

Paléontologie humaine et Préhistoire

# Les causes astronomiques des grandes variations du climat au Quaternaire

André Berger

*Université catholique de Louvain, Institut d'astronomie et de géophysique Georges-Lemaître,  
chemin du Cyclotron, 2, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique*

Reçu le 10 mai 2005 ; accepté après révision le 19 septembre 2005

Disponible sur internet le 28 novembre 2005

Rédigé à l'invitation du Comité éditorial

## Résumé

La théorie astronomique des paléoclimats explique la récurrence des cycles glaciaire–interglaciaire au cours du Quaternaire. Elle est basée sur les variations à long terme des distributions, selon les latitudes et les saisons, de l'énergie que la Terre reçoit du Soleil. La réponse du système climatique à ce forçage a été simulée à partir d'un modèle de complexité réduite mis au point à Louvain-la-Neuve. Ce modèle a ainsi pu reproduire les grandes caractéristiques du climat des trois derniers millions d'années, à savoir l'entrée en glaciation il y a 2,75 Ma, les cycles d'obliquité de la fin du Pliocène et du début du Pléistocène, l'émergence du cycle de 100 ka il y a 900 ka, les cycles glaciaire–interglaciaire des derniers 600 ka, et les variations climatiques depuis 200 ka BP. En plus du rôle joué par l'insolation et les gaz à effet de serre, le modèle montre toute l'importance des rétroactions liées à la vapeur d'eau, à l'albédo planétaire, à la végétation, aux inlandsis et au relèvement isostatique. De plus, l'analyse du climat au Quaternaire a permis de montrer que le stade isotopique 11 d'il y a 400 000 ans était le meilleur analogue de notre Holocène. L'étude du devenir de notre interglaciaire montre aussi qu'il devrait durer beaucoup plus longtemps que les autres et ce, même indépendamment de l'action des activités humaines sur le climat. *Pour citer cet article : A. Berger, C. R. Palevol 5 (2006).*

© 2005 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

## Abstract

**Astronomical origin of the large climatic variations during the Quaternary.** The astronomical theory of palaeoclimates aims at explaining the recurrence of glacial–interglacial cycles during the Quaternary. It is based upon the long-term variations of the latitudinal and seasonal distributions of the energy that the Earth receives from the Sun. The response of the climate system to this forcing has been simulated by means of the Louvain-la-Neuve (Belgium) model of intermediate complexity. This model reproduces the main climatic features of the last 3 Myr: the entrance into glaciation 2.75 Myr ago; the obliquity cycles from Late Pliocene to Early Pleistocene; the emergence of the 100-kyr cycle 900 kyr ago, the glacial–interglacial cycles of the last 600 kyr, and the climatic variations of the last 200 kyr. In addition to the role played by insolation and greenhouse gases, the model stresses the importance of the feedbacks related to the water vapour, the planetary albedo, the vegetation, the inlandsis and the isostatic rise. Moreover, the analysis of the Quaternary climate has shown that Marine Isotopic Stage 11, 400 000 years ago, was the best analogue of our Holocene. Simulations and sensitivity analyses show that our interglacial will last much longer than most of the others, even without taking into account the impact of human activities on the climate. *To cite this article: A. Berger, C. R. Palevol 5 (2006).*

© 2005 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Adresse e-mail : [berger@astr.ucl.ac.be](mailto:berger@astr.ucl.ac.be) (A. Berger).

*Mots clés* : Paléoclimats ; Théorie astronomique ; Milankovitch ; Modèle ; Insolation

*Keywords*: Palaeoclimates; Astronomical theory; Milankovitch; Model; Insolation

## 1. Le climat au Quaternaire

Le climat de la Terre change à de multiples échelles de temps, allant de la saison à des centaines de millions d'années. Les alternances entre extensions glaciaires et périodes interglaciaires, qui se reproduisent avec une quasi-rythmicité de 100 000 ans environ, ont marqué de manière spectaculaire le dernier million d'années. Un interglaciaire est caractérisé par un climat au moins aussi chaud que l'actuel (par actuel, il faut comprendre non perturbé par les activités humaines, c'est-à-dire avant la révolution industrielle). L'interglaciaire dans lequel nous sommes, l'Holocène, a commencé il y a 10 000 ans environ. Il a culminé aux alentours de 3000 ans avant J.-C. Cet « optimum climatique » était vraisemblablement de 1 à 2 °C plus chaud qu'à présent et le niveau de la mer était alors plus élevé de quelques mètres. L'Holocène est l'aboutissement naturel de la déglaciation qui a suivi le dernier maximum glaciaire daté d'il y a 21 000 ans. À cette époque, l'Europe du Nord et l'Amérique du Nord étaient recouvertes d'inlandsis de 2 à 3 km d'épaisseur, ce qui représente quelque 50 millions de kilomètres cubes de glace de plus qu'à l'heure actuelle. Ils s'étendaient jusqu'au Nord de l'Allemagne, des Pays-Bas et de la Grande-Bretagne et atteignaient New York. Le niveau des océans était plus bas de 120 m et l'air à la surface de la Terre plus froid de 5 °C en moyenne globale. La concentration en CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère avoisinait 180 ppmv, alors qu'au début de la révolution industrielle elle était de 280 ppmv, une valeur typique des interglaciaires. Rappelons que cette concentration a atteint 376 ppmv en 2004. Elle a donc augmenté de 96 ppmv sous la pression des activités humaines en environ 200 ans, alors qu'une telle augmentation n'a pu se faire naturellement qu'en une dizaine de milliers d'années (c'est-à-dire 50 à 100 fois plus lentement qu'au cours des deux derniers siècles).

## 2. Climat du futur

Quand, en 1972, les paléoclimatologues se sont réunis pour discuter de la fin de l'interglaciaire actuel [8], la plupart croyaient qu'on en était proche et que l'entrée en glaciation était imminente. Mais des calculs récents suggèrent qu'il n'en est rien. Au contraire, l'in-

terglaciaire actuel pourrait encore se poursuivre pendant 40 à 50 000 ans [8].

En fait, les données géologiques disponibles en 1972 montraient que les deux derniers interglaciaires, dont l'Éémien il y a 125 000 ans, avaient duré chacun 10 000 ans environ. En supposant que tous les interglaciaires aient la même longueur, il était donc normal de croire que « notre période chaude devait vraisemblablement se terminer assez rapidement, du moins sans intervention humaine » [18 (p. 267)].

Une telle affirmation, faite il y a plus de 30 ans, a depuis lors été remise en question. D'abord, certains interglaciaires peuvent avoir duré plus longtemps [25]. Ainsi, il y a 400 000 ans, l'interglaciaire du stade isotopique marin numéro 11 – MIS-11 –, aurait été plus chaud et plus long que le nôtre [13]. Par ailleurs, nous sommes de plus en plus sous l'influence d'un réchauffement global, vraisemblablement lié à l'intensification de l'effet de serre naturel par les activités humaines [17]. Mais, même hors perturbation anthropique, notre climat pourrait évoluer d'une manière totalement différente de celle des anciens interglaciaires, parce que le forçage astronomique et les mécanismes qui furent responsables de ces époques chaudes peuvent avoir été totalement différents de ce qui nous attend dans le futur [10].

## 3. La théorie astronomique des paléoclimats

À l'échelle géologique, les cycles climatiques sont déclenchés par les changements dans les distributions saisonnière et en latitude de l'énergie reçue du Soleil. Ceux-ci sont dus aux variations de l'orbite de la Terre et de son axe de rotation.

Formulée au début du XX<sup>e</sup> siècle par le Yougoslave Milutin Milankovitch, la théorie astronomique explique la récurrence des cycles glaciaire–interglaciaire. Selon Milankovitch [22], l'insolation polaire estivale détermine l'entrée en glaciation : lorsque la neige de l'hiver précédent n'arrive pas à fondre, elle s'accumule et, en réfléchissant le rayonnement solaire, provoque un refroidissement et ainsi une rétroaction positive pouvant aller jusqu'à la formation d'inlandsis. Même s'ils ont révélé un comportement plus complexe du climat, les calculs plus récents ont confirmé la théorie. Tout dépend donc des variations de l'énergie que la Terre reçoit du Soleil aux différentes latitudes au cours

des saisons. Or, à long terme, trois facteurs astronomiques gouvernent les fluctuations de l'insolation [2] :

- la forme de l'orbite terrestre tout d'abord, mesurée par l'excentricité,  $e$ . Elle passe d'un cercle presque parfait ( $e = 0$ ) à une ellipse légèrement aplatie (au Quaternaire,  $e$  atteint au maximum la valeur d'environ 0,06), pour revenir au cercle au bout de 400 000 ans. À ce long cycle se surimpose une variation qui suit une quasi-période de 100 000 ans ;
- l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre, l'obliquité, qui varie entre  $22^\circ$  et  $25^\circ$ , avec une périodicité principale de l'ordre de 41 000 ans ;
- la précession climatique, qui tient au fait que la Terre oscille comme une toupie : son axe de rotation décrit un cône autour de la direction perpendiculaire au plan de l'orbite. Ce mouvement décale lentement la position des équinoxes par rapport au périhélie (point de l'orbite terrestre le plus proche du Soleil) et module l'effet de l'obliquité sur l'insolation saisonnière avec une double périodicité, 23 000 ans et 19 000 ans [1], double périodicité que l'on retrouve dans les sédiments [16]. En moyenne, elle suit un cycle d'environ 21 000 ans. De plus, l'amplitude de la précession climatique est elle-même influencée par l'excentricité. Ces deux paramètres diminuent donc de concert.

La quantité d'énergie reçue journalièrement sur Terre dépendant essentiellement de la précession climatique, quand l'excentricité devient très faible, les variations d'insolation sont donc d'autant plus amorties. Cela sera le cas au cours des dizaines de milliers d'années à venir. À ce moment, l'amplitude des changements d'insolation sera donc considérablement réduite et beaucoup plus petite que pendant l'Éémien. Par exemple, à  $65^\circ\text{N}$  au solstice d'été, les variations d'insolation seront inférieures à  $25 \text{ W m}^{-2}$  au cours des 25 000 prochaines années, alors qu'elles atteignaient  $110 \text{ W m}^{-2}$  entre 125 000 et 115 000 années avant le Présent ( $100 \text{ W m}^{-2}$  représentent 20% de l'énergie reçue actuellement à  $65^\circ\text{N}$  au solstice d'été !). Du point de vue de l'insolation, l'Éémien peut donc difficilement être considéré comme un analogue des prochains millénaires, comme cela est souvent suggéré. Mais cette faible amplitude des variations d'insolation dans le futur est exceptionnelle. Une telle situation ne s'est guère présentée plus de 2 à 3 fois au cours des deux derniers millions d'années, la dernière fois était il y a 400 000 ans, à l'époque du stade isotopique 11 [3]. À cette époque (comme actuellement), les très petites valeurs de l'excentricité (correspondant à une orbite de la

Terre autour du Soleil pratiquement circulaire) coïncidaient avec les minima de son cycle de 400 000 ans. Comme l'excentricité module l'amplitude de la précession climatique, cette dernière va s'annuler alors pratiquement. Il s'ensuit que, la précession contrôlant les variations de l'irradiation journalière, ces variations sont dans ces conditions considérablement amorties.

#### 4. La modélisation du climat

Pour tester les impacts d'une telle situation et pour expliquer la relation entre la cause astronomique et les effets sur le système climatique, il est indispensable de posséder un modèle [15] qui permette de reproduire l'évolution du climat aux échelles de temps concernées. La longueur de ces échelles requiert des simulations sur des centaines de milliers d'années. Dans l'état actuel des connaissances et des moyens de calcul disponibles, les modèles utilisés ne peuvent donc être que de complexité réduite.

Le modèle de Louvain-la-Neuve (LLN) fut un des premiers de ces EMIC (*Earth Models of Intermediate Complexity*). Il tient compte des processus importants qui gouvernent l'évolution des différentes parties du système climatique et de leurs interactions. Il utilise une représentation simplifiée de l'atmosphère, de l'hydrosphère, de la cryosphère, de la lithosphère et de la végétation. De nombreux tests de sensibilité ont montré que les mécanismes principaux qui doivent être impérativement pris en compte sont liés aux rétroactions positives entre (i) le pouvoir réfléchissant de la planète (albédo) et la température, (ii) les gaz à effet de serre (vapeur d'eau,  $\text{CO}_2$  et méthane) et la température, (iii) la nature de la couverture végétale et le climat, que ce soit dans les hautes latitudes en hiver ou dans les zones tropicales, (iv) l'altitude et la localisation des inlandsis et les précipitations neigeuses, et (v) la dynamique des inlandsis et la réponse isostatique de la lithosphère sous-jacente.

Ce modèle a été testé dans différentes situations climatiques [5,6] et a reproduit les grandes caractéristiques de l'entrée dans l'âge glaciaire du Quaternaire il y a quelque 2,7 Ma, la transition entre les périodes de 41 000 et de 100 000 ans il y a 800 000 ans environ, les oscillations glaciaire-interglaciaire, la déglaciation entre 21 000 et 10 000 ans avant le présent, et l'évolution du climat du dernier millénaire et du dernier siècle en tenant compte des activités solaire, volcanique et humaines (gaz à effet de serre et sulfates). Sa réponse aux scénarios du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat – GIEC – (réchauffement entre 1,5

et 2,5 °C) est située dans la fourchette des modèles utilisés par ce groupe.

La simulation des 400 000 dernières années a finalement montré toute l'importance des variations de l'énergie reçue du Soleil et de la concentration en gaz à effet de serre dans l'air. Il faut toutefois souligner que l'accord avec les données paléoclimatiques n'est que qualitatif. Si les spectres des résultats du modèle et des reconstructions paléoclimatiques montrent un excellent accord dans

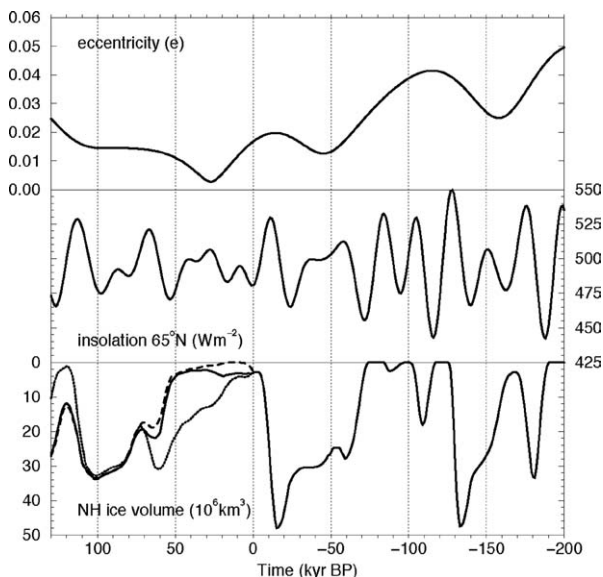


Fig. 1. Cette figure illustre les variations conjointes de l'excentricité, de l'énergie reçue à 65°N le jour du solstice d'été (en  $W m^{-2}$ ) et du volume de glace de l'hémisphère nord simulé par le modèle 2.5-D de Louvain-la-Neuve. Ces variations vont de 200 000 ans dans le passé à 130 000 ans dans l'avenir. La courbe en trait plein du volume de glace montre la réponse du modèle aux variations d'énergie reçue du Soleil et de la concentration en  $CO_2$ . Cette dernière est extraite des données de la carotte de glace de Vostok pour le passé [23] et d'un scénario reproduisant les 120 000 dernières années pour le futur [8]. La courbe en trait pointillé donne l'évolution du volume de glace si la concentration future en  $CO_2$  était constante et égale à 210 ppmv. La courbe en tirets résulte d'un scénario où la concentration en  $CO_2$  atteindrait 750 ppmv dans les deux siècles à venir suite aux activités humaines, avant de revenir, un millier d'années plus tard, à des valeurs naturelles.

Fig. 1. This figure shows the joint variations of eccentricity, 65°N insolation at the summer solstice (in  $W m^{-2}$ ) and ice volume of northern hemisphere simulated by the 2.5-D model of Louvain-la-Neuve. These variations are calculated between the last 200 ka and the next 130 ka. The full-line curve of ice volume shows the model answer to the variations of insolation and  $CO_2$  concentration, the latter according to the data of the Vostok ice core for the past times [23] and to a scenario reproducing the last 120 ka for the future [8]. The dotted curve gives the evolution of ice volume if the future  $CO_2$  concentration would be constant and equal to 210 ppmv. The dashed curve results from a scenario in which the  $CO_2$  concentration would reach 750 ppmv in the next two centuries, due to human activities and come back to natural values after 1000 years.

les bandes spectrales autour des périodes de la précession (23 et 19 ka), de l'obliquité (40 ka) et de l'excentricité (100 ka), il n'en demeure pas moins que la série temporelle du climat simulé (le volume de glace sur la Fig. 1) montre encore bien des lacunes lorsqu'on la compare à celle des reconstructions géologiques. En particulier, le modèle simule systématiquement des interglaciaires libres de glace dans l'hémisphère nord, à l'exception de l'Holocène, pour lequel le volume de la glace restante (en l'occurrence celle du Groenland) est bien reproduit. Les données suggèrent, au contraire, que le niveau marin, lors des interstades 7.1, 5.3 et 5.1, était inférieur au niveau actuel et bien inférieur à celui du stade 5.5. Ceci est encore plus vrai pour le stade 6.5, dont la modélisation montre un niveau marin équivalent à celui de l'Holocène, alors qu'il appartient à une période glaciaire. Une constatation similaire peut être faite pour les stades 9 et 11 reproduits à la Fig. 1 de Berger et Loutre [6]. Pour les deux transitions 11–10 et 9–8, la forme d'entrée en glaciation modélisée est assez différente de celle des reconstructions paléoclimatiques. Ces différences entre les résultats du modèle et les données paléoclimatiques sont discutées par Berger et Loutre [3,7]. Il faut toutefois noter que la fonte exagérée des glaces de l'hémisphère nord, lors des interglaciaires des 400 000 dernières années, n'empêche nullement le modèle de reproduire l'alternance des cycles glaciaire–interglaciaire et les caractéristiques spectrales des données paléoclimatiques dans les bandes spectrales des paramètres astronomiques au cours des 575 000 dernières années [19].

## 5. Le futur naturel de l'Holocène

Ce modèle de LLN a été utilisé pour mieux comprendre l'évolution du climat de l'Holocène et pour essayer de prévoir son futur à partir des variations de l'énergie reçue du Soleil et de la concentration en  $CO_2$  dans l'air. La plupart des scénarios de  $CO_2$  utilisés pour les 100 000 prochaines années (concentration constante ou similaire à celle des précédents interglaciaires) conduisent à un interglaciaire exceptionnellement long, s'étendant de 8000 ans avant le présent à quelque 50 000 ans dans le futur (voir la courbe du volume de glace dans la Fig. 1). On y aperçoit, en effet, que le volume de glace dans l'hémisphère nord ne recommence à croître que dans 50 000 ans. Un premier stade glaciaire apparaît à 65 000 ans et il faut attendre 100 000 ans pour observer le prochain maximum glaciaire. Seuls les scénarios où la concentration future en  $CO_2$  est inférieure à 220 ppmv [21] conduisent à une entrée précoce en glaciation (voir la courbe pointillée sur le graphique du volume de glace),

une situation totalement improbable au vu des concentrations préindustrielles et actuelles.

Lors du précédent long interglaciaire, au stade isotopique 11 [4], l'insolation astronomique et le climat étaient très proches de ce que nous leur connaissons actuellement, hors impacts anthropiques. La concentration en CO<sub>2</sub> y avait une valeur typique des interglaciaires (légèrement supérieure à 280 ppmv [23]). Les simulations du climat de cette époque conduisent aussi à un long interglaciaire, illustrant toute l'importance du CO<sub>2</sub> quand les variations de l'insolation sont trop faibles pour faire varier le climat d'elles-mêmes.

## 6. L'impact des activités humaines à l'échelle géologique

Cette longueur inhabituelle de l'interglaciaire actuel semble d'ailleurs être bien confirmée par plusieurs enregistrements paléoclimatiques [5,6], celui de EPICA [14] en particulier. Toutefois, étant donné l'incertitude de l'échelle de temps du CO<sub>2</sub> à la base de la carotte de Vostok, il a paru opportun de vieillir ou de rajeunir la chronologie du CO<sub>2</sub> dans la simulation. Loutre [20] a ainsi pu montrer toute l'importance de la phase entre les évolutions de l'insolation et du CO<sub>2</sub> à cette époque. Si on vieillit les concentrations en CO<sub>2</sub> de 10 ka, on s'aperçoit que l'insolation et CO<sub>2</sub> diminuent de pair entre 410 et 400 ka BP, générant alors un court interglaciaire. Si on rajeunit le CO<sub>2</sub>, sa concentration reste alors élevée pendant la phase de décroissance de l'insolation, comme c'est d'ailleurs le cas avec la chronologie de Vostok. Dans ces conditions, l'interglaciaire simulé est exceptionnellement long. Cette même relation de phase favorable à un long interglaciaire est bien celle de l'Holocène. On s'aperçoit, en effet, que l'insolation d'été commence à décroître à partir de 10 ka BP, alors que la concentration en CO<sub>2</sub> reste élevée, voire augmente à partir de 7 ka BP. Si on en croit les leçons du passé, les conditions sont donc bien remplies pour engendrer un long interglaciaire holocène, du moins en ce qui concerne les valeurs d'insolation et du CO<sub>2</sub>.

Cette augmentation du CO<sub>2</sub> au sein de l'Holocène a aussi soulevé le problème du début de l'action des activités humaines sur le climat. Ruddiman [24] a, en effet, suggéré que cet accroissement de quelques dizaines de ppmv serait en fait d'origine anthropique. Selon lui, ceci aurait même retardé l'entrée en glaciation de notre planète. Cette idée, bien qu'attrayante, est toutefois combattue du strict point de vue du cycle du carbone [9], les arguments avancés par Ruddiman liés essentiellement à la modification de la couverture

végétale ne semblant pas pouvoir être les principaux responsables de la concentration préindustrielle des gaz à effet de serre. De plus, divers scénarios d'évolution hypothétique du CO<sub>2</sub> au cours des dernières 10 000 années tendent à montrer que l'hypothèse de Ruddiman a très peu de chance d'être vraie. À partir du modèle de LLN, plusieurs expériences ont en effet été réalisées. On a supposé que l'évolution du CO<sub>2</sub> à partir de 7 ka BP (où la concentration était légèrement inférieure à 260 ppmv) aurait pu être celle des stades isotopiques 9 ou 7 notamment [11]. Parmi toutes ces simulations, seule celle basée sur le scénario du stade isotopique 7, où la concentration en CO<sub>2</sub> décroît rapidement pour atteindre 230 ppmv actuellement, conduit à l'entrée en glaciation. Ce résultat confirme, une fois de plus, l'importance de la décroissance simultanée de l'insolation et du CO<sub>2</sub> aux époques où l'orbite terrestre devient circulaire pour entrer en glaciation.

La concentration en CO<sub>2</sub> dans l'air a dépassé les 376 ppmv en 2004, une valeur qui est déjà bien au-delà des valeurs typiques d'interglaciaire (~290 ppmv). C'est pourquoi nous avons aussi testé la réponse du modèle aux perturbations anthropiques. Les scénarios utilisés supposent des concentrations atteignant jusqu'à 750 ppmv au cours des 200 prochaines années et retournant aux concentrations « naturelles » après 1000 années [3,21]. Les résultats de ces expériences numériques suggèrent que, sous l'emprise de faibles variations d'insolation, il existerait une valeur seuil du CO<sub>2</sub> au-delà de laquelle la calotte du Groenland disparaîtrait. Dans ce cas, le système climatique mettrait quelque 40 000 ans pour retrouver une évolution « naturelle » et donc oublier les perturbations artificielles induites par les activités humaines au cours du troisième millénaire. Un effet de serre irréversible (à l'échelle humaine) pourrait dès lors être la caractéristique principale de notre climat futur. Si le Groenland et l'Antarctique de l'Ouest venaient à disparaître, l'Anthropocène de Crutzen et Stoermer [12] servirait de transition toute désignée entre le Quaternaire et la prochaine époque géologique (le Quinternaire ?). Une telle prédiction rejoint celle faite par J. Murray Mitchell Jr, qui, en 1972, prédisait que « l'impact des activités humaines sur le climat futur serait vraisemblablement un réchauffement global, favorable dès lors à la perpétuation du présent interglaciaire » [18 (p. 436)].

## 7. Conclusions

En résumé, nous entrons dans une période exceptionnelle, au cours de laquelle l'insolation restera pres-

que constante. Cette situation va exacerber le rôle des autres agents qui contrôlent le comportement du système climatique, en particulier les concentrations en CO<sub>2</sub> et autres gaz à effet de serre. Sous une concentration naturelle de quelque 290 ppmv, une valeur déjà très peu fréquente à l'échelle du Quaternaire, la longueur simulée de l'interglaciaire actuel apparaît aussi comme exceptionnelle, atteignant quelque 50 000 ans. De plus, les tests effectués en tenant compte de l'impact possible des activités humaines montrent qu'il existe, dans notre modèle, un seuil de CO<sub>2</sub> (d'environ 700 ppmv) à partir duquel la calotte polaire du Groenland pourrait fondre. En conséquence, il semble exclu de parler encore d'entrée en glaciation imminente et une telle hypothèse ne peut plus, en aucune manière, être prise comme excuse pour autoriser la poursuite des émissions de CO<sub>2</sub> sans contrôle ni limite, avec l'espoir hypothétique que le réchauffement global qui s'ensuivrait contrecarrerait l'entrée naturelle en glaciation.

Finalement, la plupart des simulations climatiques réalisées à ce jour confirment que la distribution et l'amplitude des variations climatiques globales que nous subirons vraisemblablement dans le futur seront très semblables à celles qui prévalaient durant les phases les plus chaudes des quelques dernières dizaines de millions d'années. La reconstruction de ces climats du passé, où température et concentration en CO<sub>2</sub> dans l'air étaient au moins égales à celles d'aujourd'hui, nous permettrait dès lors d'améliorer notre compréhension du comportement du système climatique et nous servirait de guide pour prédire le climat futur et ses impacts sur l'environnement global.

## Références

- [1] A. Berger, Support for the astronomical theory of climatic change, *Nature* 268 (1977) 44–45.
- [2] A. Berger, Long-term variations of daily insolation and Quaternary climatic changes, *J. Atmos. Sci.* 35 (12) (1978) 2362–2367.
- [3] A. Berger, M.-F. Loutre, Modelling the climate response to astronomical and CO<sub>2</sub> forcings, *C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. IIa* 323 (1996) 1–16.
- [4] A. Berger, M.-F. Loutre, An exceptionally long interglacial ahead?, *Science* 297 (2002) 1287–1288.
- [5] A. Berger, M.-F. Loutre, Climate 400 000 years ago, a key to the future?, A. Droxler, L. Burckle, R. Moore (Eds.), *Earth's Climate and Orbital Eccentricity: The marine Isotope Stage 11 Question*, *Geophys. Monogr.* 137 (2003) 17–26.
- [6] A. Berger, M.-F. Loutre, Astronomical theory of climate change, *J. Phys.* IV 121 (2004) 1–35.
- [7] A. Berger, M.-F. Loutre, Théorie astronomique des paléoclimats, *C. R. Geoscience* 336 (2004) 701–709.
- [8] A. Berger, M.-F. Loutre, H. Gallée, Sensitivity of the LLN climate model to the astronomical and CO<sub>2</sub> forcings over the last 200 kyr, *Clim. Dyn.* 14 (9) (1998) 615–629.
- [9] M. Claussen, V. Brovkin, R. Calov, A. Ganopolski, C. Kubatzki, Did humankind prevent a Holocene glaciation?, *Clim. Change* 69 (2005) 409–417.
- [10] T.J. Crowley, Are there any satisfactory geologic analogs for a future greenhouse warming?, *J. Clim.* 3 (11) (1990) 1282–1292.
- [11] M. Crucifix, M.-F. Loutre, A. Berger, Comment on “The anthropogenic greenhouse era began thousands of years ago”, *Clim. Change* 69 (2–3) (2005) 13–426.
- [12] P. Crutzen, E.F. Stoermer, The Anthropocene, *Global Change Newslett.* 41 (2000) 17–18.
- [13] A.W. Droxler, J.W. Farrell, Marine Isotope Stage 11, new insights for a warm future, *Global Planet. Change* 24 (1) (2000) 1–78.
- [14] EPICA Community Members, Eight glacial cycles from an Antarctic ice core, *Nature* 429 (6992) (2004) 623–628.
- [15] H. Gallée, J.P. van Ypersele, T. Fichefet, C. Tricot, A. Berger, Simulation of the last glacial cycle by a coupled sectorially averaged climate–ice-sheet model. I. The Climate Model, *J. Geophys. Res.* 96 (1991) 13139–13161.
- [16] J.D. Hays, J. Imbrie, N.J. Shackleton, Variations in the Earth's orbit, Pacemaker of the Ice Ages, *Science* 194 (1976) 1121–1132.
- [17] J.T. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, C.A. Johnson, *Climate Change 2001: The Scientific Basis*, published for the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, 2001.
- [18] G. Kukla, R.K. Matthews, J.M. Mitchell Jr., The end of the present interglacial, *Quat. Res.* 2 (1972) 261–269.
- [19] X.S. Li, A. Berger, M.-F. Loutre, CO<sub>2</sub> and Northern Hemisphere ice volume variations over the Middle and Late Quaternary, *Clim. Dyn.* 14 (7–8) (1998) 537–544.
- [20] M.-F. Loutre, Clues from MIS 11 to predict the future climate – a modeling point of view, *Earth Planet. Sci. Lett.* 212 (1–2) (2003) 213–224.
- [21] M.-F. Loutre, A. Berger, Future climatic changes: are we entering an exceptionally long interglacials?, *Clim. Change* 46 (1–2) (2000) 61–90.
- [22] M.M. Milankovitch, M. Milankovitch, *Kanon der Erdbestrahlung und seine Anwendung auf des Eiszeitenproblem*, Royal Serbian Sciences, Spec. publ. 132, section of Mathematical and natural Sciences, vol. 33, 1941. p. 633, Belgrade. (Canon of Insolation and the Ice Age Problem, English Translation by the Israël Program for the U.S. Department of Commerce and the National Science Foundation, Washington D.C., 1969, and by Zavod za Udzbenike I nastavna Sredstva, in cooperation with Muzej nauke I tehnike Srpske akademije nauka I umetnosti, Beograd, 1998).
- [23] J.-R. Petit, J. Jouzel, D. Raynaud, N.I. Barkov, J.-M. Barnola, I. Basile, M. Bender, J. Chappellaz, M. Davis, G. Delaygue, M. Delmotte, V.M. Kotlyakov, M. Legrand, V.Y. Lipenkov, C. Lorius, L. Pepin, C. Ritz, E. Saltzman, M. Stievenard, Climate and atmospheric history of the past 420 000 years from Vostok ice core, Antarctica, *Nature* 399 (6735) (1999) 429–436.
- [24] W.F. Ruddiman, The anthropogenic greenhouse era began thousands of years ago, *Clim. Change* 61 (2003) 261–293.