

# ASTRONOMIE ET VARIATIONS CLIMATIQUES

par

Jean-Paul PARISOT et Bernard MAZODIER  
Observatoire de Besançon

## I - FAITS ET METHODES

1. Les âges glaciaires
2. Les glaciations
3. Les petits âges glaciaires

## II - BILANS ENERGETIQUES

1. L'insolation
2. Rôle de l'atmosphère

## III - VARIATIONS DE LA CONSTANTE SOLAIRE

1. Distance Terre-Soleil
2. Activité solaire
3. Evolution du Soleil
4. Traversée de nuages galactiques
5. Action de la Lune

## IV - VARIATIONS DES ELEMENTS ELLIPTIQUES TERRESTRES

1. Méthode
2. Evolution de l'obliquité  $\epsilon$
3. Evolution de  $\omega$
4. Evolution de l'excentricité  $e$

## V - LA THEORIE DE MILANKOVITCH

## VI - CONCLUSION

1. Précambrien ; variations à long terme
2. Glaciations et stades glaciaires
3. Climat actuel

Appendice : A1. Les thermomètres géologiques

A2. Notation des années

A3. Périodes géologiques

A4. Les glaciations du quaternaire

A5. Programme de calcul des éléments orbitaux de la Terre

## BIBLIOGRAPHIE GENERALE

La France au temps des mammouths (collectif, Hachette 1969, 249 pages)

Labeyrie J. L'homme et le climat (Denoel, Paris 1985, 281pages)

Bernard E.A. (1974-1975) Les bases énergétiques de la paléoclimatologie théorique et l'évolution des climats, 160 pages publiées dans Ciel et Terre 90(6)p413 ; 91(1)p41,89 et 161.

Berger A. (1979) La théorie astronomique des paléoclimats. La Météorologie VIème série n°16 p9.

Berger A. (1976) Obliquity and Precession for the last 5 000 000 years. Astronomy and Astrophysics n°51 p 127.

Berger A. Long-term variations of daily. Insolation and Quaterny climatic changes. Journal of the atmospheric sciences 35(12)p 2362.

Parmi la cinquantaine de causes (astronomiques, géodynamiques, chimiques, géologiques,...) susceptibles d'agir sur le climat à long ou court terme, les phénomènes astronomiques ont l'avantage d'être calculables et prévisibles. En particulier les éléments positionnant la Terre dans l'espace (distance au soleil, inclinaison de l'axe,...) qui jouent un rôle central dans le mécanisme des saisons ont, en raison de leur variabilité, modulé la climatologie terrestre depuis toujours.

C'est le but de cet exposé de faire le point sur l'évolution des éléments orbitaux de la Terre en liaison avec le rôle climatique qu'ils ont joué. Ces idées ne sont pas nouvelles car elles ont été diffusées par le mathématicien Milankovitch dès 1931. Actuellement la communauté climatologique et astronomique est partagée sur l'efficacité de tels mécanismes pour lesquels on trouve tantôt des arguments convaincants, ou inversement des contre-exemples évidents. Après une présentation rapide des données paléoclimatiques on trouvera l'exposé détaillé du rôle de chacun des éléments orbitaux en terme d'insolation semestrielle qui s'avère être le paramètre essentiel. Un programme en Basic donne au lecteur la possibilité de reconstituer et de prédire en détails l'évolution orbitale de la Terre.

## INTRODUCTION :

Il y a une vingtaine d'années, plusieurs rapports émanant de l'O.M.M. (Organisation Météorologique Mondiale) lançaient la première mise en garde : "Attention l'homme est en train de modifier le climat de manière irréversible". Les rapports faisaient état de l'imminence d'une glaciation dont l'accélération serait induite par l'homme : industrialisation, urbanisme, désertification intense, rejet de polluants... Depuis, cette thèse a été largement combattue et l'O.M.M. a rappelé à plusieurs reprises qu'il fallait accepter avec beaucoup de prudence ces prévisions de catastrophes climatiques. Premier signal d'alarme, une brume étrange qui flotte depuis une vingtaine d'années au-dessus de l'Arctique : un brouillard qui n'a rien de naturel puisqu'il est constitué de gouttelettes d'acide sulfurique dérivant lentement depuis les grands centres industriels de l'hémisphère Nord et qui viennent s'accumuler au-dessus de la banquise. Ce brouillard pollué joue le rôle de la vitre d'une serre de jardinier en emprisonnant la chaleur au-dessus de la banquise. Quelques degrés supplémentaires, il n'en faudrait pas plus pour qu'en de multiples points du globe, l'aventure biblique de Noé se renouvelle.

Partout sur terre, le climat fluctue non seulement d'années en années mais il change graduellement de siècles en siècles. La principale difficulté est d'estimer objectivement ces fluctuations mais notre mémoire est fort courte et nous avons tendance à oublier les faits semblables du passé et à nous alarmer quand un hiver trop sévère ou une sécheresse prolongée s'installe. Les fluctuations et changements à long terme sont les résultats de processus naturels qui agissent sur le système climatique très complexe : atmosphère, océans, continents. Jusqu'à présent ces processus étaient liés à des facteurs intrinsèques du système ou à des facteurs externes tels que les événements astronomiques. A l'heure actuelle, il apparaît très nettement que l'homme lui-même devient un facteur d'influence dans la balance climatologique.

Les variations de température à la surface de la terre au cours de son histoire constituent une donnée importante pour la compréhension de l'évolution de la Terre. De nombreux faits attestent une évolution (souvent catastrophique) des climats à la surface de la terre. Par exemple, les études géologiques et paléontologiques prouvent qu'au début du carbonifère (il y a environ 390 millions d'années) régnait sur l'Europe

un climat tropical (présence d'évaporites en Belgique) qui, peu à peu, a évolué vers un climat équatorial attesté par les grands gisements de houille de la fin du carbonifère. Depuis cette époque, le climat européen n'a cessé d'évoluer et de se dégrader pour parvenir à son stade actuel.

C'est le but de la climatologie de définir les causes principales de ces modifications et de rechercher les phénomènes susceptibles de les expliquer (l'imagination féconde des astronomes et géologues a fourni environ une soixantaine de mécanismes). Le but de cette étude est de présenter les liens (souvent qualitatifs) entre l'évolution paléoclimatique et celle des phénomènes astronomiques depuis la formation de la Terre. On insistera plus particulièrement sur les variations induites par l'évolution de l'orbite de la Terre autour du Soleil.

## I - FAITS ET METHODES

Déjà dans la première moitié du XXe siècle, on avait acquis la certitude de ces bouleversements climatiques et très tôt deux grandes écoles s'affrontent :

1) les partisans de la dérive des continents pour qui l'explication est très simple : les continents sont animés de mouvements de grandes envergures en latitude et ils se trouvent alternativement dans des régions froides et dans des régions chaudes.

2) Les fixistes : les continents sont immobiles, et les variations de température observées sont simplement causées par des sursauts ou au contraire par des baisses de l'activité solaire.

Avec le succès remporté par la dérive des continents dans les années 60, les partisans de cette théorie remportent la première manche. Mais, malgré tout, des études soigneuses font apparaître les faiblesses de la théorie de la tectonique des plaques dans l'interprétation de certaines paléotempératures. On peut rapporter de nombreuses anomalies comme par exemple la présence de magnolias en Alaska à une époque où elle se trouvait à une latitude de 70°N ! Ceci suggère que des facteurs autres que la dérive des continents affectent sérieusement les paramètres climatiques.

### I - 1 LES AGES GLACIAIRES

La figure 1 donne une idée des tendances générales du climat depuis l'antécambrien. Les 3 courbes mises en parallèle nous révèlent le climat passé à partir de 3 méthodes différentes (cf. appendice "les thermomètres géologiques"). De cette figure se dégage l'idée d'une alternance "presque cyclique" de périodes chaudes (vers - 150 et - 500 millions d'années) et de périodes froides (comme celle que nous connaissons depuis le début du quaternaire). Ces fluctuations climatiques à long terme se succèdent avec une échelle de temps de l'ordre de 100 millions d'années et s'accompagnent de variations de température de l'ordre de 20°. Ce sont les phases froides qui ont reçu le nom d'âge glaciaire : on en a dénombré 3 avec certitude depuis l'ère primaire et 5 non datées dans le précambrien (durant cette époque les indices utilisables sont pratiquement inexistant).

## LES AGES GLACIAIRES

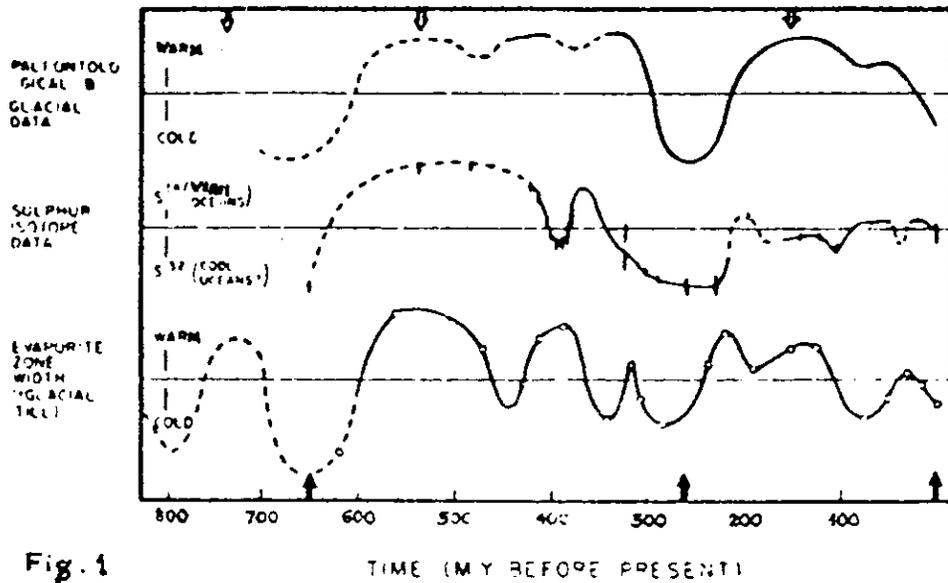


Fig. 1

3 exemples de données paléoclimatiques suggérant des fluctuations sur des échelles de l'ordre de 100 millions d'années. Les flèches indiquent les périodes chaudes (blanches) et froides (noires)

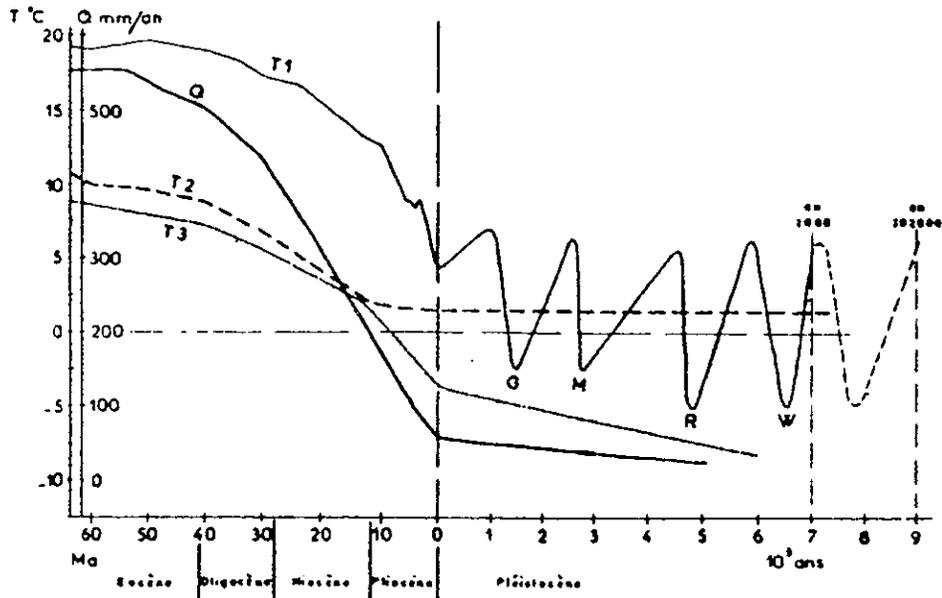


Fig. 2. — Températures et précipitations entre — 60 Ma et —  $7 \cdot 10^4$  ans à l'échelle des Ma et depuis cette époque (0) à l'échelle de  $10^4$  ans, d'après P.M. Borisov.

- T1 : Température moyenne annuelle en Europe occidentale
- T2 : Température des eaux abyssales équatoriales dans le Pacifique
- T3 : Température du mois le plus froid dans les déserts de l'Asie Centrale
- Q : Précipitations dans le désert du Kyzylkum
- G : Gunz ; M : Mindel ; R : Riss ; W : Würm.

## I-2 LES GLACIATIONS :

Comme on peut le constater sur la figure 2, le climat européen n'a cessé de se dégrader depuis le début du quaternaire. Cet âge glaciaire dans lequel nous vivons actuellement se présente comme une suite pseudo-périodique de phases chaudes et de phases froides. La période est d'environ 200 000 ans et les variations de température induites sont de l'ordre de 10°.

L'alternance de périodes chaudes et froides durant le quaternaire a été mise en évidence au début du siècle par BRUCKNER et PENCK en 1905. L'étude des moraines alpines dans les vallées des affluents du Danube leur a permis de montrer des avances et des reculs considérables du glacier alpin. Ils ont ainsi proposé le découpage du quaternaire (appelé chronologie alpine) en 4 glaciations portant le nom des affluents du Danube où ces optimums climatiques ont été soupçonnés (Gunz, Mindel, Riss et Würm). Cette évolution "en dent de scie" des climats récents a été non seulement précisée sur le continent européen par l'utilisation de "thermomètres géologiques" nouveaux mais elle a été mise en évidence sur d'autres continents (Amérique du Nord, Afrique). Une analyse plus fine permet de découper chaque glaciation en stades et interstades glaciaires (durée de l'ordre de 50 000 ans). Par exemple, le mammouth a vécu en "France" durant la glaciation du Würm et sa disparition a coïncidé avec le retour d'un climat plus chaud à la fin du Würm IV (4e stade du Würm qui s'est terminé il y a environ 10 000 ans).

L'optimum climatique le plus froid du quaternaire s'est produit durant la glaciation du Riss il y a environ 200 000 ans. Les Alpes disparaissaient complètement sous une calotte de glace qui recouvrait tout le Nord de l'Europe, calotte qui pouvait atteindre une épaisseur de l'ordre de 2 000 m. On a l'habitude d'estimer l'importance des retenues d'eau sous forme de glace par l'équivalent en eau : c'est la hauteur dont varierait le niveau mondial des mers si on faisait fondre cette glace en la répartissant uniformément sur toutes les mers. Les estimations actuelles de la calotte rissienne donnent une valeur proche de 150 m, équivalente à la calotte polaire antarctique (100 m) et au glacier du Groenland (50 m) réunis. La banquise arctique est négligeable car quelque soit la quantité d'eau incorporée sous forme de glace dans l'Arctique, quand elle fond le niveau de la mer ne varie pas en vertu du principe d'Archimède (Faites l'expérience dans un verre ; des glaçons qui fondent ne font pas varier le niveau !)

Il est bien évident que ces variations s'accompagnent d'une profonde modification de la physionomie des continents actuels : la fonte des glaces provoque la remontée des continents allégés par cette perte de poids (la Norvège s'est élevée de presque 100 m depuis 10 000 ans). L'abaissement considérable du niveau des mers a provoqué la disparition de nombreux bras de mers comme la Manche. La création de ces ponts a rendu possible l'implantation de l'homme dans des îles comme l'Australie et la Grande-Bretagne.

## I-3 PETITS AGES GLACIAIRES :

Depuis environ 2000 ans (Figure 3) , on a mis en évidence une alternance d'épisodes chauds et froids (petits âges glaciaires). Actuellement on se situe dans une phase descendante : avancée des glaces du Groenland, décroissance de la température de l'eau de mer. Des minimums ont été observés vers l'an 1000 et vers 1580. Le dernier maximum date de 1940 et depuis, les températures moyennes diminuent d'environ

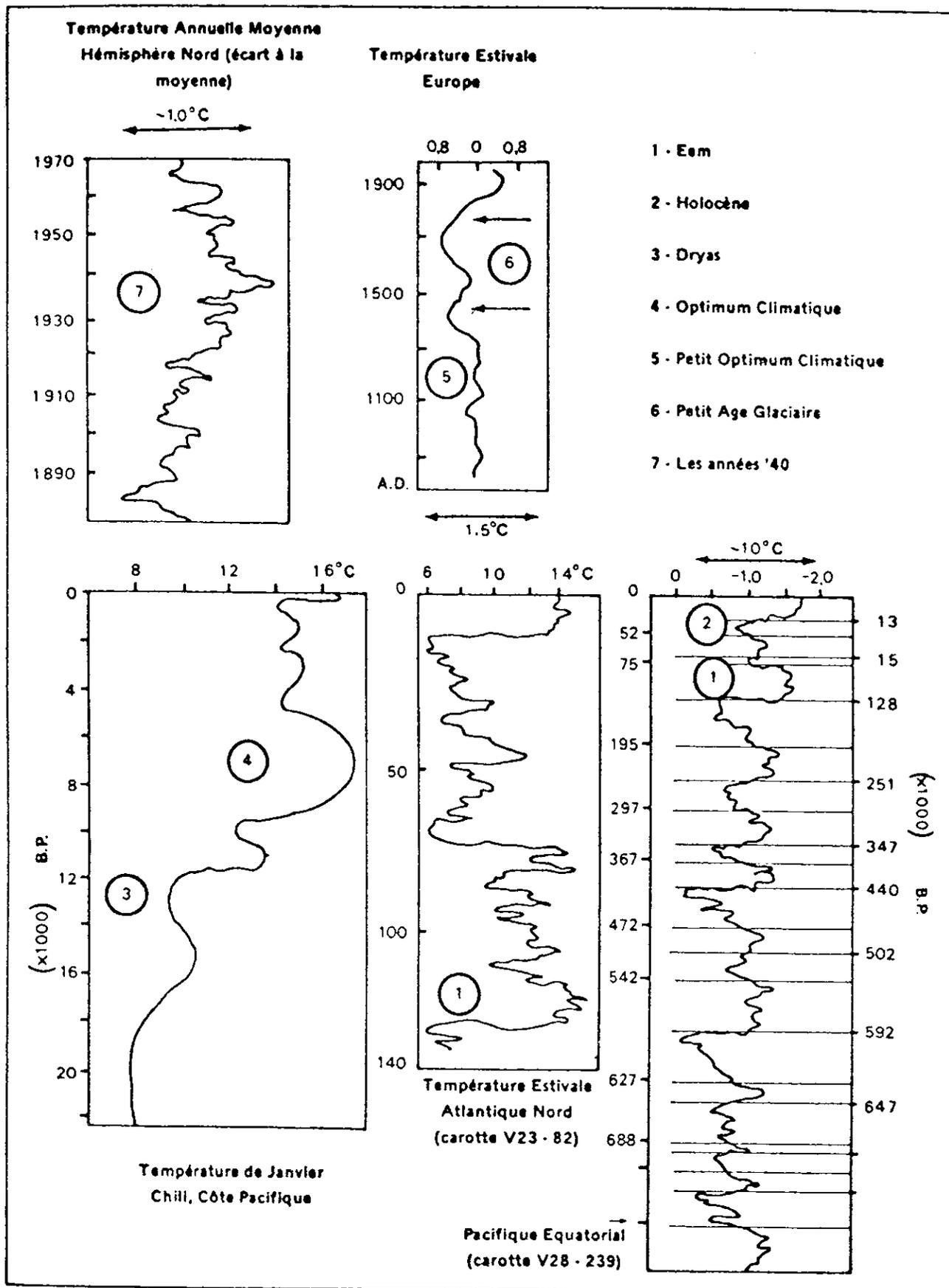


Fig. 3 : Changements climatiques au Quaternaire.

0,05 % : la série d'hivers doux observés depuis 1970 en Europe constitue une anomalie locale et ne reflète pas un renversement de la tendance générale (Fig. 3). Dans le même ordre d'idées, les variations actuelles des glaciers alpins paraissent inexplicables : de 1880 à 1892, le glacier du Rhône a avancé de plusieurs mètres par an. La décrue fut tout aussi rapide. On a l'impression de se trouver devant un équilibre instable qu'un rien suffit à détruire, de telle sorte qu'on ne puisse pas déduire grand chose des faits actuels, simples accidents dans l'évolution générale.

Tableau 1 : Les grandes phases climatiques

Phase climatique	Echelle de temps (an)	Variations de température induites (°C)
Age glaciaire	200 x 10 <sup>6</sup>	20°
Glaciation	200 000	10°
Stade glaciaire	50 000	5°
Petit âge glaciaire	100	1°

Si la variabilité des climats est bien établie à la surface de la Terre, on a des certitudes sur l'existence de phénomènes analogues sur les autres planètes. Les photographies prises par Mariner 9 de la surface de Mars ont montré l'existence de vallées fluviales asséchées. L'eau a certainement coulé à la surface de Mars à une époque inconnue. A l'heure actuelle, on aurait de grosses difficultés à y trouver de l'eau sous forme liquide car en plein été, il règne une température de l'ordre de - 20° C sous les tropiques. Des phénomènes de grande envergure agissent sur les paramètres climatiques et produisent à la surface des planètes des bouleversements importants.

Après une présentation de l'insolation, paramètre climatique fondamental, nous examinerons rapidement les phénomènes astronomiques susceptibles de faire évoluer ce paramètre. L'accent sera mis sur le rôle des éléments orbitaux de la Terre : méthodes de calcul, variations des éléments, conséquences climatiques,...

## II - BILANS ENERGETIQUES

### II - 1 L'INSOLATION

La quantité fondamentale qui intervient dans le processus de chauffage de la Terre par le Soleil est la constante solaire  $I_0$ . Actuellement elle vaut :

$$I_0 = 1.92 \text{ cal/mn/cm}^2 = 1340 \text{ W/m}^2$$

Elle mesure l'énergie totale arrivant en haut de l'atmosphère. Localement, sans tenir compte de l'absorption atmosphérique, l'efficacité de cette énergie reçue dépend de 2 facteurs :

- de la distance Terre-Soleil (la constante est définie à 1 unité astronomique (U.A.))
- de l'orientation de la surface du sol par rapport aux rayons du soleil ; elle est directement liée à la latitude.

Si on appelle  $r$  la distance Terre-Soleil et  $h$  la hauteur du soleil au-dessus de l'horizon, l'insolation instantanée est égale à :

$$I = \frac{I_0 \sin h}{r^2} \quad (1)$$

La hauteur  $h$  du soleil à un instant déterminé dépend de la latitude du lieu ( $\varphi$ ) et des coordonnées équatoriales du soleil ( $\alpha$  et  $\delta$ ) suivant la relation :

$$\sin h = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos H \quad (2)$$

où  $H$  est l'angle horaire du soleil.

L'un des paramètres fondamentaux de la climatologie est l'insolation semestrielle, c'est-à-dire la quantité d'énergie reçue durant chaque semestre. On parle d'insolation d'été  $I_e$  en regroupant l'été et le printemps et d'insolation d'hiver  $I_h$  qui englobe l'automne et l'hiver. Pour calculer chacun de ces paramètres on doit intégrer la relation (1) sur toute une journée entre le lever et le coucher puis additionner les insolutions journalières du semestre. Ce calcul se complique car on doit introduire la distance au soleil  $r$  qui dépend de la position de la Terre sur son orbite. En particulier l'angle  $\omega$  (longitude du périhélie) mesure la position du point le plus proche par rapport au point  $\gamma$  (direction du soleil à l'équinoxe de printemps). Ainsi pour que les équations soient complètes il faut adjoindre à (1) et (2) la relation

$$r = \frac{1 - e^2}{1 - e \cos (\omega - \lambda)}$$

avec  $\sin \delta = \sin \lambda \sin \varepsilon$

$\omega$  = longitude du périhélie

$\varepsilon$  = inclinaison de l'équateur sur l'écliptique

$e$  = excentricité de l'orbite terrestre

$\lambda$  = longitude de la Terre autour du soleil mesurée depuis le point  $\gamma$ .

L'étude détaillée de ces intégrations a été faite par Milankovitch qui a obtenu les insolutions semestrielles sous une forme approchée car un calcul analytique n'est pas possible complètement :

$$I_{\text{été}} = \frac{I_0}{\pi} \left( S + \sin \varepsilon \sin \varphi - \frac{4}{\pi} e \sin \omega \cos \varphi \right)$$

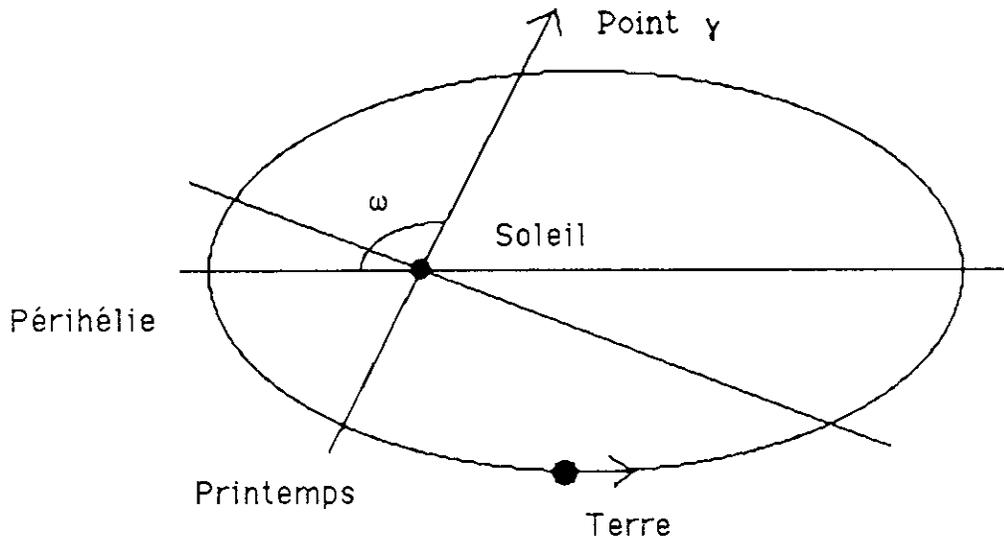
$$I_{\text{hiver}} = \frac{I_0}{\pi} \left( S - \sin \varepsilon \sin \varphi + \frac{4}{\pi} e \sin \omega \cos \varphi \right) \quad (4)$$

$$\text{avec } S = \left( 1 - \frac{\sin^2 \varepsilon}{4} \right) - \sin^2 \varphi \left( 1 - \frac{\sin^2 \varepsilon}{4} - \sin \varepsilon \right)$$

Il existe une latitude privilégiée pour laquelle le contraste saisonnier est nul. ( $I_e = I_h$ ). Elle est définie par :

$$\text{tg } \varphi_e = \frac{4e}{\pi} \frac{\sin \omega}{\sin \varepsilon} \quad (5)$$

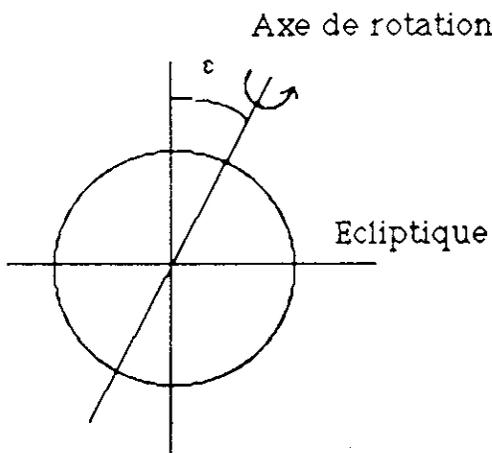
Cet équateur calorifique a actuellement une valeur de  $3^\circ$  ( $e = 0.017$ ,  $\omega = 107^\circ$ ,  $\varepsilon = 23^\circ$ ). Il oscille de  $12^\circ$  de part et d'autre de l'équateur avec une période de l'ordre de 10 à 20 000 ans.



Eléments de l'orbite de la Terre

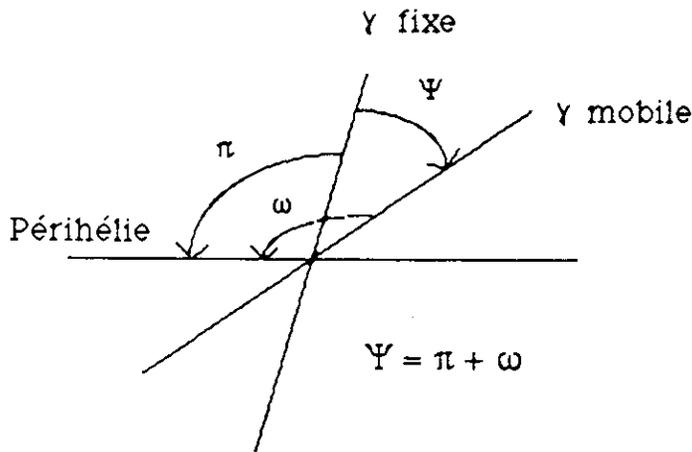
L'orbite de la Terre autour du soleil est représentée par une ellipse dont le périhélie correspond au point le plus proche du soleil. L'excentricité est donnée par  $e = (a^2 - b^2)^{1/2}$  où  $a$  et  $b$  sont les demi-axes de l'ellipse.

Au début du printemps, vu depuis la Terre, le soleil se trouve dans la direction du point  $\gamma$ . On repère la position du périhélie par rapport à cette direction avec l'angle  $\omega$  appelé longitude du périhélie. Il vaut actuellement  $102^\circ$ , signifiant que la Terre passe au périhélie le 3 janvier.



Le 3ème élément qui définit complètement la position de la Terre dans l'espace est  $\varepsilon$ , l'inclinaison de l'équateur sur l'écliptique. C'est cette inclinaison qui est responsable des saisons et ses variations ( $22^\circ$  à  $25^\circ$ ) entraînent des modifications importantes des zones climatiques terrestres.

Sous l'effet de perturbations variées, chacun de ces éléments évolue avec des périodes moyennes de 40 000 ( $\epsilon$ ), 100 000 ( $e$ ) et 21 000 ( $\omega$ ). A ces évolutions, il faut ajouter la précession qui entraîne le point  $\gamma$  à raison d'un tour tous les 26 000 ans.



En réalité, du point de vue climatique le paramètre essentiel est la position relative du périhélie par rapport au point  $\gamma$ . En première approximation :

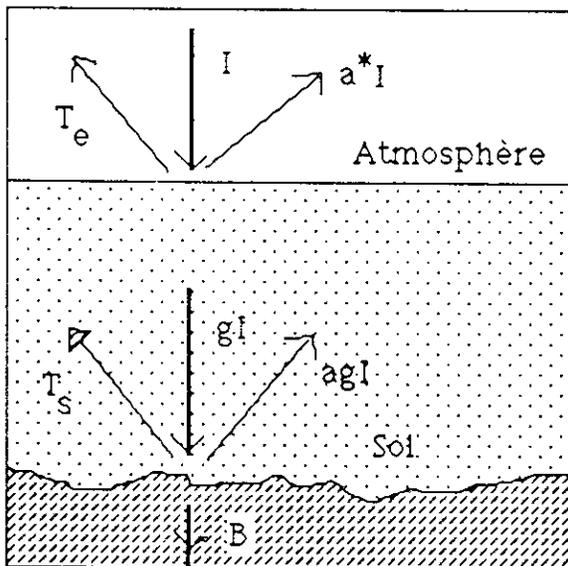
- le point  $\gamma$  tourne dans le sens retrograde à raison d'un tour en 26 000 ans.
- Le périhélie effectue un tour dans le sens direct en 100 000 ans.

T, la période du mouvement relatif est donnée par :

$$1/T = 1/100\,000 + 1/26\,000 \approx 1/21\,000.$$

D'où cette période fondamentale de 21 000 ans attribuée à la précession dont la valeur est différente de 26 000 ans.

## II-2 ROLE DE L'ATMOSPHERE



De l'énergie  $I$  qui arrive en haut de l'atmosphère, seule une fraction  $g$  parvient au niveau du sol. Le sol en réfléchit directement une fraction  $a$  (albedo planétaire) et le reste maintient la surface du sol à une température de l'ordre de 250 à 310°K. Dans cet intervalle de températures, le rayonnement se situe dans l'infrarouge (4 à 100  $\mu\text{m}$ ) et il est en grande partie absorbé par l'eau et le gaz carbonique de l'air (le méthane a joué un rôle identique dans l'atmosphère primitive de la Terre). C'est cet "effet de serre" qui rend critique les rejets de gaz carbonique auxquels nous assistons depuis le début de l'ère industrielle.

De même qu'on a défini un albedo planétaire  $a$ , on définit l'albedo atmosphérique  $a^*$  : la réflexion est principalement due aux nuages. L'augmentation de

la couverture nuageuse agit sur la température au niveau du sol par deux processus antagonistes :

- elle contribue à diminuer cette température par une réflexion plus importante du rayonnement solaire ( $a^*$  augmente) ;
- elle accentue l'effet de serre par la présence d'une quantité d'eau plus importante dans l'atmosphère.

En réalité, le deuxième processus est le plus efficace et une augmentation de la nébulosité provoque un réchauffement global malgré une valeur plus importante de l'albedo  $a^*$ .

Tableau 2 : Paramètres atmosphériques moyens  
(l'intensité I est exprimée en (cal/mn/cm<sup>2</sup>))

Zone	I	g	a	$a^*$	B	Ts(°C)
Polaire	0.249	0.476	0.61	0.50	0.01	- 15
40 - 50° lat.	0.440	0.531	0.12	0.35	0.09	8
Equatoriale	0.593	0.537	0.08	0.25	0.19	26

Du point de vue dynamique, les mouvements de l'atmosphère se traduisent par une circulation complexe entre l'équateur et le pôle due au gradient de température (elle passa de -15 à +25°C). Les masses d'air chaud enrichies en vapeur d'eau sont transportées dans les régions de hautes latitudes où elles provoquent des chutes de neige qui viennent alimenter la calotte polaire. Ce modèle simplifié de la circulation atmosphérique nous permet de comprendre que trois conditions sont nécessaires pour l'installation d'un climat froid :

- la présence de terre dans les régions polaires (de grandes quantités de glace ne peuvent s'étendre sur la mer. Ex la banquise : de l'eau plus chaude est transportée des régions tropicales bloquant le développement de la glace),
- une insolation tropicale excédentaire,
- une insolation polaire déficitaire.

### III VARIATIONS DE LA CONSTANTE SOLAIRE $I_0$

Le soleil rayonne de l'énergie comme un corps noir porté à une température  $T_s$  de l'ordre de 5770 K. La constante solaire s'écrit sous la forme générale

$$I_0 = \sigma \frac{R^2}{a^2} T_s^4 \quad (6)$$

R = Rayon du soleil

a = Distance Terre-Soleil exprimée en unités astronomiques.

$T_s$  = Température de surface du soleil.

$\sigma$  = Constante de Stephan =  $5,67 \cdot 10^{-34}$  SI

A partir de cette relation, on peut facilement en tirer la sensibilité de la constante solaire aux différents paramètres. On différencie (6) :

$$\frac{\Delta I_0}{I_0} = 2 \frac{\Delta R}{R} + 4 \frac{\Delta T_s}{T_s} \quad (7)$$

Ainsi pour obtenir une variation de 1% de la constante solaire il suffit de faire varier le rayon du soleil de 3400 km (sur 690 000 km) et la température de surface du soleil de 15°. Pour évaluer les effets de cette variation au niveau de la terre, on écrit la relation qui lie la température effective de la Terre à la constante solaire  $I_0$ .

$$I_0 = 4 \sigma T_e^4 (1-A) \quad (8)$$

A : albedo terrestre ( $\approx 0,3$ )

$T_e$  : Température effective de la Terre

En différenciant (on néglige les variations de l'albédo A)

$$4 \frac{\Delta T_e}{T_e} = \frac{\Delta I_0}{I_0}$$

En prenant une température effective de l'ordre de 300 K, on aboutit au résultat qu'une variation de 1% de la constante solaire entraîne une variation de la température effective à la surface de la terre de près de 1°. D'où le lien étroit entre les températures  $T_s$  et  $T_e$  :

$$\Delta T_s = 15^\circ \text{ ---> } \Delta I \approx 1\% \text{ ---> } \Delta T_e = 1^\circ$$

Il suffit que le soleil se réchauffe ou se refroidisse seulement de 15° pour que sur terre l'effet soit de 1°.

### III - 1 VARIATIONS DE LA DISTANCE TERRE-SOLEIL :

On peut montrer que dans un système binaire (Terre-Soleil) le produit (demi-grand axe)  $\times (M_{\text{soleil}} + m_{\text{terre}})$  reste constant quand les masses varient. Le soleil perdant de la masse par l'intermédiaire du vent solaire, on doit s'attendre à une augmentation systématique de la distance moyenne Terre-Soleil. Les calculs montrent que cet effet est négligeable sur des échelles de temps de l'ordre de l'histoire du système solaire.

### III - 2 ACTIVITE SOLAIRE

L'activité solaire liée aux mouvements dans l'atmosphère du soleil obéit à d'étonnantes périodicités. Elle se manifeste par la présence de taches à la surface du soleil, par des éruptions et par des sursauts de rayonnement ( $\Delta T_s \approx 30^\circ \text{ ---> } \Delta T_e \approx 2^\circ\text{C}$ ). Son étude menée depuis 1749 a mis en évidence deux périodes de 11 et de 200 ans (le pôle nord et le pôle sud du soleil s'inversant tous les 11 ans). Cette activité pourrait jouer un grand rôle dans les variations climatiques sur des échelles de temps de l'ordre de 10 ans : elle pourrait par exemple expliquer les sécheresses de 1910 et 1976. Des corrélations évidentes n'ont jamais été clairement montrées.

### III - 3 EVOLUTION DU SOLEIL

Les modèles de structure interne du soleil permettent de suivre assez bien l'évolution d'une étoile du type du soleil. Toutes les études montrent un accroissement de la luminosité solaire d'environ 40 % depuis sa formation jusqu'à l'époque actuelle. Cette faible luminosité à l'époque de la formation de la Terre, a peut-être entraîné des températures négatives à la surface de la terre durant l'antécambrien. Mais, par ailleurs, des évidences géologiques suggèrent l'existence de grandes étendues d'eau à des époques aussi reculées que 3,7 milliards d'années. Deux mécanismes sont susceptibles de corriger cette température trop basse :

- 1) l'augmentation de l'effet de serre dû au dégazage plus important de la croûte terrestre avec en particulier de grandes quantités de H<sub>2</sub>O et CO<sub>2</sub> dans les premiers stades de l'atmosphère terrestre.
- 2) la vitesse de rotation de la terre plus élevée : au moment de la formation de la terre, le jour a pu descendre à une durée inférieure à deux heures. Dans ce cas, la portion d'atmosphère chauffée par le soleil est plus importante et l'atmosphère se stabilise à une température plus élevée.

La pseudo-période de 250 millions d'années des âges glaciaires a poussé certains à la justifier par un cycle de variations des réactions nucléaires au sein du noyau solaire. Les modèles à mélange renaissent actuellement sous une forme nouvelle à la faveur du problème préoccupant des neutrinos solaires. Le soleil tire son énergie de réactions nucléaires de fusion (principe de la bombe à hydrogène) se produisant en son centre. Mais, pour que cette énergie produite atteigne la surface du soleil, il faut attendre plusieurs millions d'années : l'énergie solaire que nous recevons aujourd'hui a été "fabriquée" dans le soleil il y a peut-être un million d'années ! La seule observation qui permette un accès direct à l'activité instantanée du soleil est la mesure du flux des neutrinos solaires. Ces particules sont fabriquées au cours des réactions nucléaires et elles ont la propriété de sortir très vite du soleil et elles atteignent ainsi la terre quelques minutes après leur synthèse. Or, actuellement, toutes les tentatives de mesure du flux de neutrinos donnent des valeurs bien inférieures aux résultats théoriques (environ 10 fois moins). On est contraint à envisager la possibilité d'un soleil intermittent envoyant des bouffées d'énergie de temps à autre, créant à retardement des réchauffements et des refroidissements. La matière centrale du soleil serait brassée par convection produisant un rythme thermique du noyau : celui-ci serait actuellement dans une phase de minimum promettant un âge glaciaire dans un ou 2 millions d'années.

### III - 4 TRAVERSEE DE NUAGES INTERSTELLAIRES :

Le soleil décrit une orbite pratiquement circulaire autour du centre galactique qu'il parcourt en 250 millions d'années. A chaque passage dans les bras spiraux, le soleil rencontre des nuages de matière interstellaire : les particules le composant tombent sur le soleil et le réchauffent si toute leur énergie est convertie en chaleur. Avec les nuages classiques (10 atomes/cm<sup>3</sup>), on peut s'attendre à une augmentation de la constante solaire de l'ordre de 1 % et à un accroissement de la température à la surface de la terre de l'ordre de 1°C. Cette estimation n'est qu'une valeur supérieure de

l'effet que l'on peut attendre de ce phénomène. Par ailleurs, en vertu de la théorie des ondes spirales, le soleil ne traverse par les bras spiraux à chaque tour de galaxie car les bras sont à considérer comme des ondes de densité qui tournent autour du centre galactique avec une vitesse (différente de celle du soleil) totalement inconnue actuellement. Par exemple, si au niveau du soleil, les bras effectuent 1 tour en 250 millions d'années, le soleil ne les traversera jamais.

### III-5 ACTION DE LA LUNE :

Le bourrelet équatorial dû aux marées n'a pas son grand axe confondu avec la ligne des centres de masse car le globe terrestre n'est pas un fluide parfait. La dissymétrie introduite provoque une accélération fictive de la lune qui s'éloigne de la Terre de près de 3 cm par an. Dans ce processus la conservation du moment cinétique du système Terre-Lune est assurée par un gain de la part de la lune par une perte de la part Terre qui ralentit son mouvement de rotation. Ainsi les deux astres s'éloigneront l'un de l'autre jusqu'à ce que les périodes de rotation soient les mêmes (modèle d'une haltère). La théorie de l'évolution du système Terre-Lune a été étudiée par Darwin (fils) dès 1873. Quand on remonte le temps, les principaux résultats sont :

- diminution de la durée du jour : cette variation a été confirmée par les observations d'éclipses durant l'Antiquité et par l'étude de coraux fossiles qui développent des sillons sous l'influence des rythmes du jour, du mois lunaire et des saisons ;
- diminution de la distance Terre-Lune  $a_L$  et augmentation de l'aplatissement de la Terre (marées plus fortes) ;
- accélération de la précession des équinoxes ;
- amortissement des variations périodiques de  $e$  et  $e \sin \Pi$  ;
- redressement de l'axe polaire : un pôle toujours froid et un fort gradient de température Equateur-Pôle favorisant l'extension de la calotte polaire donc état glaciaire.

## IV - VARIATIONS SECLAIRES DE $e$ , $\omega$ et $\varepsilon$

### IV - 1 METHODE

En vertu de la loi de Newton, chaque planète (i) subit de la part du soleil et des 8 autres planètes une force d'attraction de la forme

$$F_i = G m_i \sum_{j=1}^8 \frac{m_j}{r_{ij}^2} + G m_i \frac{M_s}{r_{is}^2} \quad (9)$$

où  $m_i$  = masse de la planète i

$M_s$  = masse du soleil

$r_{ij}$  = distance de i à j

L'ordre de grandeur des masses planétaires étant  $10^{-3}$  à  $10^{-7}$  fois plus faible que la masse du soleil, la force  $F_i$  (9) se réduit en première approximation au 2ème terme.

Dans ces conditions, le problème est séparé en 8 problèmes des 2 corps obéissant aux lois de Kepler. En ce qui concerne la Terre, ses éléments elliptiques définissant son orbite autour du soleil

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{excentricité : } e = 0.012 \\ \text{longitude : } \omega = 102^\circ \\ \text{inclinaison : } \varepsilon = 23^\circ 27' \end{array} \right.$$

sont fixés dans la mesure où l'on néglige l'effet des autres planètes, de la Lune ainsi que l'écart à la sphéricité de la distribution des masses à l'intérieur du globe terrestre.

En réalité, les planètes sont des sphéroïdes aplatis par rotation. Pour la Terre par exemple, l'action conjuguée de la Lune et du soleil sur le globe non sphérique entraîne l'équateur dans un mouvement de précession au cours duquel l'axe de rotation terrestre décrit un cône d'angle constant  $\varepsilon$  avec une période de l'ordre de 26 000 ans. Si du point de vue climatique il n'y a pas de modifications des saisons car l'angle  $\varepsilon$  reste constant, il y a néanmoins une légère modulation causée par le passage au périhélie à des dates différentes de l'année. Actuellement, le passage au périhélie le 3 janvier tempère légèrement l'hiver de l'hémisphère nord (on y gagne environ  $1^\circ$  en raison de la proximité du soleil).

Si on s'intéresse à l'évolution à long terme des mouvements planétaires, les éléments elliptiques vont être sujets à des variations lentes sous l'effet des perturbations planétaires. On appelle ainsi perturbations, les effets faibles que font subir les autres planètes au mouvement képlérien de l'une d'entre elles. La théorie de ces variations "dites séculaires" a été établie par les fondateurs de la mécanique céleste, Laplace et Lagrange entre 1773 et 1784.

Tableau 3 : études des variations à long terme des éléments orbitaux de la Terre.

Ordre des masses	Degrés des excentricités et inclinaisons	
	1	2
1	Lagrange (1781)	Anolick (1969)
	Laplace (1798)	Bretagnon (1974)
	Pontécoulant (1834)	
	Stockel (1870)	
	Harzer (1895)	
	Milankovitch (1920)	
	Anolick (1969)	
	Bretagnon (1974)	
2	Brouwer	Bretagnon (1971)
	Van-Woerkom (1950)	Berger (1978)
	Sharaf-Bovdnikova (1969)	
	Vernekar (1972)	

Les travaux sont classés selon la précision des développements en séries utilisés dans les calculs. Les séries obtenues au 1er ordre des masses ne permettent pas de pousser les prévisions au-delà de 100 000 ans.

En prenant comme point de départ des conditions déterminées (l'année 1950 par exemple), l'évolution des éléments ( $e$ ,  $\varepsilon$  et  $\omega$  pour la Terre) est obtenue à partir de développements mathématiques de forme simple masquant les calculs théoriques fastidieux ! Sans rentrer dans le détail de la validité des améliorations ultérieures, nous pouvons citer les travaux récents qui ont conduit aux développements utilisés dans ce travail. Ils sont rassemblés dans le tableau 3 en fonction de l'ordre des termes perturbateurs.

A partir des développements les plus poussés, on peut déduire les éléments de l'orbite terrestre sur une durée de plus de 5 millions d'années. Les solutions s'écrivent sous la forme suivante :

$$\begin{aligned}\varepsilon &= \varepsilon_0 + \sum_i A_{1i} \cos (A_{2i} t + A_{3i}) \\ e \sin \Pi &= \sum_i B_{1i} \sin (B_{2i} t + B_{3i}) \\ e \cos \Pi &= \sum_i B_{1i} \cos (B_{2i} t + B_{3i}) \\ \psi &= \psi_0 + \sum_i C_{1i} \sin (C_{2i} t + C_{3i})\end{aligned}\quad (10)$$

où les constantes sont données dans les tableaux 4, 5 et 6

avec  $\omega = \Pi + \psi$

$$\varepsilon_0 = 23.320556^\circ$$

$$\psi_0 = 3.392506^\circ + 50",439\ 273\ t$$

$t$  = la variable  $t$  est exprimée en années comptées depuis 1950

On décompose  $\omega$  en 2 parties

.  $\psi$  = précession générale rapportée au point  $\gamma$  de référence (1950.0)

.  $\Pi$  = longitude du périhélie par rapport au point  $\gamma$  de référence (fixe).

Tableau 4 : DEVELOPPEMENT DE L'OBLIQUITE  $\epsilon$   
Amplitude (")      Vitesse ("/an)      Phase (  $\frac{\circ}{\equiv}$  )  
A1                      A2                      A3

---

-2462.22	31.609970	251.90
-857.32	32.620499	280.83
-629.32	24.172195	128.30
-414.28	31.983780	292.72
-311.76	44.828339	15.00
308.94	30.973251	263.79
-162.55	43.668243	308.42
-116.11	42.246689	240.00
101.12	30.599442	222.97
-67.69	42.681320	268.78
24.91	43.836456	316.79
22.58	47.439438	319.60
-21.16	63.219955	143.80
-15.65	64.230484	172.73
15.39	1.010530	28.93
14.67	7.437771	123.59
-11.73	55.782181	20.20
10.27	0.373813	40.82
6.49	13.218362	123.47
5.85	62.583237	155.69
-5.49	63.593765	184.62
-5.43	76.438309	267.27
5.16	45.815262	55.01
5.08	8.448301	152.52
-4.07	56.792709	49.13
3.72	49.747849	204.66
3.40	12.058272	56.52
-2.83	75.278214	200.32
-2.66	65.241013	201.66
-2.57	64.604294	213.55

Tableau 5 : DEVELOPPEMENT DE  $e \sin \pi$   
 Amplitude (") Vitesse ("/an) Phase (°)  
 B1 B2 B3

0.01860798	4.2072050	23.62
0.01627522	7.3460910	193.78
-0.01300660	17.8572630	308.30
0.00988829	17.2205460	320.19
-0.00336700	16.8467330	279.37
0.00333077	5.1990790	87.19
-0.00235400	18.2310760	349.12
0.00140015	26.2167580	128.44
0.00100700	6.3591690	154.14
0.00085700	16.2100160	291.16
0.00064990	3.0651810	114.86
0.00059900	16.5838920	332.09
0.00037800	18.4939800	296.41
-0.00033700	6.1909530	145.76
0.00027600	18.8677930	337.23
0.00018200	17.4255670	152.09
-0.00017400	6.1860010	126.83
-0.00012400	18.4174410	210.66
0.00001250	0.6678630	72.10

Tableau 6 : DEVELOPPEMENT DE  $\psi$   
 Amplitude (") Vitesse ("/an) Phase (°)  
 C1 C2 C3

7391.02	31.609970	251.90
2555.15	32.620499	280.83
2022.76	24.172195	128.30
-1973.65	0.636717	348.10
1240.33	31.983780	292.72
953.87	3.138886	165.16
-931.75	30.973251	263.79
872.38	44.828339	15.37
606.35	0.991874	58.57
-496.03	0.373813	40.82

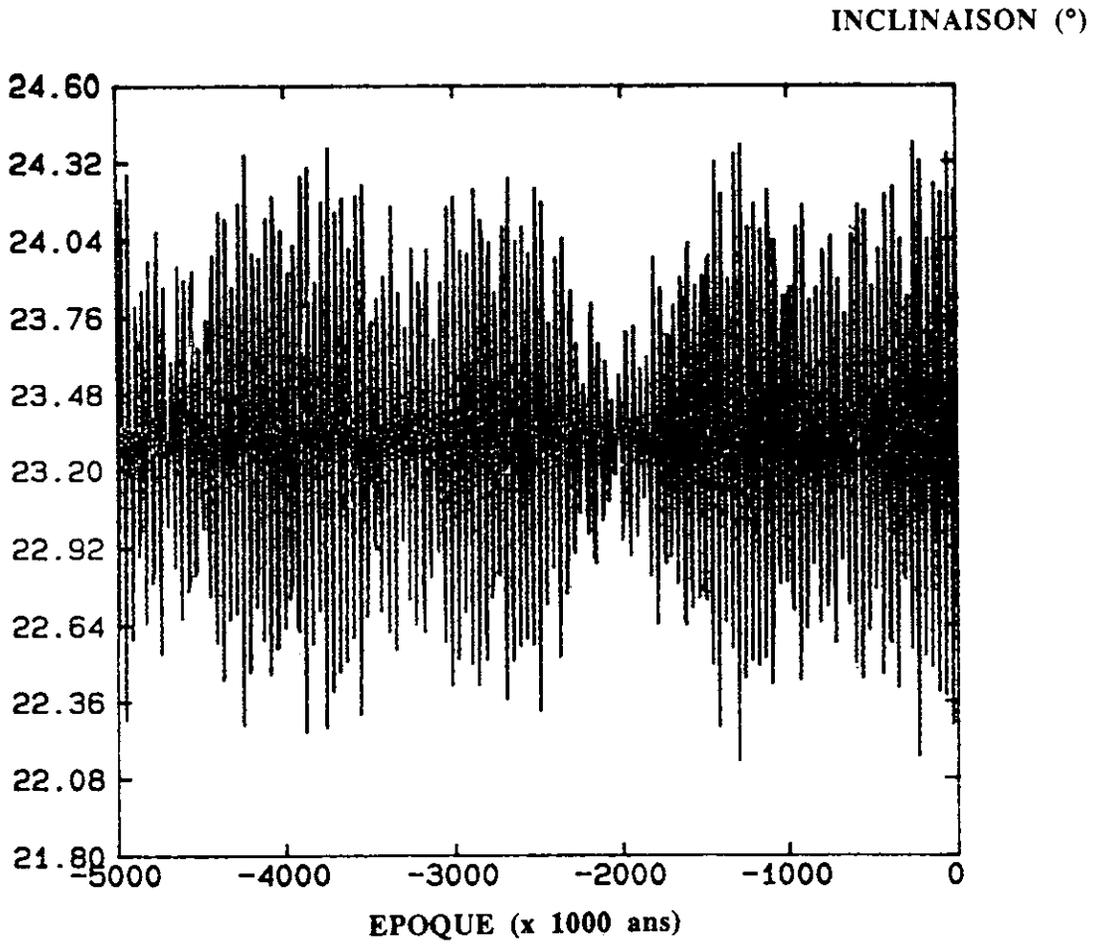


Fig 5

