

Paléontologie humaine et Préhistoire
Paléoclimats et mécanismes climatiques

Jacques Labeyrie

Chemin de la Fèverie, 91190 Gif-sur-Yvette, France

Reçu le 8 novembre 2004 ; accepté après révision le 19 septembre 2005

Disponible sur internet le 19 janvier 2006

Rédigé à l'invitation du Comité éditorial

Résumé

On décrit les deux mécanismes conduisant aux deux types principaux de paléoclimats, chaud et froid, ayant affecté l'ensemble de la Terre depuis le refroidissement post-mésozoïque et la création du Gulf Stream (ce dernier ayant imposé les alternances entre les périodes chaudes et les glaciations dans l'hémisphère nord depuis le Pliocène). *Pour citer cet article : J. Labeyrie, C. R. Palevol 5 (2006).*

© 2006 Publié par Elsevier SAS pour l'Académie des sciences.

Abstract

Two mechanisms are described here, which generated the two main types of palaeoclimates – warm and cold – having affected the whole Earth from the post-Mesozoic cooling and the creation of the Gulf Stream (the latter having imposed alternations of warm periods and glaciations in the Northern Hemisphere since the Pliocene times). *To cite this article: J. Labeyrie, C. R. Palevol 5 (2006).*

© 2006 Publié par Elsevier SAS pour l'Académie des sciences.

Mots clés : Paléoclimats ; Isotopes ; Gulf Stream ; Glaciations ; Variations d'insolation ; Tectonique ; Volcans ; Océan

Keywords: Palaeoclimates; Isotopes; Gulf Stream; Glaciations; Insolation variations; Tectonics; Volcanoes; Ocean

1. Introduction : les divers témoins des paléoclimats

Il y a une quarantaine d'années, on ne possédait encore, sur les paléoclimats, que peu de renseignements précis ; ils étaient en outre très limités dans le temps, ou l'espace. Mais ils laissaient penser cependant qu'il y avait eu des glaciations très importantes dans un passé assez récent, le Pléistocène. Ces renseignements étaient donnés :

- par les moraines, qui témoignaient des limites géographiques d'invasions glaciaires (jusqu'à 50°N en

Europe et 40°N en Amérique), et avaient permis, en outre, d'établir, par les terrasses anciennes de certaines vallées alpines, une chronologie très approximative de quatre glaciations recouvrant tout le Pléistocène ;

- par les relevés de pollens fossiles, surtout collectés en Europe ;
- par des os fossiles, surtout de Mammouths, de l'Ouest de l'Europe à la Russie, témoignant d'un climat de steppe s'étendant sur toute l'Europe non maritime, au nord des Alpes et des Balkans.

Cependant, ces moyens, peu précis, ne permettaient guère de remonter dans le passé plus loin que le « dernier cycle climatique », qui, avec seulement trois ou

Adresse e-mail : antoine.labeyrie@wanadoo.fr (J. Labeyrie).

quatre autres à peu près semblables, était censé, jusque vers 1970, avoir rempli tout le Pléistocène.

Milutin Milankovitch, dès 1930, montra que la cause des glaciations était essentiellement attribuable à la variation d'origine astronomique de l'inclinaison sur l'écliptique, de l'axe polaire de la Terre entre 22° et 25° , avec une période de 41 000 ans, et de sa précession (période 23 000 ans). La variation au cours du temps de ces paramètres créait ainsi périodiquement des variations d'insolation dans les hautes latitudes, qui étaient, soit *estivales*, soit *hivernales*, et qui duraient chaque fois pendant plusieurs milliers d'années [1]). Ainsi, aux alentours de 65°N , lors des diminutions d'insolation estivales, des chutes de neige se produisaient pendant l'été au Canada et en Scandinavie ; l'albedo ainsi augmenté était alors ensuite suffisant pour initier la croissance d'inlandsis qui grossissaient au cours des millénaires suivants, jusqu'à atteindre par endroits plus d'un kilomètre d'épaisseur. À leur maximum d'étendue, ces inlandsis descendaient aux environs de 40°N en Amérique et 50°N en Europe. Ils disparaissaient lorsque l'insolation d'été augmentait à nouveau et donnaient alors un climat « interglaciaire » analogue à l'actuel. Il faut remarquer que ces variations orbitales diminuant l'insolation des hautes latitudes, en été, sont petites en valeur relative (40 W m^{-2} au maximum, pour une valeur moyenne d'insolation à 65°N de 440 W m^{-2}).

Les deux premiers résultats, portant sur des variations continues des paléoclimats, arrivèrent vers 1970. D'une part, ce fut la découverte des variations des hauteurs de la mer depuis trente mille ans, qui montra que le niveau de l'océan mondial était descendu de cinquante mètres entre $-30\,000$ ans et $-20\,000$ ans et était remonté de 130 m depuis $-18\,000$ ans (ces mesures furent faites sur les restes sous-marins de végétaux dragués sur des côtes atlantiques d'Afrique tropicale et sur des coquillages dragués en Méditerranée, et datés par le ^{14}C).

D'autre part, ce fut l'analyse isotopique du rapport des oxygènes 16 et 18 dans les diatomées et les foraminifères fossiles (extraits de carottes de sédiments marins). Cette dernière devint bientôt une puissante méthode générale d'étude des paléoclimats. D'abord interprétée, selon son inventeur Harold Urey, comme donnant les variations dans le temps des températures de l'eau (de surface ou de fond, selon l'espèce de foraminifère considérée), elle fut étendue bientôt jusqu'à près de deux millions d'années (vers 1990, elle ira beaucoup plus loin encore). Très vite, on a pu montrer que ces mesures indiquaient aussi la composition isotopique fossile de l'eau elle-même, d'où l'on put déduire,

par un très beau raisonnement, comment avaient varié les quantités de glace accumulées tout au long du Quaternaire sur les continents de haute latitude qui entouraient l'Atlantique nord : l'eau de mer devient plus « lourde » (plus riche en isotope 18) lorsque il y a une « glaciation », c'est-à-dire quand les glaces s'accumulent sur les continents. Ceci est dû au fait que la neige qui tombe est d'autant plus « légère », riche en isotope « léger » ^{16}O , qu'elle tombe plus près des pôles. Par ailleurs, le stock mondial d'eau, et donc d'isotopes ^{16}O et ^{18}O , étant constant, il se trouve non seulement que le niveau de la mer baisse (130 m, au maximum de la dernière glaciation), mais aussi que, lorsque la neige « s'allège », la mer « s'alourdit ». Cette méthode fut aussi appliquée, dans l'autre sens, aux glaces de l'Antarctique, cette fois sur les rapports isotopiques D/H et $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ de glace fossile (venue de l'atmosphère) extraite de très profonds carottages, et donna ainsi les températures de l'air polaire jusque durant les 800 000 dernières années [4]. Quant à l'analyse des diatomées, elle permit d'obtenir les variations des températures de surface de la mer.

Ensuite, l'analyse en fonction du temps des variations de la composition isotopique de l'eau jusqu'à plusieurs millions d'années dans les carottes extraites des forages marins très profonds permit de voir des maxima de ^{18}O très nombreux qui étaient à la fois très profonds et duraient plus longtemps, et qui correspondaient à autant de grandes glaciations. On a vu ainsi (Fig. 1) qu'il y a eu, dans les quatre derniers millions d'années seulement, beaucoup plus de grandes glaciations que pendant les quelques millions d'années précédents : une dizaine pendant le dernier million d'années, contre moins de vingt entre -1 et $-3,5$ Ma, et 7 ou 8 seulement entre 3,5 et 6,2 Ma [7].

Par ailleurs, l'analyse en fréquence de ces variations montra la prépondérance de trois périodes dans les maxima du ^{18}O : à peu près 100 000, 40 000 et 20 000 ans. D'où l'idée que ce sont les modifications astronomiques « orbitales » de l'insolation (puisqu'elles ont ces mêmes trois périodes) qui sont les responsables des modifications paléoclimatiques du Quaternaire et notamment des « glaciations » et de leurs conséquences, confirmant ce qu'avait proposé Milankovich.

2. Insuffisance des variations d'insolation d'origine orbitale pour créer les glaciations

- À cause de la stabilité des orbites et des masses des planètes du système solaire, il est très probable que les trois responsables astronomiques (orbitaux) qui produisent les variations cycliques de l'insolation

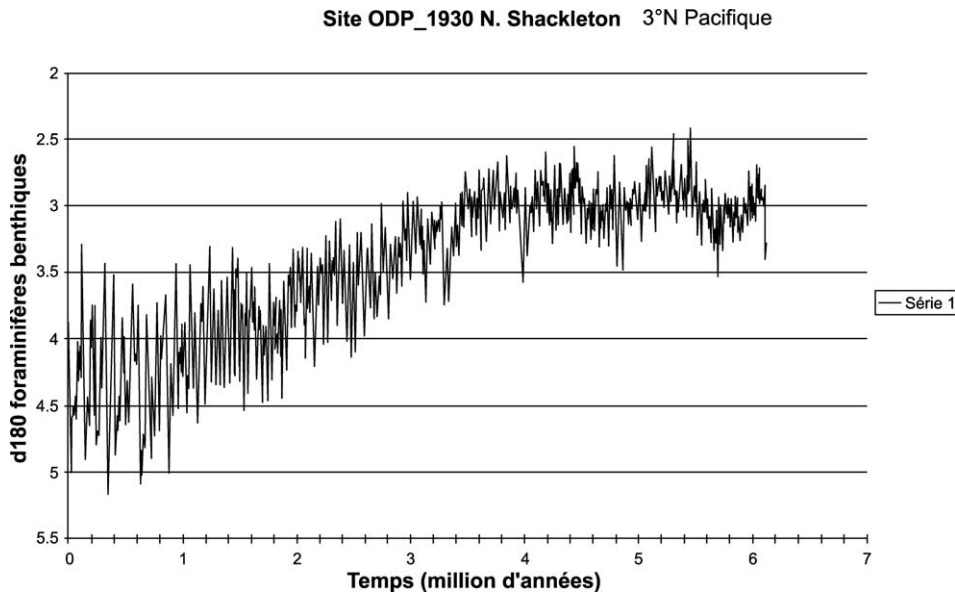


Fig. 1. Développement des glaciations au cours du Pléistocène. Les mesures du rapport des oxygènes 18 et 16 dans les carottes marines de forages profonds montrent que les glaciations (qui se traduisent par une forte valeur du rapport $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) ont commencé à apparaître vers $-3,5$ Ma, ont augmenté de $-3,5$ à -1 Ma, et restent à peu près constantes depuis lors. La valeur moyenne du rapport augmente aussi, à cause du volume moyen de glace polaire et de la baisse de la température de l'eau ($0,1\%$ par $^{\circ}\text{C}$).

Fig. 1. Glaciation development during the Pleistocene.

terrestre soient restés inchangés depuis très longtemps, depuis bien avant le Quaternaire, probablement même avant le Mésozoïque. Pourquoi donc les glaciations commenceraient-elles alors seulement au Quaternaire ?

- En outre, il est peu probable que les eaux de l'Atlantique nord, déjà très froides en temps normal, puissent évaporer assez de vapeur d'eau pour assurer, en une durée de quelques milliers d'années, le développement d'inlandsis jusqu'à des latitudes aussi basses que 40°N en Amérique et 50°N en Europe (et, en plus, pourquoi cette différence de latitude, alors que le refroidissement d'origine orbitale est le même tout le long d'une latitude donnée?). Il faut donc qu'il y ait, en plus de ces refroidissements d'origine orbitale, une *cause supplémentaire* pour initier les inlandsis et, par suite, les périodes de glaciation.

Pour cela, il était avant tout nécessaire qu'il y eût, disponible en haute et moyenne latitude, la quantité considérable de vapeur d'eau qu'il fallait pour les édifier : 50 millions de km^3 de glace lors du dernier maximum, à la fois pour l'Amérique du Nord et l'Europe, sans compter ce qui va tomber sur la mer. Or, l'océan Atlantique de haute latitude, même si l'on est en période chaude comme aujourd'hui, est de toutes fa-

çons très froid, couvert par la banquise, donc a une évaporation quasi nulle, et il est donc a fortiori incapable de fournir une pareille quantité de neige en période d'insolation faible.

Pour expliquer ces grandes glaciations, il est donc nécessaire d'ajouter aux diminutions d'insolation d'été d'origine orbitale un nouveau phénomène, assurant *l'apport supplémentaire de vapeur d'eau dans les régions de l'Atlantique nord, ce qui n'a pu se faire que par un apport d'eau chaude depuis les tropiques jusque vers le Nord de cet océan*. On peut remarquer, au passage, que ce phénomène est totalement indépendant des variations astronomiques orbitales.

Par ailleurs, le fait que ces glaciations, au moins pour la dernière, se soient développées plus bas (40°N) en Amérique, à l'ouest de l'océan, qu'en Europe (50°N) montre que cette eau chaude est arrivée du sud en longeant la côte orientale du territoire actuel des États-Unis, puis a traversé l'océan, entre les latitudes 40°N et 50°N . Les vents étant en majorité zonaux, l'Europe n'a pu bénéficier de l'apport de vapeur d'eau, donc des chutes de neige, qu'à ces latitudes, de dix à quinze degrés plus élevées que celles où avaient lieu les chutes de neige en Amérique.

Cet apport d'eau chaude est bien connu, c'est le Gulf Stream. Comme on le verra ci-dessous, il a commencé à arriver dans l'Atlantique nord un peu avant la fin du

Pliocène, et son débit a crû depuis environ –3,5 Ma (3,5 millions d'années) pour devenir constant depuis –1 Ma environ, ce qui explique que l'importance des glaciations, qui suivaient les mêmes variations, a augmenté dans les mêmes proportions au cours du temps.

Depuis ce dernier million d'années, le Gulf Stream a donc, comme aujourd'hui, une branche qui, venant du golfe du Mexique, sort par le détroit entre la Floride et Cuba, avec un débit, le long de la côte orientale de la Floride, de 25 sverdrup ($1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), et une température supérieure à 28 °C. Un peu plus au nord, grossi par l'apport du reste du courant équatorial d'eau chaude qui est remonté à l'est des Antilles, et par des adjonctions venues du grand « gyre » anticyclonique de l'Atlantique nord, son débit a nettement augmenté, de telle sorte qu'au large du cap Hatteras, au point 35°N, 73°W, son débit est déjà de 38 sverdrups; plus loin encore, au point 38°N, 69°W, quand il quitte ce grand gyre (il s'appelle maintenant la « dérive nord-atlantique »), il débite 80 sverdrups, soit $2,4 \times 10^{15}$ tonnes d'eau par an ; mais il est devenu beaucoup plus large et, refroidi par des mélanges supplémentaires avec l'eau océanique du gyre, sa température n'est plus que de 15 °C environ.

À partir de cette latitude, ce fleuve d'eau tiède représente, s'il se refroidit jusqu'à 0 °C, un apport énorme de chaleur supplémentaire, donc potentiellement de neige (à raison de 585 calories pour convertir 1 g d'eau liquide en vapeur), capable de construire en 2000 hivers de quoi recouvrir d'un inlandsis de plus d'un kilomètre d'épaisseur à la fois les États-Unis, le Canada, et toute l'Europe du Nord, de la côte ouest de l'Irlande jusqu'à Mourmansk. Ceci, très probablement, ne s'amorcera que si on assiste, à ce moment, à un refroidissement d'origine orbitale.

En période orbitale « chaude », cet apport d'eau chaude tropicale se contentera d'assurer, pendant tout l'hiver, une bande d'eau de mer libre de glace jusqu'à Mourmansk, et aussi d'assurer un climat doux et pluvieux sur toute la surface de l'Europe située des Pyrénées au cap Nord (en toute saisons) et de toute l'Europe centrale au Nord des Alpes (surtout l'été).

En résumé, les grandes glaciations avec inlandsis ne peuvent se produire que s'il y a simultanément, pendant quelques milliers d'années :

- un refroidissement polaire d'origine orbitale de longue durée ;
- une arrivée d'eau chaude tropicale dans l'Atlantique nord.

On peut en conclure que le mécanisme de Milankovitch n'est valable que parce qu'il y a aussi le Gulf Stream ; par conséquent, les glaciations ne pouvaient pas se produire avant l'apparition de celui-ci.

On remarquera que, dans le Pacifique, le Kuro-Shiwo a, aux mêmes latitudes, un débit et une température comparables à ceux du Gulf Stream. Toutefois, à cause du barrage que représentent les montagnes Rocheuses, son influence ne se fait que peu sentir à l'intérieur du continent nord-américain, et se limite à la région côtière de celui-ci.

3. La naissance et l'évolution du Gulf Stream

Pourquoi, et depuis quand, le Gulf Stream est-il apparu ?

Durant le début du Mésozoïque, l'Europe et l'Amérique du Nord étaient jointes et le Pacifique communiquait alors avec la mer Caraïbe, car l'Amérique centrale n'existait pas. Lorsque l'Atlantique nord commença à se former et l'Amérique à se séparer de l'Europe, l'eau tropicale atlantique, formée au nord de l'équateur, pénétrait librement dans le Pacifique, poussée vers l'ouest par les vents alizés.

Cette situation continua pendant une partie de l'époque tertiaire, puis cessa lorsque l'Amérique, dans sa dérive vers l'ouest, commença à escalader les pentes de la dorsale du Pacifique et que des éruptions volcaniques continues s'ensuivirent et commencèrent à édifier la longue chaîne qui forme l'Amérique centrale. Une autre chaîne, également nord-sud, plus petite, celle des Petites Antilles, allant de la Grenade jusqu'aux îles Vierges [6], s'édifiait aussi très lentement. Il semble que, sous cette dernière chaîne, au Crétacé, la profondeur était très grande, supérieure à 4000 m, puis le fond nouvellement créé de l'Atlantique entra en subduction, sur une longueur de 1000 km environ, sous une des rides nord-sud qui se formaient alors (entre la ride actuelle des Barbades et celle des Aves), déclenchant comme c'est le cas habituel, une chaîne de volcans sous-marins à la verticale de cette subduction.

Vers –4 Ma, dans les débuts du Pléistocène, les sommets de ces volcans commencèrent à émerger, formant les premières îles des Petites Antilles, et le passage de mer libre entre celles-ci devint suffisamment faible pour que les eaux chaudes profondes de la circulation zonale équatoriale soient déviées et commencent à remonter vers le nord, en longeant cette chaîne des Petites Antilles par son côté oriental (Fig. 2). Ainsi commença à naître le Gulf Stream, qui se développa pendant les trois millions d'années suivants. De nos jours, il ne reste plus à travers ce barrage des Antilles que huit passages, de

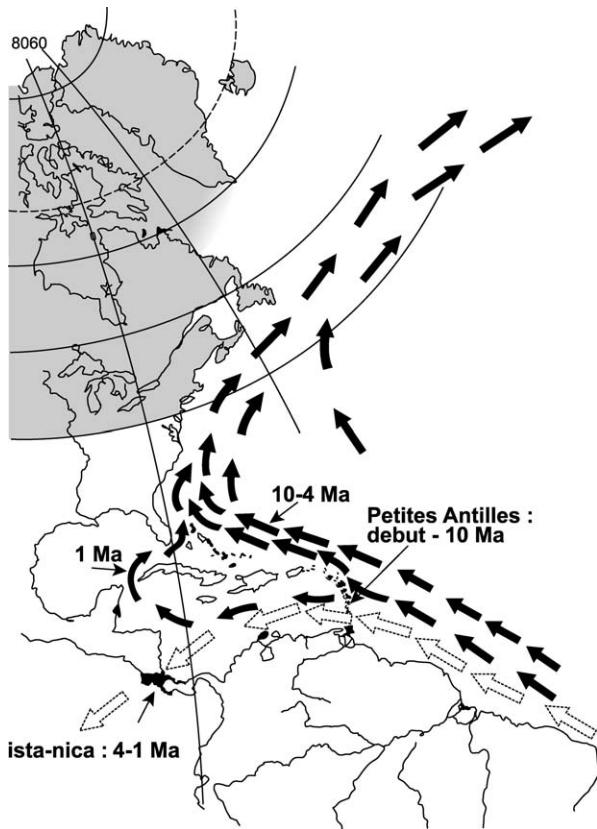


Fig. 2. Remplacement du courant équatorial par le Gulf Stream. Le semi-barrage des Antilles, commencé vers -10 Ma devint très important vers -4 Ma, et celui du Costa Rica fut achevé il y a 1 Ma. À partir de cette date, l'eau qui passait encore à travers les Antilles vers le Pacifique fut réinjectée dans l'Atlantique, après s'être réchauffée dans le golfe du Mexique et au nord de Cuba. Encore à l'heure actuelle, elle participe pour 50% environ au débit du Gulf Stream à la hauteur de Miami.

Fig. 2. Replacement of the equatorial current by the Gulf Stream.

longueur totale 200 km environ, où la profondeur maximale est comprise entre 200 et 400 m, mise à part une fracture où la profondeur atteint près de 2000 m, mais n'est pas plus large que 10 km, entre l'île d'Anguila et les îles Vierges. Partout ailleurs, le long de l'arc antillais, la profondeur est comprise entre 0 et 200 m.

Pendant ce temps, probablement vers -1 Ma [2], l'édification du barrage volcanique de l'Amérique centrale est devenue totale, coupant finalement le passage de l'eau atlantique vers le Pacifique, à la jonction du Nicaragua et du Costa Rica. L'eau chaude équatoriale atlantique, qui passait encore à travers les Antilles, fut alors obligée de remonter vers le nord, en passant entre la Floride et Cuba. Depuis lors, les trois quarts environ du débit équatorial atlantique longent le semi-barrage des Antilles, et le quart s'échappe par le détroit de Flo-

ride, après avoir fait le détour par la mer Caraïbe et le golfe du Mexique. Finalement, ces deux branches se sont réunies à la hauteur de Miami pour former le Gulf Stream.

Quand, à l'avenir, les variations orbitales le commanderont, les insolation estivales et hivernales dans l'hémisphère nord diminueront et la vapeur d'eau que le Gulf Stream évapore en quantité importante déversera à nouveau de la neige et démarrera de nouveaux inlandsis.

4. Les mécanismes du climat depuis la fin du Pliocène (Fig. 3)

Il apparaît donc que le mécanisme essentiel définissant le climat en Europe et en Amérique du Nord est essentiellement l'apparition, répétée plusieurs dizaines de fois depuis 3,5 Ma environ, de glaciations importantes, intercalées avec autant de périodes chaudes (on peut en déduire que le Pléistocène, qui est une période *climatique*, devrait donc commencer à 3,5 Ma, et non à la fin de la période *magnétique* d'Olduwai, à 1,67 Ma).

Lors de ces glaciations, des anticyclones vont se développer sur les inlandsis continentaux, ce qui aura pour effet de les étendre encore plus vers le sud : les glaces pourront alors atteindre 42°N en Amérique, et 52°N en Europe. Ainsi, pendant le Pliocène, puis le Pléistocène, les continents enneigés vont se refroidir, *de temps en temps*, de façon considérable. Chaque fois, cela va durer quelques milliers d'années, puis le ré-

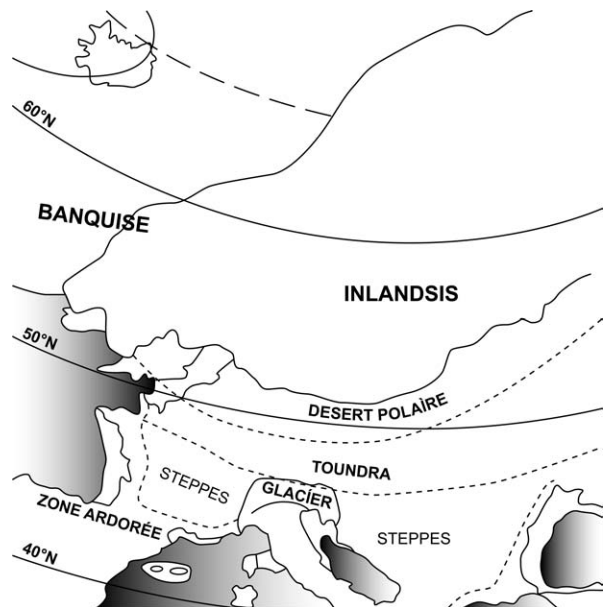


Fig. 3. Paléoclimat en Europe pendant la dernière grande glaciation. Fig. 3. European palaeoclimate during the Last Great Glaciation.

chauffement orbital va recommencer, l'inlandsis va fondre, et les continents vont se débarrasser rapidement de leur enveloppe de glace, au rythme de $50 \times 10^6 \text{ km}^3$ de glace en 10 000 ans. C'est ce qui s'est passé pour la dernière fois de -18000 à -7000 ans, le niveau de la mer montant pendant ce temps de 120 m. Après, il redescend de 3,5 m (c'est en effet le niveau supérieur du corail des atolls).

En résumé, ce sont ces variations alternatives d'inlandsis et de continents déglacés sur les hautes latitudes autour de l'Atlantique nord qui vont régler dorénavant le climat de l'Europe et de l'Amérique du Nord.

Par ailleurs, en dehors des périodes « orbitales froides » et des zones au voisinage de l'inlandsis où les climats sont alors conditionnés par celui-ci, il apparaît, d'après les résultats des études polliniques, que les températures continentales de printemps et d'été, à chaque latitude, sont proportionnelles aux variations d'insolation d'origine orbitale, dans ces mêmes saisons, et à ces mêmes latitudes, et cette proportionnalité a subsisté au moins pendant les quelques cent mille années du dernier cycle climatique (Fig. 5).

Puisque les insolutions d'origine orbitale sont calculables jusqu'à des millions d'années dans le passé, il semble que l'on ait ainsi un moyen de reconstituer, pour une latitude donnée a priori, les variations mensuelles relatives des paléoclimats au cours des saisons printemps-été, et pendant les périodes orbitales chaudes. Pour les périodes d'insolation orbitale froides, la précision sera beaucoup plus faible, et un climat zonal pourra être imaginé à partir de modèles du genre CLIMAP [3].

5. Esquisse des paléoclimats continentaux pendant le Pléistocène

5.1. Paléoclimats durant une grande glaciation

Pendant le dernier cycle, cette grande glaciation s'étend de -18000 à -65000 ans (périodes isotopiques 1 à 4).

D'après la position des moraines laissées par cette dernière grande glaciation, les inlandsis s'arrêtent alors à peu près à la latitude $52^{\circ}30' \text{ N}$ en Europe, et vers 42° N en Amérique du Nord. Ces inlandsis modifiaient très fortement les climats des zones voisines : ils engendraient, sur toute leur surface, une haute pression anticyclonique, qui envoyait dans toutes les directions, et en particulier vers le sud, un flot continu d'air froid et sec. Il s'ensuivit que, pendant cette période, le climat de l'Europe et de l'Amérique du Nord se divisait en trois bandes :

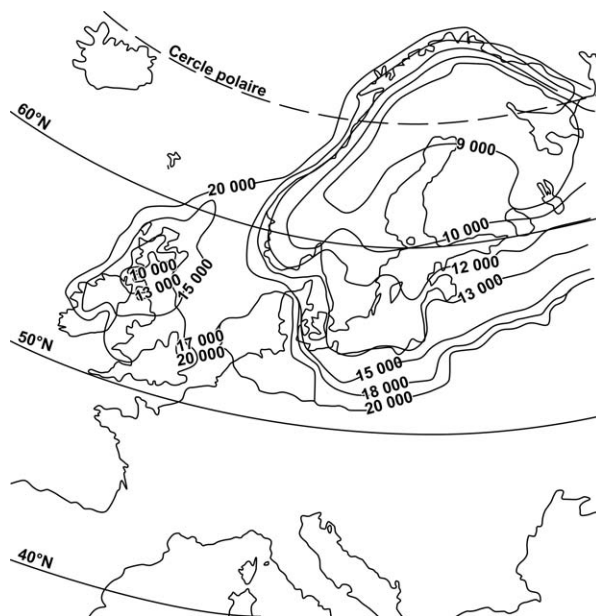


Fig. 4. Début de l'Holocène en Europe (étapes de la déglaciation).
Fig. 4. Beginning of the Holocene in Europe (deglaciation steps).

- au nord, sur ces continents, l'inlandsis, avec, plus au nord encore, s'étendant jusqu'au pôle, la banquise ; d'après CLIMAP, sur l'océan, la frontière sud de la banquise s'étend en arc de cercle de Terre-Neuve à l'Islande, puis redescend jusqu'à l'Irlande. À son contact, la température de la mer libre, en surface, commence à 5° C ;
- au sud immédiat de l'inlandsis, sur une centaine de kilomètres en latitude, le désert polaire, une bande impropre à toute végétation, avec, par endroits, la toundra ;
- sur l'Europe, plus au sud, du Sud de la Manche aux Pyrénées et du Nord de la Russie jusqu'aux Carpates, une bande de latitude de près de 800 km : c'est le climat froid et sec qui prédomine encore en toute saison, avec un sol couvert de steppe, peuplée par les grands mammifères herbivores. À l'est des Carpates, cette zone redescend jusqu'à la Crimée et le Nord de la mer Noire, qui est alors un lac d'eau douce. Toutefois, sur le rivage atlantique de cette zone de steppe, il semble que les vents marins plus humides créent une bande arborée, sans doute à mélèzes et bouleaux, peuplée de la faune de Lascaux (bovidés, cerfs...). Cette bande humide s'étend entre la Loire et les Pyrénées, et semble aller de l'océan jusqu'au Massif central. Cette bande boisée est plus large qu'aujourd'hui, d'une centaine de kilomètres supplémentaires, puisque la mer était plus basse d'une centaine de mètres ;

- au sud des Pyrénées et des Alpes, tous les pays bordiers de la Méditerranée sont couverts d'arbres à feuilles caduques (chêne), comme celle qui couvre aujourd'hui le Nord de l'Europe ;
- en Amérique du Nord, on observe la même succession climatique et la même évolution, mais les zones ne sont pas plus resserrées puisque, si l'inlandsis descend plus de 10° plus au sud, la mer Caraïbe commence aussi presque 10° plus au sud que la Méditerranée ;
- en Afrique du Sahara et du Sahel, il apparaît d'après les travaux de Gasse, que l'aridité augmente en même temps que s'étendent les périodes froides dans les hautes latitudes ; Sahara et Sahel sont donc encore plus arides qu'aujourd'hui pendant le Pléni-glacial.

5.2. Paléoclimats pendant les interglaciaires

Les interglaciaires du dernier cycle, avant l'Holocène, sont ceux des stades isotopiques **5a** (–65000 à –90000 ans), **5c** (–100000 à –110000 ans), et l'Éémien, stade **5e**, qui va de –115 000 jusqu'à –127 000 ans, début du cycle suivant. Les périodes glaciaires **5b** et **5d** qui les séparent sont courtes et peu intenses, tout comme les périodes orbitales de faible insolation qui les ont déclenchées.

Après le début du dernier réchauffement, qui débute vers –20000 ans, les inlandsis régressent très rapidement et disparaissent complètement vers –9000 ans (Fig. 4). Les études polliniques (notamment celles de la Grande Pile, dans les Vosges, ou celles des Échets ou du lac du Bouchet dans le centre de la France, tout comme celle de Philippi, en Macédoine, en frontière de la zone méditerranéenne, montrent que les climats durant ces divers interglaciaires ont tous été analogues à ceux de l'Holocène actuel en France (apparition des forêts de chêne). Ils débutent très brutalement, environ 1000 ans après le début du réchauffement, puis disparaissent plus progressivement, à mesure que s'installe la nouvelle glaciation.

Il est à remarquer qu'au Sahara et au Sahel, l'humidité s'accroît, avec installation de lacs et peut-être de savanes, en période de réchauffement [5].

5.3. Paléoclimats pendant les autres cycles du Pléistocène

On peut définir un cycle comme la durée qui s'écoule entre les fins de deux grandes glaciations.

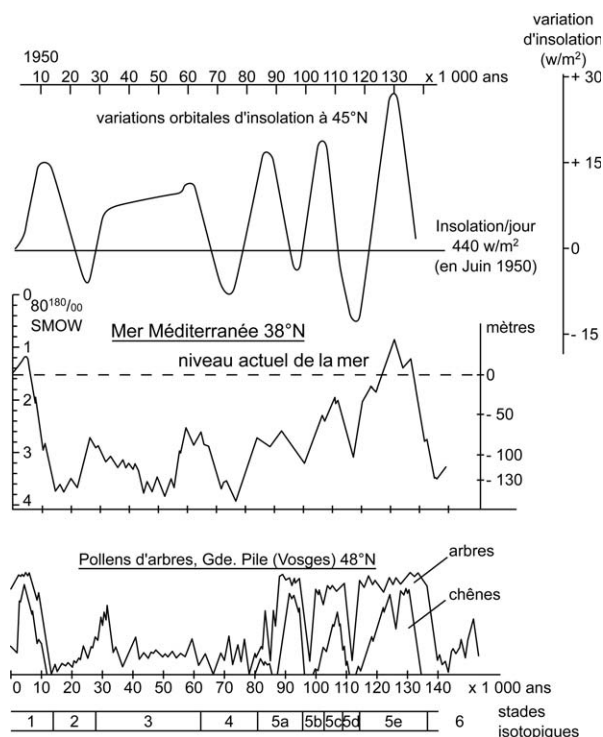


Fig. 5. Corrélation entre l'insolation en juin, la densité de pollens et la température à la latitude 48°N, ainsi que la composition isotopique de la mer Méditerranée et son niveau pendant le dernier cycle.

Fig. 5. Correlation between the insolation in June, the pollen density and the temperature at latitude 48°N, as well as the isotopic composition of the Mediterranean Sea and its level during the last cycle.

Que peut-on dire des paléoclimats de la vingtaine de cycles qui se sont succédé avant celui qui a précédé celui où nous sommes aujourd'hui ?

Les pollens et les moraines ont été effacés par les avatars de ce dernier cycle, mais cependant, d'après la succession des variations isotopiques des cycles précédents, et aussi d'après les sept derniers cycles enregistrés par le forage EPIC, à Vostok, au centre du continent antarctique, on peut penser que tous les cycles du Pléistocène ont été identiques au dernier, au moins pendant le dernier million d'années, étant ensuite de plus en plus longs à mesure que l'on remontait vers le début de cette période à glaciations et climats chauds alternés, il y a environ 3,5 Ma. En remontant toujours davantage vers le passé, les grandes glaciations disparaissaient, malgré les refroidissements d'été d'origine orbitale, puisque le Gulf Stream était de moins en moins important. Entre celles qui subsistaient alors, les périodes froides commandées par les diminutions d'été d'insolation orbitale devaient se limiter à des périodes froides analogues aux périodes 5b et 5d qui régnèrent en Europe lors de notre

dernier cycle, durant lesquelles, si les chênes disparaissaient, de nombreux autres arbres subsistaient du moins. Et on arrive ainsi aux débuts du Pléistocène.

Références

- [1] A.L. Berger, Long-term variations of caloric insolation resulting from the Earth's orbital elements, *Quat. Res.* 9 (1978) 139–167.
- [2] Climap, in: A. Mc Intyre, R. Cline (Eds.), *Geol. Soc. Am., Chart Series MC-36*, Boulder, CO, 1981, pp. 1–18.
- [3] EPICA community members, Eight glacial cycles from an Antarctic Ice core, *Nature* 429 (2004) 623.
- [4] Gasse F. in *Colloque interacadémies*, Paris, septembre 2004.
- [5] J. Guyot, A. Pons, J.-L. de Beaulieu, M. Reille, *Nature* (1989) 338.
- [6] K.W. Burton, et al., Closure of the Central American Isthmus and its effect on deep-water formation, *Nature* 386 (1997) 382–385.
- [7] N.J. Shackleton, A. Mix, ODP 846, 3°S, 90°49W, Prof. 3300 m, in: N.G. Pisias (Ed.), *Proc. Ocean Drilling Program Sci. Results Leg*, College Station, USA, 1995, pp. 839–859 (138).