

Climat et astronomie

Didier Paillard, Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement

L'astronomie et le climat ont des liens multiples et étroits, depuis l'invention du calendrier il y a plusieurs millénaires, jusqu'à la compréhension des cycles climatiques à long terme de notre planète qui restent encore mal compris aujourd'hui.

La Terre et le Soleil

Les saisons

L'archétype du phénomène climatique, bien connu de tous, c'est l'alternance des saisons. La question du retour des saisons s'est posée dès la préhistoire ou l'Antiquité. Cette préoccupation climatique est à l'origine de l'astronomie. En effet, la révolution néolithique et le développement de l'agriculture nécessitent un outil capable de prédire l'époque des semailles ou des récoltes, indépendamment des fluctuations quotidiennes du temps qu'il fait : c'est l'invention du calendrier. Les premiers savants ou prêtres de l'époque établiront ainsi les lois qui gouvernent les saisons, malgré le caractère très aléatoire de la météorologie au quotidien, à travers l'observation du mouvement des astres. Il est donc raisonnable d'affirmer que la question du climat, via la découverte du cycle saisonnier, est probablement à l'origine du déterminisme en science.

Climat et déterminisme sont dès lors intimement liés, dès les origines. Le « temps qu'il fait » (la météo) et le « temps qui passe » (qui s'écoule du passé vers le futur) proviennent de la même racine latine *tempus*, ce qui souligne à quel point saisons et écoulement du temps sont liés dans les esprits et l'évolution des idées.

Les zones climatiques et la zone habitable

Si les variations saisonnières de la température ont servi de référence pour définir l'année, ce sont ses variations géographiques qui sont à l'origine du mot « climat ». Ce mot d'origine grecque (*κλίμα*) était encore au 17^e siècle synonyme de latitude. Il signifie initialement « angle » ou « inclinaison », en référence à la hauteur du Soleil au-dessus de l'horizon, qui change avec la latitude géographique. Ainsi Aristote définit cinq zones géographiques sur la Terre, deux zones polaires inhabitables car trop froides, une zone équatoriale inhabitable car trop chaude, et deux zones tempérées, habitables, à des latitudes (climats) intermédiaires.

« La raison démontre que la partie habitable est limitée en latitude, et cette partie peut être regardée comme circulaire par la température mélangée qui y règne » (Aristote, *Météorologiques*, 2, ch. 5, §13).

Depuis l'Antiquité, la notion de climat est donc étroitement liée à la notion d'habitabilité. Ce sont tout d'abord les médecins, puis les explorateurs et géographes aux 17^e et 18^e siècles, qui vont entreprendre de mesurer les températures, les précipitations, en même temps que d'autres variables environnementales, afin de mieux quantifier « l'habitabilité » des différentes régions du monde, de définir les « climats sains » ou « malsains », car on ne connaissait pas encore les agents pathogènes, microbes ou virus et l'on pensait que les maladies étaient liées à l'environnement et en particulier au climat.

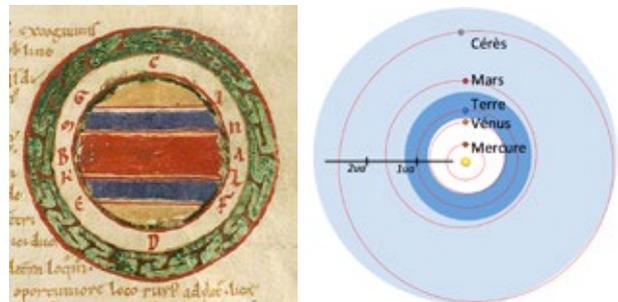


Fig.1. À gauche, les zones géographiques du globe terrestre de l'Antiquité : les zones habitables en bleu, et les zones inhabitables, polaires en jaune et torride en rouge (manuscrit du 12^e siècle « *Le songe de Scipion* » de Macrobie); à droite, la zone habitable du Système solaire, selon différents critères (bleu foncé entre 0,73 et 1,24 UA, bleu clair, jusqu'à 3 UA).

Le climat est donc, avant tout, une notion de géographie, destinée à caractériser, de manière déterministe, l'environnement des êtres humains. Le lien avec l'astronomie a toujours été évident, par exemple en définissant les cercles polaires et les tropiques à partir de l'obliquité de la Terre (l'inclinaison¹ de l'axe de rotation, $\varepsilon = 23^\circ 26'$) : au-delà du cercle polaire, le Soleil ne se lève pas,

¹ Angle entre l'axe de la Terre et la perpendiculaire au plan de l'écliptique.

ou ne se couche pas à certains moments de l'année ; entre les tropiques, le Soleil (à midi) est tantôt au sud, tantôt au nord, et passe donc deux fois par an au zénith.

Pour aller au-delà de la simple notion de latitude, les géographes définissent le climat à travers les moyennes des observations sur une période de quelques dizaines d'années (30 ans selon les recommandations des services météorologiques). En effet, en l'absence de « changement climatique », la moyenne ou espérance mathématique est une bonne indication de ce que l'on peut prédire *a priori*.

Les saisons et les zones climatiques : pas aussi simple qu'il n'y paraît...

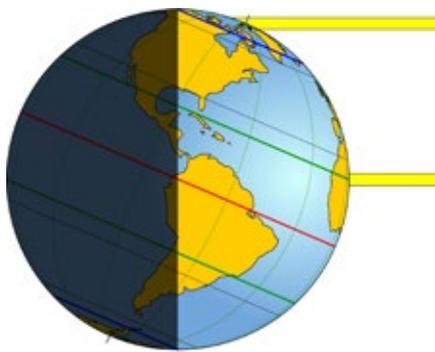


Fig.2. La Terre au solstice d'été. Cette figure est inspirée d'un ouvrage destiné aux nouveaux programmes du lycée, avec la légende : « La quantité d'énergie solaire reçue à la surface de la Terre est inégale selon les zones du globe : zone polaire, zone tempérée et zone intertropicale ».

La hauteur du Soleil au-dessus de l'horizon est le principal facteur qui détermine le climat. Mais, de façon intéressante, cette figure représente la Terre durant l'été de l'hémisphère nord, c'est-à-dire précisément le moment de l'année où le pôle nord reçoit quotidiennement plus d'énergie que les tropiques, contrairement à ce qui est suggéré par la légende et la figure ! Car la durée du jour est aussi un élément essentiel pour discuter de l'énergie reçue à différents endroits et différentes saisons sur Terre : au solstice d'été, le pôle Nord bénéficie de 24 heures de soleil, contre 12 heures seulement à l'équateur.

Si on calcule la puissance moyenne reçue par jour en tenant compte de la longueur de la journée et de la hauteur du Soleil, on obtient la figure 3. Les calculs sont détaillés dans l'encadré 1 (page suivante).

Le climat dépend donc de la latitude et de la saison, mais aussi des trois paramètres astronomiques : e (excentricité), ε (obliquité) et ω (précession climatique) qui sont définis sur la figure 4.

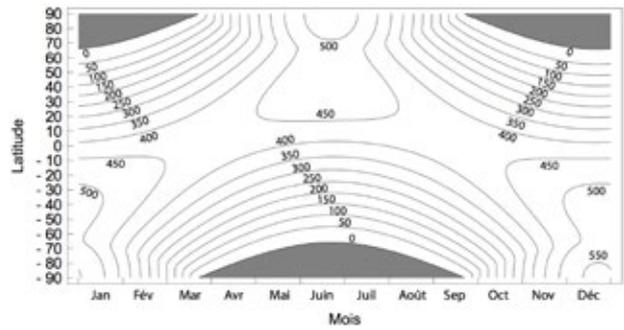


Fig.3. Puissance moyenne journalière P_M ($W.m^{-2}$) reçue au sommet de l'atmosphère par $1 m^2$ horizontal, en fonction de la position orbitale λ (traduite ici en mois du calendrier usuel) et de la latitude ϕ , calculée pour les valeurs actuelles de l'excentricité e , de la précession climatique² ω et de l'obliquité ε . On y remarque que les pôles reçoivent plus d'énergie que les tropiques aux solstices d'été, à cause de la durée du jour. Par ailleurs, il y a une asymétrie entre les deux pôles, car la Terre est plus proche du Soleil au début du mois de janvier.

	<p>L'excentricité correspond à « l'aplatissement » de l'ellipse, plus précisément $e = c/a$ où a est le demi-grand-axe et c la distance du centre au foyer. Elle oscille entre environ 0 et 0,06, avec des pseudo-périodicités de 100 000 et de 400 000 ans.</p>
	<p>L'obliquité ε est l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre par rapport à la normale au plan orbital. Elle oscille avec une période de 41 000 ans entre $21,9^\circ$ et $24,5^\circ$,</p>
	<p>La précession climatique ω correspond à la position de l'équinoxe de printemps par rapport au périhélie (P), là où la Terre est au plus proche du Soleil.</p> <p>La précession climatique effectue un cycle complet environ en 21 000 ans.</p>

Fig.4. Paramètres astronomiques qui déterminent le climat.

² À ne pas confondre avec la précession des équinoxes. La précession des équinoxes concerne le déplacement de l'équinoxe de printemps par rapport au point vernal (période 26 000 ans) alors que la précession climatique indique le déplacement de la position de cet équinoxe par rapport au périhélie (période 21 000 ans). Le périhélie se déplace par rapport au point vernal, d'où la différence.

Encadré 1

Calcul de la puissance reçue du Soleil

Plus précisément, on peut calculer la quantité d'énergie reçue, par unité de temps, au sommet de l'atmosphère et par m^2 horizontal (on parlera d'insolation, en $W.m^{-2}$) à une latitude φ et à une saison donnée. Soit λ la position orbitale (angle) de la Terre par rapport à l'équinoxe de printemps (sa longitude vraie), on appelle déclinaison δ , la hauteur du Soleil au-dessus de l'équateur céleste, qui est donnée par $\sin \delta = \sin \lambda \times \sin \varepsilon$ où ε est l'obliquité de l'axe terrestre ($23^\circ 26'$).

Pour ce calcul, on se place dans un repère d'origine T, le centre de la Terre, et défini par le plan de l'équateur et le méridien de l'observateur. On utilisera ici des vecteurs unitaires.

Coordonnées sphériques de l'observateur O :

rayon = 1 ; longitude = 0 ; latitude = φ

Coordonnées cartésiennes de l'observateur O :

$(\cos \varphi, 0, \sin \varphi)$.

Coordonnées sphériques du Soleil S :

rayon = 1 ; longitude = H ; latitude = δ

où H est l'angle horaire du Soleil par rapport à sa position à midi vrai (H = 0 à midi ; H = π à minuit), angle qui permet de repérer la rotation terrestre.

Coordonnées cartésiennes du Soleil :

$(\cos \delta \times \cos H, \cos \delta \times \sin H, \sin \delta)$

On calcule le produit scalaire de \vec{TO} par \vec{TS} ,

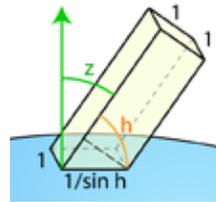
ce qui donne l'angle zénithal du Soleil \widehat{OTS} :

$\vec{TO} \cdot \vec{TS} = \cos \widehat{OTS} = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos H$.

Pour calculer la puissance reçue par une surface horizontale de $1 m^2$, il faut tenir compte :

- de la distance Terre Soleil notée r en multipliant par $(a/r)^2$ car la puissance reçue est inversement proportionnelle au carré de la distance (a demi grand axe de l'orbite, c'est la distance pour laquelle est donnée la constante solaire) ;

- de la distance zénithale z du Soleil en multipliant par $\cos z$ ou $\cos \widehat{OTS}$ (figure ci-dessous)



On a représenté un faisceau de lumière de $1 m^2$ de section transportant $1365 W$ (S_0).

L'aire A de la surface chauffée au sol par ce faisceau est égale à $1/\sin h$ ou $1/\cos z$. La puissance reçue au sol par m^2 est donc égale à $S_0/A = S_0 \times \cos z$.

La puissance instantanée reçue (en $W.m^{-2}$) est donc :

$$P_1 = S_0 (a/r)^2 (\sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos H)$$

où S_0 est la constante solaire ($\approx 1365 W.m^{-2}$), définie ci-dessous, figure 5.

La distance r est donnée par l'équation de l'ellipse en coordonnées polaires :

$$r = a (1 - e^2) / (1 + e \cos v)$$

où e est l'excentricité de l'orbite ($e = 0,0167$) et $v = \lambda - w$ est l'anomalie, ie. la position orbitale par rapport au périhélie ; $w = 282^\circ$ est la «précession climatique», c'est-à-dire la position de l'équinoxe de printemps par rapport au périhélie.

L'heure H_0 de lever/coucher du Soleil est donnée par

$$\widehat{OTS} = \pi, \text{ d'où : } \cos H_0 = -\text{tg } \varphi \times \text{tg } \delta$$

La puissance moyenne reçue sur une journée (en $W.m^{-2}$) est donc l'intégrale entre $-H_0$ et H_0 de la puissance instantanée P_1 divisée par 2π (si H_0 est en radians) :

$$P_M = S_0 (a/r)^2 (H_0 \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \sin H_0) / \pi$$

C'est ce calcul qui permet d'obtenir la figure 3.

Le bilan radiatif et l'effet de serre

Pour comprendre et calculer les températures à la surface de la Terre, ou de n'importe quelle planète, il est nécessaire d'effectuer le bilan d'énergie entre le rayonnement incident et le rayonnement sortant. Les lois physiques du rayonnement thermique ont été proposées à la fin du 19^e siècle (loi de Wien, loi de Stefan-Boltzmann), avant d'être expliquées et unifiées par la mécanique statistique dans le cadre de la loi du corps noir, proposée par Max Planck en 1900. Il est dès lors assez simple de calculer l'équilibre radiatif entre l'énergie solaire incidente, l'énergie solaire réfléchie et le rayonnement infrarouge émis par la planète, comme cela est illustré sur la figure 5.

Au final, le bilan radiatif peut s'écrire sous la forme d'une équation simple :

$$(1 - \alpha) S_0 / 4 = \sigma T^4$$

(le facteur 4 étant le rapport de l'aire de la sphère à l'aire du disque).

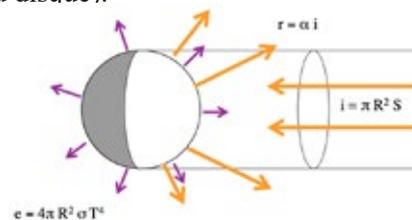


Fig.5. La constante solaire S_0 est la puissance reçue par unité de surface, perpendiculairement aux rayons solaires, à la distance moyenne Terre-Soleil ($S_0 = 1365 W.m^{-2}$). La puissance incidente totale i est obtenue en multipliant S_0 par la surface interceptée, soit le disque de rayon R. L'albédo planétaire α est la fraction réfléchie de ce rayonnement incident. Par ailleurs, la surface planétaire, supposée ici isotherme, émet un rayonnement thermique de corps noir σT^4 ($\sigma = 5,67 \times 10^{-8} W.m^{-2}.K^{-4}$) sur l'ensemble de sa surface sphérique (voir encadré 2).

Cette équation permet notamment d'estimer la température des exoplanètes (voir les Cahiers Clairaut n° 169 de mars 2020), connaissant la luminosité de l'étoile, et moyennant des hypothèses sur l'albédo, pour discuter de « l'habitabilité » de celles-ci. Néanmoins, la température obtenue de cette façon pour la Terre ($\alpha = 0,31$) ne correspond pas à la température de surface qui nous intéresse. L'équation ci-dessus donne environ $T = 255 \text{ K}$ (soit $-18 \text{ }^\circ\text{C}$), ce qui correspond bien à la température du rayonnement infra-rouge émis vers l'espace, essentiellement par la vapeur d'eau, dans la partie haute de la troposphère, vers 6 à 8 km d'altitude. En effet, les basses couches de l'atmosphère sont presque totalement opaques aux rayonnements infra-rouges qui y sont absorbés par les gaz à effet de serre, notamment la vapeur d'eau. Lorsque l'on monte en altitude, la température diminue et la teneur en vapeur d'eau aussi (l'eau condense, forme des nuages, puis précipite). Plus haut dans la troposphère, l'air devient suffisamment sec pour que le rayonnement infra-rouge puisse s'échapper vers l'espace, de façon à équilibrer le rayonnement solaire incident.

L'effet de serre sur Terre est donc intimement lié au gradient vertical de température et à la présence d'eau. La quantité de vapeur d'eau dans l'atmosphère est directement contrôlée par la température. C'est ce que l'on appelle une rétroaction positive : plus il fait chaud, plus l'effet de serre lié à la vapeur d'eau augmente. À l'inverse, les concentrations des autres gaz à effet de serre (notamment CO_2 , CH_4 , N_2O) dépendent avant tout de leurs émissions et puits, naturels et anthropiques : ce sont eux qui vont donc déterminer l'intensité de l'effet de serre et le climat sur Terre.

Les variations climatiques sur Terre

Au 19^e siècle, la découverte de périodes glaciaires dans l'histoire géologique récente a été la première mise en évidence scientifique que le climat de la Terre changeait au cours du temps. Dès lors s'est posée la question des mécanismes sous-jacents. Comme cela a été mentionné plus haut, les deux principaux déterminants du climat sont l'astronomie et les gaz à effet de serre. C'est pourquoi, dès cette époque, deux théories des glaciations ont été proposées. D'une part une théorie astronomique, basée sur les changements à long terme des paramètres orbitaux et axiaux de la Terre (l'excentricité e , l'obliquité ε et la précession climatique ω , voir encadré 1). Et d'autre part, une théorie géochimique, basée sur de possibles changements de la concentration atmosphérique en CO_2 .

Encadré 2

La loi du corps noir, Max Planck (1900)

La puissance rayonnée par unité de surface P (en $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) possède une distribution spectrale qui est donnée en fonction de la longueur d'onde λ par :

$$\frac{dP}{d\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1}$$

où h est la constante de Planck, c la vitesse de la lumière, k la constante de Boltzmann et T la température en kelvin. Cette distribution possède une forme « en cloche », qui s'annule en 0 et à l'infini, comme cela est illustré sur la figure ci-dessous.

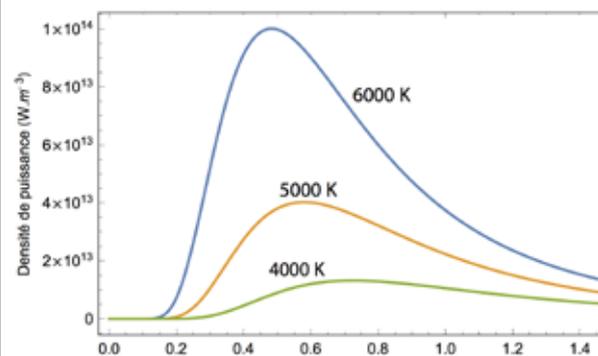


Fig.6. Densité spectrale dP/dl d'un corps noir en fonction de la longueur d'onde l pour différentes valeurs de la température : la puissance totale émise augmente fortement avec la température, et la longueur d'onde du maximum diminue.

On peut alors en déduire deux lois fondamentales qui caractérisent ce rayonnement :

La loi de Stefan-Boltzmann, qui donne la puissance totale rayonnée P , en calculant l'intégrale sur toutes les longueurs d'onde de la loi de Planck :

$$P = \left(\frac{2\pi^5 k^4}{15 c^2 h^3} \right) T^4 = \sigma T^4$$

avec la constante de Stefan : $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$

La loi du déplacement de Wien, qui donne la longueur d'onde du maximum de radiation :

$$\lambda_{\text{MAX}} = \frac{2,898 \cdot 10^{-3} \text{ m}\cdot\text{K}}{T}$$

Autrement dit, la longueur d'onde maximale d'un rayonnement « thermique » est inversement proportionnelle à sa température. C'est cette loi qui permet d'affirmer que les étoiles rouges sont plus froides que les étoiles bleues. En particulier, le rayonnement visible (solaire) est centré autour de $\lambda_{\text{MAX}} = 0,5 \text{ }\mu\text{m}$ ce qui permet d'obtenir une température « de surface » du Soleil d'environ 6 000 K. De même, la température ambiante est de l'ordre de 280 K, donc nous baignons dans un rayonnement infrarouge centré au voisinage de $\lambda_{\text{MAX}} = 10 \text{ }\mu\text{m}$, et le rayonnement émis par la Terre vers l'espace est un peu plus « froid », vers $\lambda_{\text{MAX}} = 15 \text{ }\mu\text{m}$, car il est émis plus en altitude.



Fig.7. L'hémisphère nord durant le dernier maximum glaciaire il y a environ 20 000 ans. Le nord de l'Europe et de l'Amérique sont recouverts de 2 à 4 km de glace (en blanc) ce qui entraîne une baisse du niveau marin d'environ 120 à 130 m et donc de nouvelles terres émergées (brun clair). La banquise, ou glace de mer (bleu clair) est plus étendue qu'aujourd'hui.

Les glaciations sont-elles causées par l'astronomie ?

La première théorie astronomique des glaciations a été proposée par Joseph Adhémar, professeur de mathématique, dès 1848. En effet, le phénomène de précession était connu des astronomes depuis Hipparque de Nicée (2^e siècle avant J.-C.) qui l'avait estimé correctement à « plus de 1° par siècle » (et donc une périodicité inférieure à 360 siècles). Ce mouvement de précession était désigné comme le « troisième mouvement de la Terre ». Les deux premiers mouvements (rotation et révolution) donnent lieu aux cycles diurnes et saisonniers, avec des effets climatiques évidents. Il était donc logique d'envisager des cycles climatiques à très long terme, environ 23 000 ans³ pour la précession climatique ω . Selon Adhémar, les glaciations étaient sensées s'effectuer en alternance entre les deux hémisphères, puisque l'effet de la précession est saisonnier : l'hiver de l'hémisphère sud est aujourd'hui plus loin du Soleil, car nous sommes proches de l'aphélie en juin, ce qui permettait d'expliquer la présence d'une « glaciation » en ce moment en Antarctique, et à l'inverse une ère glaciaire de l'hémisphère nord dans la situation opposée, il y a environ 11 000 ans.

³ La précession climatique possède un cycle d'environ 21 000 ans, mais l'effet correspondant sur l'insolation est modulé par l'excentricité (cf. encadré 1), ce qui engendre un forçage climatique à 23 000 et 19 000 ans.

Encadré 3

Les calottes de glace

Il existe une grande confusion dans les médias et dans les esprits sur la nature des différentes zones englacées dans les régions polaires et il peut être utile de préciser un peu le vocabulaire.

1. Les calottes de glace aujourd'hui présentes sur Terre sont le Groenland et l'Antarctique. L'épaisseur de glace correspondante est typiquement de l'ordre de 2 à 4 km. Il s'agit là de neige accumulée pendant des millénaires : c'est le plus grand réservoir d'eau douce sur Terre.

2. La banquise, ou glace de mer, correspond à la surface de l'océan qui gèle en hiver notamment dans l'océan Arctique ou autour du continent Antarctique. C'est avant tout un phénomène saisonnier et une grande partie de la banquise fond en été. L'épaisseur typique est de l'ordre du mètre. Dans les quelques endroits où les courants font converger la glace de mer, celle-ci peut parfois atteindre une dizaine de mètres d'épaisseur. Il s'agit d'eau de mer gelée, qui reste un peu salée (le sel est expulsé des cristaux de glace, mais s'accumule dans des inclusions, ou bulles d'eau sur-salées, piégées dans la glace lors de sa formation).

3. Les icebergs sont d'énormes morceaux de glace qui se sont écoulés des calottes avant de se briser et de flotter librement sur l'océan. Ils mesurent souvent plusieurs centaines de mètres d'épaisseur.

4. Les plateformes glaciaires, présentes en Antarctique, sont intermédiaires entre la calotte et les icebergs : il s'agit de la calotte qui déborde du continent sous-jacent et flotte sur l'océan, tout en restant encore solidaire de l'Antarctique. Les deux plus grandes plateformes actuelles, la plateforme de Ross et celle de Ronne-Filchner, mesurent chacune plus de 400 000 km². Lorsque ces plateformes se brisent sur leur bord océanique, cela génère des icebergs gigantesques, des « grands tabulaires », de la taille d'un département ou plus.

La fonte de glace « flottante » (banquise, icebergs et plateformes glaciaires) ne modifie pas le niveau marin. Par contre, la fonte des calottes Groenland et Antarctique actuelles augmenterait le niveau de la mer de plus de 60 m, ce qui n'est pas envisagé dans un avenir proche. Au maximum glaciaire, le Canada et l'Europe du Nord étaient couverts de plusieurs kilomètres de glace : la calotte Laurentide en Amérique et Fennoscandinave en Europe. Le niveau de la mer était alors environ 120 ou 130 mètres plus bas.

Nous savons maintenant que la présence de glace en Antarctique n'a rien à voir avec les périodes glaciaires, qui par ailleurs sont synchrones entre les deux hémisphères. En effet, comme cela a été montré par Milutin Milankoviç au début du 20^e siècle, le processus qui contrôle l'évolution des calottes de glace, c'est avant tout la fonte estivale : soit l'été est suffisamment chaud pour faire disparaître les neiges tombées en hiver, soit au contraire, l'accumulation neigeuse va pouvoir s'accroître d'une année sur l'autre. Si la précession climatique ω a un rôle non négligeable sur l'insolation estivale, c'est en fait l'obliquité ϵ qui est le paramètre astronomique le plus important. L'obliquité varie entre 21,9° et 24,5° avec une périodicité de 41 000 ans. Par conséquent, Milankoviç prédit dès les années 1920 des cycles climatiques glaciaires interglaciaires dominés par cette périodicité.

Cette théorie astronomique sera à la fois confirmée et démentie par les données paléocéanographiques dans les années 1970. En effet, les géologues marins ont pu prélever des carottages de sédiments dans de multiples endroits au fond des océans. Les analyses micropaléontologiques, géochimiques et isotopiques ont toutes confirmé l'existence de cycles climatiques glaciaires interglaciaires sur notre planète, et les datations radio-isotopiques ont démontré que ces changements climatiques étaient « rythmés » par l'astronomie, avec des périodicités de 23 000 ans (correspondant aux variations de la précession climatique ω), de 41 000 ans (correspondant à l'obliquité ϵ), et surtout des cycles dominants de 100 000 ans, tout au long du dernier million d'années (correspond à l'excentricité e). De façon intéressante, au début de l'ère quaternaire (entre 2,6 et 1 million d'années dans le passé), c'était la périodicité de 41 000 ans qui dominait les variations climatiques, en parfait accord avec la théorie de Milankoviç. Mais depuis 1 million d'années, on observe avant tout des cycles à 100 000 ans de grande amplitude, liés aux variations de l'excentricité, qui n'étaient pas attendus par la théorie. Les mécanismes à l'origine de ces grands cycles restent toujours débattus.

Les glaciations sont-elles causées par des variations de CO₂ ?

Les théories astronomiques du climat ont été développées par des « amateurs de sciences » : J. Adhémar était professeur de mathématique,

J. Croll a fait beaucoup de métiers (assureur, pasteur, gardien) avant d'obtenir un poste de bibliothécaire à l'université, M. Milankoviç était initialement un ingénieur construisant des ponts et des barrages. Les géologues et chimistes étaient plutôt majoritairement en faveur d'une explication géochimique des glaciations, car lorsqu'il y a moins de CO₂ sur Terre, le climat doit se refroidir à cause de la diminution de l'effet de serre. En effet, les principaux mécanismes contrôlant la concentration atmosphérique en CO₂ étaient connus, notamment par J.J. Ebelmen, au milieu du 19^e siècle, et il semblait clair que le CO₂ atmosphérique devait varier significativement au cours du temps, sous l'influence conjuguée du climat, de l'activité biologique et géologique.

La découverte des glaciations va ainsi motiver le physicien et alpiniste John Tyndall à mesurer l'absorption du rayonnement infrarouge par les différents gaz présents dans l'atmosphère et ainsi prouver le rôle majeur du CO₂ et de la vapeur d'eau pour déterminer le climat. À la fin du 19^e siècle, Svante Arrhénius, prix Nobel de chimie, va aller plus loin et calculer le taux de CO₂ atmosphérique qui permettrait d'expliquer les glaciations : selon lui, les températures glaciaires s'expliqueraient facilement avec une baisse d'environ 40 % du CO₂. Arrhénius en profite pour calculer aussi l'effet d'une augmentation du CO₂ sur le climat et pour annoncer le réchauffement climatique inévitablement associé à la combustion massive du charbon depuis la révolution industrielle. Pour un doublement du CO₂, il prédit ainsi un réchauffement de l'ordre de 5 °C, ce qui est compatible avec la « sensibilité climatique » des modèles actuels (en général de 3 à 5 °C, parfois un peu plus).

Les mesures du CO₂ dans les bulles d'air des carottes de glace prélevées en Antarctique effectuées près d'un siècle plus tard, lui donnent largement raison : la concentration était de 180 ppm au dernier maximum glaciaire, contre 280 ppm à l'époque pré-industrielle, soit une baisse de 36 % durant les glaciations, comme Arrhénius l'avait calculé. De façon intéressante, son calcul est faux, mais le résultat final est raisonnable : les données spectroscopiques qu'il avait à sa disposition surestimaient largement le rôle du CO₂ alors que son modèle, trop simple, sous-estimait l'effet de serre.

De façon encore plus spectaculaire, les variations de CO₂ durant les cycles glaciaires correspondent assez

étroitement aux variations climatiques, avec un cycle dominant de 100 000 ans. Il est donc très probable que le CO_2 ait joué un rôle important dans ces cycles. Les modèles climatiques actuels suggèrent que les changements de température observés durant les glaciations sont liés pour moitié à la présence des calottes de glace, et pour moitié à la baisse du CO_2 . Il est maintenant clair que le CO_2 et l'astronomie ont un rôle dans les cycles climatiques du Quaternaire, mais il reste à construire une théorie faisant la synthèse de la théorie astronomique et de la théorie géochimique.

Les cycles astronomiques comme échelle de temps

Les liens entre l'astronomie et l'évolution du climat sur Terre ne se limitent pas à la période des glaciations du Quaternaire. Les cycles astronomiques ont clairement rythmé le climat de notre planète depuis ses origines. De façon intéressante, ces cycles peuvent être calculés, grâce à la mécanique céleste, sur de longues durées. Si l'on parvient à identifier clairement le signal astronomique dans les enregistrements géologiques, cela permet la construction d'une échelle « cyclo-stratigraphique », avec une datation absolue du passé géologique. Cette méthode, lorsqu'elle est disponible, s'avère plus précise que les radio-chronomètres basés sur la décroissance de certains éléments radioactifs. C'est elle qui sert de base aujourd'hui pour construire

en grande partie l'échelle de temps géologique internationale, en particulier pour la période du Cénozoïque, c'est-à-dire depuis 65 millions d'années. Ce travail s'est fortement développé au cours des dernières décennies, d'une part en tentant d'identifier les cycles d'origine astronomique dans les enregistrements géologiques, mais aussi en calculant les paramètres à long terme du Système solaire. De façon intéressante, Jacques Laskar, de l'Observatoire de Paris, a démontré que le Système solaire est chaotique : au-delà d'environ 50 millions d'années, il n'est plus possible de calculer précisément les paramètres astronomiques de la Terre, ni tout simplement de savoir où se situent les planètes. Mais certains cycles restent stables, notamment le cycle à 400 000 ans des variations de l'excentricité e . Par ailleurs, on observe souvent, notamment dans les enregistrements isotopiques du carbone, cette périodicité de 400 000 ans. Il semble bien que le cycle du carbone sur Terre soit, à long terme, modulé par l'astronomie. Ceci pourrait d'ailleurs expliquer la date de certaines transitions climatiques, comme le début du Quaternaire (il y a 2,6 millions d'années) ou l'apparition des cycles à 100 000 ans (il y a 1 million d'années) déjà mentionnés, qui correspondent tous deux à une modulation de ce cycle à 400 000 ans. Mais la théorie astronomique du carbone reste encore à construire. ■