

LE CONTRÔLE ASTRONOMIQUE DU CLIMAT : LA THÉORIE DE MILANKOVITCH

22

CHAPITRE

MOTS-CLÉS

- ▶ Flux solaire, saisons, équinoxe, solstice, aphélie, périhélie.
- ▶ Excentricité, obliquité, précession.
- ▶ Calendrier Julien et calendrier Grégorien.
- ▶ Gilbert, cyclostratigraphie.

La Terre est soumise à l'heure actuelle à un régime de climats contrastés qui correspond à une **période interglaciaire**. Modulés par le régime des vents et des courants marins, les climats sont avant tout commandés par le degré d'insolation qui dépend de la latitude et des caractéristiques de l'orbite terrestre. Ces dernières (précession des équinoxes, obliquité de l'axe de rotation de la Terre par rapport au plan de l'écliptique et excentricité) varient dans le temps à différentes fréquences modifiant, d'une manière générale, la configuration Terre-Soleil et donc l'insolation.

 Voir chap. 24,
fig. 24.9

22.1 LE CYCLE DES SAISONS

Les variations saisonnières du climat sont dues aux fluctuations de l'insolation, mais la quantité d'énergie solaire que reçoit la surface terrestre dépend plus des paramètres de l'orbite terrestre que du fonctionnement solaire (*fig. 22.1*). Ainsi du fait de l'excentricité de l'orbite, le **flux solaire** passe de $1\,410\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ au périhélie (le 3 janvier actuellement) à seulement $1\,320\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ à l'aphélie (4 juillet). Périhélie et aphélie correspondent respectivement au point le plus proche et le plus éloigné du Soleil. La Terre s'y trouve à une date variable en raison de la précession des équinoxes (*fig. 22.3, 22.4* et *encart 22.1*).

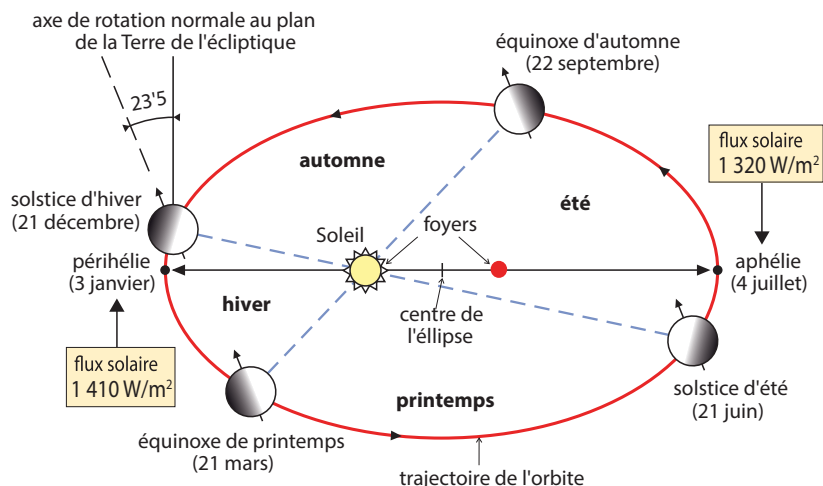


Figure 22.1 La position de la Terre, des solstices et des équinoxes et définition des différentes saisons.

Cependant ce n'est pas la distance Terre/Soleil, qui d'ailleurs varie assez peu (rapport d'excentricité : 0,0167), qui détermine la fluctuation saisonnière de l'intensité de l'ensoleillement mais l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre par rapport au plan de l'écliptique (**obliquité** = $23^{\circ}5'$). Ainsi, la Terre est plus près du Soleil pendant l'hiver de l'hémisphère Nord que pendant l'été. Sur une échelle de temps plus longue, le contraste climatique saisonnier sera d'autant plus marqué que l'obliquité sera forte.

Les **équinoxes** correspondent à une position de la Terre où l'axe de rotation de la planète est perpendiculaire aux rayons du Soleil (la durée du jour est égale à celle de la nuit puisque le cercle d'illumination passe alors par les pôles). Les **solstices** correspondent à une situation où l'angle de l'axe de rotation de la Terre par rapport au cercle d'illumination est maximal, le jour est alors soit le plus long (solstice d'été) soit le plus court (solstice d'hiver) pour l'hémisphère nord. Par convention les dates des équinoxes et des solstices définissent le début des différentes saisons.

Encart 22.1 – Les dates-clés de l'année climatique : les équinoxes et les solstices

En fait les dates correspondant à ces différentes positions clés de la Terre par rapport au Soleil ne sont pas fixes. Ainsi, la date de l'équinoxe de printemps, fixée arbitrairement au 21 mars, fluctue au fil des ans entre le 19 et le 21 mars. Cela est lié au fait que la position équinoxiale de la Terre se retrouve tous les 365,2422 jours. Si l'année terrestre avait toujours la même durée, le printemps prendrait un jour de retard tous les 4 ans. Pour compenser ce retard le calendrier grégorien a inventé l'année bissextile qui, avec le 29 février, dure 366 jours. Au contraire du calendrier Julien (utilisé de -44 à 1582) qui laissait dériver l'équinoxe, le calendrier grégorien a maîtrisé cette dérive.

Cependant, le jour supplémentaire de l'année bissextile est un tout petit peu trop long, par rapport au retard de l'équinoxe, pour jouer totalement son rôle de tampon. De ce fait l'équinoxe remonte le temps et le printemps arrive de plus en plus tôt (il avance d'environ 3 jours en 400 ans). Pour compenser, on a décidé que, par période de 400 ans, 3 années bissextiles, choisies dans les années séculaires (celles qui se terminent par 00) ne comporteraient que 365 jours. Cela a été le cas de 1900 et cela le sera en 2100 tandis que l'année 2000 est restée bissextile.

22.2 LA THÉORIE ASTRONOMIQUE DU CLIMAT OU THÉORIE DE MILANKOVITCH

Les paramètres orbitaux de la Terre ne sont pas stables et présentent des fluctuations périodiques à différents ordres de fréquences, dont les plus basses paraissent expliquer les variations climatiques à moyen et long terme : c'est la **théorie astronomique des paléoclimats**.

Elle fut mise en forme entre 1920 et 1941 par l'astronome serbe **Milutin Milankovitch** (1879-1958) à la suite des travaux précurseurs d'Adhémar (1842) et de Croll (1875). Elle a été actualisée par Berger (1988, 1992) qui a montré qu'elle rendait bien compte de la succession des cycles glaciaires/interglaciaires du Quaternaire et pouvait, assez probablement, être généralisable aux époques antérieures.

Au cours de la seconde moitié du xx^e siècle, cette théorie a été validée par les données de **paléotempératures** issues de la mesure du rapport des **isotopes stables de l'oxygène** sur les sédiments et les glaces quaternaires (*fig. 36.8*). Les données isotopiques ont montré que les variations cycliques du climat étaient beaucoup plus fréquentes au cours du Quaternaire (71 stades isotopiques sur 1,8 Ma, *fig. 36.7*) que ne le laissaient supposer les connaissances sur les glaciations continentales (glaciations Donau, Gunz, Mindel, Riss et Würm).

La théorie astronomique du climat (dite théorie de Milankovitch) postule que le climat est avant tout commandé par les variations de l'insolation. Cependant, ce n'est pas l'insolation globale annuelle de la planète qu'il faut prendre en compte mais **celle, reçue l'été, aux hautes latitudes (60° N) de l'hémisphère nord** où se trouve la majorité des continents, lieu privilégié de l'accumulation des neiges et des glaces (*fig. 22.8*). Cela revient à dire que pour que le climat terrestre soit stable il faut que la Terre reçoive suffisamment d'énergie, au cours de l'été de l'hémisphère nord, pour faire fondre toute la neige et la glace qui s'y sont accumulées en hiver. Dans le cas contraire, l'accumulation progressive de celles-ci provoque une extension de plus en plus grande de la calotte glaciaire et, par augmentation de l'albédo, une dérive vers les climats froids des périodes glaciaires.

22.2.1 Les paramètres orbitaux

Les variations d'intensité de l'insolation (saisonniers et latitudinales) sont sous le contrôle de trois paramètres orbitaux de la Terre : l'excentricité de l'orbite, l'obliquité de l'axe de rotation et la précision des équinoxes. Si la Terre n'était soumise qu'à l'attraction gravitationnelle du Soleil, son mouvement serait constant au cours du temps. La présence des autres planètes du système solaire et de la Lune crée des interactions gravitationnelles avec la Terre qui modifient ses paramètres orbitaux.

L'**excentricité** correspond à l'aplatissement de l'ellipse que décrit la Terre dans l'espace (*fig. 22.1*). On passe d'une configuration quasi-circulaire à une excentricité maximale de 7 %, selon une périodicité de l'ordre de **100 000 ans** (valeur actuelle : 1,67 %).

L'**obliquité** de l'écliptique correspond à l'angle que fait l'axe de rotation de la Terre par rapport au plan orbital. L'inclinaison de la Terre détermine les saisons (*fig. 22.1*) : quand le pôle Nord pointe vers le soleil, l'hémisphère Nord reçoit davantage de chaleur, c'est l'été boréal ; la configuration inverse six mois plus tard conduit à l'été austral (et à l'hiver boréal). L'inclinaison actuelle de 23°27' est susceptible de variation de $\pm 1^{\circ}30'$ selon une périodicité de **41 000 ans** (*fig. 22.2*). Lorsque l'inclinaison est maximale les climats et les saisons sont très contrastés, les zones polaires interceptent davantage le rayonnement solaire lorsqu'elles pointent vers le soleil (été chauds et hivers rigoureux aux hautes latitudes, c'est la configuration des périodes inter-glaciaires avec peu de glace sur les continents des hautes latitudes). Inversement une faible inclinaison conduit à des étés plus frais et des hivers moins rigoureux, c'est la configuration qui permet le développement des calottes glaciaires continentales.

Les variations de l'obliquité modifient la zonation climatique terrestre car elles entraînent un déplacement de la position des tropiques et des cercles polaires dont les latitudes sont pour les premières égales à l'obliquité ($23^{\circ}27'$ actuellement) et pour les secondes complémentaires (soit actuellement $90^{\circ} - 23^{\circ}27' = 66^{\circ}33'$).

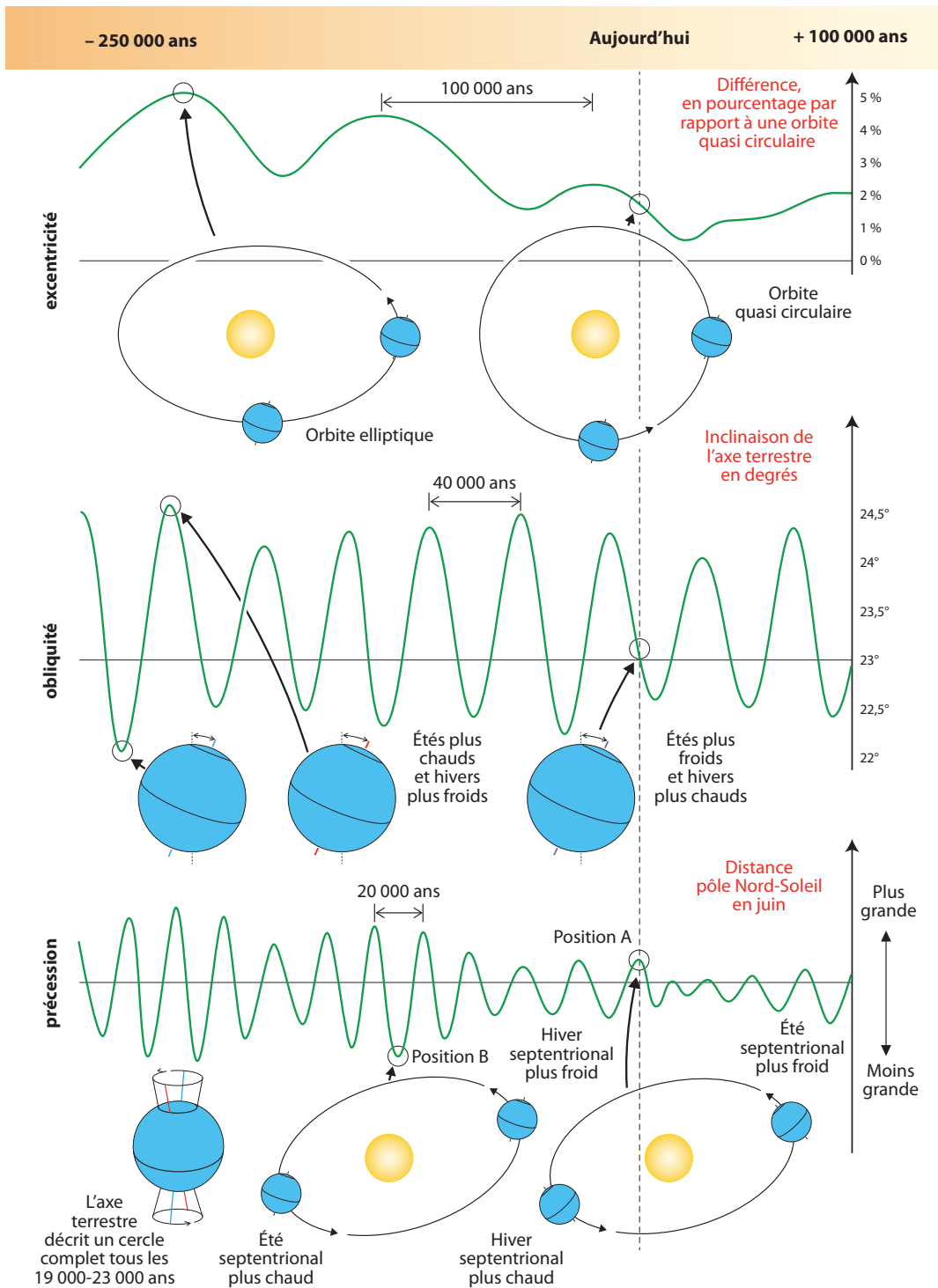


Figure 22.2 Paramètres orbitaux terrestres et saisonnalité.



La **précession des équinoxes** provient du fait que la Terre n'est pas rigoureusement sphérique et que la répartition des masses y est hétérogène. De ce fait l'action du Soleil, de la Lune et des autres planètes sur le bourrelet équatorial perturbe la rotation terrestre en provoquant une rotation de l'axe de la Terre autour de la perpendiculaire au plan orbital. Ce mouvement de l'axe de rotation, semblable à celui de l'axe d'une toupie en fin de rotation décrit un **cône de précession** selon une périodicité de 26 000 ans (*fig. 22.2*).

Comme les positions où se trouve la Terre sur l'orbite au moment des solstices et des équinoxes (*fig. 22.1*) dépendent de l'orientation de l'axe de la Terre, elles vont se déplacer au cours du temps en fonction du cône de précession. De ce fait, solstices et équinoxes se produisent en moyenne chaque année 25 minutes plus tôt. **Ce mouvement fait donc que chaque équinoxe précède celui de l'année précédente, d'où le terme de précession.**

On peut donc décrire la précession soit par rapport aux repères des étoiles (**précession astronomique**) soit par rapport à l'orbite terrestre en mesurant l'angle que fait le *point vernal* (position de la Terre sur l'orbite correspondant à l'équinoxe de printemps) avec le périhélie (*figs. 22.1 et 22.5*). C'est cette seconde définition qui est utilisée en paléoclimatologie, on lui donne souvent le nom de **précession climatique**. Berger (1977) a calculé que les variations d'insolation qui résultent du mouvement de précession ne présentent pas la périodicité attendue de 26 000 ans de la précession astronomique mais une périodicité moyenne de **21 700 ans** (pour les 5 derniers Ma) qui résulte en fait de la conjonction d'un cycle majeur de **23 000 ans** et un cycle mineur de **19 000 ans**.

L'axe de rotation de la Terre décrit le cône de précession en 26 000 ans (précession astronomique). De ce fait, l'étoile polaire (l'étoile qui est dans le prolongement de l'axe de rotation de la Terre) n'est pas toujours la même. Actuellement, c'est une étoile de la Petite Ourse, il y a 4 000 ans c'était l'étoile α de la constellation du Dragon et dans 12 000 ans ce sera Véga une étoile de la constellation de la Lyre.

Encart 22.2 – Gilbert, un précurseur de la cyclostratigraphie

Dès 1895, Gilbert utilisa une ébauche de cette théorie pour expliquer, par des variations climatiques, les fluctuations régulières (alternance marnes-calcaires) de la sédimentation pélagique du Crétacé supérieur du Colorado (États-Unis). Frappé par la régularité de ces alternances, il postula que la durée de dépôt

d'un doublet marne/calcaire correspondait à un cycle climatique commandé par la précession. En hommage, on utilise parfois une nouvelle unité de temps le Gilbert correspondant à la durée d'un cycle de précession (durée qui n'est pas stable au cours des temps géologiques, *fig. 22.6*).



22.2.2 Influence des paramètres orbitaux sur le climat : les saisons astronomiques

Alors que l'influence de l'excentricité sur le climat est pratiquement nulle, sa combinaison avec la précession joue donc un rôle capital en définissant la durée de deux **saisons « astronomiques »** (ou **saisons « caloriques »**) : une saison chaude (printemps et été en simplifiant) et une saison froide (automne et hiver) séparées par les équinoxes (*fig. 22.3*). Milankovitch a calculé la quantité totale d'énergie radiative reçue par la Terre durant ces saisons astronomiques. Pour l'hémisphère Nord, il propose :

$$\text{Pour la saison chaude : } Q_{c(\text{en joules})} = (T/4) \cdot (S_0/a^2) \cdot (r^2/\sqrt{1-e^2}) \cdot (\pi + 2 \sin \epsilon)$$

$$\text{Pour la saison froide : } Q_{c(\text{en joules})} = (T/4) \cdot (S_0/a^2) \cdot (r^2/\sqrt{1-e^2}) \cdot (\pi - 2 \sin \epsilon)$$

Avec T = durée de l'année sidérale, S_0 = constante solaire, r = rayon de la Terre, a = grand axe de l'ellipse, e = excentricité et ϵ = obliquité.

Encart 22.3 – La durée des saisons astronomiques

Du fait que l'axe de rotation de la Terre décrit un cône (cône de précession), les positions des points γ et γ' , qui correspondent respectivement aux équinoxes de printemps et d'automne et qui définissent les saisons (fig. 22.1 et 22.3), se déplacent sur l'orbite terrestre en sens inverse du mouvement annuel de la Terre. Il faut 21 000 ans pour que le point γ occupe la même position sur l'orbite terrestre.

Il en résulte que les saisons peuvent avoir des durées différentes par combinaison de l'excentricité et de la précession des équinoxes. En

effet, conformément à la seconde loi de Kepler, les saisons ont des durées proportionnelles aux aires balayées par le rayon vecteur. Si l'orbite terrestre est circulaire, la durée des saisons est égale (les surfaces S_1 , S_2 , S_3 et S_4 restant égales quelle que soit la position du point γ correspondant à l'équinoxe de printemps, fig. 22.3A). Si l'orbite est une ellipse, la durée des saisons va dépendre de la position du point γ donc de la précession climatique (angle γ soleil-périhélie). Dans la configuration de la figure 22.3B, on aura par ordre de durée croissante l'hiver, l'automne, l'été et le printemps.

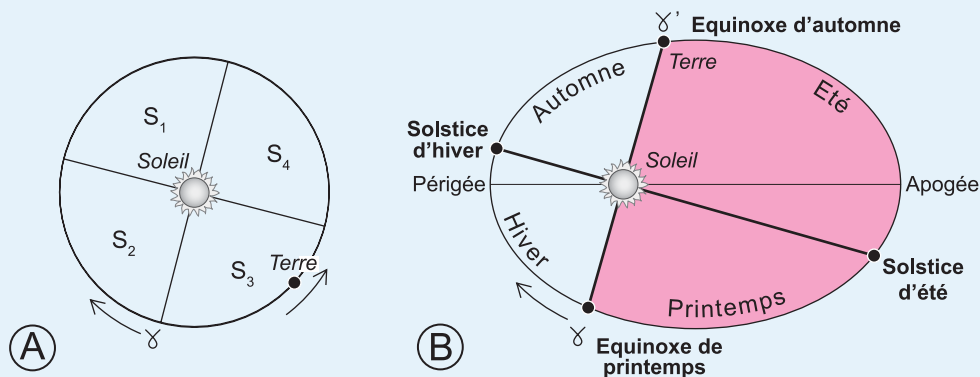


Figure 22.3 Durée des saisons « astronomiques » (caloriques) en fonction de la conjonction excentricité et précession.

Milankowitch a proposé une formule simple pour calculer la **différence de durée** (D en jours) entre la « saison chaude » et « la saison froide » :

$$D = 465 e \sin \varpi$$

où e est la valeur de l'excentricité et ϖ celle de la précession.

À excentricité constante, c'est donc la périodicité de la précession qui régule la différence de durée entre la « saison chaude » et la « saison froide » (fig. 22.4).

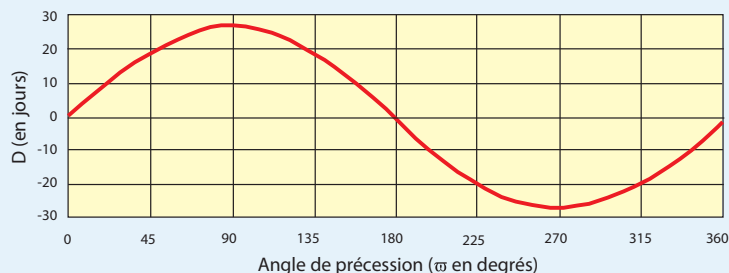


Figure 22.4 Le contrôle de la durée des saisons par la précession.

La différence de durée (D, en jours) entre la saison chaude (printemps + été) et froide (automne + hiver) en fonction de l'angle de

précession peut atteindre 28 jours, comme il y a 3 millions d'années lorsque l'excentricité était forte ($e = 6\%$).

Ainsi dans l'équation donnant la durée des saisons astronomiques (fig. 22.4), les seules variables sont l'excentricité et la précession. Cependant, ce qui importe, c'est l'insolation par unité de temps et plus une saison donnée sera longue, moins l'intensité radiative par unité de temps (jour par exemple) sera importante. Donc plus une saison sera courte plus on pourra la considérer comme chaude, plus elle sera longue plus on pourra la considérer comme froide (une même quantité d'énergie étant répartie sur un temps plus ou moins long).

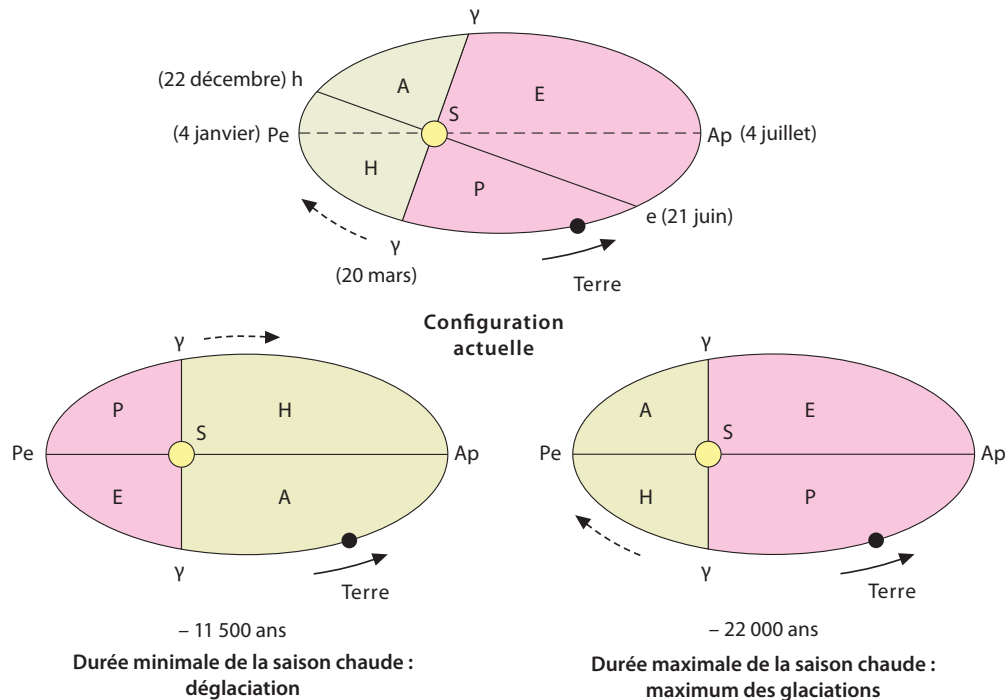


Figure 22.5 Diverses configurations des solstices et des équinoxes et durées des saisons « astronomiques » chaudes (en rose) et froides (en vert) résultantes (modifié d'après Berger 1992 et Foucault 1993).

Ap = Aphélie, Pe = Périhélie, S = Soleil, T = Terre, A, H, P et E sont les initiales des saisons, γ est la position du point vernal (équinoxe de printemps) dont la flèche pointillée indique le sens du déplacement, γ' = équinoxe d'automne. Configuration actuelle : précession $\varpi = 100,4^\circ$ (fig. 22.4). Configuration il y a 11 000 ans : précession $\varpi = 270^\circ$, durée maximale de la saison froide. Configuration il y a 22 000 ans : précession $\varpi = 90^\circ$, durée maximale de la saison chaude (configuration qui correspond au maximum des glaciations car l'intensité de la saison chaude est alors plus faible).

Lorsque l'excentricité est faible, les saisons ont la même durée ; lorsque l'excentricité est forte, la durée des saisons dépend de la précession. En prenant comme exemple l'hémisphère Nord, si le solstice d'été a lieu lorsque la Terre est à l'aphélie (fig. 22.1 et 22.5), la saison « chaude » aura une durée maximale mais sera relativement fraîche (chaque jour ne recevra qu'une insolation réduite). En revanche la saison froide sera courte mais tiède. Si le solstice d'été survient au périhélie, la saison « chaude » aura une durée minimale mais présentera de fortes températures, la saison froide sera longue et rigoureuse.

Un peu paradoxalement, c'est le premier cas qui correspond aux périodes glaciaires (c'est l'intensité de l'été de l'hémisphère Nord qui pilote le système, voir fig. 22.8).

Voir
chap. 32.5
et 6 et 35.5

Le climat terrestre est donc susceptible de variations selon des périodicités de l'ordre de 20 000, 40 000 et 100 000 ans. Nous verrons ultérieurement ce que cette théorie peut apporter à la sédimentologie et à la géochimie et aussi comment celles-ci peuvent à leur tour la conforter. L'utilisation que peuvent en faire les géologues en termes de chronostratigraphie est toutefois liée à la qualité des solutions astronomiques définissant les périodicités des paramètres orbitaux dans le passé. Des propositions ont été faites (*fig. 22.6*) mais, en toute rigueur, nous ne disposons actuellement que de solutions applicables de manière fiable jusqu'à - 50 Ma car le système solaire paraît avoir eu une histoire plus ou moins chaotique rendant plus complexe la mise en équation des mouvements de la Terre. Au-delà, des solutions existent (± 250 Ma) mais doivent être utilisées avec précaution et confrontées avec des données géologiques fiables.

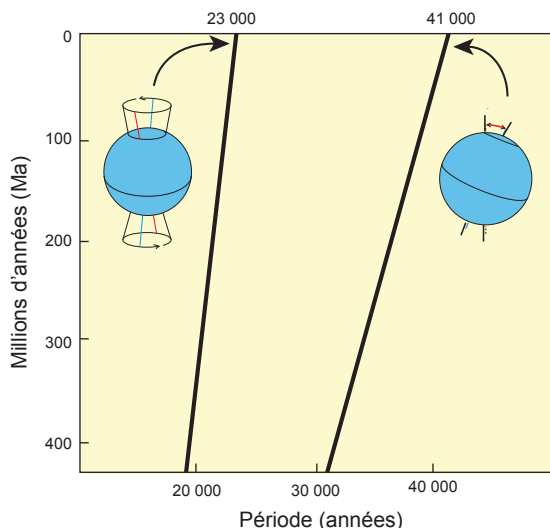


Figure 22.6 Hypothèses de variation des périodes des paramètres de la précession et de l'obliquité au cours des temps géologiques (d'après Berger et Loutre, 1994).

Au sujet de l'interaction des différents corps célestes, on doit noter que la Lune, par sa présence à proximité de la Terre, semble avoir joué un rôle modérateur ; en stabilisant l'obliquité de la Terre dans une faible gamme de variation, elle a évité des écarts de température trop importants (*fig. 22.7*). Au contraire, la planète Mars, du fait de la petite taille de ses deux satellites, présente des oscillations régulières de l'inclinaison de son axe de rotation pouvant atteindre les 60° en quelques millions d'années. Du fait de l'éloignement irréversible de la Lune à raison de 3,8 cm/an, la Terre pourrait connaître le même genre de comportement chaotique que la planète Mars dans plus d'un milliard d'années.

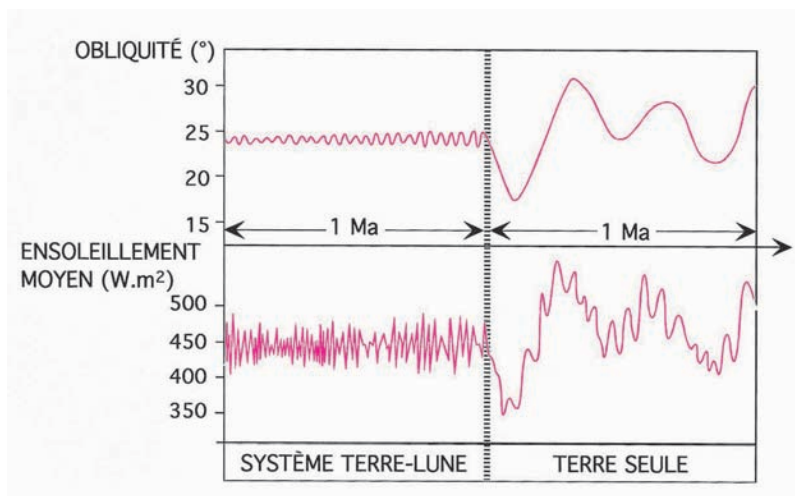


Figure 22.7 Rôle modérateur de la Lune sur l'amplitude de fluctuation de l'obliquité terrestre et sur l'ensoleillement moyen à sa surface (d'après Laskar 1993).

22.3 LA DISSYMMÉTRIE CLIMATIQUE DES DEUX HÉMISPÈRES TERRESTRES

Il existe une très forte dissymétrie climatique au cours des saisons entre les deux hémisphères (Fig. 22.8). On observe dans l'hémisphère nord une variation importante, au cours de l'année, des surfaces enneigées et des glaces alors qu'elles sont pratiquement stables dans l'hémisphère sud au cours des saisons. Cette dissymétrie, liée en grande partie à la répartition hétérogène des continents (lieu préférentiel d'accumulation de la neige et des glaces) et des océans entre les deux hémisphères, explique le rôle crucial que joue **l'insolation d'été à 60 °N** dans la théorie astronomique du climat de Milankovitch (cf. *supra*).

On notera aussi le déplacement de la couverture nuageuse, traduisant la migration de la ZCIT (zone de convergence intertropicale, soulignée en rouge et en bleu sur la figure 22.8) dans l'océan Indien depuis le sud de l'Indonésie vers l'Inde au cours de la mousson (voir Fig. 21.12).

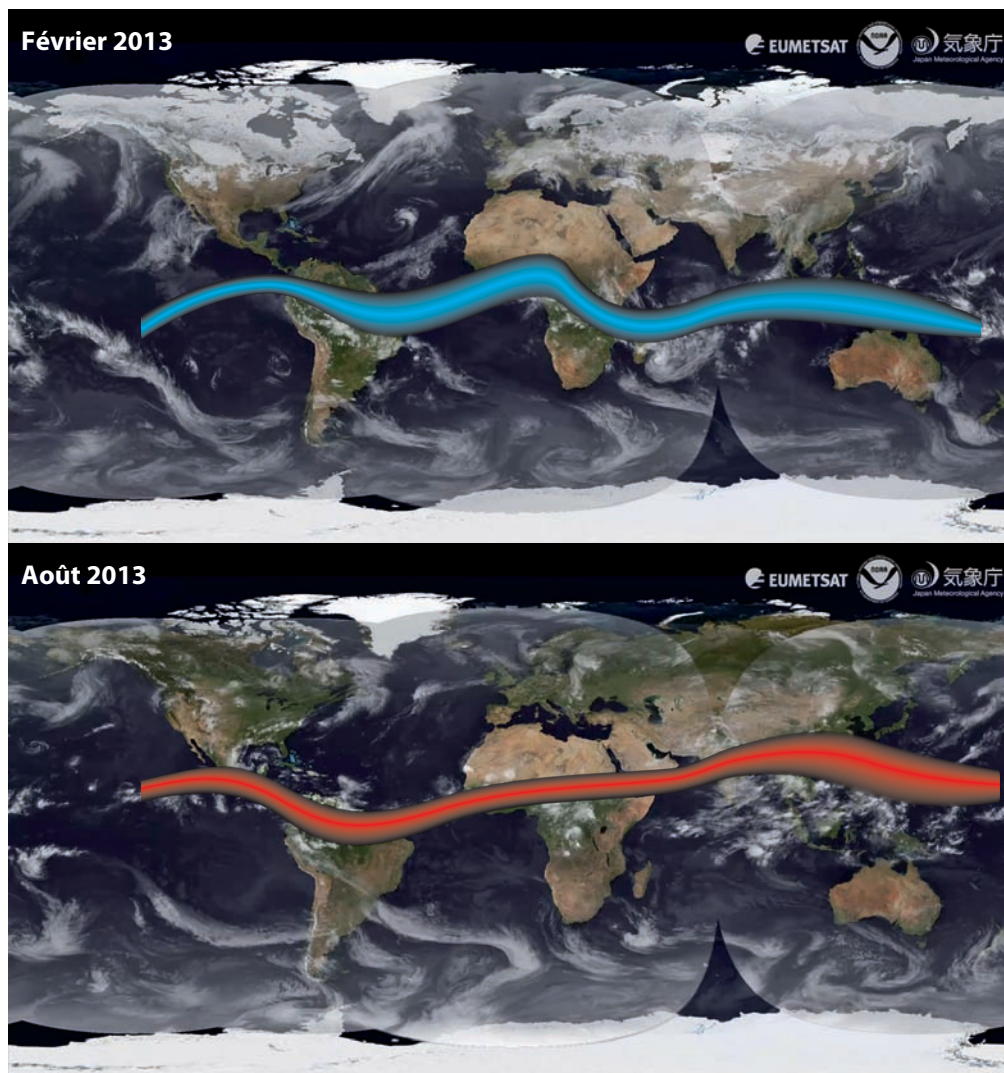


Figure 22.8 La dissymétrie climatique entre les deux hémisphères terrestres : photographies satellitaires de la Terre au cours de l'hiver et de l'été de l'hémisphère nord.

Photographies extraites de la vidéo « *A year of weather 2013* », retraçant les circulations atmosphériques au cours de cette année, qui est consultable à l'adresse <https://www.youtube.com/watch?v=m2Gy8V0Dv78>.

À retenir

- La quantité d'insolation reçue par la Terre est fortement dépendante des paramètres de l'orbite terrestre (excentricité, obliquité et précession des équinoxes). Ces paramètres fluctuent au cours du temps selon des fréquences respectivement de l'ordre de 100 000 ans, 40 000 ans et 20 000 ans. La théorie de Milankovitch postule donc que le climat terrestre est susceptible de fluctuations selon de telles fréquences ou de fréquences résultant de leur combinaison.
- Les variations de l'obliquité jouent un rôle important sur la répartition saisonnière de l'énergie solaire à la surface de la Terre.
- L'excentricité a un rôle beaucoup plus discret si on la considère isolément mais ses variations deviennent conséquentes lorsqu'elles se combinent avec la précession.
- Lorsque l'excentricité est faible, toutes les saisons ont la même durée quelle que soit la valeur de la précession qui ne joue alors aucun rôle climatique.
- Lorsque l'excentricité est forte, la durée des saisons dépend de la valeur de la précession.
- Si le solstice d'été a lieu lorsque la Terre est près du périhélie, la durée de la saison chaude sera minimale et elle sera très chaude car l'insolation, par unité de temps, y sera intense alors que la saison froide sera longue et rigoureuse.
- Si le solstice d'été a lieu lorsque la Terre est près de l'aphélie, la durée de la saison chaude sera maximale et fraîche (quantité d'insolation par unité de temps réduite) alors que la saison froide sera courte mais tiède.