

ÉPREUVE COMMUNE DE TIPE 2011 - Partie D

TITRE : Planète Terre en mouvements

Temps de préparation :2 h 15 minutes
Temps de présentation devant les examinateurs :10 minutes
Entretien avec les examinateurs :10 minutes

GUIDE POUR LE CANDIDAT :

Le dossier ci-joint comporte au total : 16 pages

Guide candidat : 1 page
Document principal : 14 pages
Documents complémentaires : 1 page

Travail **suggéré** au candidat : Le candidat mettra en lumière le rôle essentiel de l'observation précise dans l'établissement des lois de la mécanique céleste, dans l'étude des perturbations du mouvement de la Terre et dans celle de leurs impacts, notamment sur le climat de la Terre. Au cas où le candidat souhaiterait aborder la question sous un autre angle, il lui est demandé d'en faire état dès le début de l'épreuve.

CONSEILS GENERAUX POUR LA PREPARATION DE L'EPREUVE :

- * Lisez le dossier en entier dans un temps raisonnable.
- * Réservez du temps pour préparer l'exposé devant les examinateurs.
 - Vous pouvez écrire sur le présent dossier, le surligner, le découper ... mais tout sera à remettre aux examinateurs en fin d'oral.
 - En fin de préparation, rassemblez et ordonnez soigneusement TOUS les documents (transparents, *etc.*) dont vous comptez vous servir pendant l'oral, ainsi que le dossier, les transparents et les brouillons utilisés pendant la préparation. En entrant dans la salle d'oral, vous devez être prêt à débiter votre exposé.
 - A l'issue de l'épreuve, vous devez remettre au jury le dossier scientifique. Tout ce que vous aurez présenté au jury pourra être retenu en vue de sa destruction.

Planète Terre en mouvements

5 La Terre tourne sur elle-même et, comme les autres planètes, décrit un mouvement elliptique autour du Soleil. La Terre n'est toutefois pas insensible à l'action des autres éléments du système solaire et en premier lieu de son satellite « la Lune », voire de sa propre atmosphère. Les conséquences de ces perturbations, loin d'être négligeables, sont à l'origine de changements climatiques, de l'allongement de la durée du jour et d'irrégularités de la rotation de la Terre.

10 L'objet de ce texte, au-delà de considérations générales sur les lois de Kepler, les mouvements à force centrale, la loi de la gravitation et la conservation du moment cinétique, est d'explorer quelques unes des perturbations de l'orbite de la Terre autour du soleil et de celles de la rotation de la Terre et de donner un aperçu des conséquences pratiques de ces perturbations.

15 **1. Du « géocentrisme » à « l'héliocentrisme »**

Dès l'antiquité, Aristarque de Samos (environ 310-230 av. J.C.) avance l'hypothèse d'un mouvement de la Terre autour du Soleil. Ptolémée (90-168) s'inscrit, par contre, en défenseur du géocentrisme. Il faut attendre Copernic et Galilée, pour que le concept d'une Terre immobile au centre de l'univers soit à nouveau remis en cause. Les observations disponibles jusqu'alors ne permettent pas de mettre en évidence un mouvement de la Terre dans l'espace. Copernic et Galilée reprennent l'hypothèse du mouvement des planètes autour du Soleil. Kepler énonce des lois qui découlent de l'observation précise du mouvement des astres. Ces lois ne représentent qu'une description cinématique du mouvement sans faire d'hypothèses sur la nature des forces en jeu.

25 Kepler (1571-1630) est le disciple de Tycho Brahe (1546-1601) auquel il succède comme astronome de l'empereur d'Allemagne Rodolphe II. Tycho Brahe est principalement un observateur de positions précises mais s'il effectue de très bonnes observations, en revanche, il n'est pas convaincu par les théories héliocentriques de Copernic (1473-1543). Il pense toujours que la Terre est au centre du système solaire. Kepler va utiliser les observations de Tycho Brahe pour énoncer ses lois. Kepler est convaincu que Copernic a raison, ce qui sera définitivement

admis après Galilée (1564-1642) en 1610 grâce à l'utilisation d'une lunette astronomique et à l'observation des satellites de Jupiter.

35 Kepler, très grand calculateur et mathématicien, obtient, à partir des observations de Tycho Brahe, les orbites des planètes. Il énonce les lois qui portent son nom et qui caractérisent ces orbites. Il introduit pour la première fois la notion d'orbite elliptique, rompant avec les mouvements circulaires uniformes érigés en dogme par les Grecs. Kepler montre par ailleurs que les plans des orbites planétaires passent par le Soleil et non par la Terre, ce qui contredit un des postulats du géocentrisme.

40 2. Les lois de Kepler

Kepler énonce ses deux premières lois en 1609 et sa troisième loi en 1619.

Les planètes décrivent des ellipses dont le Soleil occupe l'un des foyers.

Jusqu'alors, on n'avait considéré que le cercle comme trajectoire possible des corps célestes. Ce sont les observations précises de Tycho Brahe qui ont permis de revenir sur ce postulat. 45 L'ellipticité des orbites des planètes est très faible : la différence entre les longueurs des axes de l'ellipse est très inférieure à la longueur du grand axe. La différence entre le cercle et l'orbite de la Terre est infime : si on veut la représenter sur une feuille de papier, la différence entre le cercle et l'ellipse tient dans l'épaisseur du trait de crayon ! Le Soleil n'est pas au centre de l'ellipse, mais au foyer qui est légèrement décentré (Figure 1).

50

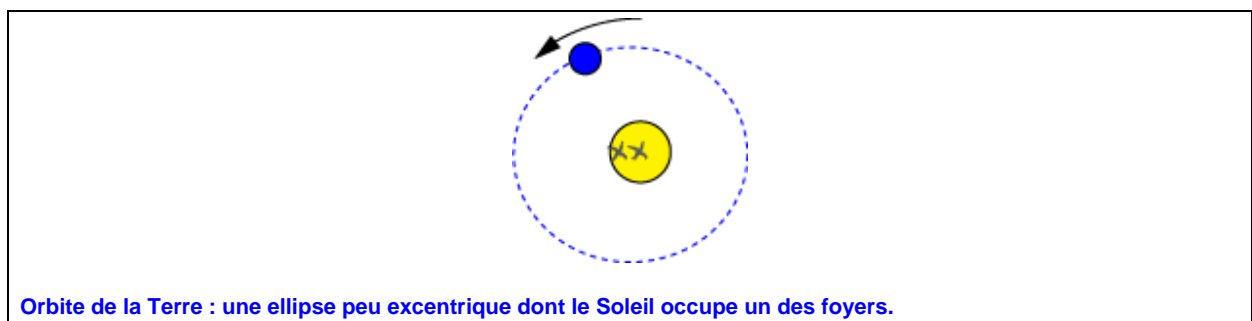


Figure 1

55 *Au cours du mouvement le rayon vecteur joignant le soleil à la planète balaie des aires égales en des temps égaux*

La signification de cette loi est claire : les planètes ne se déplacent pas avec une vitesse uniforme ; elles vont plus vite quand elles sont près du Soleil et plus lentement quand elles en sont loin. Cela est particulièrement observable pour les comètes dont les orbites sont, contrairement à celles des planètes, très excentriques (très allongées).

60 *Le rapport du cube des demi- grands axes « a » des orbites des planètes aux carrés des périodes « T » est le même pour toutes les planètes.*

C'est-à-dire :

$$a^3/T^2 = \text{constante} \text{ ou bien } \omega^2 a^3 = \text{constante}$$

65 (ω étant la vitesse angulaire moyenne du mouvement de révolution de la planète autour du soleil = $2\pi/T$)

3. Les mouvements à force centrale

En mécanique du point, un mouvement à force centrale est le mouvement d'un point matériel M soumis uniquement à une force centrale, c'est-à-dire une force toujours dirigée vers le même point noté O , appelé *centre de force*.

70 Ce type de mouvement est une modélisation de certains phénomènes physiques : il n'est pas rigoureusement présent dans la nature, mais certains mouvements s'en rapprochent. Par exemple, on peut considérer que la Terre est soumise à une force centrale de la part du Soleil.

75 L'étude mathématique de ce type de mouvements permet d'obtenir quelques résultats généraux. On peut montrer par exemple que la trajectoire est contenue dans un plan, que la vitesse aréolaire est constante.

Par définition le moment cinétique \vec{L} est le produit vectoriel de \vec{OM} et de la quantité de mouvement $\vec{p} = m \cdot \vec{v}$ (où m et v sont la masse et la vitesse du point matériel) :

$$\vec{L} = \vec{OM} \wedge \vec{p}$$

Le théorème du moment cinétique appliqué au centre de force O dans un référentiel galiléen (ou
 80 inertiel) énonce que la dérivée du moment cinétique \vec{L} au point O est le produit vectoriel du
 rayon vecteur \vec{OM} et de la force \vec{F} :

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{OM} \wedge \vec{F} = \vec{0}, \text{ puisque les deux vecteurs sont colinéaires.}$$

85 Par conséquent, le moment cinétique \vec{L} est constant au cours du mouvement. Cela signifie que le
 vecteur position \vec{OM} et la quantité de mouvement $\vec{p} = m\vec{v}$ du point M sont à tout instant
 perpendiculaires au vecteur \vec{L} de direction constante. La trajectoire est donc plane : elle est
 entièrement contenue dans le plan contenant le centre attracteur O et orthogonal au moment
 cinétique \vec{L}

90 On vient de voir que la trajectoire de la particule restait dans un plan fixe d'origine O . En passant
 aux coordonnées polaires r et θ , dans ce plan, on peut écrire

$$\vec{OM} = \vec{r} = r\vec{e}_r$$

donc

95
$$\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt} = \dot{r}\vec{e}_r + r\dot{\theta}\vec{e}_\theta$$

Où \vec{e}_θ est un vecteur unitaire perpendiculaire à \vec{e}_r dans le plan de la trajectoire, et où \dot{r} et $\dot{\theta}$
 désignent les dérivées par rapport au temps r et θ

Puis,
$$\vec{L} = \vec{r} \wedge m\vec{v} = mr\dot{r}\vec{e}_r \wedge \vec{e}_r + mr^2\dot{\theta}\vec{e}_r \wedge \vec{e}_\theta = mr^2\dot{\theta}\vec{e}_z$$

Dans laquelle $\vec{e}_z = \vec{e}_r \wedge \vec{e}_\theta$ est un vecteur unitaire orthogonal au plan de la trajectoire.

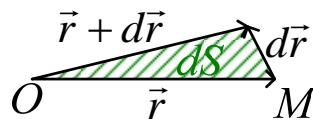
100 De cette dernière relation, on tire la valeur de la norme, constante, du moment cinétique :

$L = mr^2\dot{\theta}$. Or, l'aire dS (figure 2) balayée par le rayon vecteur \vec{r} pendant un temps dt infinitésimal est

105

$$dS = \frac{1}{2}r^2\dot{\theta}dt = \frac{1}{2}\frac{L}{m}dt$$

$$\dot{S} = \frac{1}{2}r^2\dot{\theta} = \frac{1}{2}\frac{L}{m} = \frac{1}{2}C$$



110

Figure 2

Cette loi, sous la forme $r^2\dot{\theta} = C$ exprime que la *vitesse aréolaire* est **constante** et est appelée **loi des aires**.

115 C'est à dire qu'un mouvement à force centrale est suffisant pour assurer la planéité d'une trajectoire et la constance de la vitesse aréolaire soit deux des propriétés du mouvement des planètes autour du soleil identifiées par Kepler.

4. La loi de la gravitation universelle

120

La force F d'attraction qui s'exerce entre deux masses m_1 et m_2 situées à une distance r est égale à :

$$F = \frac{Gm_1m_2}{r^2}$$

125 où $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2\text{kg}^{-2}$

On peut alors montrer que des trajectoires elliptiques sont des solutions de l'équation du mouvement de la masse m_1 autour du barycentre de m_1 et m_2 .

130 Dans le cas simple d'un mouvement circulaire d'une planète de masse m_2 autour du soleil (de masse m_1) on obtient l'équation :

$$m_2 \omega^2 r = m_2 m_1 \frac{G}{r^2}$$

où ω est la vitesse angulaire.

135
$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

soit encore

$$\omega^2 r^3 = m_1 G$$

140 c'est à dire une valeur constante (indépendante de m_2). On retrouve la 3^{ème} loi de Kepler.

5. La rotation de la Terre perturbée par l'atmosphère

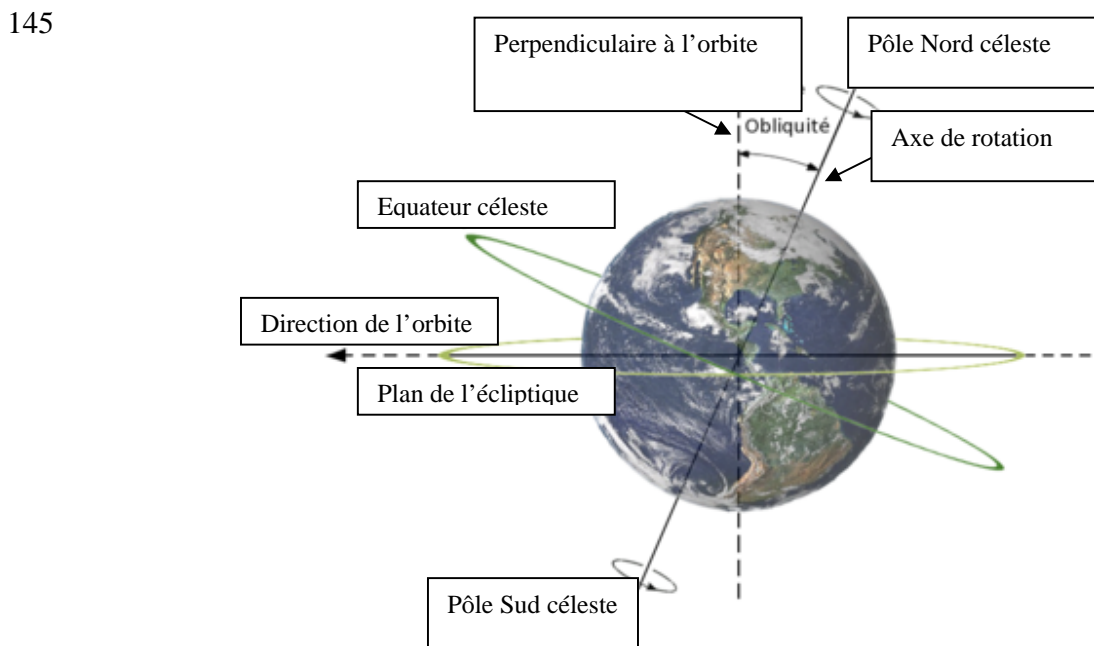


Figure 3

Le moment cinétique de la Terre associé à son mouvement de rotation autour de son axe peut, à l'échelle de quelques années, être considéré comme constant. Il est en fait la somme de deux termes correspondant à la Terre solide et à son enveloppe fluide (eau + air) :

$$L_{fluide} = \frac{2}{3} M_f \omega_f R_T^2$$

155 où M_f est la masse totale fluide, ω_f la vitesse angulaire de la masse fluide et R_T le rayon de la Terre ($6400 \cdot 10^3$ m)

$$L_{solide} = \frac{2}{5} M_s \omega_s R_T^2$$

où M_s est la masse totale solide de la Terre ($6 \cdot 10^{24}$ kg) et ω_s la vitesse angulaire de la masse solide. En pratique les observations font apparaître que le terme majeur de perturbation du moment cinétique fluide provient des mouvements de l'atmosphère (la masse de l'atmosphère est équivalente à celle d'une pellicule d'eau de 10 m d'épaisseur recouvrant l'ensemble de la Terre).

Les termes L_{air} et L_{solide} sont alors respectivement de $2,5 \cdot 10^{27}$ $\text{kgm}^2\text{s}^{-1}$ et de $7 \cdot 10^{33}$ $\text{kgm}^2\text{s}^{-1}$. Les mouvements de l'atmosphère se traduisent par une perturbation de son moment cinétique qui, pour assurer la conservation du moment total, doit être compensée par une perturbation de celui de la Terre solide. C'est ce qui est observé en pratique. La figure 4 indique ainsi que les perturbations de la durée du jour (exprimées en ms/jour) observées de 2008 à 2010 reflètent pour l'essentiel l'effet induit par le vent à l'échelle de la planète : le terme « geodetic » se réfère aux mesures précises effectives, par des moyens géodésiques, de la durée du jour et le terme « wind » au calcul de l'effet intégré du vent sur la rotation de la Terre.

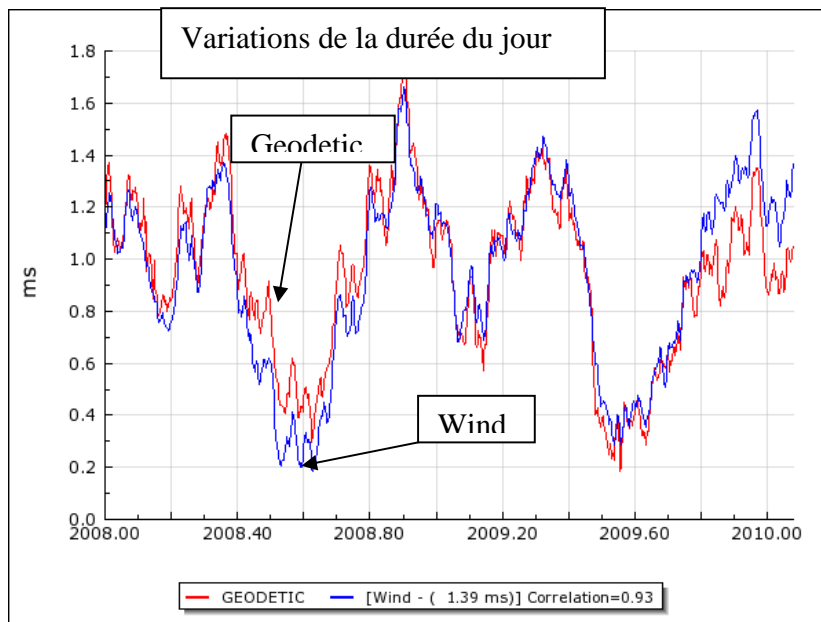


Figure 4

6. Le divorce de la Terre et de la Lune

180 Un réseau mondial de stations d'observations de la Lune (Figure 5) effectue régulièrement des
tirs laser sur des réflecteurs déposés sur la surface de la lune au cours des missions américaines et
soviétiques. Le temps d'aller et retour des signaux laser entre la Lune et la Terre et son évolution
systématique ont ainsi permis d'établir que la Lune s'éloigne de la Terre de 3,7 cm par an. Cet
185 éloignement de la Lune est en fait la traduction d'une dissipation d'énergie du système Terre-
Lune associée au phénomène des marées.

Pour mieux cerner le phénomène on considère le système isolé Terre-Lune (on néglige donc le
rôle du soleil dans le phénomène des marées) et on lui applique l'invariance de son moment
190 cinétique et de son énergie (énergie potentielle + énergie cinétique).

Le terme de moment cinétique Terre-Lune évalué dans un repère ayant pour centre celui de la
Terre et pour axe la perpendiculaire (voir figure 3) au plan de l'écliptique (on néglige à ce point
les angles entre les axes de rotation de la Terre et de la Lune, et la perpendiculaire au plan de
l'écliptique, ainsi que l'inclinaison de l'orbite de la Lune sur le plan de l'écliptique) peut
195 s'écrire :

$$L_{TL} = L_T + L_{orbL} + L_L$$

où L_{TL} est le moment cinétique total, L_T le moment cinétique de la Terre L_{orbL} est le moment
cinétique de la Lune autour de la Terre et L_L le moment cinétique de la Lune .

200

$$L_{TL} = \frac{2}{5} M_T \omega_T R_T^2 + M_L v_L D + \frac{2}{5} M_L \omega_L R_L^2$$

où M_T est la masse de la Terre ($6 \cdot 10^{24}$ kg), R_T le rayon de la Terre, M_L la masse de la Lune ($=M_T/81$), ω_T et ω_L les vitesses angulaires de la Terre et de la Lune, v_L la vitesse de la lune autour de la
Terre, D la distance Terre-Lune ($3,84 \cdot 10^8$ m) et R_L le rayon de la Lune.

205 Il s'avère que le 3^{ème} terme et ses fluctuations sont négligeables devant les 2 premiers.

L_{TL} se réduit à

$$L_{TL} = \frac{2}{5} M_T \omega_T R_T^2 + M_L v_L D$$

L'utilisation de la loi de la gravitation pour calculer v_L conduit à :

210

$$L_{TL} = \frac{2}{5} M_T \omega_T R_T^2 + M_L M_T^{1/2} G^{1/2} D^{1/2}$$

Les termes variables de cette expression sont ω_T et D

215 L'invariance de L_{TL} permet d'exprimer la variation de la vitesse angulaire de la Terre $\Delta\omega_T$ en fonction de l'éloignement de la Lune ΔD

$$\frac{2}{5} M_T \Delta\omega_T R_T^2 + \frac{1}{2} M_L M_T^{1/2} G^{1/2} D^{-1/2} \Delta D = 0$$

220 Ce qui donne pour un ΔD de 3,7 cm par an, un $\Delta\omega_T$ de $-1,3 \cdot 10^{-14}$ rd.s⁻¹ par an, ou encore, en terme de durée du jour, une augmentation de 1,6 ms par siècle ! Cette quantité peut paraître bien faible par rapport aux fluctuations dues à l'atmosphère, mais le caractère systématique de la diminution de la vitesse de rotation de la Terre conduit à une lente dérive du temps « solaire » par rapport à celui des horloges atomiques.

225



Figure 5 Station de tirs laser

De la même manière le calcul de la conservation d'énergie du système Terre-Lune conduit à évaluer la diminution de l'énergie cinétique de la rotation de la Terre :

230 $\Delta E_{\text{rot}} = 2/5 M_T \omega_T R_T^2 \Delta\omega_T = 1,14 \cdot 10^{20}$ joules par an soit une puissance de 3,6 térawatts, une valeur proche de celle que donne le calcul de la dissipation de l'énergie des marées océaniques !
Donc du point de vue de la physique, la dissipation marées conduit à un ralentissement de la vitesse de rotation de la Terre et à un éloignement la Lune.

235 7. Les avatars du mouvement de la Terre autour du soleil

Deux éléments importants sont à prendre en considération dans le mouvement de la terre autour du soleil : son orbite dans le plan de l'écliptique et la localisation de son axe de rotation (inclinaison et orientation dans le repère constitué par le plan de l'écliptique et la perpendiculaire à celui-ci ayant pour origine le Soleil).

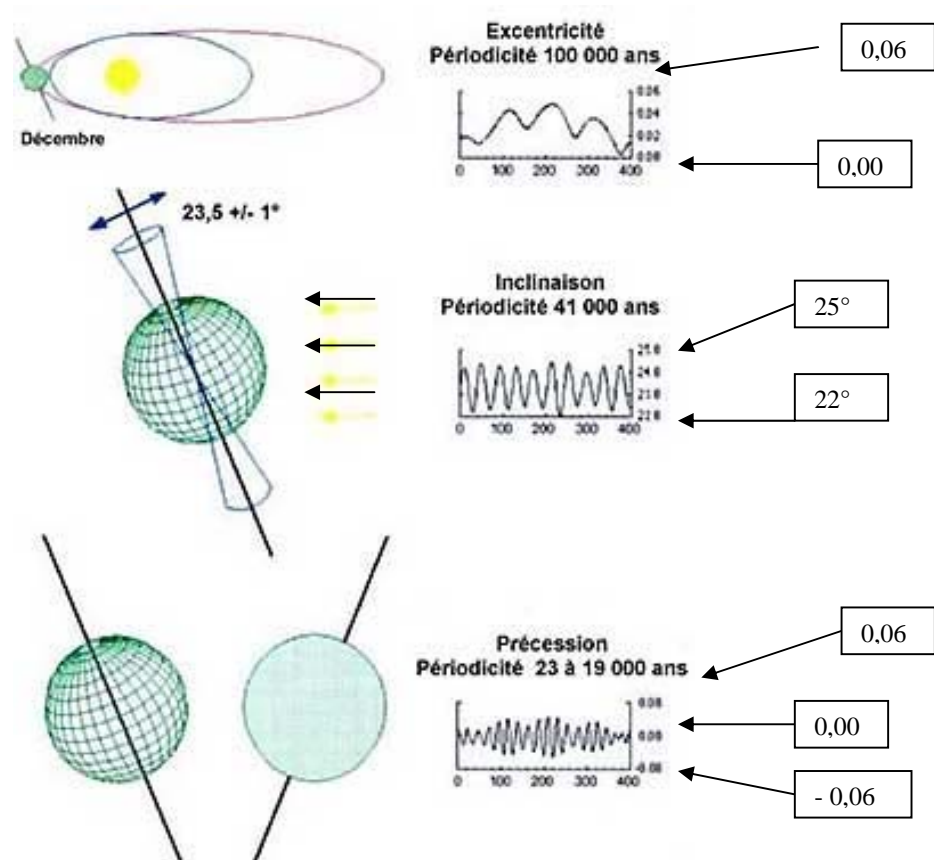
240

Or ces éléments sont soumis à des perturbations qui résultent :

- De la présence des autres planètes du système solaire et notamment de Jupiter
- De l'aplatissement de la Terre aux pôles (ou bourrelet équatorial)
- Des actions conjuguées de la Lune et du Soleil

245

Les différents effets sont représentés schématiquement dans la figure 6, leurs définitions sont précisées plus loin.



250

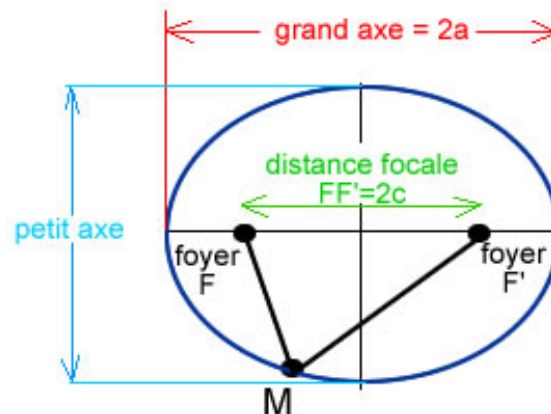
Figure 6 -Variation des paramètres astronomiques de la Terre.

255

a. L'excentricité de l'orbite de la Terre

L'excentricité (dont la définition est rappelée dans la figure 7) de l'orbite de la Terre est très faible. Elle varie en fait entre 0 et 0,06 et sa valeur actuelle, décroissante, est de 0,02. La
260 périodicité de sa variation est de 100 000 ans. L'excentricité, en dépit de sa faible valeur, constitue un facteur déterminant de l'insolation de la Terre.

Rappel sur l'excentricité d'une ellipse



Une ellipse de grand axe $2a$ et de foyers F et F' est l'ensemble des points M du plan tels que $MF+MF'=2a$

L'excentricité est $e=\text{distance focale}/\text{grand axe}$
soit $e=c/a$
($e=0$ dans le cas d'un cercle)

265

Figure 7

270

b. Inclinaison (ou obliquité) de l'axe de la Terre

L'axe de la Terre a une inclinaison sur le plan de l'écliptique de $23,5^\circ$ qui est modulée de plus ou moins 1° avec une périodicité de 41 000 ans.

275

c. Précession

La précession est un mouvement rétrograde de l'axe de la Terre qui lui fait décrire un cône
280 d'ouverture de $23,5^\circ$. Ce mouvement est dû à l'attraction lunaire et solaire sur le "bourrelet"
équatorial de la Terre. Il modifie les conditions d'exposition de la Terre à l'énergie solaire dans la
mesure où il en résulte un déplacement de la position des équinoxes sur l'orbite de la Terre.
Lorsque l'on tient compte du fait que l'orbite de la Terre dans le plan de l'écliptique subit elle-
même au cours du temps un mouvement de rotation (qui modifie également la position des
285 équinoxes sur l'orbite de la Terre), on aboutit à la définition d'un paramètre de précession des
équinoxes qui tient compte à la fois de l'éloignement de l'équinoxe de printemps (pour
l'hémisphère nord) du périhélie et de la valeur de l'ellipticité. Ce paramètre varie avec des
périodicités de 19 000 et 23 000 ans.

8. Impact des paramètres astronomiques sur le climat

290 Les travaux du mathématicien serbe Milutin Milankovitch, entre 1920 et 1941, font renaître un
intérêt pour une théorie astronomique des climats dont l'idée avait émergé au cours du 19^{ème}
siècle. En bénéficiant de l'amélioration croissante des solutions astronomiques, il calcule
l'insolation d'été au sommet de l'atmosphère pour différentes latitudes en tenant compte des
variations de l'excentricité, de la précession des équinoxes et de l'inclinaison de l'axe de rotation
295 de la Terre. Il suggère que l'insolation d'été dans les hautes latitudes de l'hémisphère Nord est le
paramètre critique à la succession de cycles glaciaires-interglaciaires. Des étés froids
permettraient la persistance dans les hautes latitudes de l'hémisphère Nord¹ des neiges hivernales
dont l'albédo² élevé favoriserait le refroidissement et l'accumulation annuelle de glace.

Ce modèle climatique tombe toutefois dans l'oubli pendant plus de cinquante ans, jusqu'à ce que
300 l'on découvre une cyclicité semblable enregistrée par le rapport oxygène-18/oxygène-16 dans la
composition des fossiles carbonatés des fonds marins et de la glace des glaciers
continentaux. Dans la mesure (voir annexe A) où l'on peut relier les variations de rapport
isotopique à la température, ces mesures permettent de reconstituer les changements climatiques
intervenus pendant un million d'années. La figure 8 fournit une comparaison des variations de
305 température déduites de l'analyse de carottes de glace à Vostok (Antarctique) pendant les

¹ Les hautes latitudes de l'hémisphère Sud, englacées de manière permanente, ne sont pas le siège des mêmes phénomènes amplificateurs. La référence en terme d'insolation est donc celle des hautes latitudes Nord. Une fois qu'un processus de changement climatique est enclenché, c'est l'ensemble de la planète, et en particulier les régions de hautes latitudes Nord ou Sud, qui subit les effets de ce changement.

² L'albédo correspond à la fraction du rayonnement incident à la surface de la Terre réfléchi vers l'espace

derniers 250 000 ans et de celle de l'insolation à 65°N calculée en fonction des variations des paramètres astronomiques (ellipticité, précession, inclinaison). La similarité de la plupart des variations apparaît clairement sur cette figure.

Il faut noter cependant que, si les conditions d'insolation sont essentielles dans l'amorce des changements climatiques, d'autres phénomènes physiques sont également mis en jeu sous forme de « rétroactions ». Ainsi une diminution de l'insolation abaisse la température et accroît les surfaces dont la couverture neigeuse persiste en été. Ceci induit un accroissement de la lumière solaire réfléchi vers l'espace, donc une moindre insolation effective et une accélération du processus. Il en est de même en ce qui concerne l'effet de serre : les changements de température induisent des changements de composition de l'atmosphère (dégazage de dioxyde de carbone et de méthane lorsque la température augmente, par exemple) qui amplifient le changement de température initial.

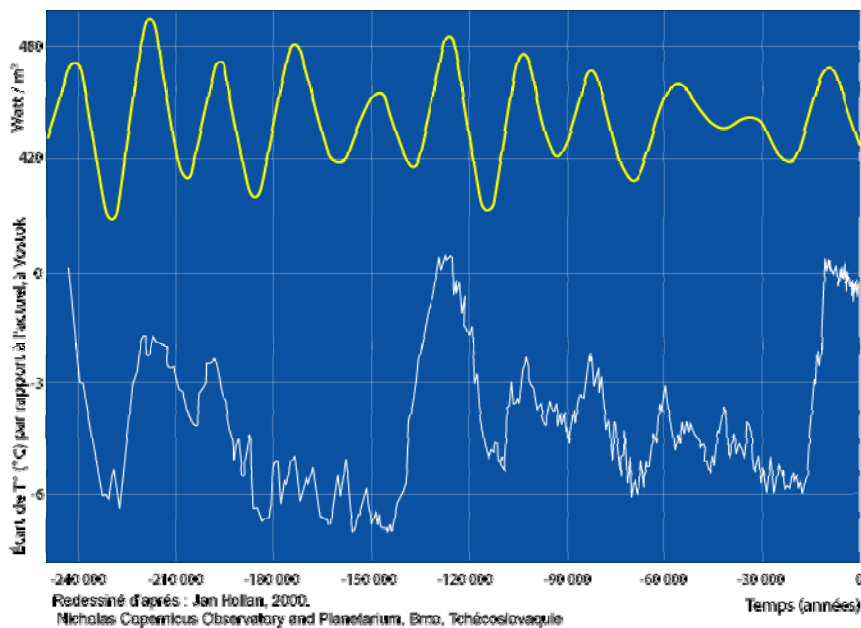
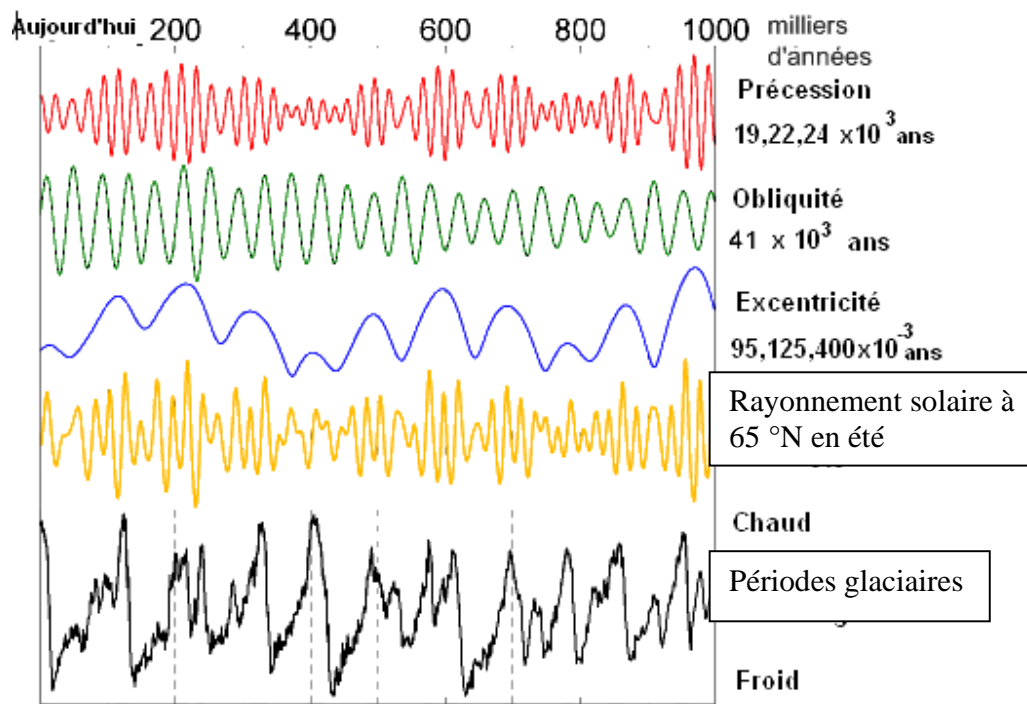


Figure 8 Comparaison entre la courbe du rayonnement solaire à la latitude 65°N (en haut) et la courbe de température calculée d'après le rapport O-18/O-16 de la glace à Vostok, Antarctique (en bas)

La figure 9 donne la succession, sur un million d'années, des périodes glaciaires et des variations des paramètres astronomiques. Elle permet d'appréhender la difficulté d'interprétation des liens entre cette succession et l'évolution des paramètres astronomiques. Une caractéristique qui

ressort de cette figure est le caractère très rapide du passage d'une époque glaciaire à une époque tempérée et le passage beaucoup plus lent d'une époque tempérée à une époque glaciaire.



330 Figure 9 variations des paramètres astronomiques et évolution climatique. Les tirets verticaux en bas de la figure correspondent aux marques de temps de -200, -400, -500, -700 mille ans

9. Conclusion

La Terre dans sa course autour du Soleil est soumise à l'action des autres planètes du système solaire et à celle de son satellite, la Lune. Cette course a suscité l'intérêt des astronomes depuis l'antiquité et donné également lieu à de vives polémiques. Les outils de la mécanique céleste, ainsi que les méthodes d'analyse des archives sédimentaires et glaciaires ont considérablement progressé, notamment au cours des dernières décennies. Il en résulte que d'infimes perturbations d'origine astronomique sont devenues accessibles à la mesure. Celles-ci, loin d'avoir uniquement un intérêt académique, ont des conséquences pratiques importantes, notamment en matière de climat. On peut à ce sujet souligner un élément paradoxal de l'équilibre de la Terre : la Lune qui, comme on l'a vu, perturbe l'orientation de l'axe de la Terre (précession) est également un facteur considérable de stabilisation de l'inclinaison de cet axe et, par voie de conséquence, de stabilisation du climat de la Terre !

Annexe A

Pour rappel, l'eau de mer est formée de 98% d'oxygène-16 et un peu moins de 2% d'oxygène-18. Au moment de l'évaporation l'eau lourde (contenant un O-18) passe moins rapidement en phase
350 vapeur et la vapeur d'eau a toujours une composition appauvrie en oxygène-18 par rapport à l'eau en phase liquide. En temps normal, l'eau d'évaporation retombe rapidement sous forme de précipitations et se re-mélange avec l'eau demeurée en phase liquide. Durant une glaciation, l'eau appauvrie en oxygène-18 tombe en neige sur les continents et demeure en grande partie piégée dans la glace des glaciers. Entre-temps, la composition de l'eau des océans s'enrichit en oxygène-
355 18, proportionnellement au volume de l'eau appauvrie accumulée sur les continents sous forme de glaciers. La composition en oxygène-18/oxygène-16 de l'eau de mer est continuellement enregistrée dans la composition minérale de nombreux organismes marins incluant les coraux, les mollusques et les foraminifères. On peut connaître les compositions anciennes de l'eau de océans en oxygène-18/oxygène-16 en la déduisant de la composition minérale des fossiles marins. La
360 variation du volume des glaciers continentaux au cours des temps géologiques reflète les variations climatiques sur Terre.