des océans redescendent à 8 °C, tandis que les reconstitutions quantitatives proposées par Joël Guiot, chercheur au CNRS, indiquent des températures estivales de 5 °C à 8 °C inférieures à l'actuel, et des précipitations bien moindres. Ce refroidissement brutal, qui a provoqué une nouvelle avancée des glaciers alpins et

scandinaves, a un effet important sur la couverture végétale : la grande majorité des enregistrements polliniques européens témoignent en effet d'une extension des formations herbacées au détriment des forêts pionnières installées lors de la phase d'amélioration climatique précédente. Dans certaines régions septentrionales ou proches des rivages océaniques, on note un effacement total de toute végétation forestière.

Ce bouleversement climatique, qui fut tout d'abord reconnu en Europe et ensuite sur l'ensemble de l'hémisphère Nord, eut une répercussion globale. Différents enregistrements géochimiques, paléobotaniques et géomorphologiques attestent de ses effets en Amérique centrale, en Amérique du Sud et jusqu'en Nouvelle-Zélande, où des moraines indiquant une avancée glaciaire contemporaine de cette période ont été récemment identifiées.

Les causes de cet événement climatique sont désormais bien connues. Il résulte de l'afflux d'énormes quantités d'eau douce dans l'Atlantique Nord consécutivement à la fonte des calottes glaciaires laurentide et scandinave lors du réchauffement du Bølling/Allerød. Cette décharge massive aurait bloqué la circulation thermohaline (température et salinité) et engendré un refroidissement brutal de l'ordre de 6 °C. Cette circulation océanique, qui assure les transferts de chaleur d'un hémisphère à un autre, en un millier d'années est assurée par le sel qui, expulsé lors de la transformation de l'eau en glace dans les hautes latitudes de l'hémisphère Nord, augmente la densité de l'eau qui, de ce fait, plonge en profondeur et redescend jusqu'aux zones australes. Ces courants froids perdent ensuite de leur densité et remontent en surface, où ils se réchauffent et assurent ainsi les courants des mers chaudes. Ces courants rejoignent ensuite leur point de départ en passant par le Pacifique et l'océan Indien. Un afflux important d'eau douce, en modifiant la densité des eaux océaniques, contribue à bloquer ou à ralentir cette circulation océanique et entraîne un refroidissement de l'Atlantique Nord.

D'après les données résultant de l'étude des carottes prélevées sur l'inlandsis groenlandais, cet événement climatique qui représente le dernier soubresaut glaciaire qu'ait connu la planète est survenu en moins de cinquante ans et s'est achevé en moins de deux siècles. Par sa rapidité, le Dryas récent représente l'exemple type d'un renversement climatique majeur caractérisé par le basculement rapide de conditions climatiques interglaciaires vers des conditions glaciaires, entraînant des bouleversements écologiques importants. S'il

attire autant l'attention de la communauté scientifique, c'est qu'il peut préfigurer et, par conséquent, permettre d'évaluer les modalités et l'impact sur les écosystèmes d'un refroidissement soudain du climat.

Avec la fin du Dryas récent et avec le brusque réchauffement du climat qui lui fait suite vers 11 600 avant le présent, s'amorce réellement l'Holocène. Les données paléoclimatiques, recueillies dans les enregistrements sédimentaires marins, continentaux et glaciaires, convergent pour indiquer une remontée vers le nord du front polaire en quelques siècles, tandis que les températures augmentent de près de 10 °C en moins d'un demi-siècle en s'accompagnant d'une hausse des précipitations. Plusieurs reconstitutions quantitatives évoquent un relèvement des températures de l'ordre de 2 °C à 3 °C par siècle durant les premiers stades de ce réchauffement.

Dès lors, les tendances climatiques s'orientent vers un réchauffement durable, mais celui-ci reste encore soumis aux contrecoups de la déglaciation. Ainsi, la tendance au réchauffement est ponctuée par plusieurs oscillations froides, qui sans atteindre pour autant l'intensité du Dryas récent auront des effets considérables sur l'environnement, mais aussi probablement sur les sociétés préhistoriques qui peuplaient l'hémisphère Nord. Il n'y a pas eu durant l'Holocène, c'est-à-dire au cours des dix derniers millénaires, de changements climatiques aussi abrupts que durant le dernier épisode glaciaire ou la transition tardiglaciaire, mais le climat a été affecté par des oscillations telles que des refroidissements, des réchauffements ou plus localement des sécheresses durables pour lesquelles les explications restent encore incertaines et attisent la curiosité de la communauté scientifique.

Les oscillations du climat durant l'Holocène

Contrairement à ce que l'on pouvait penser il y a encore quelques dizaines d'années, le climat de l'Holocène n'a pas été stable et le réchauffement actuel n'a rien d'exceptionnel, à l'exception de son intensité. De nombreuses oscillations du climat ont été révélées par différentes méthodes d'analyse et il ressort que, tout en étant orienté vers une tendance au refroidissement à long terme (le forçage orbital nous attirant inéluctablement vers une nouvelle glaciation d'ici cinq millénaires), le climat a varié durant la totalité de l'Holocène, parfois de manière brutale et rapide, ce qui semble exclure d'office des causes liées à un forçage climatique d'origine astronomique.

L'oscillation préboréale et l'événement 8200 : les derniers avatars de la déglaciation

Le premier bouleversement climatique de l'Holocène, reconnu sous le nom d'« oscillation préboréale », est survenu entre 11100 et 10700 avant le présent. Cet accident climatique s'est accompagné de nouvelles avancées glaciaires et d'une modification de la couverture végétale marquée par un abaissement de la limite supérieure des forêts. À l'instar du Dryas récent, il serait le contrecoup du réchauffement du début de l'Holocène.

Le deuxième événement climatique majeur survient il y a huit mille deux cents ans, d'où son appellation « d'événement 8200 ». En Europe, et plus largement sur l'ensemble de l'hémisphère Nord, ce renversement global des conditions climatiques est marqué par une nette tendance au refroidissement (chute des températures de 3 °C au Groenland et de 1,7 °C en Europe) et par l'accroissement de l'humidité. Dans les régions d'Afrique et d'Asie à régime de mousson, il se traduit par des conditions plus sèches, ou bien encore par une augmentation des vents en Amérique du Sud.

Cet événement brutal, survenu à l'échelle d'un siècle, fut immédiatement suivi d'un réchauffement tout aussi soudain que de courte durée, puisqu'il est estimé à moins de soixante-quinze ans en Europe. Cet accident climatique a-t-il eu des répercussions sur la végétation ? On peut répondre par l'affirmative si l'on considère les études palynologiques réalisées à très haute résolution (échantillonnages très resserrés) par Willy Tinner et André F. Lotter dans plusieurs lacs suisses et allemands. Ces travaux montrent clairement que la réponse de la végétation fut quasiment immédiate et s'est produite en quelques décennies. Ce coup de froid s'accompagne d'un recul rapide du noisetier et d'une extension synchrone des espèces mieux adaptées aux nouvelles conditions climatiques, en favorisant notamment le développement momentané du hêtre ou du sapin.

À l'instar du Dryas récent, les coups de froid et les dégradations climatiques enregistrées au début de l'Holocène durant l'oscillation préboréale et l'événement 8200 seraient la conséquence d'une modification de la circulation océanique, et en particulier de la circulation thermohaline. Les différences d'intensité entre les refroidissements enregistrés lors du Dryas récent et de l'oscillation préboréale reposent sur la quantité d'eau douce injectée dans l'Atlantique Nord, qu'elle provienne de la fonte des deux calottes glaciaires ou d'une seule. Quand à « l'événement 8200 », il serait, d'après les recherches les plus récentes, le résultat d'une décharge d'importantes quantités d'eau douce à

la suite du drainage brutal d'énormes lacs proglaciaires situés dans la baie d'Hudson et qui avaient été gonflés par les eaux de fonte de la calotte laurentide.

Après chaque épisode de réchauffement et de blocage de la circulation thermohaline, la réactivation de cette circulation entraîne la mise en place d'un nouveau cycle, c'est ce qui explique les phénomènes de bascule du climat, survenus au Dryas récent durant « l'oscillation préboréale » et lors de « l'événement 8200 ». Ces deux derniers événements représentent les ultimes contrecoups climatiques de la déglaciation.

Des oscillations cycliques déterminées par l'activité solaire depuis sept mille ans ?

Parallèlement à l'achèvement de la fonte des dernières calottes glaciaires et à la réduction des apports d'eau douce dans l'Atlantique Nord, le système climatique s'est apaisé. La reprise du fonctionnement de la circulation thermohaline, entre 7800 – 5800 avant le présent, ainsi que le forçage orbital entraînent un maximum thermique dans les hautes latitudes de l'hémisphère Nord (avec des températures supérieures de 2 °C aux valeurs actuelles) et provoquent le retrait des derniers glaciers. Ces conditions climatiques favorisent l'extension des forêts et entraînent localement une remontée des espèces thermophiles en altitude et vers les latitudes nord.

Toutefois, à partir de cette période, la situation devient plus complexe. Si le climat semble s'équilibrer avec la diminution du forçage océanique il y a 7800 ans, cette stabilité climatique n'est qu'apparente. La multiplication récente des recherches à haute résolution, réalisée sur les enregistrements glaciaires ou continentaux, prouve l'existence de nombreuses oscillations du climat, au sein desquelles le « petit âge glaciaire » des XIV^e-XIX^e siècles représente l'événement le plus récent.

Pour nos régions, le référentiel le plus précieux repose sur les résultats de l'étude des fluctuations des niveaux lacustres menée depuis plus d'une dizaine d'années dans le Jura par M. Magny et par l'équipe du laboratoire de chrono-écologie de Besançon. Les phases de transgression et de régression enregistrées dans les sédiments lacustres fournissent d'excellents témoignages de l'histoire des conditions climatiques qui ont concerné l'Europe tempérée au cours des derniers millénaires. Ces travaux indiquent l'existence de six phases majeures de détérioration du climat au cours des dix derniers millénaires. En dehors des deux phases que nous avons évoquées (vers 10800 et 8200 ans avant le présent), des oscillations plus froides ou



En plein désert saharien, les peintures rupestres du plateau du Tassili N'Ajjer témoignent de l'existence passée de conditions climatiques plus humides favorables au développement de sociétés agro-pastorales. Ces scènes de chasse et d'élevage sont attribuées à une période comprise entre le IV^e et le II^e millénaires avant Jésus Christ.

(photo : G. Lopez / Bios)

humides affectent nos latitudes il y a environ 5 400 ans, 2 850 ans et enfin près de 500 ans (petit âge glaciaire). D'autres recherches, intégrant l'analyse de la variation de la limite supérieure de la forêt, les évolutions de la végétation, l'activité des glaciers ainsi que les données isotopiques, confirment ces tendances pour l'ensemble de l'Europe du Nord. Ainsi, on observe en Norvège une chute de 1 °C des températures entre 6000 et 5000 avant le présent. Tous les enregistrements sur les fluctuations des lacs montrent également l'existence d'une phase transgressive il y a 4500 ans, tandis qu'une période plus humide est attestée vers 3900 – 3500 avant le présent en Ecosse ainsi qu'aux Pays-Bas. Un faisceau convergent d'indices tend à prouver l'existence de dégradations répétées du climat, de durée centenaire ou pluricentenaire, qui auraient affecté l'hémisphère Nord. Il est certain que ces dégradations climatiques ont eu une incidence sur les activités agraires des communautés paysannes néolithiques ou protohistoriques.

Entre ces phases de dégradation du climat, caractérisé par l'installation de conditions climatiques plus fraîches ou plus humides, d'autres travaux montrent quant à eux l'existence de phases de réchauffement. Les analyses dendrochronologiques ainsi que l'étude de la fluctuation des glaciers alpins révèlent l'existence d'une série de réchauffement du climat il y a 7 400 ans, 4 900 ans,

2 400 ans et, plus près de nous, aux environs du IV^e siècle de notre ère.

La reconstruction de ces oscillations et la compréhension des mécanismes dont ils dépendent sont fondamentales et focalisent l'attention de la majorité des paléoclimatologues qui, sur la base d'études pluridisciplinaires, étudient les enregistrements continentaux, marins et glaciaires. De nombreuses recherches indiquent que ces oscillations secondaires seraient liées aux variations de l'activité solaire. Ainsi, au forçage océanique du climat qui prévalait jusqu'au milieu de l'Holocène aurait succédé un forçage solaire. Celui-ci imprimerait au climat des rythmes réguliers dans lesquels apparaissent des cycles de périodicités différentes : 2 300 ans, 200 ans, 130 ans et 80 ans. Malgré les nombreux synchronismes existant entre ces oscillations climatiques et les variations de l'activité solaire révélée par les variations du Δ de ^{14}C résiduel, cette explication reste encore très controversée.

Il est clair que le fonctionnement de la machine climatique est beaucoup plus complexe durant notre interglaciaire que durant la période glaciaire, d'autant plus que cette complexité est accentuée par de fortes variabilités spatiales. Une autre certitude est que les dynamiques du climat sont influencées par plusieurs facteurs interdépendants, qui peuvent agir isolément ou ensemble à des

échelles spatiales ou temporelles variables. Certainement par excès de prudence, de nombreux scientifiques évoquent, pour expliquer certaines dynamiques climatiques, la combinaison entre l'océan, la circulation atmosphérique, l'activité solaire et le volcanisme.

Le climat durant le dernier millénaire : entre petit âge glaciaire et réchauffement actuel

Exception faite du réchauffement global actuel, le dernier millénaire connaît deux oscillations majeures dans son histoire climatique. Ainsi, entre les IX^e et XIII^e siècles, l'Europe est concernée par un réchauffement climatique, classiquement nommé « optimum climatique médiéval », qui pour certains historiens aurait pesé sur l'expansion agraire et culturelle du Moyen Âge. Bien que de nombreuses preuves permettent de conclure à l'existence d'années particulièrement chaudes durant cette période, il n'est pas encore prouvé que cette phase ait eu un retentissement global ; les évidences ne sont pas suffisantes et des tendances climatiques contradictoires sont observées dans l'hémisphère Sud à la même époque. Si, pour relativiser les causes du réchauffement actuel, l'hypothèse selon laquelle les températures médiévales auraient été supérieures à celles que nous connaissons actuellement avait été formulée, les reconstitutions quantitatives établies à partir de nombreuses séries dendrochronologiques permettent désormais de la réfuter.

Le refroidissement du « petit âge glaciaire » fait par contre l'objet d'un plus large consensus. Une abondante documentation historique, aussi bien textuelle qu'iconographique, reflète la mise en place de conditions climatiques plus froides et plus humides qu'à l'heure actuelle entre la fin du Moyen Âge et la deuxième moitié du XIX^e siècle. Deux phases majeures de refroidissement sont clairement identifiées : la première se situe entre les années 1150 et 1460 et la seconde, beaucoup plus froide, entre 1560 et 1850, avec un abaissement des températures plus net entre 1570 et 1730 et durant la première moitié du XIX^e siècle. L'ensemble des données climatiques recueillies par H.H. Lamb pour le centre de l'Angleterre montre un affaissement des températures de l'ordre de 1,5 °C entre 1200 et 1700. Cet événement global enregistré sur l'ensemble de la planète a, sous nos latitudes, provoqué une avancée des glaciers alpins, scandinaves mais également pyrénéens. Localement, la limite inférieure des glaciers s'est abaissée de 900 mètres, tandis que des tempêtes extrêmes balayaient les côtes de l'Atlantique Nord. Les causes de cet épisode froid restent encore à préciser mais, depuis

les travaux de l'américain J. Eddy en 1976, cette oscillation climatique, constituée de plusieurs épisodes froids, est attribuée à une diminution de l'activité solaire. Ainsi la phase froide centrée sur le XVIII^e siècle coïncide-t-elle avec un net affaiblissement de l'activité solaire (minimum de Maunder). Toutefois, cette variation de l'activité du soleil ne semble pas, une fois encore, être seule en cause. Ces périodes de refroidissement correspondraient également à une modification de la circulation atmosphérique de l'Atlantique Nord, avec notamment une descente vers le sud de l'aérojet et une position plus méridionale du front polaire. Ce scénario aurait favorisé les coulées d'air polaire sur l'Europe durant l'hiver tout en accentuant les précipitations durant l'été. Les éruptions volcaniques semblent également avoir joué un rôle non négligeable dans ces fluctuations climatiques accidentelles pluriannuelles. Le chercheur britannique Keith Briffa et son équipe ont démontré l'existence de synchronismes entre les plus importantes périodes de refroidissement du climat enregistrées au cours des derniers siècles et les épisodes volcaniques.

Quelle qu'en soit la cause exacte, cet épisode eut de graves conséquences socio-économiques en Europe, notamment sur les activités agricoles et la santé. C'est principalement dans les régions septentrionales et à proximité des rivages océaniques que ses effets furent les plus dévastateurs. À titre d'exemple, on peut mentionner la destruction, par l'avancée des glaciers, d'habitats dans certaines vallées montagnardes des Alpes et de Norvège, ou bien encore la chute et l'arrêt définitif de la viticulture en Angleterre, sans omettre d'évoquer les pertes de récolte et les disettes qui ponctuèrent cette époque. La fin de cet épisode, vers 1850, clôtura la dernière oscillation froide reconstruite sous nos latitudes.

Quant aux tendances climatiques actuelles, nul n'est besoin de rappeler qu'elles témoignent d'un réchauffement global de la planète sous les effets combinés de variations climatiques naturelles et de l'effet de serre additionnel d'origine anthropique. Les données dendrochronologiques ainsi que les études géochimiques des carottes glaciaires montrent que notre XX^e siècle – et plus particulièrement les dernières décennies – représente la période la plus chaude qu'ait connue la planète au cours de ces mille deux cents dernières années, tandis que les gaz à effet de serre atteignent des concentrations inégalées au cours des quatre cent vingt mille dernières années... Les valeurs enregistrées pour le dernier millénaire montrent une augmentation des températures de l'ordre de 0,6 °C depuis 1861

dans l'hémisphère Nord, et principalement une hausse des températures hivernales. Ce réchauffement s'est produit en deux temps : entre 1920 et 1945 et surtout depuis 1975 et, si l'on accorde du crédit aux simulations proposées, le réchauffement prévu en 2100 serait compris entre 1,4 °C et 5,8 °C. Certes, la marge d'incertitude de cette fourchette est importante mais, dans une perspective pessimiste, un réchauffement de l'ordre de plusieurs degrés aurait des conséquences majeures et probablement désastreuses pour notre société. Ainsi, ce changement climatique aurait un effet négatif sur la végétation des régions subtropicales et des latitudes moyennes du sud de l'Europe et du sud de la Méditerranée. Ces effets pourraient toutefois être plus positifs au niveau des hautes latitudes, en agissant sur les périodes de végétation et les précipitations.

Les exemples du passé montrent qu'un réchauffement du climat pourrait également jouer un rôle important sur la fonte des glaces et, par conséquent, sur la circulation thermohaline. Ne pourrait-on pas s'attendre, comme le suggèrent certains scientifiques, à un nouveau blocage de la circulation thermohaline et à un refroidissement brutal du climat ? Une étude récente indique que les eaux de l'Atlantique Nord ne plongent plus en profondeur, ce qui, à moyen terme, contribuerait à bloquer la circulation thermohaline qui n'assurerait plus alors sa fonction de régulateur thermique et entraînerait un refroidissement en Europe dans un scénario comparable à « l'événement 8200 » (mais avec une intensité moindre). Les conséquences écologiques en seraient certainement importantes, tout autant qu'elles le seraient pour nos sociétés, principalement dans les pays émergents dont l'économie repose principalement sur l'agriculture. Il faut garder à l'esprit que de tels renversements climatiques, reconnus par le passé, sont survenus à l'échelle de quelques générations.

Bouleversements climatiques et sociétés

Les réponses sociales à des événements climatiques de longue durée (pluridécennal ou centenaire), en particulier les sécheresses durables, peuvent être analysées par le croisement d'approches paléoclimatiques et archéologiques. Ainsi, l'épisode froid et humide survenu en raison d'un abaissement de l'activité solaire vers 850 avant le présent, à la fin de l'âge du bronze, s'est traduit en Europe du Nord par un véritable désastre pour les activités humaines qui reposaient largement sur l'agriculture. Ainsi en Suède, au Pays-bas et dans les régions alpines, la montée des niveaux lacustres a provoqué, selon les cas, soit une adaptation des

habitats, soit un déplacement des populations. En Asie centrale, cette modification du climat aurait, selon une équipe de recherche russe, influencé la migration des Scythes vers l'Europe du Sud-Est et vers les zones occidentales de l'Asie.

À l'inverse, cet événement climatique eut des effets bénéfiques en Afrique du Nord où l'on peut observer le glissement de conditions climatiques sèches vers des conditions plus humides. De même, des enregistrements polliniques provenant d'un lac du Cameroun indiquent le passage d'une forêt dense à des formations de savane. Cette transformation environnementale s'est accompagnée d'une croissance des populations agricoles, en favorisant notamment la migration de sociétés agropastorales vers ces zones plus facilement exploitables.

Les réponses sociales aux bouleversements climatiques sont complexes et diversifiées. Dans la majorité des cas elles se traduisent par des mécanismes d'adaptation parfois rapides et peuvent constituer des stimuli positifs. Sans céder pour autant à la tentation d'une position déterministe, on ne peut éluder les coïncidences qui existent entre le contexte climatique et les processus d'anthropisation et de mise en valeur des milieux. Ces relations sont d'autant plus évidentes qu'elles concernent les zones marginales situées aux limites de l'œkoumène (terres habitées). La confrontation entre les étapes de la colonisation agropastorale des massifs montagnards et les conditions climatiques montrent que ces dernières ont eu une influence. Aussi H. Richard, du laboratoire de chrono-écologie de Besançon, propose-t-il l'hypothèse d'un déterminisme climatique lors des premières phases de conquête de hauts plateaux jurassiens durant le Néolithique, tandis que d'autres recherches réalisées par l'équipe de palynologie de l'université de Toulouse suggèrent que l'expansion des pratiques pastorales et la mise en place des transhumances dans les montagnes du sud de l'Europe pourraient avoir été influencées par la mise en place d'un climat plus sec dans le bassin nord-occidental de la Méditerranée, il y a de cela près de cinq mille ans.

Il existe également des cas extrêmes révélés par l'archéologie mais sur lesquels plane encore des doutes quant à leurs causes réelles. Deux de ces cas méritent d'être évoqués. Le premier exemple concerne une crise majeure qui a affecté la société mésopotamienne, il y a quatre mille deux cents ans. Entre 4300 et 4200 avant le présent, les Akkadiens bâtirent un véritable empire dans le nord de la Mésopotamie (Syrie actuelle), entre les vallées alluviales du Tigre et de l'Euphrate, où ils prati-



Durant la période classique de la civilisation maya, la grande cité de Tikal, dont on peut observer les vestiges dans le nord du Guatemala, abritait près de 50 000 habitants. Le déclin de cette cité, et plus largement de la civilisation maya, survenu durant le ^xe siècle, reste encore mystérieux. Plusieurs hypothèses sont fréquemment évoquées, parmi lesquelles une importante modification du climat, la surpopulation ou encore des troubles politico-religieux.

(photo : J.-E. Molina / Bios)

quaient une agriculture irriguée. Après plus d'un siècle de prospérité, cet empire s'est effondré brutalement il y a de cela quatre mille deux cents ans. Les données archéologiques indiquent une dislocation rapide et une dispersion des populations vers le sud de la Mésopotamie. Les enregistrements sédimentaires montrent que cet effondrement et la crise socio-économique subséquente sont synchrones avec un changement climatique important, caractérisé par une aridification du nord-est de l'actuelle Syrie.

Le deuxième exemple est celui de la chute de la société maya. Cette société, qui occupait un vaste territoire englobant les hautes terres et les zones basses d'Amérique centrale depuis le ^{II}e millénaire av. J.-C., a connu entre le ^{III}e siècle et le ^{IX}e siècle une période d'expansion marquée par la mise en place d'une société hiérarchisée et par l'essor d'importants centres urbains et culturels. Cet empire s'effondre rapidement entre 750 et 950 de notre ère pour des raisons sans doute complexes. Plusieurs explications ont été proposées : elles évoquent la possibilité de troubles politiques ou religieux, ainsi que l'éventualité d'une crise écologique liée à la surpopulation et à l'exploitation massive des ressources. La réponse n'est certainement pas univoque, mais l'hypothèse d'un dérèglement climatique est mise en avant pour expliquer cet événement reconnu sous l'anglicisme de « *Collapse Maya* ». Cette influence possible du climat fut

démontrée par l'observation de sédiments lacustres qui ont enregistré à partir du ^{IX}e siècle – et pendant près de deux siècles – l'installation de conditions climatiques arides. Ce sont les régions du sud du Yucatan qui auraient été les plus affectées par cette sécheresse et les témoignages archéologiques semblent indiquer que la densité de population serait alors passée de 200 à 100 habitants par kilomètre carré.

Le spectre d'un bouleversement climatique majeur agité par les médias s'accompagne souvent de l'évocation de ses possibles répercussions sociales et le terme de « réfugiés du climat » a fait récemment son apparition. Sans pour autant céder à une dramatisation excessive, il est une question cruciale qui préoccupe désormais la communauté scientifique : celle de la sécurité et de la stabilité de nos sociétés face aux bouleversements climatiques qui pourraient survenir brutalement dans un avenir plus ou moins proche. Plusieurs exemples historiques ont révélé les effets dévastateurs d'événements climatiques majeurs sur des sociétés complexes et florissantes. Par exemple, les répercussions socio-économiques du petit âge glaciaire sont là pour le prouver.

De tels événements sont certainement exceptionnels, mais ils ont néanmoins le mérite de nous alerter sur les conséquences sociales d'éventuels basculements climatiques.

Didier Galop