Paramètres de Milankovitch et réchauffement climatique

Bernard Beauzamy

25 mars 2023

La récente conférence de Paul Deheuvels "Le climat : beaucoup de bruit pour rien", disponible sur notre chaîne YouTube (https://www.youtube.com/watch?v=Zeegk_kzgmg) a recueilli plus de 34 000 vues à ce jour (24/03/2023). Elle suscite des commentaires en très grand nombre. Une question qui revient fréquemment est : quelle est l'influence des paramètres de Milankovitch sur le climat ?

Les paramètres de Milankovitch sont :
- Les variations de l'inclinaison de l'axe de la Terre ;
- La variation de la forme de l'orbite terrestre autour du soleil ;
- La précession.

Ils peuvent modifier le mouvement et la disposition de la Terre par rapport au Soleil, et entraîner des changements climatiques à l'échelle d'un hémisphère. Mais, contrairement à ce que l'on croit généralement, ils sont sans influence sur l'ensoleillement global reçu en une année par la planète. Voyons ceci en détail.

1. Les variations de l'inclinaison de l'axe de la Terre

L'inclinaison de l'axe de la Terre est variable. D'après les calculs de Milankovitch, elle varie entre 22,1° et 24,5° sur une période de 41 000 ans. Plus l'inclinaison est prononcée, plus les saisons le sont. Des étés plus frais pourraient favoriser localement la formation des glaciers et modifier l'albédo.

Actuellement, l'axe de la Terre possède une obliquité de 23,4°, ce qui est proche de la valeur moyenne entre les deux extrema. Elle est dans une phase descendante et atteindra son minimum dans environ 10 000 ans. En prenant comme seul paramètre d'influence l'inclinaison de l'axe terrestre, les étés deviendraient plus froids et les hivers plus chauds pour un hémisphère, l'autre subissant les conséquences inverses.

Mais, bien entendu, l'inclinaison de l'axe de la Terre est sans influence sur la quantité d'énergie globalement reçue par la planète tout entière : une sphère a deux hémisphères.

2. Le phénomène de précession

La Terre n'étant pas une sphère parfaite, la rotation de la Terre sur elle-même confère à l'axe de rotation de notre planète un mouvement de précession, semblable à celui de l'axe d'une toupie. La principale conséquence du phénomène de précession est le déplacement des solstices et des équinoxes par rapport à la position de la Terre sur son orbite.

Ainsi, les saisons étaient inversées il y a environ 10 000 ans. Pour ce qui est de l'hémisphère Nord, l'hiver avait lieu lorsque la Terre atteignait son aphélie (point le plus éloigné du Soleil) et l'été avait lieu lors du passage au périhélie. Actuellement, cette situation a lieu dans l'hémisphère Sud, et le contraste entre les saisons est moins important, car l'hémisphère Sud est essentiellement recouvert d'océans, les terres émergées se trouvant pour la plupart dans l'hémisphère Nord.

La réalité est plus complexe encore : au cycle de précession (environ 26 000 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". Les nutations influent moins sur le climat que la précession, mais ont tout de même un lien avec les variations de la hauteur des marées.

Mais là encore :

- Les phénomènes de précession et de nutation n'ont pas d'impact sur la quantité de chaleur reçue globalement par la Terre sur une année, mais seulement sur un hémisphère particulier ;

- Les ordres de grandeur de durée n'ont rien à voir avec le débat actuel.

3. Les variations de l'excentricité orbitale

La forme de l'orbite de la Terre autour du Soleil varie selon des cycles dont la durée est d'environ 100 000 ans. L'excentricité de l'orbite terrestre caractérise l'écart de forme entre un cercle parfait et l'orbite, supposée elliptique. Si a, b désignent respectivement le demi-grand axe et le demi petit axe de l'ellipse, l'excentricité est définie par :

$$e = \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}}$$

Elle vaut actuellement $e \approx 0.0167$. Comme le demi-grand axe vaut :

$a \approx 0.1496 \times 10^9 \ km$

on trouve :

$b \approx 0.149579 \times 10^9 \ km$

Autrement dit, l'orbite terrestre est extrêmement proche d'un cercle, contrairement à ce que beaucoup de dessins représentent.

La troisième loi de Kepler s'énonce sous la forme :

$$\frac{T^2}{a^3} = \frac{4\pi^2}{G\left(M+m\right)}$$

où T est la durée de l'année terrestre, G la constante universelle de gravitation, M, m les masses du Soleil et de la Terre. Si on fait l'hypothèse que la durée de l'année est constante (on estime qu'elle augmente de 1.25 μs par an), que les masses M, m sont constantes, on en déduit que a, demi-grand axe, est constant. Autrement dit, les variations de l'excentricité ne peuvent venir que d'une variation de b, demi petit axe.

On estime que, il y a 128 000 ans, lors de la précédente période interglaciaire, l'excentricité était proche de 0,04. Les calculs détaillés donnés en Annexe établissent la formule :

$$E = \frac{KR^2}{4a^2\sqrt{1-e^2}} = \frac{KR^2}{4ab}$$

où K est une constante sans dimension et E est l'ensoleillement total reçu par la planète pendant une année (plus précisément : flux reçu par la planète, divisé par flux émis par le Soleil, nombre sans dimension).

Si on passe d'une situation avec $e_1 = 0.04$ à une situation avec $e_2 = 0.0167$, le quotient $\frac{E_1}{E_2}$ vaut approximativement 1.0007 : la variation totale d'ensoleillement est infime.

Ces questions concernant l'impact de la forme de l'orbite sur le climat sont très intéressantes sur le plan scientifique, mais il est clair qu'elles n'interviennent pas dans le présent débat sur le réchauffement climatique : le débat porte sur les cent dernières années et les variations d'orbite se font sur des centaines de milliers d'années.

Annexe : Excentricité de l'orbite et ensoleillement

Le paramètre d'excentricité de l'orbite n'a pas l'influence qu'on lui prête souvent. Ceci nécessite quelques calculs, que nous allons maintenant présenter.

Notons $D(t)$ la distance, à l'instant t, entre la Terre et le Soleil (de l'ordre de 150 millions de km). En admettant que le Soleil rayonne également dans toutes les directions, le flux d'énergie reçu à la distance D est proportionnel à la surface de la sphère, centrée sur le Soleil, de rayon D, soit $S = 4\pi D^2$.

Notons R le rayon terrestre (de l'ordre de 6 300 km). La surface de réception du flux est celle de la section du globe terrestre par un plan passant par le centre ; elle a pour surface :

$S_T = \pi R^2$

Ceci n'est pas tout à fait exact : le Soleil étant beaucoup plus gros que la Terre, illumine un peu plus qu'une demi-sphère ; mais, compte-tenu de l'éloignement, la différence est négligeable.

La proportion de flux solaire reçu par le globe terrestre est donc :

$$F = \frac{S_T}{S} = \frac{R^2}{4D^2} \tag{1}$$

On constate ainsi qu'elle est inversement proportionnelle au carré de la distance entre la Terre et le Soleil.

La seconde loi de Kepler (loi des aires) s'écrit :

$$\frac{d\vartheta}{dt} = \frac{C}{D(t)^2} \tag{2}$$

où ϑ désigne l'angle entre le rayon-vecteur Soleil-Terre et une direction fixe (par exemple l'étoile Polaire).

Notons $E(\vartheta)$ l'ensoleillement (quantité de flux solaire reçu) entre la situation $\vartheta = 0$ (fixée arbitrairement) et la situation $\vartheta(t)$. D'après (1), on a :

$$E(\vartheta(t)) = K \int_{\tau=0}^{t} \frac{1}{D(\tau)^2} d\tau \tag{3}$$

où K est une constante.

Utilisant (2), ceci s'écrit :

$$E(\vartheta(t)) = K' \int_{\tau=0}^{t} \frac{d\vartheta}{d\tau} d\tau = K'\left(\vartheta(t) - \vartheta(0)\right) \tag{4}$$

Autrement dit, l'ensoleillement reçu ne dépend que de l'angle parcouru, et non du temps mis à le parcourir.

Par exemple, divisons l'année entière (année sidérale) en douze portions égales, correspondant à des angles égaux $2\pi/12$ (et non à des temps égaux). Le flux solaire reçu par la Terre sera le même sur chacune de ces portions et ce quelle que soit l'excentricité de l'orbite.

Calculons maintenant le flux total reçu (ensoleillement total), en fonction des paramètres de l'orbite. Ecrivons la seconde loi de Kepler sous la forme :

$$D^2 \frac{dv}{dt} = \frac{2\pi a^2 \sqrt{1-e^2}}{T} \tag{5}$$

où D est comme précédemment la distance Soleil-Terre, v la vitesse de la Terre, a le demi-grand axe, e l'excentricité et T la durée totale de la révolution (une année).

On déduit de (5) :

$$\frac{1}{D^2} = \frac{T}{2\pi a^2 \sqrt{1-e^2}} \frac{dv}{dt} \tag{6}$$

et donc :

$$\frac{1}{T} \int_0^T \frac{1}{D(t)^2} dt = \frac{1}{2\pi a^2 \sqrt{1-e^2}} \int_0^T \frac{dv}{dt} dt = \frac{1}{a^2 \sqrt{1-e^2}} \tag{7}$$

Le flux total reçu est donc :

$$F = \frac{KR^2}{4T} \int_0^T \frac{1}{D(t)^2} dt = \frac{KR^2}{4a^2 \sqrt{1-e^2}} \tag{8}$$

Comme l'excentricité e vaut $e = \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}}$, on a $1 - e^2 = \frac{b^2}{a^2}$ et finalement :

$$F = \frac{KR^2}{4a^2 \sqrt{1-e^2}} = \frac{KR^2}{4ab} \tag{9}$$

Le flux moyen d'ensoleillement reçu par an se déduit donc simplement des paramètres de l'orbite, en supposant celle-ci elliptique. Il ne dépend pas seulement de l'excentricité, mais des deux axes de l'ellipse.

Les calculs menés par Jean-Claude Duplessy et Gilles Ramstein dans leur livre "PALÉOCLIMATOLOGIE - Enquête sur les climats anciens", CNRS éditions, page 262, ne sont pas complètement corrects. En effet, il n'est pas légitime de supposer que le demi-grand axe est constant, auquel cas le flux ne dépendrait que de l'excentricité.

En effet, les variations de l'orbite terrestre sont dues à la prise en compte de l'attraction des autres planètes. Si une planète comme Jupiter se trouve "dans le prolongement" du grand axe de l'orbite terrestre, celle-ci sera allongée et le grand axe s'en trouvera modifié.

Les calculs faits ci-dessus sont très approximatifs, car ils supposent que l'orbite est elliptique et que les lois de Kepler sont vérifiées. Or, si l'on prend en compte les autres planètes, l'orbite cesse d'être réellement elliptique.