

LES CYCLES DE MILANKOVITCH



**LA THEORIE ASTRONOMIQUE DU
CLIMAT**

INTRODUCTION

Au 19ème siècle, pour expliquer la présence de blocs erratiques loin des glaciers de montagnes, le climatologue suisse Louis Agassiz formula sa théorie des glaciations.

Il émettait donc l'idée que le climat, sur Terre, n'avait pas toujours été comme aujourd'hui. Cependant, une fois sa théorie vérifiée, il a fallu expliquer l'origine de ces changements climatiques qui ont lieu depuis la formation de la Terre.

Pour expliquer les glaciations survenues au paléozoïque, on a eu recours à la tectonique des plaques. On sait donc aujourd'hui que la grande glaciation de l'Ordovicien (à l'origine d'une extinction massive) est due à l'arrivée en position polaire d'un super continent appelé Gondwana (regroupant l'Amérique du sud, l'Afrique, l'Australie, l'Inde, et l'Antarctique) .

Cependant, la tectonique des plaques n'explique pas les variations climatiques du quaternaire. La clef du mystère a été découverte en 1941 par le météorologue serbe Milutin Milankovitch: il a mis en évidence trois cycles de variations des paramètres orbitaux de la Terre. Cette théorie, appelée théorie astronomique des climats, ou théorie des cycles de Milankovitch, a été reprise et étoffée par le mathématicien et astronome belge André Berger en 1988.

Ce sont ces cycles que nous allons présenter dans ce document, ainsi que leurs conséquences sur le système climatique terrestre.

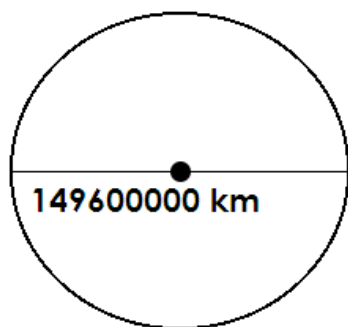
Ce document est la version complétée et actualisée d'un travail de recherche bibliographique que j'ai réalisé en 1998 à l'occasion d'un stage au Palais de la Découverte. Je dédie ce travail à mon idole, Anaïs Baydemir, et ses collègues du service météo de France Télévisions, qui font un travail remarquable pour nous proposer un bulletin météo de grande qualité.

Le présent document reprend au format PDF l'ensemble des pages de la section « Cycles de Milankovitch » de mon site internet.

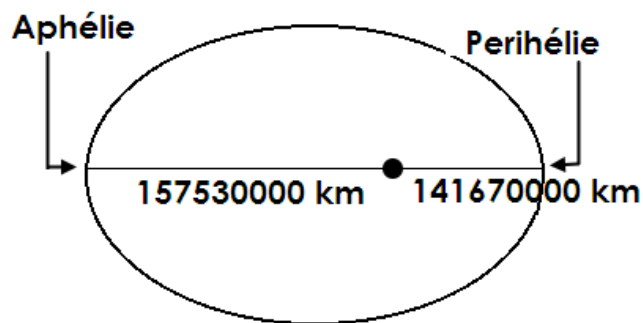
PREMIER CYCLE: L'EXCENTRICITÉ DE L'ORBITE TERRESTRE

L'excentricité de l'orbite de la Terre est un paramètre variable. Actuellement, elle est de 0.0167, mais elle varie entre 0 et 0.053 sur une période de 100000 ans. Milankovitch soupçonnait aussi l'existence d'un cycle de 400000 ans, dont l'existence a été confirmée récemment.

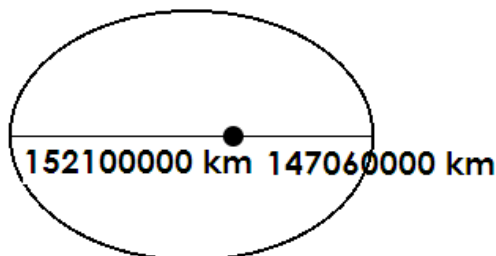
VARIATIONS DE L'EXCENTRICITÉ DE L'ORBITE TERRESTRE



Excentricité minimale (e=0)



Excentricité maximale (e=0,053)



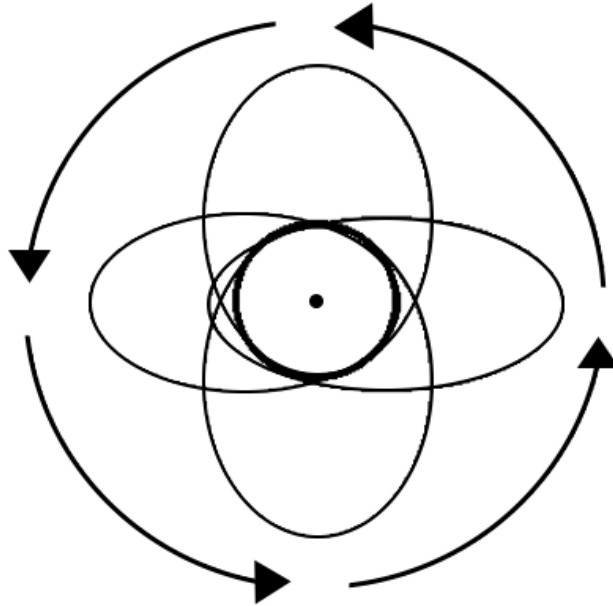
Excentricité actuelle (E=0,017)

L'excentricité de l'orbite terrestre varie entre 0 (Orbite circulaire) et 0,053. Elle suit un cycle de 100000 ans, mais il existe aussi un cycle plus long, de 400000 ans. Ce dernier n'a été confirmé que récemment, car les données climatiques ne remontaient pas suffisamment loin à l'époque pour pouvoir voir ce cycle.

Les astronomes ont aussi mis en évidence un phénomène de précession de l'orbite terrestre, de période égale à 126000 ans. Cette précession (voir la figure 2), consiste en la rotation de l'orbite autour du soleil. Nous verrons plus loin que la variation de la longitude héliocentrique du périhélie découle en partie de ce cycle de 126000 ans.

Les saisons seront alors plus accentuées si l'excentricité de l'orbite est maximale, la combinaison avec la variation d'obliquité amplifiant encore les contrastes saisonniers.

PRÉCESSION DE L'ORBITE TERRESTRE



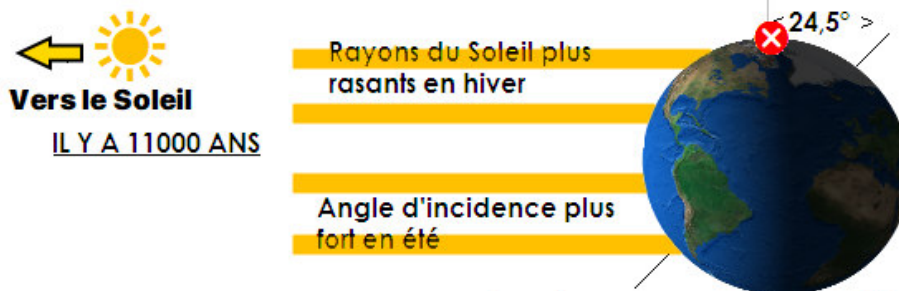
Les flèches indiquent le sens de rotation de l'orbite terrestre. Il en résulte un déplacement de la date du passage au périhélie et de la date du passage à l'aphélie.

Ces variations sont induites par l'attraction gravitationnelle des autres planètes, Mars, Jupiter et Vénus notamment.

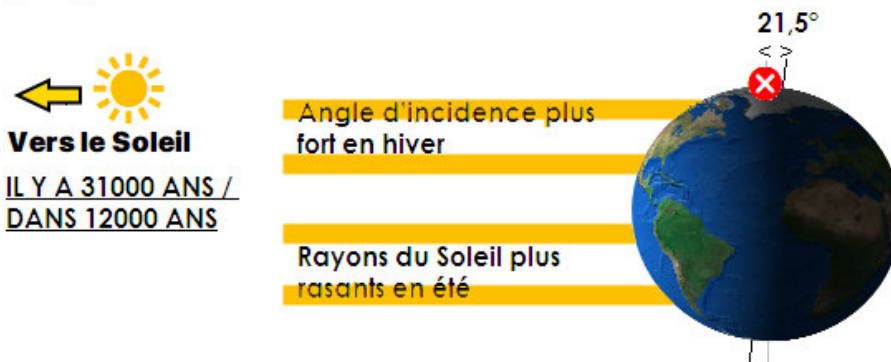
DEUXIÈME CYCLE: VARIATIONS DE L'OBLIQUITÉ DE LA TERRE

LES VARIATIONS DE L'OBLIQUITÉ DE L'AXE DE ROTATION DE LA TERRE

Le point indiqué par le symbole **⊗** est fixe en latitude pour montrer les variations de l'angle d'incidence des rayons solaires.



Une plus grande partie du globe est éclairée en permanence en été et plongée dans l'obscurité en hiver.



Le contraste entre l'été et l'hiver est atténué si l'inclinaison diminue, et renforcé si l'inclinaison augmente.

N.B. Une inclinaison nulle (axe de rotation vertical) entraînerait une absence de saisons

On est généralement tenté de croire que l'obliquité de l'axe de rotation de la Terre est constante. En réalité, l'attraction gravitationnelle de la Lune la fait varier. Elle oscille entre 21,5 et 24,5° selon une période de 41000 ans.

. La conséquence en est un renforcement du contraste entre les saisons lorsque l'inclinaison est maximale (hiver plus rigoureux , été plus chaud), du fait de la variation de l'angle d'incidence des rayons du soleil induite par ce cycle.

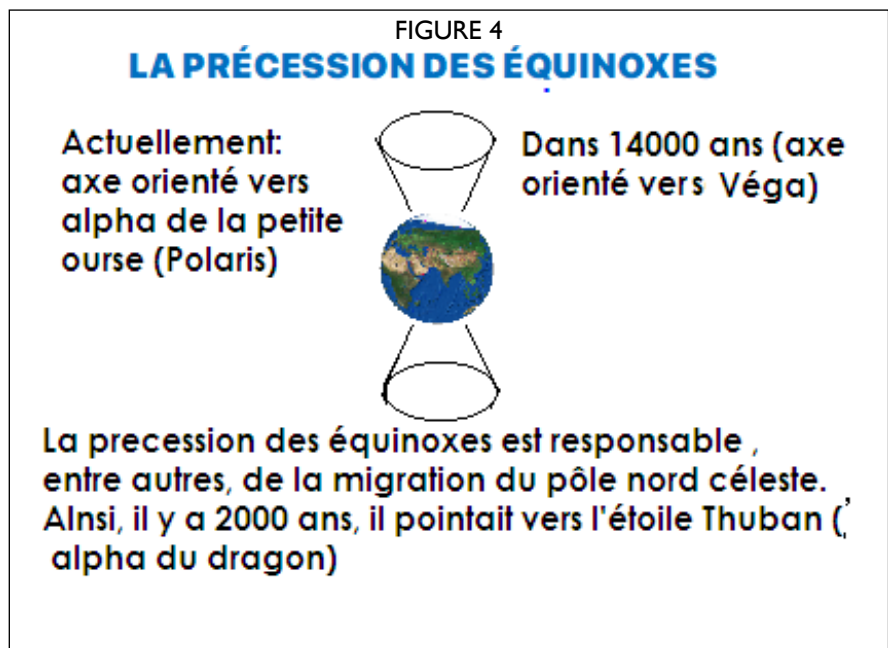
Il y a 11000 ans , l'inclinaison était maximale(24,5°). Il y a 31000 ans, elle passait par un minimum (21.5 à 22°). Actuellement, l'inclinaison diminue, et elle sera de nouveau minimale dans 12000 ans. Selon la valeur de l'obliquité, la limite des zones qui sont éclairées en continu pendant 6 mois puis plongées dans l'obscurité pendant 6 autres mois oscille de ± 250 kms autour de la limite actuelle (cercles polaires).

Les variations d'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre est liée à l'attraction gravitationnelle de la Lune et des autres planètes. La Lune tend cependant à stabiliser ces variations. En effet, sans notre satellite, celles-ci seraient beaucoup plus importantes, et la Terre serait hostile à la vie. Notre planète pourrait même basculer et se retrouver « la tête en bas » comme c'est le cas aujourd'hui pour Vénus (Qui tourne sur elle même dans le sens rétrograde).

TROISIEME CYCLE: LA PRÉCESSION DES ÉQUINOXES

La Terre est aplatie aux pôles et renflée à l'équateur. La combinaison de cette propriété avec la rotation de la Terre sur elle-même confère à l'axe de rotation de notre planète un mouvement, dit de précession, semblable à celui de l'axe d'une toupie. Ce mouvement est lié à l'attraction gravitationnelle du Soleil, de la Lune, et des autres planètes du système solaire, qui induisent un couple de forces qui tend à faire basculer l'axe de rotation de la Terre et à l'amener dans

une position perpendiculaire au plan de l'écliptique. Ce mouvement est contrebalancé par la force centrifuge due à la rotation de la Terre; la résultante des deux forces induisant une précession de l'axe de rotation de la Terre, qui est actuellement incliné de $23^{\circ}26'$ par rapport à l'axe des



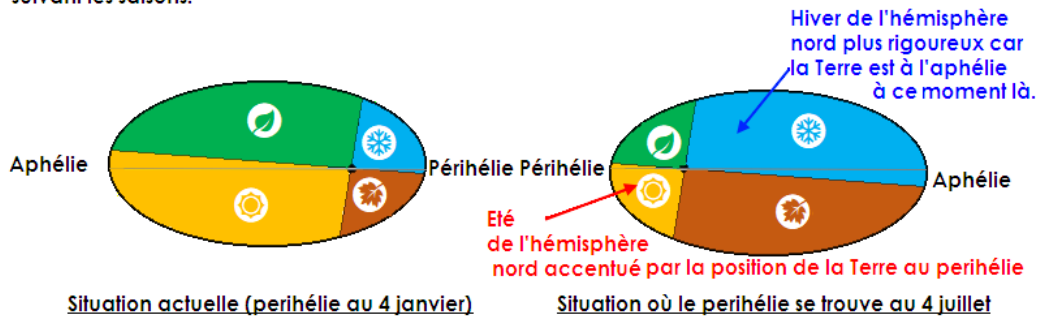
pôles de l'écliptique. La précession des équinoxes a une double périodicité : 19000 et 23000 ans. La conséquence la mieux connue est que les pôles célestes se déplacent (voir figure ci-dessus). L'autre effet de ce mouvement est une précession dans le sens rétrograde du point vernal (direction du soleil à l'équinoxe de printemps), ce qui se traduit par le déplacement des solstices et des équinoxes (d'où le nom de ce mouvement) par rapport à la position de la Terre sur son orbite. Ainsi, il y a 13000 ans, les saisons étaient inversées par rapport à aujourd'hui (voir schéma ci-dessus).

L'hiver de l'hémisphère nord avait alors lieu lorsque la Terre était plus éloignée du soleil, l'été ayant lieu au passage au périhélie de notre planète. Le contraste entre les saisons se trouvait donc accentué. Aujourd'hui, cette situation a lieu dans l'hémisphère Sud, et le contraste entre les saisons est moins important car cet hémisphère est essentiellement recouvert d'océans, tandis que la plupart des terres émergées se regroupent dans l'hémisphère Nord. Ce mouvement paraît simple, mais la réalité est différente: au cycle de 23000 ans s'ajoute un cycle d'une vingtaine d'années, consistant en de petites oscillations de l'axe de rotation de la Terre autour de sa position moyenne, cycle appelé

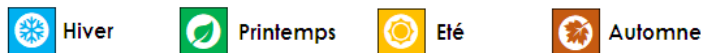
"nutation"¹ par les astronomes. On notera que les effets de la précession des équinoxes sont plus importants aux basses latitudes qu'aux pôles. De plus, une modification des moussons et de la circulation océanique aurait rendu le Sahara verdoyant il y a 8000 ans. A. Berger pense que cela est dû à la précession des équinoxes, mais nous n'en savons rien pour l'instant.

PRÉCESSION DU PÉRIHÉLIE DE L'ORBITE TERRESTRE ET INVERSION DES SAISONS

Ce phénomène est provoqué par la combinaison de la précession des équinoxes et de la précession de l'orbite terrestre. Il a une période de 21500 ans et il est responsable d'une variation d'insolation suivant les saisons.

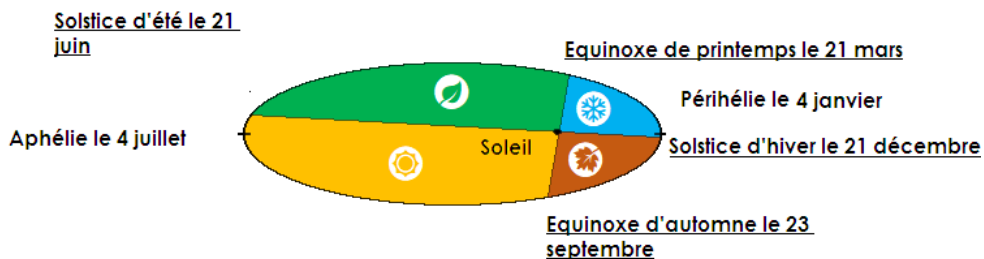


N.B. L'hémisphère sud ressent moins ces contrastes car il est constitué essentiellement d'océans.



Une inversion des saisons entre les 2 hémisphères se produit également tous les 12000 ans à cause de la précession des équinoxes. Ainsi, il y a 12000 ans, le rythme des saisons de l'hémisphère nord était celui que connaît actuellement l'hémisphère sud, et vice-versa.

Les saisons aujourd'hui



Les saisons il y a 13000 ans

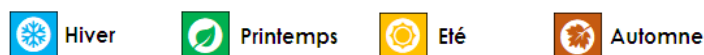
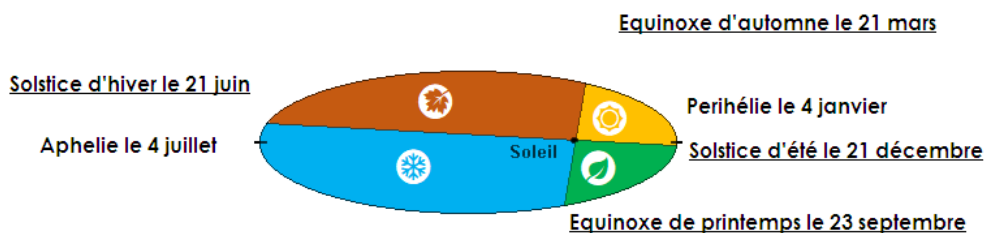
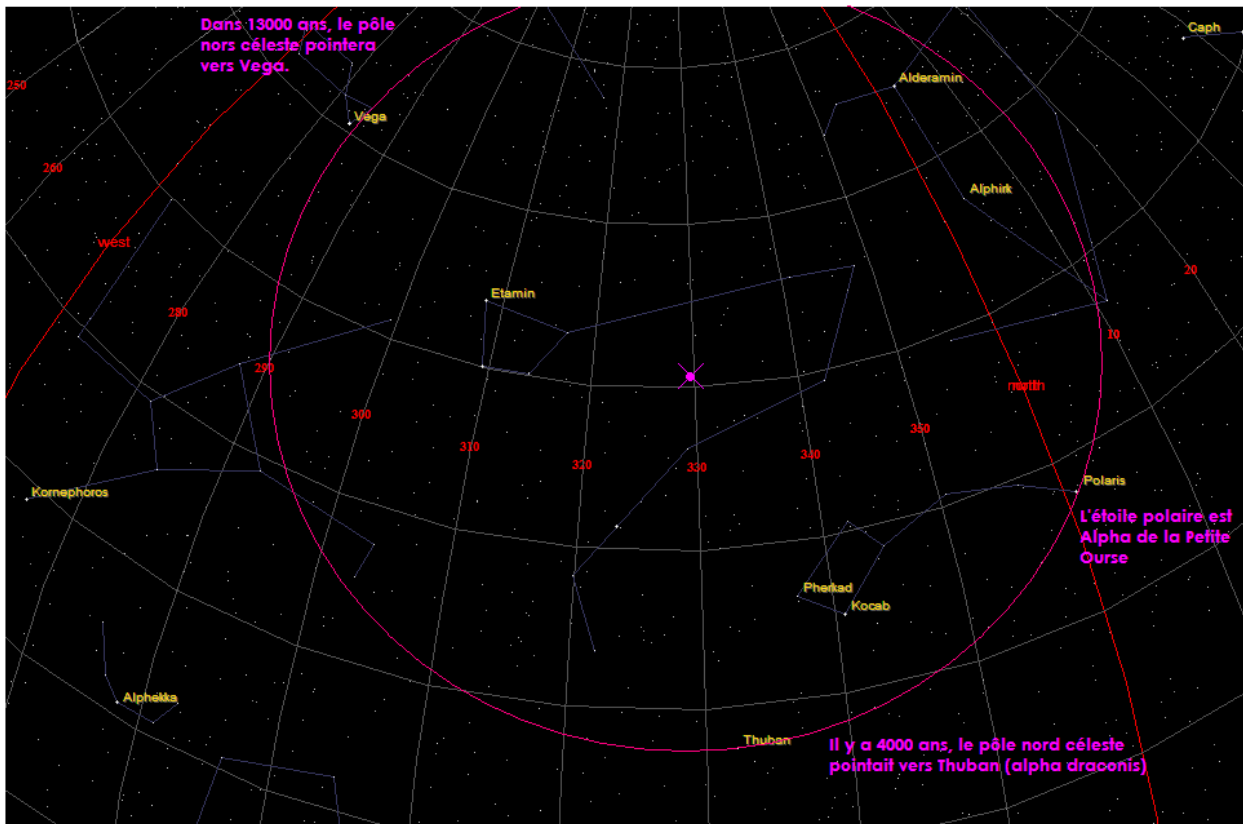


Figure 5

¹Ces oscillations n'ont rien à voir avec la variation de l'obliquité de la Terre, que nous avons vu dans le précédent chapitre.

La précession des équinoxes est également à l'origine de celle du pôle céleste. Le pôle nord céleste pointait vers l'étoile Alpha du Dragon (Thuban) il y a 4000 ans.

LA PRÉCESSION DU PÔLE CÉLESTE, UNE CONSÉQUENCE DE LA PRÉCESSION DES ÉQUINOXES



Le pôle céleste tourne autour du point marqué en rouge sur la carte du ciel. Il y a 4000 ans, le pôle céleste pointait en direction de Thuban (Alpha du Dragon) ; dans 13000 ans, Véga (Alpha de la Lyre) deviendra l'étoile polaire. Le pôle sud ne pointe, lui, vers aucune étoile brillante.

Figure 6

Aujourd'hui, le pôle nord céleste pointe vers Alpha de la Petite Ourse. Dans 13000 ans, il pointera vers Véga (Alpha de la Lyre), pour revenir vers Thuban dans 19000 ans, puis de nouveau vers notre étoile polaire dans 23000 ans.

Le pôle sud céleste ne pointe actuellement vers aucune étoile brillante², mais la prochaine étoile polaire australe pourrait être Alpha du Centaure.

La précession des équinoxes a été découverte bien avant que Milutin Milankovitch ne fasse le lien avec le cycle des glaciations découvert au XIX^{ème} siècle par Louis Agassiz. C'est l'astronome grec Hipparque (190-120 avant J.C.) qui l'a découvert, en comparant les positions des étoiles qu'il avait compilées dans un catalogue, avec celles calculées 150 ans plus tôt par un autre astronome grec, Timocharis.

² L'étoile polaire sud est actuellement Sigma Octantis, une petite étoile peu brillante et difficile à voir à l'œil nu.

La précession des équinoxes est, rapellons le, liée à la force gravitationnelle de la Lune et du Soleil. Elle est associée à des oscillations de l'axe de rotation de la Terre. Ces oscillations sont appelées nutations, et la principale, dite nutation de Bradley a une amplitude de 9,2 secondes d'angle et une période de 18,6 ans. Il existe également des nutations de plus faibles amplitudes et de périodes plus courtes (annuelle, semi annuelle...). Ces nutations sont induites par la rotation du noyau terrestre, qui comporte une couche externe liquide et une couche interne solide.

LA NUTATION, UNE COMPOSANTE DE LA PRÉCESSION DES ÉQUINOXES

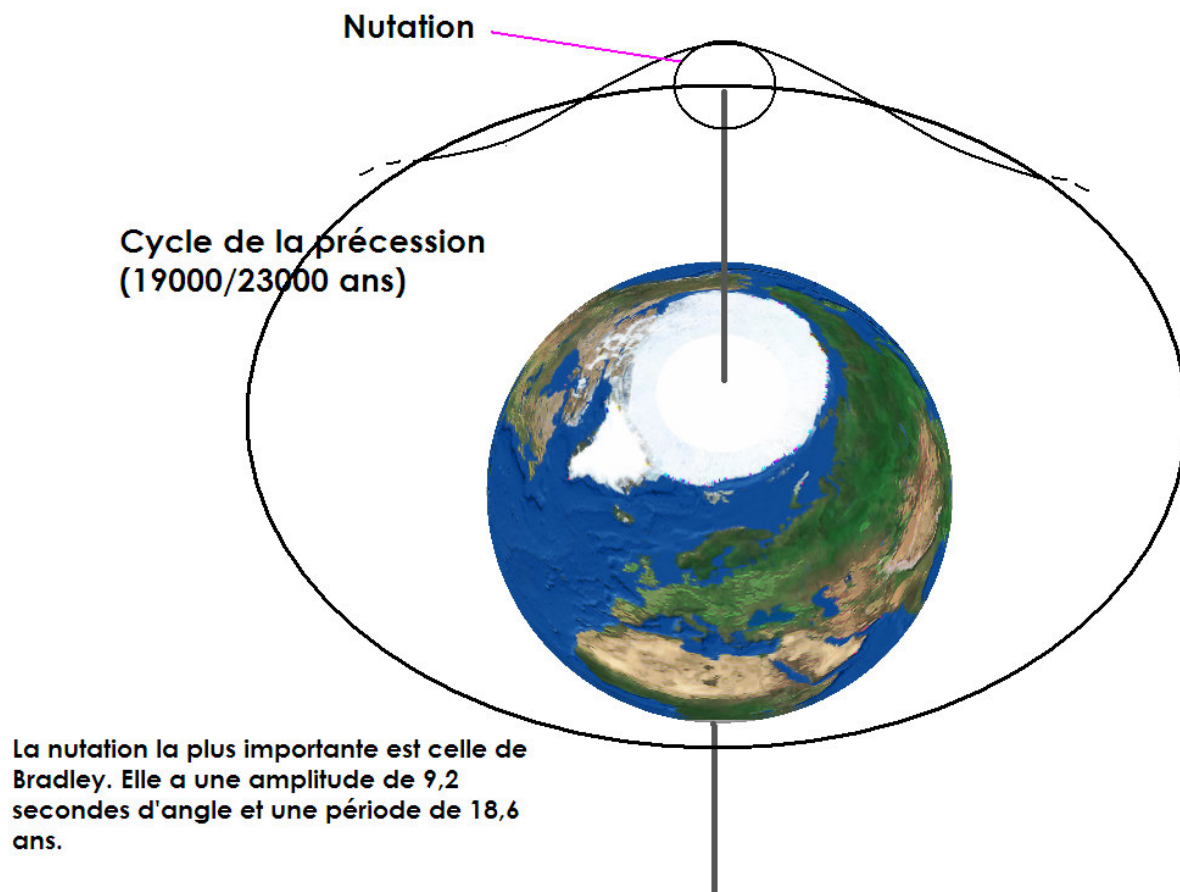


Figure 7

Ce cycle peut influencer le climat terrestre, mais dans une moindre mesure que la précession elle-même. Par ailleurs, la nutation pourrait avoir un lien avec le cycle de variation de la hauteur des marées d'équinoxes, qui a une période de 18 ans environ. (Pour plus d'informations à ce sujet, voyez le site internet du SHOM, <http://www.shom.fr>).

A ceci, s'ajoute le phénomène de la polhodie, un phénomène de précession de faible ampleur des pôles terrestres, découvert en 1783 par le mathématicien Leonhard Euler. Cette précession, liée au fait que la Terre n'est pas rigide, se fait en 433 jours (Cycle dit de Chandler ; à noter qu'Euler avait postulé que ce cycle durait 305 jours, une valeur qui s'est révélée sous-estimée.) ; le pôle oscille de $\pm 0,325$ secondes d'arc autour du pôle d'inertie de la Terre (Soit, rapporté à la circonférence terrestre, une oscillation de ± 20 mètres). Compte-tenu de sa faible ampleur, la polhodie n'a pas d'influence sur les saisons.

AUTRES PHÉNOMÈNES ASTRONOMIQUES POUVANT INFLUENCER LE CLIMAT TERRESTRE

Trois autres phénomènes astronomiques peuvent encore influencer le climat de la Terre. En premier lieu, l'activité solaire, a une influence significative. On connaît, en effet, des cycles de 11 ans (cycle de Schwabe), 80-90 ans, et 180 ans dans la variation du nombre de taches solaires, et, donc, de l'activité solaire. Des minimums dans le nombre de taches solaires (minimum de Wolf 1282-1342, minimum de Spörer 1416-1534, minimum de Maunder 1645-1715) ont été enregistrés, et ils correspondent parfaitement à des périodes de l'histoire de France où les hivers ont été très rigoureux. Ces minimums seraient dus à une augmentation de 3‰ du diamètre du soleil, liée à une dilatation de son enveloppe externe, ce qui aurait entraîné un refroidissement de la photosphère, et, donc, une réduction du nombre de taches solaires. Cela a entraîné une baisse de l'insolation de la Terre, probablement à l'origine du « petit âge glaciaire » qui a occasionné une baisse de 1°C de la température moyenne, entre 1400 et 1800. De même, la période chaude du Crétacé est probablement liée à l'activité solaire. Une augmentation inexplicée de la température des couches externes du soleil aurait renforcé l'insolation de la Terre, ce qui aurait augmenté de 4 à 5 degrés la température moyenne de la Terre.

On peut aussi citer le ralentissement de la rotation de la Terre, provoqué par des frottements liés aux effets de marée induits par l'attraction gravitationnelle de la Lune. Ce ralentissement provoque un allongement de la durée du jour, et, par conséquent, un allongement de la durée d'ensoleillement quotidien.

Enfin, la lente révolution (un cycle dure 250 millions d'années) du système solaire autour du centre de notre galaxie entraînerait périodiquement ce dernier dans des régions à forte concentration en poussières, ce qui réduirait, selon A.Berger, l'insolation sur Terre. Cela pourrait avoir été le cas au Précambrien, où l'insolation était égale à 75% de l'insolation actuelle. Cependant, cela était compensé par la forte teneur en CO₂ de l'atmosphère (plus de 30% à l'époque, selon l'exposition "Terre et vie").

Il est à noter que des variations climatiques existent à l'échelle de la centaine de millions d'années, mais celles-ci sont en partie liées à la dérive des continents.

INFLUENCE DES CYCLES DE MILANKOVITCH SUR L'INSOLATION

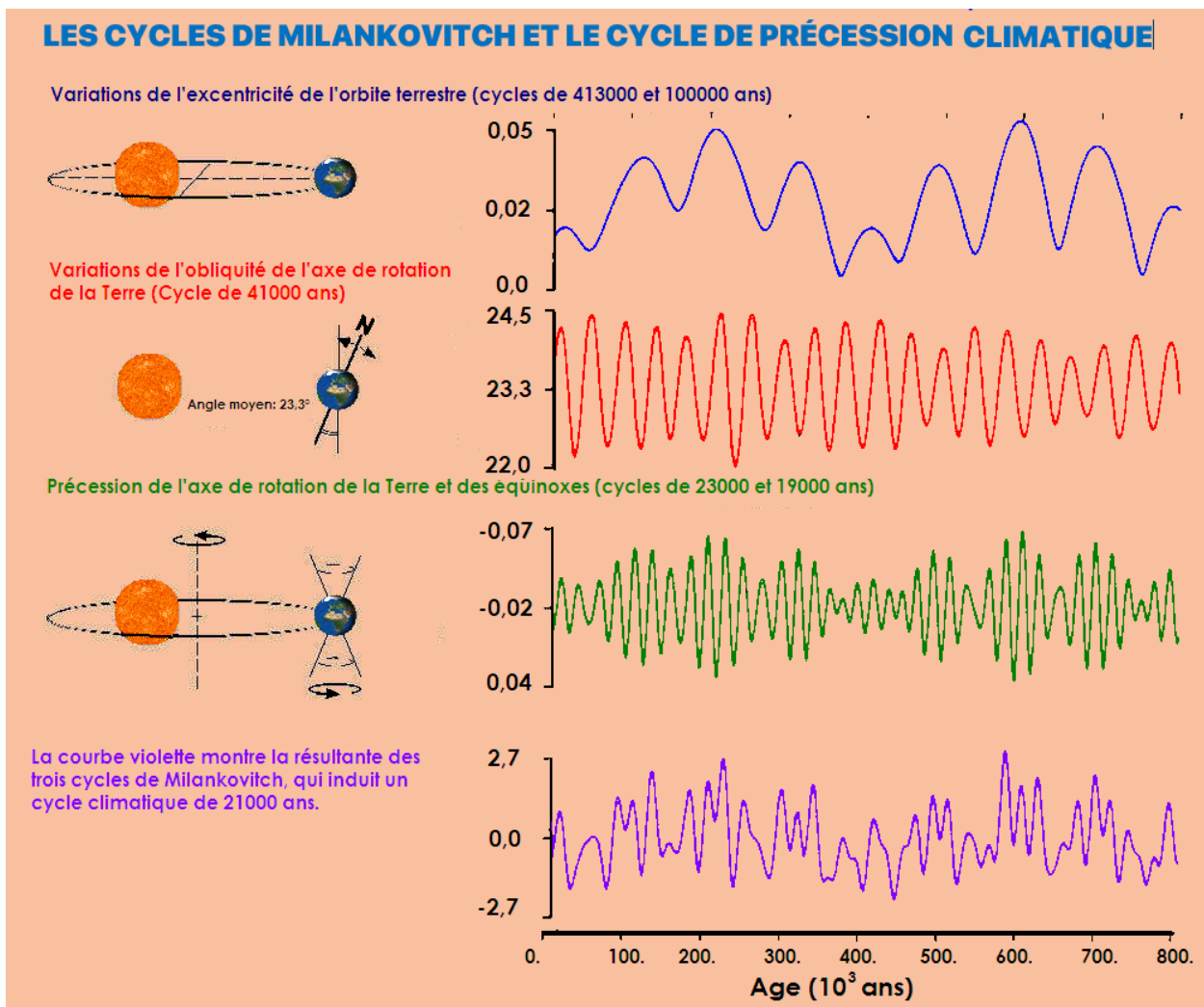
Les graphiques insérés entre les pages 10 et 11 montrent les variations d'insolation entraînées par les trois cycles de Milankovitch.

La variation de l'excentricité de l'orbite terrestre (premier graphique) entraîne des variations assez faibles de l'insolation ($\pm 2 \text{ W}\times\text{m}^{-2}$ au maximum).

La variation de l'obliquité de l'axe de rotation (deuxième graphique) entraîne des variations d'insolations moins négligeables ($\pm 15 \text{ W}\times\text{m}^{-2}$ au maximum).

La précession des équinoxes (troisième graphique) est le cycle qui influence le plus le climat: elle entraîne des variations d'insolations de $\pm 50 \text{ W}\times\text{m}^{-2}$ au maximum, ce qui suffit à provoquer des glaciations. En effet, le cycle suivi par les glaciations a une période proche de celle de la précession des équinoxes (19000 ans). On appelle cela la précession climatique.

La combinaison de l'ensemble des cycles donne un cycle de glaciation d'environ 100000 ans. Actuellement, nous sommes en période interglaciaire, et ce depuis 10000 ans. La précédente glaciation a duré pendant 100000 ans, et ce devrait être le cas pour la prochaine.



Voici, pour finir, un tableau, adapté d'un site internet américain, qui récapitule les périodes de 5 harmoniques principales pour chacun des 3 cycles de Milankovitch.

Les différentes harmoniques des cycles de Milankovitch						
	Precession		Obliquité		Excentricité	
Rang	Period e (ans)	Amplitude relative	Period e (ans)	Amplitud e relative	Period e (ans)	Amplitude relative
1	23716	1,0	41000	1,0	41288 5	1,0
2	22428	0,871	39730	0,3481	94945	0,7909
3	18976	0,6989	53615	0,2555	12329 7	0,6818
4	19155	0,5269	40521	0,1682	99590	0,6091
5	19261	0,1828	28910	0,1267	13124 8	0,5273
Moyenne pondérée	21383		41615		110375	

CONCLUSION

En extrapolant, à partir des calculs de Milankovitch, la valeur de l'insolation sur les 250000 dernières années, les scientifiques ont réussi à corréliser les variations de température à la surface de la Terre avec les trois cycles décrits dans ce document. On a donc, grâce à Milutin Milankovitch, réussi à déterminer les causes des changements climatiques passés. Toujours d'après ses calculs, les climatologues ont pu prévoir les changements climatiques à long terme: quelque soit le réchauffement occasionné par l'activité humaine, la Terre devrait connaître une nouvelle glaciation dans 20000 ans et ce jusque dans 60000 ans, et la période froide que subit la Terre depuis l'arrivée, au Miocène, de l'Antarctique en position polaire³, prendra fin dans 2 millions d'années selon A.Berger. Par ailleurs, il a été prouvé que des cycles de Milankovitch existent aussi sur la planète Mars: ainsi, la planète rouge connaît une précession des équinoxes d'une périodicité de 171000 ans. L'inclinaison de son axe de rotation varie selon une périodicité de 124000 ans, entre 15 et 35° (L'inclinaison actuelle étant de 24°; cette variation plus importante que la Terre s'explique car les deux petits satellites de Mars, Phobos et Deimos, sont trop petits pour entraîner une stabilisation de l'axe de rotation de la planète rouge. Ce n'est pas le cas sur Terre, où la présence de la lune limite à 2,5° l'amplitude de la variation de l'inclinaison de l'axe de rotation de notre planète). Enfin, l'orbite de Mars voit son excentricité varier selon une périodicité de 100000 ans, à cause de l'influence gravitationnelle de la planète Jupiter.

³L'arrivée en position polaire de l'Antarctique a induit la formation de la calotte glaciaire, ce qui a entraîné un refroidissement global de la Terre, il y a 15 millions d'années

BIBLIOGRAPHIE

Dictionnaire du climat, Larousse

La terre et l'univers collectif Hachette collection synapse

Gros temps sur la planète J. C. Duplessy et Pierre Morel Odile Jacob, collection Points

Le climat de la Terre Robert Sadourny Flammarion, collection Dominos

Le climat A.Berger éditions DeBoëck

Cosmographie, par Denis Savoie, éditions H&O Sciences