

# Influences astronomiques sur le climat du passé

Roland Lehoucq

Astrophysicien au CEA

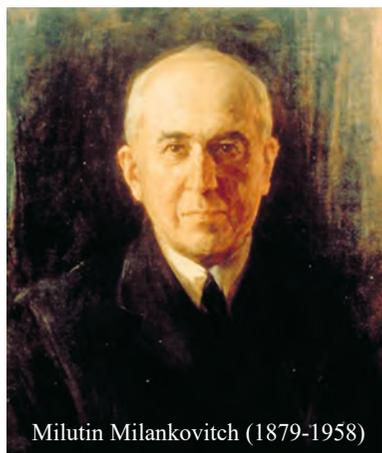


Depuis les travaux du géologue suisse Louis Agassiz, en 1837, on sait que des changements importants du climat avaient eu lieu dans le passé, avec des alternances entre périodes glaciaires et interglaciaires.

Ainsi, le dernier maximum glaciaire est survenu il y a 20 000 ans, période durant laquelle des glaciers recouvraient une très grande partie de l'Amérique du Nord et s'étendaient en Europe sur toute la Scandinavie. En 1842, le mathématicien français Joseph-Alphonse Adhémar fut le premier à proposer que des variations de l'orbite de la Terre autour du Soleil pourraient être responsables de ces grands cycles climatiques. Sa théorie suggérait que les glaciations étaient produites par les variations de la durée des saisons dues à la précession des équinoxes. Cette proposition fut reprise en 1864 par le scientifique écossais James Croll qui élaborait, de façon plus détaillée, la première théorie astronomique des paléoclimats.

L'intérêt pour la théorie astronomique des climats prit un nouvel essor entre 1924 et 1940 avec la publication des travaux du géophysicien serbe Milutin Milanković.

Selon lui, les variations quasi-périodiques des paramètres de l'orbite terrestre (excentricité, obliquité et précession de l'axe de rotation, voir Figures 1 à 3) produisent un forçage sur le climat en faisant varier le flux énergétique solaire. Ces variations sont amplifiées par les rétroactions du système climatique terrestre comme l'albédo de surface, les gaz à effet de serre ou les courants marins.



Milutin Milankovitch (1879-1958)

## Variations séculaires de l'excentricité de l'orbite terrestre.

Rappelons d'abord que l'excentricité caractérise le degré d'aplatissement d'une ellipse : plus elle est élevée, plus l'ellipse s'éloigne du cercle.

Le mouvement de la Terre autour du Soleil suit une ellipse que l'action gravitationnelle des autres planètes tend à déformer. L'excentricité de l'orbite terrestre est actuellement très faible, de l'ordre de 0,017 et les perturbations planétaires entraînent des variations lentes de celle-ci qui varie entre 0,005 (un quasi-cercle) et 0,058 (ellipse légèrement aplatie).

En première approximation, ces variations résultent de la combinaison de signaux cycliques de périodes de 95 000, 123 000 et 413 000 ans.

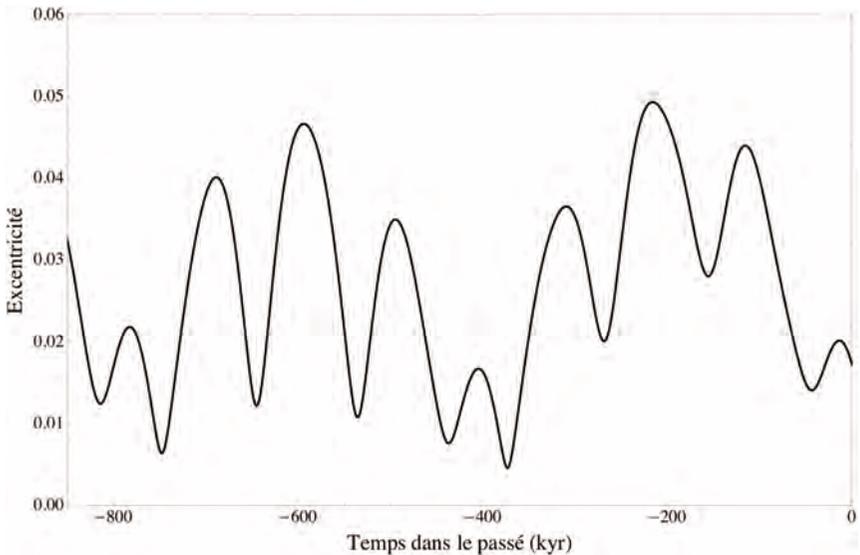
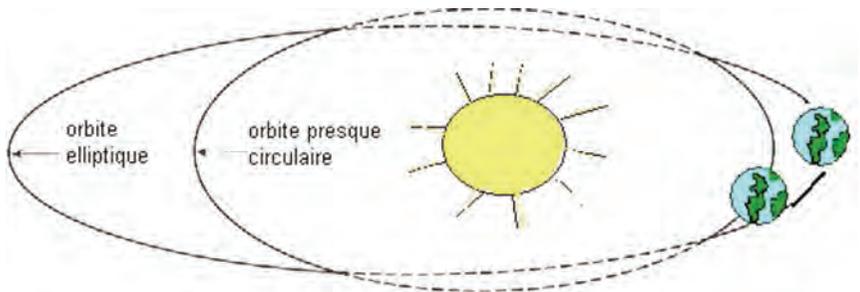


Figure 1 : *Excentricité*  
Variations séculaires de l'excentricité.



## Variations séculaire de l'obliquité de la Terre

L'obliquité est l'inclinaison de l'axe de la Terre par rapport à son plan orbital. L'obliquité est à l'origine des saisons et module au fil de l'année la puissance surfacique solaire reçue aux différentes latitudes. Elle évolue aussi au cours du temps à cause des perturbations planétaires.

L'oscillation de l'obliquité terrestre reste très limitée, variant de  $22,1^\circ$  à  $24,5^\circ$  avec une période voisine de 41 000 ans.

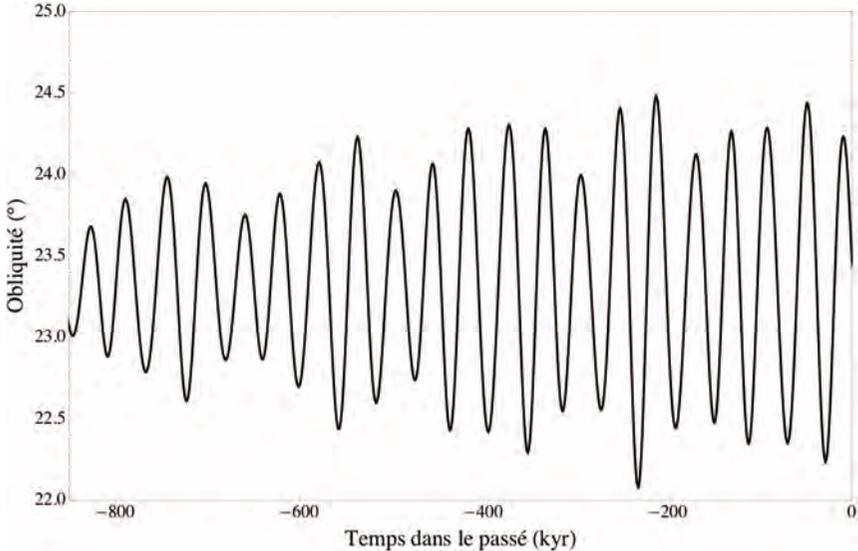
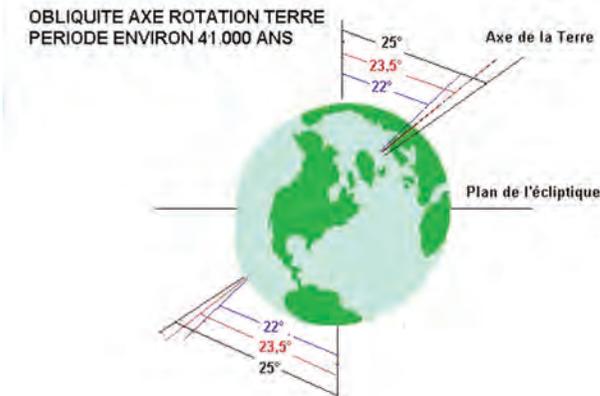


Figure 2 : *Obliquité*  
Variations séculaires de l'obliquité.



FX

## Variations séculaires de la précession climatique

La précession est un changement de direction de l'axe de la Terre. Celle-ci n'étant pas sphérique mais légèrement aplatie sur les pôles, les forces gravitationnelles exercées par le Soleil et la Lune tendent à changer la direction l'axe de rotation terrestre. Celui-ci décrit alors un cône, comme le ferait l'axe d'une toupie, et fait un tour complet en environ 25 700 ans. Cela entraîne un décalage régulier de la position des solstices et des équinoxes. A cet effet s'ajoute le fait que le grand axe de l'ellipse orbitale terrestre tourne aussi progressivement autour du Soleil. Finalement, la position de la Terre sur l'ellipse à un moment précis de l'année, l'équinoxe de printemps par exemple, évolue dans le temps.

Ce phénomène de précession climatique s'effectue avec des périodes proches de 19 000 et 23 000 ans. Plus concrètement, le solstice d'été a actuellement lieu vers le 21 juin à proximité de l'aphélie (aux alentours du 4 juillet), ce qui permet de tempérer les étés de l'hémisphère Nord. A l'inverse, nos hivers sont moins rigoureux car le solstice d'hiver a lieu vers le 21 décembre, non loin du passage au périhélie (aux alentours du 4 janvier). L'hémisphère Sud est dans la situation opposée. Il y a environ 11 500 ans, la situation était inversée, plaçant le solstice d'été au périhélie de l'orbite et engendrant ainsi des étés très chauds et des hivers très froids dans l'hémisphère Nord.

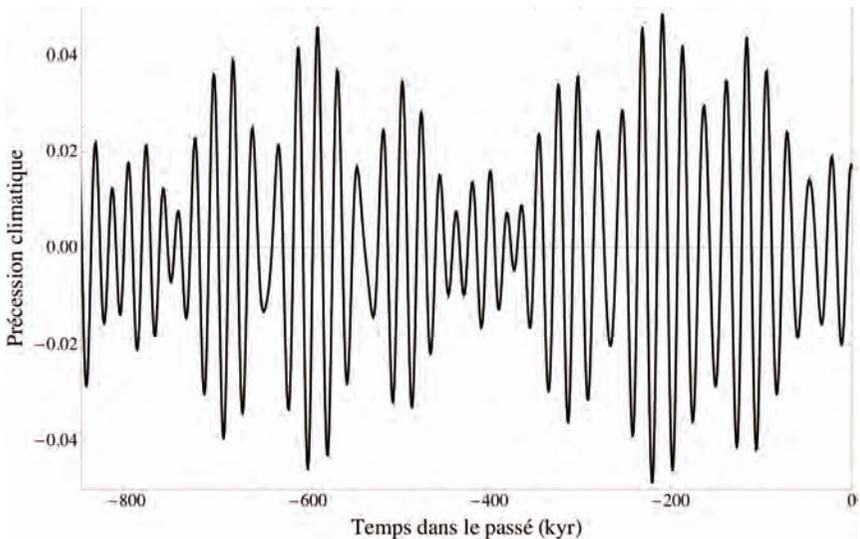


Figure 3 : *Précession*  
Variations séculaires de la précession climatique.

A partir des années 1950, la conjugaison de l'amélioration des solutions astronomiques et des données géologiques et géochimiques a permis de tester et de valider progressivement l'idée d'une influence astronomique dans la variabilité climatique ancienne. Mais c'est un article publié en 1976 par Hays, Imbrie et Shackleton qui démontra pour la première fois la présence des cycles de l'excentricité, de l'obliquité et de la précession dans la variation de la température de surface de l'océan Indien. Leur estimation de température se fondait sur l'analyse de deux carottes de sédiments déposés pendant les 450 000 dernières années. Le spectre de Fourier de leurs données permit de montrer que les fréquences fondamentales des variations climatiques étaient très proches de celles des cycles astronomiques. En 2007, le projet EPICA (European Project for Ice Coring in Antarctica) a foré les glaces profondes de l'Antarctique ce qui a permis de remonter aux variations de température jusqu'à 800 000 ans dans le passé (Figure4).

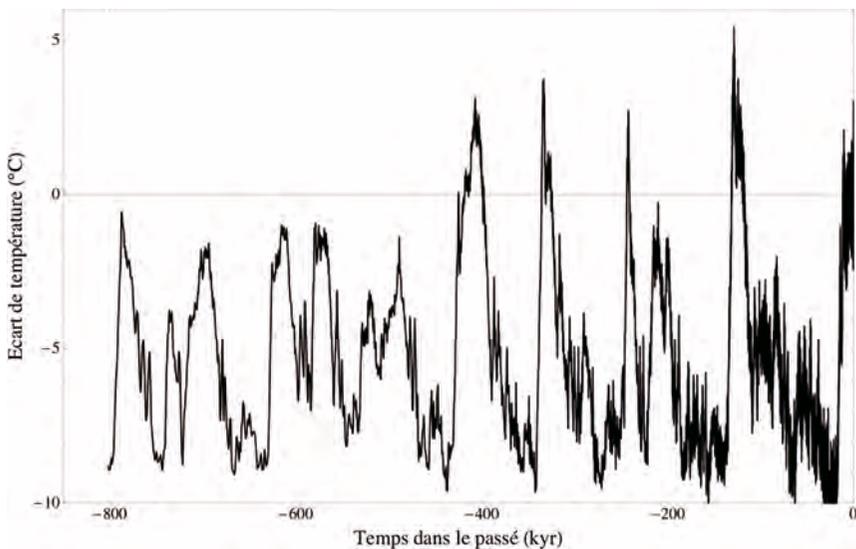


Figure 4 : *EPICA*

Variations de la température (écart avec la moyenne constatée sur le dernier millénaire) estimée à partir des mesures de l'abondance de deutérium dans une carotte glaciaire prélevée à Dôme C (Antarctique). Cette carotte a permis de remonter 800 000 ans dans le passé.

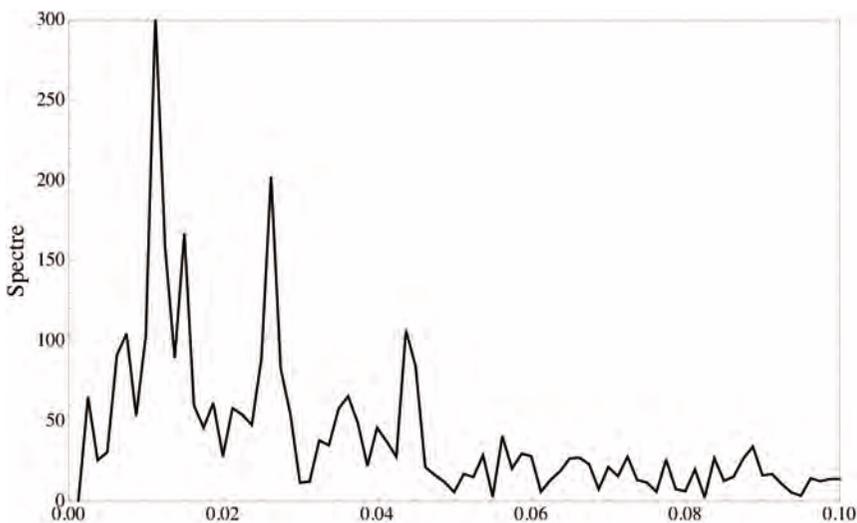


Figure 5 : *Spectre*

Spectre de Fourier des variations séculaires de température relevée à Dôme C. Les principaux pics correspondent à des périodes de 89 000, 38 000 et 23 000 ans, proches des périodes astronomiques.

Les outils et les données (voir la webographie) désormais disponibles permettent de refaire le cheminement intellectuel qui a permis d'aboutir aux théories astronomiques du climat. Là encore, l'analyse spectrale de ces variations de température permet de vérifier l'importance des cycles astronomiques terrestres (Figure 5).

Indubitablement, les changements orbitaux de la Terre jouent le rôle d'un métronome pour les variations climatiques séculaires.

**R.L.**

#### Webographie pour en savoir plus :

- J. D. Hays, J. Imbrie, and N. J. Shackleton, *Variations in the earth's orbit: pace-maker of the Ice Ages*, Science 194 (1976), 1121-1132.  
<http://www.mantleplumes.org/WebDocuments/Hays1976.pdf>
- J. Jouzel et al., *Orbital and millennial Antarctic climate variability over the past 800,000 years*, Science 317 (2007), 793-797.
- Les données du forage EPICA sont disponibles sur le site : <http://www.ncdc.noaa.gov/paleo/pubs/jouzel2007/jouzel2007.html>
- Les variations orbitales terrestres depuis 5 millions d'années calculées par l'astronome belge André Berger : <ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/paleo/insolation/>
- Site du logiciel Analyseries qui permet de faire l'analyse spectrale des variations paléoclimatiques : <http://www.lscce.ipsl.fr/logiciels/>
- Le travail d'un étudiant qui analyse les variations paléoclimatiques en terme de transformée de Gabor (au lieu de Fourier), qui est une analyse en ondelettes : <http://johncarlosbaez.wordpress.com/2013/01/30/milankovich-vs-the-ice-ages/>