

ASTRONOMIE ET VARIATIONS CLIMATIQUES

suite et fin de l'étude publiée dans le n°43

IV - 2 VARIATION DE L'OBLIQUITE ϵ :

Avant de présenter les résultats complets, nous allons prendre l'obliquité comme exemple en la décomposant en ses 6 termes principaux. Elle varie entre 22° et 24.5° avec une période proche de 41 000 ans en se mettant sous la forme :

	Période (années)
$\epsilon =$ 23.20556°	
- 0.6838 cos (31"6 t + 251.9°)	41000
- 0.62381 (32"6 t + 280.8°)	39730
- 0.1747 (24.17 t + 128.3°)	53165
- 0.1500 (31.98 t + 292.7°)	40521
- 0.0860 (44.82 t + 15.37°)	28910

Le terme fondamental a une amplitude largement dominante par rapport aux autres. Il donne des oscillations de près de 1° avec une période de 41 000 ans. Les 2 termes suivants d'amplitude moindre (0.20°) ont des périodes proches provoquant des battements qui peuvent renforcer ou atténuer le terme principal tout en conservant une période proche de 41 000 ans. La figure 4 présente l'évolution de l'obliquité de l'axe de rotation depuis 5 millions d'années. Elle évolue assez régulièrement avec la période proche de 41 000 ans superposée à des battements. Durant le dernier million d'années, l'inclinaison a présenté les variations les plus importantes. Ce phénomène se retrouve avec une récurrence de l'ordre de 1 million d'années. On peut aussi noter le minimum très marqué entre 1 800 000 et 200 000 d'années en arrière. Plus récemment (Figure 5) , les extrema se sont produits il y a - 50 000, - 30 000, - 10 000. Les prochains sont attendus pour 10 000, 27 000,.. Nous verrons que la réalisation d'une valeur minimale ou maximale de ϵ ne suffit pas si elle ne coïncide pas avec des positions particulières du périhélie afin de tempérer ou au contraire de contraster les saisons. Avant d'examiner ces coïncidences, il convient de présenter les résultats concernant les variations de ω et de e .

IV - 3 VARIATION DE ω (longitude du périhélie) :

Il varie de 0 à 360° avec une période moyenne de 21 550 (Figure 6) qui présente de larges variations car les valeurs extrêmes peuvent atteindre 15 600 et 27 700 ans. Nous verrons que les états caractéristiques qui sont $\omega = 90^\circ$ et $\omega = 270^\circ$ ont été atteints en - 22 5 00 et - 115 00 en coïncidence avec des minima et maxima de l'inclinaison. Le passage dans chacun de ces états produit une alternance de phases chaudes et de phases froides qui pourrait expliquer les glaciations.

IV - 4 EVOLUTION DE e :

Elle varie entre les valeurs théoriques 0 (orbite circulaire) et 0.07. La période est très régulière comprise entre 91 000 et 96 000 ans. On peut aussi signaler une modulation importante de période 400 000 ans (Figures 7 et 8) . Nous sommes actuellement dans une phase de faibles valeurs de e : l'orbite va être pratiquement circulaire dans 26 000 ans. Le régime d'insolation au périhélie et à l'aphélie est

Fig 6
LONGITUDE DU PERIHELIE (°)

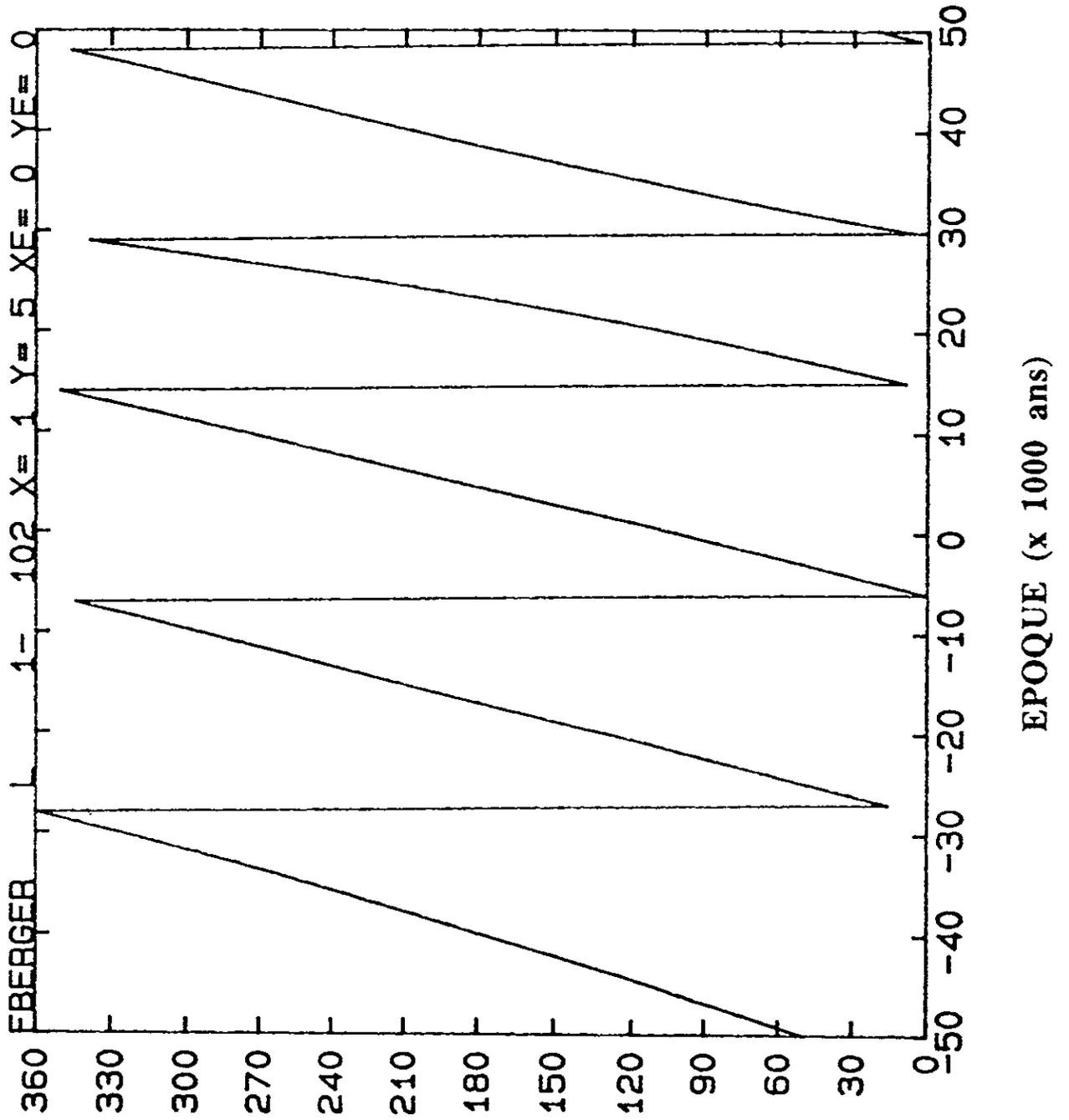


Fig 7

EXCENTRICITE

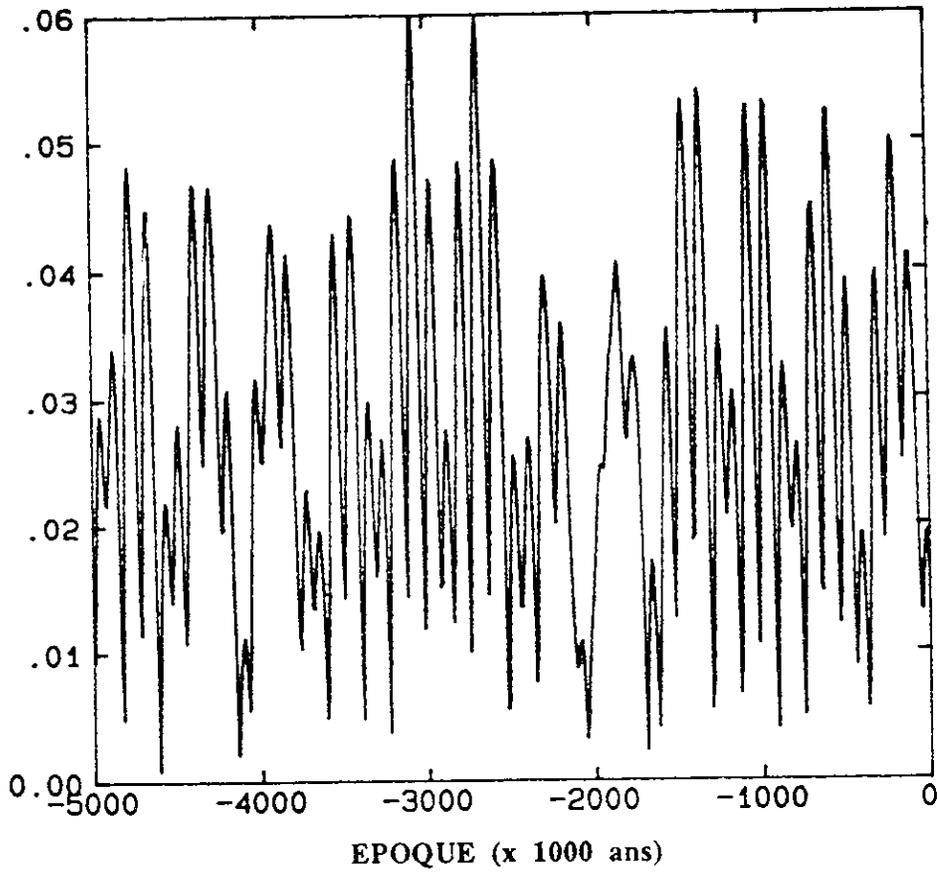
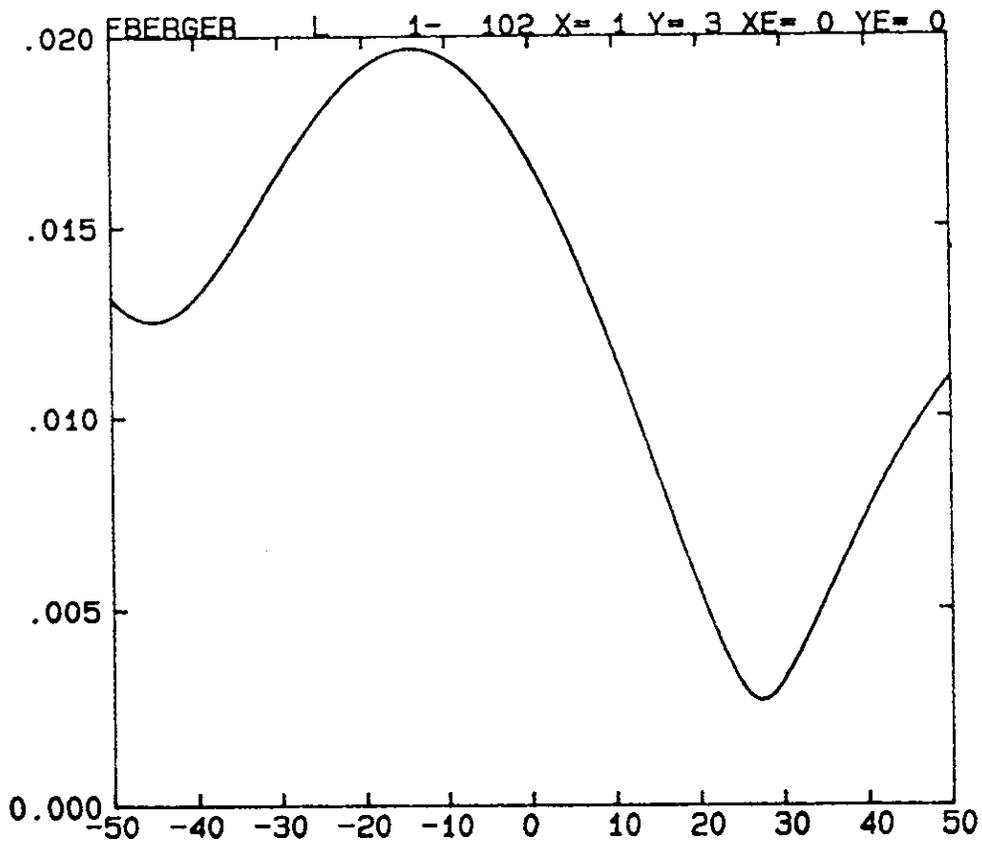


Fig 8

EXCENTRICITE



suivante. L'insolation est inversement proportionnelle au carré de la distance au soleil et soient I_a et I_p les insolutions respectivement à l'aphélie et au périhélie :

$$I_a = k \frac{I_0}{a^2 (1 + e)^2} \quad I_p = k \frac{I_0}{a^2 (1 - e)^2} \quad (11)$$

où a est le demi-grand axe de l'orbite. Comme $e \ll 1$ on peut écrire :

$$I_a = k \frac{I_0 (1 - 2e)}{a^2} \quad I_p = k \frac{I_0 (1 + 2e)}{a^2} \quad (12)$$

La variation relative est égale à

$$\frac{\Delta I}{I} = \frac{I_a - I_p}{(I_a + I_p)/2} = 4 e \quad (13)$$

Si on l'exprime en %, l'effet d'excentricité aux 2 extrémités de l'ellipse est de $4 e$. Entre les 2 valeurs extrêmes de e (0 et 0.06), la variation d'insolation croît de 0 à 24% ce qui montre l'importance de l'évolution de l'excentricité. Actuellement avec $e = 0.016$ l'effet est de 6%, conférant ainsi à l'hémisphère nord des saisons moins contrastées, car c'est en hiver que nous sommes au périhélie.

Parallèlement à une répartition différente de l'insolation annuelle, une variation d'excentricité déplace également l'équateur calorifique qui se situe actuellement à 3° au-dessus de l'Equateur. Si on conserve les mêmes valeurs de ω (102°) et de ε (23.45°) qu'actuellement, avec e variant de 0 à 0,06, l'équateur calorifique se déplace de la latitude 0 à la latitude 12° .

La température effective T_e sur Terre est liée à l'insolation par une relation de la forme $I \propto T^4$ (car la terre rayonne comme un corps noir) qui entraîne

$$\frac{\Delta I}{I} = 4 \frac{\Delta T}{T} = 4e \quad (14)$$

d'où $\Delta T = T_e$

On obtient des écarts respectivement de 5° et de 18° pour les valeurs extrêmes de e en conservant une valeur moyenne de $T = 300$ K. L'écart actuel de 5° exprime l'importance de l'effet de distance au soleil qui est loin d'être négligeable. Quand e atteint sa valeur maximale, le contraste atteint pratiquement 18° entre les 2 extrémités de l'ellipse. Si cette variation est moindre que la variation saisonnière, le facteur de distance en liaison avec la position du périhélie module fortement les saisons entre les 2 hémisphères. Si le passage au périhélie se produit durant l'hiver ($\omega = 90^\circ$ ou $\omega = 270^\circ$), l'hémisphère concerné connaît alors 2 saisons douces alors que dans l'autre, l'effet saisonnier est amplifié de $\pm 9^\circ$ en température.

Tableau 5

Valeurs extrêmes de e , ϵ et ω réalisées durant les derniers millions d'années

Elément	Valeurs extrêmes et actuelles			Périodes		
	Min	Actuel	Max	Mini	Moy	Max
ϵ	21.84	23.45	24.46	37000	41000	44000
e	0.002	0.017	0.053	81000	95000	106000
ω	0°	102°	360°	16000	22000	28000

Tableau 6

Les états caractéristiques des éléments e , ϵ et ω à la fin du quaternaire

Epoque	- 33 700	- 22 500	- 11 500	Actuellement
ω	270	90	270	102
ϵ	22.50	22.14	24.19	23°45
e	0.015	0.019	0.020	0.017

Les situations de - 22 500 et - 11 500 correspondent à 2 états caractéristiques de la Terre favorisant l'un la genèse d'une glaciation ($\omega = 90^\circ$; ϵ minimum), l'autre une période chaude ($\omega = 270^\circ$; ϵ maximal). Les années sont comptées à partir de 1950.

V - LA THEORIE DE MILANKOVITCH

Milankovitch n'a pas été le premier à tenter d'expliquer la récurrence des glaciations du quaternaire par les variations des éléments elliptiques de la Terre. Adhemar en 1842 et Croll en 1875 avaient déjà avancé de telles idées. Pour Milankovitch, des hivers doux et des étés frais sont les facteurs primordiaux favorisant les glaciations. Parmi toutes les combinaisons possibles des éléments, il distingue 2 états caractéristiques :

- **glaciation** (ϵ minimum ; $\omega = 90^\circ$) : dans les hautes latitudes (où de grandes quantités de neige et de glace existent) le déficit d'insolation en été empêche la couverture gelée de fondre; ce phénomène provoque la croissance de la calotte qui s'étend et refroidit globalement la Terre. Quand l'inclinaison est faible, la différence été-hiver s'atténue mais le contraste en latitude est maximal, accélérant de ce fait l'alimentation de la couche de glace. En effet, le contraste croissant Equateur-pôle augmente la composante méridienne de la circulation atmosphérique et océanique. Les océans tropicaux sont plus chauds par excès d'insolation et s'évaporent plus abondamment ; les masses d'air chaudes et enrichies en vapeur d'eau sont transportées plus efficacement en hautes latitudes où elles se déposent.

- **interglaciaire** (ϵ maximum ; $\omega = 270^\circ$) : la situation est l'inverse de la précédente car aux hautes latitudes l'excès d'insolation estival provoque la fonte des glaces accumulées en hiver. Les calottes accumulées en hiver régressent en été.

Dans la théorie de Milankovitch, le paramètre fondamental est donc le contraste d'insolation $I_e - I_h$ et non l'insolation totale $I_e + I_h$. D'après les expressions générales développées dans le paragraphe "Insolation" nous avons

$$I_e - I_h = 2 \frac{I_0}{\pi} (\sin \varepsilon \sin \varphi - \frac{4}{\pi} e \sin \omega \cos \varphi) \quad (15)$$

Pour une latitude déterminée, le contraste est bien maximal quand l'angle ε est maximal et $\omega = 270^\circ$ car les 2 termes sont positifs et le premier a la plus grande valeur possible. On peut aussi noter que l'effet est augmenté si l'excentricité atteint sa valeur maximale. Inversement, il sera minimal pour ε minimal ; $\omega = 90^\circ$ et e maximale. (le 2e terme est négatif avec sa plus grande valeur absolue). Actuellement ($\varepsilon = 23.45$; $\omega = 102$ et $e = 0.016$).

$$I_e - I_h = 2 \frac{I_0}{\pi} (0.397 \sin \varphi - 0.02 \cos \varphi) \quad (16)$$

Il peut paraître surprenant que le contraste d'insolation soit <0 à l'équateur (quand $\varphi = 0$). A l'Equateur, l'inclinaison ne joue aucun rôle dans le bilan saisonnier ; c'est principalement le facteur de distance qui est prépondérant. Le soleil passant au périhélie en hiver de l'hémisphère Nord, l'Equateur reçoit plus d'énergie durant cette saison que durant l'Eté. En réalité, en dessous de l'Equateur calorifique il faudrait inverser les saisons. On peut dresser le tableau suivant au cours des derniers millions d'années en précisant les 2 états extrêmes.

Tableau 7 : Contraste saisonnier
 $\pi (I_e - I_h) / I_0$

Latitude $\varphi =$	90	60	45	30	0
$e = 0.06; \varepsilon = 22^\circ; \omega = 90^\circ$	0.37	0.28	0.21	0.12	-0.076
$e = 0.06; \varepsilon = 25^\circ; \omega = 270^\circ$	0.42	0.40	0.35	0.28	0.076
$e = 0.016; \varepsilon = 23.45^\circ; \omega = 102^\circ$	0.40	0.33	0.28	0.18	-0.019
Ecart relatif max/min	13%	35%	50%	50%	25%

Dans les 2 états extrêmes, l'insolation totale peut être également exprimée :

$$I_e + I_h = 2 \frac{I_0}{\pi} \left(\left(1 - \frac{\sin^2 \varepsilon}{4}\right) - \sin^2 \varphi \left(1 - \frac{\sin^2 \varepsilon}{4} - \sin \varepsilon\right) \right) \quad (17)$$

Tableau 8 : insolation totale
 $\pi (I_e + I_h) / I_o$

$\varphi =$	90	60	45	30	0
$\varepsilon = 22$	0.37	0.52	0.67	0.82	0.96
$\varepsilon = 25$	0.42	0.55	0.68	0.82	0.95
$\varepsilon = 23.45$	0.40	0.54	0.68	0.82	0.96

En hautes latitudes, l'état favorable à une glaciation (ε minimum) provoque également un déficit d'insolation totale.

VI - CONCLUSION ET DISCUSSION

Maintenant que la liste des différents mécanismes susceptibles de jouer un rôle dans chacun des paléoclimats a été dressée, on peut essayer d'analyser rapidement la contribution de chacun.

VI - 1 Variations climatiques à longues périodes :

Durant cette période, les indices utilisables sont pratiquement inexistantes, car ils ont été en grande partie détruits par les bouleversements géologiques. (Il y a peut-être eu 5 âges glaciaires non datés). Durant cette période, il semble évident que la faible luminosité du soleil a joué un grand rôle. D'autre part, le redressement de l'axe polaire qui a agi en concomitance avec cet effet a dû favoriser l'extension d'un état glaciaire permanent pendant près de 3 milliards d'années. Cependant, l'effet de serre peut-être plus important (plus de CO_2 et présence de méthane) a pu compenser cet état.

L'état glaciaire quasi-permanent aux premiers âges de la Terre est peut-être justifié par le lent développement de la vie à la surface de la Terre ; en effet, c'est seulement à partir du cambrien qu'il y a vraiment eu explosion biologique alors que la vie existait depuis près de 3 milliards d'années sous forme de végétaux inférieurs. Les algues bleues sont nées à la faveur d'un petit réchauffement dans les zones équatoriales (elles ont pu survivre à un climat glacial général car elles peuvent résister à des températures de l'ordre de $- 269^\circ C$ et sont capables d'effectuer la photosynthèse à des températures aussi basse que $- 30^\circ C$).

Les seuls phénomènes qui puissent varier sur une échelle de temps comparable à la "période" des âges glaciaires (environ 250 millions d'années) sont les phénomènes solaires. Ici, un modèle bien élaboré de structure interne du soleil et quelques "bons" nuages de matière interstellaire placés çà et là dans la galaxie expliqueraient bien des choses (et de plus la période des âges glaciaires correspond à la période de rotation du soleil autour du centre galactique). L'hypothèse des rencontres du soleil avec des nuages de matière se perd dans l'arbitraire et serait peut-être une idée à vérifier.

Pour les deux derniers âges glaciaires (permo-carbonifère et actuel) il semble que l'explication soit simple et naturelle et qu'il ne soit pas nécessaire d'en chercher des explications artificielles et complexes. En effet, depuis le Cambrien la dérive des continents a joué un grand rôle et il ne faut pas oublier que la présence de continent à proximité du pôle est nécessaire à l'installation d'une calotte polaire conséquente

(actuellement la glace de la banquise du pôle nord est négligeable devant celle emmagasinée dans l'Antarctique). La glaciation du permo-carbonifère a coïncidé avec l'installation au pôle sud du bloc continental méridional (Gondwana) et celle du quaternaire avec l'arrivée aux hautes latitudes polaires du Groënland et de l'Antarctique. L'âge glaciaire permien a disparu avec le morcellement du Gondwana qui a libéré les hautes latitudes australes. Les quelques résultats qualitatifs montrent que la dérive en latitude suffit à expliquer dans l'ensemble l'évolution paléoclimatique à l'échelle de 10 à 100 millions d'années mais ne permettent pas de conclure que d'autres phénomènes n'ont pas agi.

VI - 2 Glaciations et stades glaciaires

Pour la période (- 250 000 - actuellement) l'accord avec les faits observés et les faits prédits par la théorie de MILANKOVITCH est remarquable. L'accord porte sur la nature, l'ampleur, la durée et l'âge des événements qui se sont succédés : naissance, développement et dislocation d'une calotte glaciaire. Le Würm III assez bien connu va être pris comme exemple.

Vers - 33700 (ϵ minimum, $\omega = 270^\circ$) il naît au pôle Nord un déficit d'insolation estivale qui croît et se propage vers les latitudes moyennes tandis que l'insolation tropicale devient excédentaire. La circulation d'air saturé d'eau accélère le développement de la calotte glaciaire qui progresse pour deux raisons : l'albédo élevé de la glace $\approx 0,7$ amplifie le contraste thermique et la calotte refroidit les océans par l'intermédiaire des courants marins.

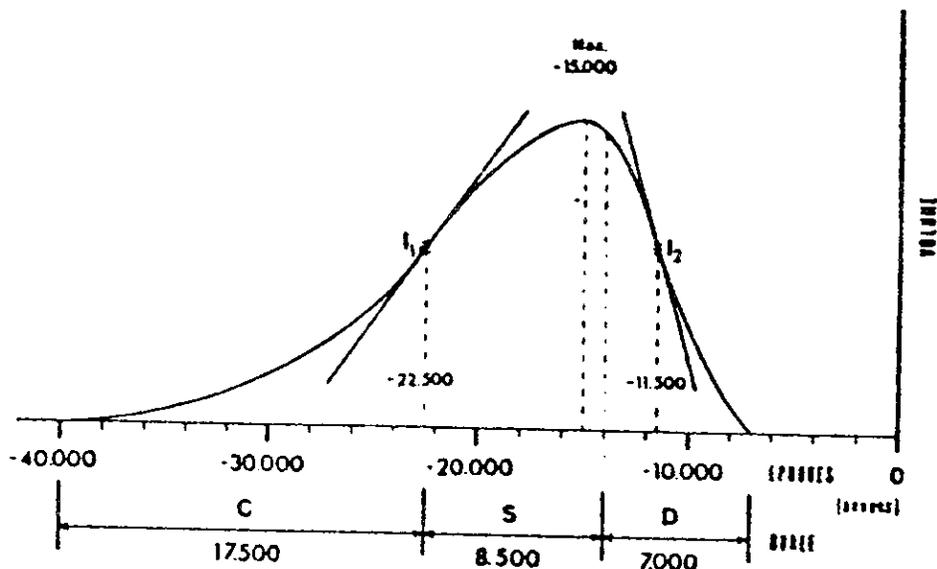


Figure 9 - Allure de la courbe de croissance de la glaciation Würm III en volume d'eau équivalent accumulé en glace.

Vers - 22 500 (ϵ minimum, $\omega = 90^\circ$) le déficit a atteint son maximum et remonte désormais vers les hautes latitudes : il y a retrait de la calotte qui s'amorce avec un retard dû à l'inertie des océans.

Vers - 11 500 (ϵ maximum, $\omega = 270^\circ$) l'insolation estivale est maximale. La désagrégation s'achève vers - 7000 époque de la disparition du glacier scandinave.

De nombreux faits militent en faveur de cette théorie : régression et transgression maritimes, cycle de 20 000 ans dans les varves glaciaires, rythmes de dépôt de 40 000 ans dans les couches de houille...

VI - 3 Climat actuel :

Depuis environ 2 000 ans, on a mis en évidence d'incontestables alternances d'épisodes chauds et froids avec des pseudo-périodes liées à celles du cycle solaire (études de varves glaciaires, de bois fossiles, de carottes de glace). D'après les extrapolations faites, on se dirige vers une période où le climat sera un peu plus rigoureux, comme cela s'est produit vers l'an 1000 et 1850. Au point de vue astronomique l'obliquité décroît pour passer vers un minimum ($23^\circ 02'$) dans 10 000 ans ; à cette époque ω vaudra 270° et les conditions propices seront créées pour développer une nouvelle calotte glaciaire qui atteindra son maximum vers 20 000. D'autre part, la Terre est entrée dans un âge glaciaire au début du quaternaire et va sûrement y rester encore pour quelques millions d'années.

APPENDICES

A1- LES THERMOMETRES GEOLOGIQUES

1) Géologiques : étude des traces laissées par les glaciers et les déserts (évaporites et tillites).

2) paléontologiques : l'étude du comportement de micro-organismes marins pélagiques a permis de connaître quels étaient les domaines de températures compatibles avec l'existence de chaque espèce. Ces études nécessitent une bonne connaissance des conditions de vie, un choix judicieux des associations et un traitement statistique sérieux.

L'analyse pollinique s'est développée considérablement depuis quelques années. Le principe de détermination est sensiblement le même que pour les études océaniques : la connaissance du milieu de vie des végétaux et leurs associations permet de reconstituer les paléoclimats.

3) Isotopiques :

a) La composition isotopique des précipitations varie avec la température de formation des nuages. Plus la température est basse, et plus les eaux sont pauvres en isotopes. On a mis en évidence une relation linéaire entre O^{18}/O^{16} et la température (la variation du rapport est de 50% quand la température varie de -50 à $30^\circ C$). C'est dans les calottes glaciaires qu'a été effectuée la plupart des travaux.

b) Concrétions des cavernes : l'eau des précipitations s'infiltré dans le sol et se charge de CO_2 dans la couche d'humus. Les carbonates dissous se redéposent dans les cavernes en raison de la baisse de pression de CO_2 . Cette méthode comme beaucoup d'autres est particulièrement fiable pour mettre en évidence des variations de températures mais trop d'incertitudes résident dans la détermination d'une température absolue.

c) Tests et coquilles fossiles : lorsque le carbonate se dépose, le rapport O^{18}/O^{16} du carbonate formé est différent de celui de l'eau. Cette différence appelée fractionnement isotopique dépend uniquement de la température.

A2- NOTATION DES ANNEES :

Le calcul des éléments orbitaux de la Terre est rapporté à l'année de référence 1950.0. De fait la notation des années est définie à partir de cette date. Par exemple - 22 500 exprime une époque qui se situe 22 500 avant l'année 1950. Les Anglo-saxons ont créé une notation spéciale (B.P = Before Present et A.P = After Present) afin de ne pas utiliser de signes + ou - qui sèment la confusion avec la chronologie historique comptée à partir de l'année 1 après Jésus-Christ.

A3- LES ECHELLES GEOLOGIQUES

Formation de la Terre	4,6 milliards d'années
Début de l'ère primaire	600 millions "
" secondaire	220 "
" tertiaire	63 "
" quaternaire	3 "

A4- LES GLACIATIONS DU QUARTENAIRE

PERIODES GLACIAIRES	DATES AVANT JC (Début)	ESPECE HUMAINE
Biber	1800 000	Australopithèque
Interglaciaire Biber/Donau		
Donau		
Inter Donau/Gunz		
Gunz	800 000	Pithécanthropes
Inter Gunz/Mindel	600 000	
Mindel	500 000	
Inter Mindel-Riss	400 000	
Riss	350 000	Pré-néandertaliens
Inter Riss-Würm	200 000	Néandertaliens
Würm I et II	100 000	
Inter Würm II et III	36 000	Cro-Magnon
Würm III	30 000	
Inter Würm III et IV	17 500	
Würm IV	15 000	L'Homme moderne prend sa forme actuelle
Pré boréal	10 000	
Boréal		
Subboréal	3 000	