Satellites naturels ou artificiels

Gilbert Walusinski - Paris

Pour les Anciens, un *satellite* est le compagnon plus ou moins modeste d'un homme puissant ; le mot est pris, le plus souvent en mauvaise part ; c'est l'acceptation courante en ... géopolitique.

L'acceptation astronomique a été introduite par Copernic. Dans son ouvrage *"Des Révolutions des orbes célestes"* (1 543), il fait décrire aux planètes des orbites circulaires autour du Soleil mais il fait exception pour la Lune qui décrit son orbite autour de la Terre : la Lune est un satellite de la Terre.

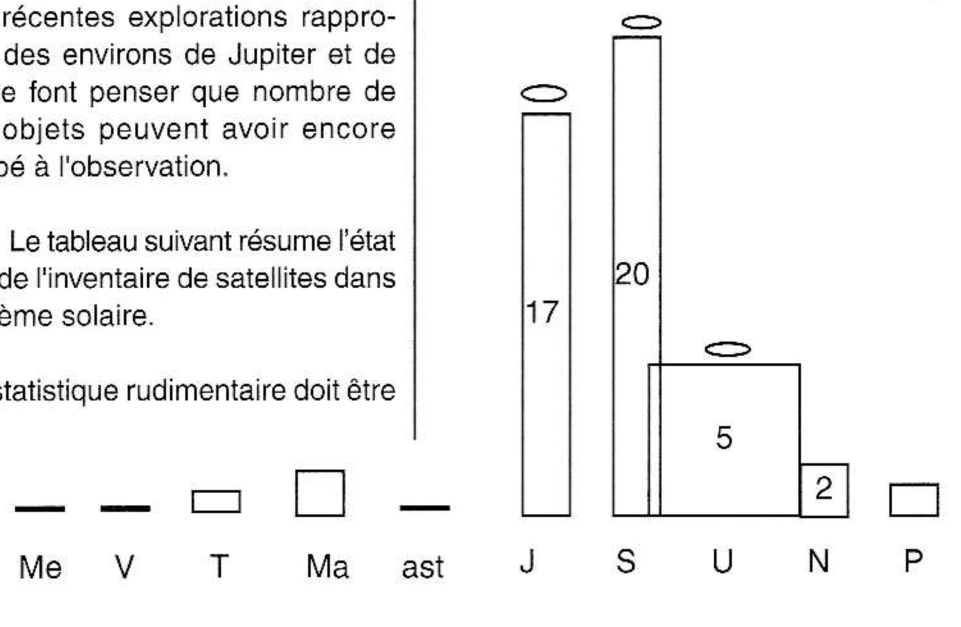
Pour les adversaires de Copernic, cette exception unique est considérée comme un des défauts de son système.
Cet argument anticopernicien perdra toute valeur lorsque Galilée, en 1610, découvrira les quatre gros satellites de Jupiter.

Aujourd'hui, on a identifié plus de 50 satellites qui gravitent autour de certaines planètes du système solaire et les récentes explorations rapprochées des environs de Jupiter et de Saturne font penser que nombre de petits objets peuvent avoir encore échappé à l'observation.

Le tableau suivant résume l'état actuel de l'inventaire de satellites dans le système solaire.

Cette statistique rudimentaire doit être corrigée en fonction des données nouvelles apportées par l'observation. L'information qu'elle apporte mérite tout de suite d'être affinée, il faut tenir compte des masses respectives des planètes et des satellites.
Par exemple, les deux petits satellites de Mars n'ont pas la même importance mécanique que l'unique et gros satellite de la Terre.

Elle suggère pourtant bien des questions :
o Pourquoi les deux planètes les plus proches du Soleil n'ont-elles aucun satellite ?
o Pourquoi les planètes ayant le plus grand nombre de satellites sont-elles justement les plus grosses ?
o Que les orbites des nombreux astéroïdes (petites planètes) soient relativement proches de celle de Jupiter, la plus grosse planète, est-ce un hasard ?
o Que les deux satellites de Neptune aient des orbites et des mouvements aussi différents, est-ce en relation avec la curieuse orbite de Pluton ? etc.



Questions de formulation simple mais réponses plus délicates car elles font appel à des connaissances de mécanique assez savantes. Nous nous limiterons ici à des indications schématiques.

C'est une mécanique également savante qui permet de comprendre le lancement *des satellites artificiels et des sondes spatiales.* Nous employons à dessein deux expressions pour distinguer :

1- les satellites artificiels, objets placés sur des orbites autour de la Terre. Satellites d'observation de la surface ou de l'atmosphère terrestre, satellites de télécommunication. Satellites géostationnaires, satellites héliosynchrones, etc.

2- les sondes spatiales, les objets lancés pour l'exploration des planètes ou de l'espace interplanétaire.

Ainsi l'appellation de satellite, sans qualificatif, sera-t-elle réservée aux objets naturels seuls recensés dans la statistique de la figure 1.

L'histoire des découvertes

L'histoire des découvertes concernant les satellites des planètes illustre de façon frappante les progrès de l'observation depuis Galilée. Le sujet se prête à des commentaires instructifs même pour des élèves ayant peu de connaissances astronomiques.

La Lune

Bien avant que Galilée braque sa lunette vers la Lune, l'observation visuelle de cet astre avait suggéré maintes réflexions aux astronomes. Aristarque de Samos, au IIIème siècle avant notre ère, savait que la Lune avance, sur le décor des étoiles fixes, de son diamètre apparent en une heure. On retrouve facilement ce résultat élémentaire quand on connaît la période sidérale de la Lune, T = 27,322 jours solaires moyens (j, s, m) :

$$360 / [27{,}322 \times 24] \neq 0°{,}5$$

En désignant R le rayon de la Terre, on a

$$\mathrm{tg}\ 0°{,}5 = R / 2 \cdot d$$
$$\text{et } d = TL = 60\ R$$

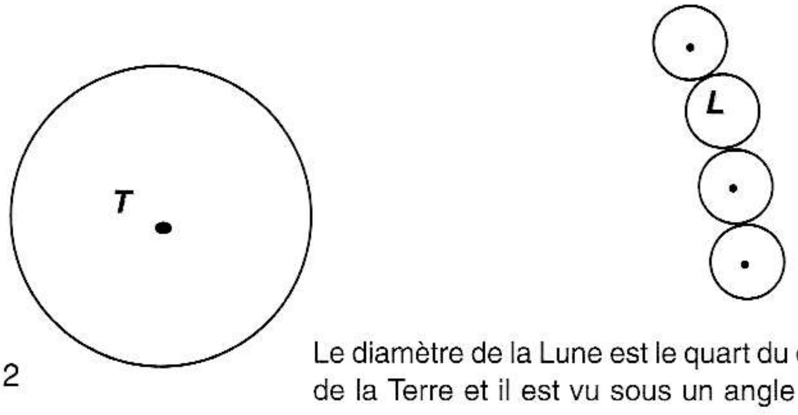


Fig. 2

Le diamètre de la Lune est le quart du diamètre de la Terre et il est vu sous un angle de 0°,5.

Ce résultat lui permit d'évaluer la première distance astronomique, celle de la Terre à la Lune, en admettant que le Soleil était beaucoup plus loin, que le cône d'ombre portée de la Terre pouvait être assimilé à un cylindre et que la totalité d'une éclipse de Lune pouvait durer jusqu'à 4 heures (fig. 2).

Les phases de la Lune

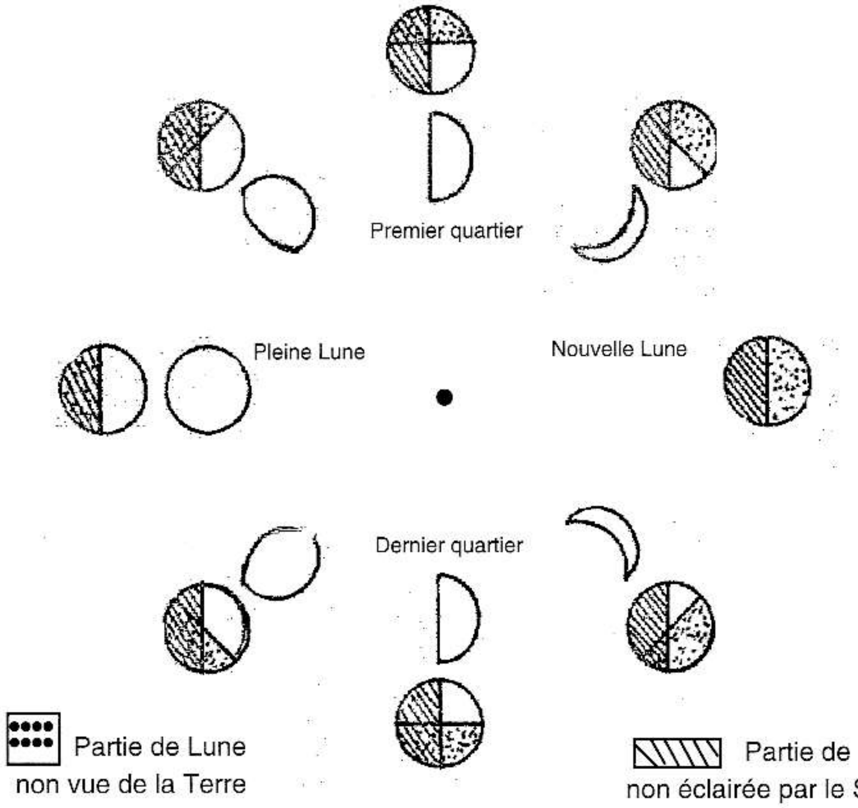
Dans le cadre du système héliocentrique de Copernic (1 543), des phénomènes tels que phases de la Lune et éclipses sont facilement expliqués. Ainsi la "nouvelle lune" correspond à la *conjonction* de la Lune et du Soleil (ces deux astres se trouvent sur le mérite cercle horaire) ; la "pleine lune" correspond à *l'opposition* des deux astres (les deux cordes horaires qui les portent ont des ascensions droites qui différent de 12 heures).

Il est donc facile de faire calculer *la période sidérale* de la Lune à partir de l'observation des phases. Celle-ci permet de connaître la lunaison ou *période synodique*.

Les éphémérides montrent que c'est une durée un peu variable, dont la valeur moyenne est q = 29,531 jsm. L'année sidérale, période de révolution de la Terre autour du Soleil étant A = -365,2564 jsm, on vérifie que :

$$1 / 27{,}322 = 1 / 365{,}2564 + 1 / 29{,}531$$

Durant les phases intermédiaires de la Lune, le terminateur qui limite là partie éclairée de la partie sombre a la forme d'une demi-ellipse, un demi-grand-cercle vu en perspective. Il est intéressant de réfléchir à l'aspect de la Terre vue de la Lune en fonction de l'aspect de la Lune vue de la Terre et de montrer des photos de la Lune et de la Terre prises le même jour par les astronautes.



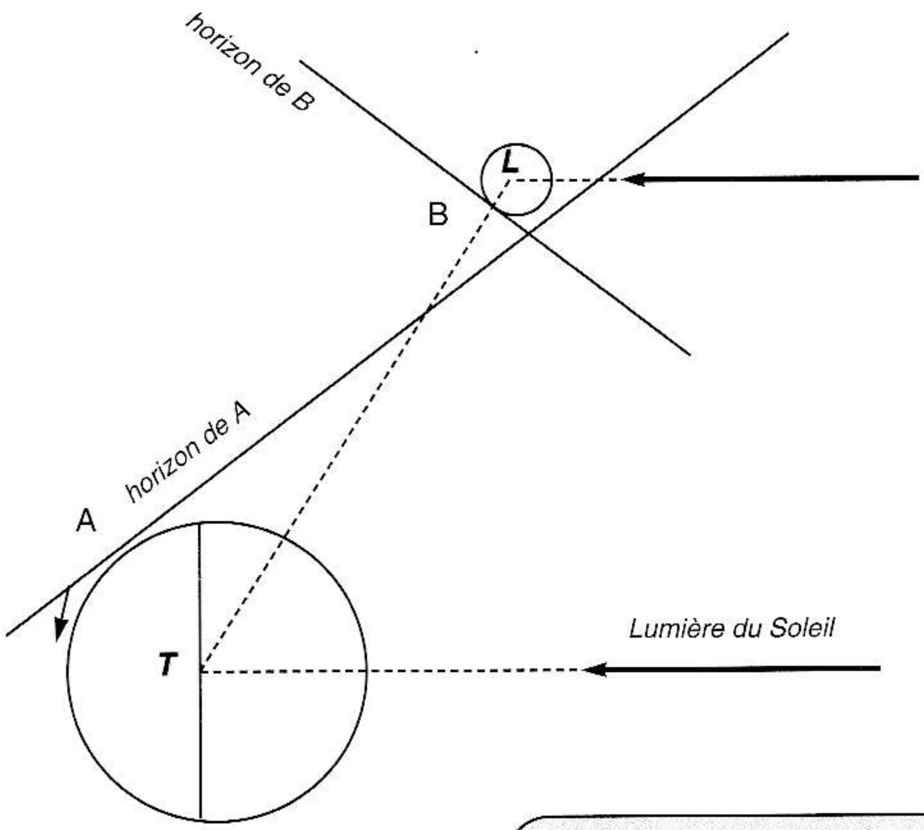


fig. 4 :
Légende de la figure :

TLS = l'angle de phase. Pour l'observateur terrestre placé en A, le Soleil est couché depuis peu, c'est le début de la nuit ; un mince croissant de Lune apparaît très bas sur l'horizon vers l'ouest, le limbe demi-cercle, la convexité tournée vers le soleil, le terminateur concave, une demi-ellipse.

Pour l'observateur placé en B sur la ligne, le spectacle serait en quelque sorte complémentaire du précédent ; pour B ce serait la fin de la nuit, la Terre apparaîtrait gibbeuse.

Le limbe demi-circulaire tourné vers le Soleil, le terminateur également convexe sous la forme d'une demi-ellipse.
En A, la lueur du "clair de lune" serait faible ; en B, la lueur du "clair de terre" serait beaucoup plus importante.

Éclipses

Le schéma de la fig. 4 présente plusieurs simplifications dont certaines peuvent être trompeuses ; on a supposé implicitement que les plans des orbites lunaire et terrestre étaient confondues avec le plan de la figure ; les observateurs A et B sont alors placés, le premier sur l'équateur terrestre le second sur l'équateur lunaire en négligeant le fait que l'axe de rotation de la Terre n'est pas perpendiculaire au plan de l'orbite terrestre.
En fait, le plan de l'orbite lunaire n'est pas confondu avec le plan de l'orbite terrestre qui coupe la sphère céleste selon le grand cercle de l'écliptique, cela explique qu'à chaque conjonction du Soleil et de la Lune, il n'y a pas éclipse du Soleil, qu'à chaque opposition, il n'y a pas éclipse de Lune.

Il n'y aura éclipse (de Soleil ou de

Lune) que si opposition (ou conjonction) se produisent alors que la Lune est assez peu éloignée des nœuds, intersection du plan de son orbite et de l'écliptique.
L'angle des deux plans est de 5°81 (variant entre 4°59' et 5°18').

Dans le cas de la figure 4, l'observateur terrestre, placé en A voit non seulement le mince croissant de Lune brillamment éclairé par le Soleil mais également la partie sombre du disque lunaire faiblement éclairée par le reflet de la plus grande partie éclairée du disque terrestre (d'autant que l'albédo de la Terre, son pouvoir diffusant, est beaucoup plus grand que celui de la Lune).
C'est le phénomène de la lumière cendrée, visible deux ou trois nuits avant ou après la nouvelle lune, C'est le "reflet d'un reflet" disait Camille Flammarion. Explication déjà donnée par Leonard de Vinci au début du XVIe siècle, formulée explicitement par Möstlin, l'astronome copernicien qui fut le maître de Kepler à l'université de Tübingen (vers 1 590).

Remarque : les exemples récents d'éclipse montrent bien qu'une éclipse n'a pas lieu n'importe quand au cours de l'année et que, d'année en année, les périodes favorables aux éclipses, distinctes l'une de l'autre à presque six mois d'intervalle, reculent progressivement.
L'étude, même schématique des mouvements de la Lune devra mettre en évidence la rétrogradation de la ligne de nœuds (un tour en moins de 19 années) ; ce phénomène est de même nature que celui de la précision des équinoxes mais d'une bien plus grande ampleur.

D'où naissent les ellipses ?

En première approximation, on néglige les perturbations et on considère le mouvement de deux corps A et B de masses m et m'. Le corps A subit, de la part de B, l'attraction :

$$F_A = k\,(mm' / |AB|^3)AB$$

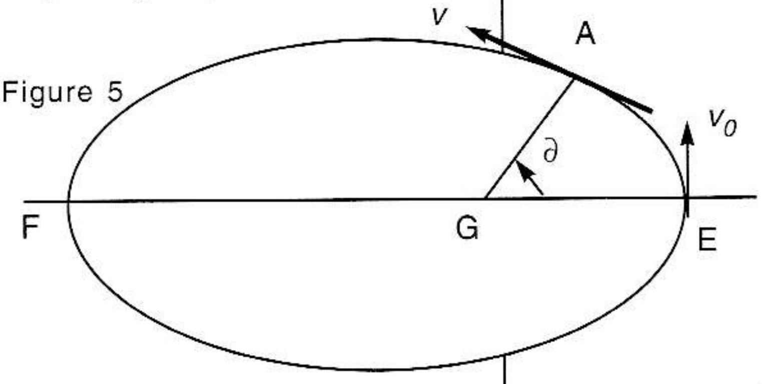
(en relation vectorielle)
alors que B subit, de la part de A, l'attraction :

$$F_B = k\,(mm' / |AB|^3)BA$$

formules dans lesquelles k est une constante la gravitation universelle (k = 6,672 X 10-11, unités S-I.).

Sur le segment AB, il existe un point G, centre des masses de A et B (ou barycentre) tel que $m\overrightarrow{GA} + m'\,\overrightarrow{GB} = 0$

Figure 5

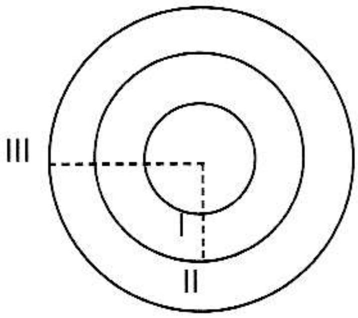


Par rapport à ce point G, le mouvement de A est alors complètement défini par l'équation différentielle

$$d^2\overrightarrow{GA}/dt^2 = -k.(m + m')\,\overrightarrow{GA}/\,|\overrightarrow{GB}|^3$$

L'accélération étant centrale, on démontre alors :
1- l'orbite de A est une ellipse ayant G pour foyer (2e loi de Kepler)
2- le rayon GA balaye une aire qui croit proportionnellement au temps (1ère loi de Képler) :

$$1 / r = (1 + e \cos \partial) / p$$



avec $\partial = 0$ lorsque A est en E, au plus près de G (ou périastre).

Le demi-grand axe de l'ellipse EF (F ou apoastre) est :

$$Z = p / (1 - e^2)$$

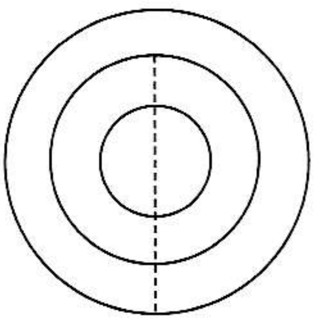
e = excentricité de l'orbite
p = paramètre de l'orbite.

On démontre que l'orbite est circulaire si la norme de la vitesse au périastre vérifie

$$|v_0| = \sqrt{k.\ (m + m') / GE}$$

C'est encore à partir de ces formules qu'on établit la 3ème loi de Kepler :

$$a^3 / T^2 = k\ (m + m')$$

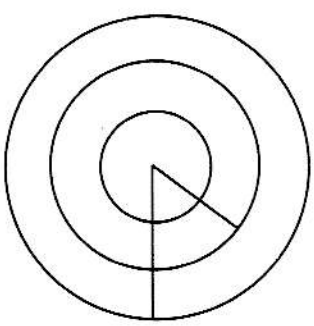


Application :

Pour un petit satellite de Jupiter tel que Amalthée on peut considérer en première approximation que le centre des masses de Jupiter et d'Amalthée est très peu différent du centre de Jupiter.

C'est encore presque le cas pour le plus gros satellite, Ganymède, en présence de la masse considérable de Jupiter. L'orbite ainsi déterminée pour le satellite est dite orbite intermédiaire. On la corrige ensuite par les perturbations des autres corps, principalement celle du Soleil.

Dans le cas des satellites galiléens, chacun des satellites subit des perturbations non négligeables de la part des trois autres. On trouve un résultat remarquable dont les trois premiers : leurs longitudes moyennes sont liées par la formule $l_1 - 3l_2 + 2l_3 = 180°$. Il en résulte qu'il n'y a jamais de conjonction simultanée des trois satellites, jamais d'éclipses simultanées et jamais de passages simultanés.



Exemples de dispositions remarquables :

Les mouvements de la Lune

Comme il a été noté plus haut le système Terre-Lune est exceptionnel : notre satellite est relativement très gros étant donné la taille de la Terre. On a plutôt affaire à une "planète double" ce qui entraîne maintes conséquences pour l'astronomie, fondée jusqu'à maintenant sur des observations et des mesures faîtes à partir du sol de la Terre.

Masse de la Terre

Le mouvement de la Lune autour de la Terre permet une première évaluation de la masse de la Terre.

Assimilons le mouvement de la Lune à un mouvement circulaire centré sur le centre de la Terre : la force centrifuge subie par la Lune est équilibrée par l'attraction terrestre

$$m' \bullet V^2/TL = k\ mm'/TL^2$$

m = masse de la Terre

m' = masse de la Lune

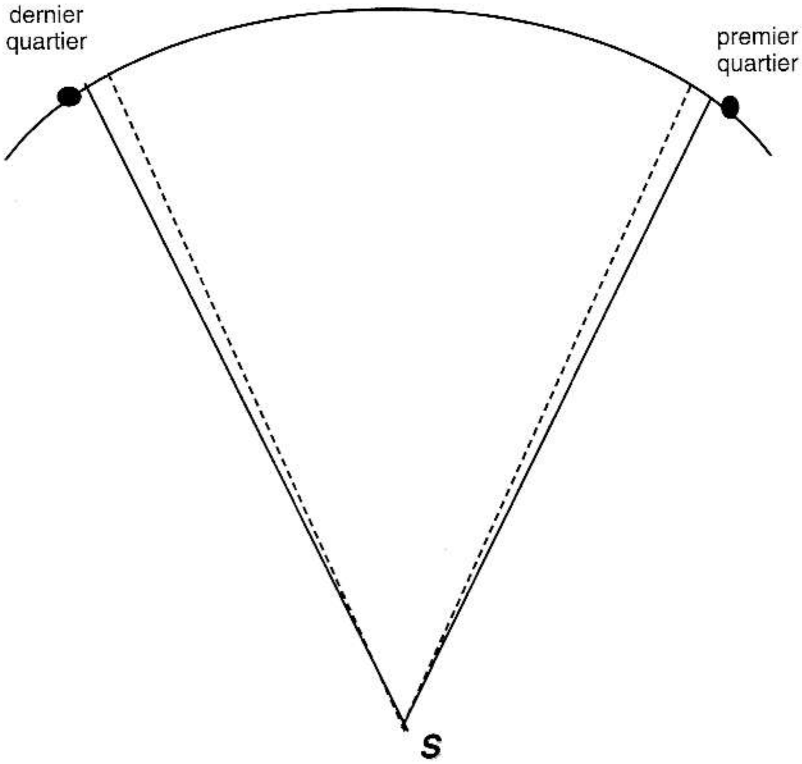
calcul de

$$V = 2\pi \times TL/27{,}322 \times 86400$$

soit

$$m = 4\pi^2 \times TL^3/k(27{,}322 \times 86400)^2$$

assez bonne approximation de la valeur $5{,}9742 \times 10^{24}$ donnée par le Bureau des Longitudes.



Inégalité lunaire

L'orbite de la Lune n'est pas décrite autour du centre de la T, erre mais autour du centre G des masses du système Terre-Lune. C'est le point G qui décrit autour du Soleil une orbite képlerienne. Quand la Lune est à son premier quartier, la Lune est en avant de G sur son orbite, quand la Lune est au dernier quartier, la Terre est en arrière de G sur son orbite (fig. 10). Comme les observations sont faites à partir de la Terre c'est le mouvement apparent du Soleil sur l'écliptique qui parait en avance ou en retard sur son Mouvement moyen de 6-,4 (on l'appelle inégalité mensuelle). -

Cet angle est celui sous lequel, de S, on voit le segment TG soit :

TG = 149,5 x 104 x sin 6",4
TG = 4.640 km

Puisque la distance moyenne Terre-Lune est 384.400 km on en déduit :

M / m' = mT/mL = 81,8

Soit enfin m' = 7.4x 1022

On en déduit la position du point neutre J sur le segment Terre-Lune où les attractions respectives de la Terre et de la Lune s'équilibrent.

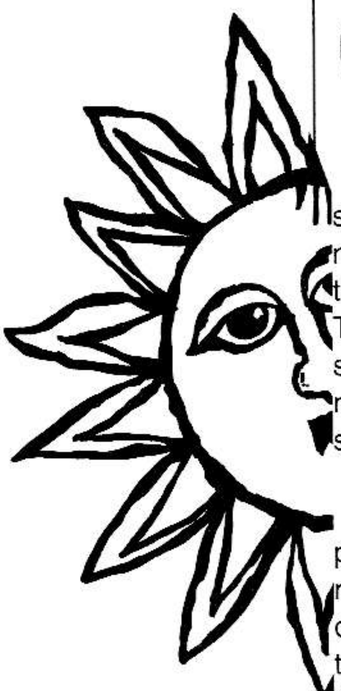
k.m' / TL2 sachant que
JT + JL = 384.400 km.

On trouve approximativement :
JT = 9 JL JT = 345.960km
JL = 38.440 km

Il est impossible de confondre le centre des masses G qui est à 1.740 km de profondeur sous le sol de la Terre et le point neutre J qui est beaucoup plus proche de la Lune que de la Terre. On retrouvera l'importance de ce point J lorsque nous étudierons l'orbite des satellites d'exploration lunaire.

Une conséquence toute différente de la distance du centre des masses au centre de la Terre est la grande inégalité que cela entraîne pour l'année des saisons, intervalle de temps qui sépare deux équinoxes de printemps. Pour la raison déjà évoquée pour l'inégalité mensuelle, les observations astronomiques sont rapportées au centre de la Terre ; or c'est le point G qui décrit l'orbite képlerienne, indépendamment du phénomène de précession, des équinoxes qui est d'une toute autre origine, le passage apparent du Soleil sur l'équateur céleste (Passage au point g) peut être avancé ou retardé de plus de 15 minutes de temps. L'année des saisons est donc une quantité variable dont la valeur moyenne, calculée sur un très grand nombre d'années, est l'année tropique.

Librations



Un autre mouvement intéressant de la Lune donne lieu au phénomène de libration ; si la Lune tourne toujours le même hémisphère vers la Terre, a y a des petits balancements qui sont faciles à observer : l'écart entre la mer des Crises et le limbe lunaire varie selon les époques.

L'explication est simple. La période de rotation de la Lune sur elle-même est égale à la période synodique de la Lune (puisque nous voyons toujours le même hémisphère), soit 29,531 jours. On dit que la rotation de la Lune en synchrone. Cette rotation est pratiquement uniforme.

Le mouvement de la Lune sur son orbite ayant lieu selon la loi des aires, la rotation propre prend de l'avance lorsque la Lune est voisine de son périgée, du retard lorsqu'elle est voisine de son apogée. Ainsi s'explique la libration en longitude qui permet de découvrir des zones lunaires à l'est ou à l'ouest du globe lunaire. S'y ajoute une libration en latitude due au fait que le plan de l'orbite lunaire fait un angle de 6°7 avec le plan de l'équateur lunaire.

S'ajoute, à ces deux librations, une libration physique due à des oscillations de la Lune autour de son centre de gravité; cette libration physique découverte par Bessel en 1 839 est de très faible importance.

Marées et allongement du jour

C'est la Lune qui joue le rôle principal dans le phénomène des marées, le Soleil y ajoutant son influence (ce qui entraîne des marées de niveau variable). Le mouvement des océans provoqué par les marées dissipe une grande quantité d'énergie qui est prise sur l'énergie cinétique due à la rotation de la Terre sur elle-même. La rotation de la Terre sur elle-même est freinée, le jour s'allonge. Ce qui complique la vie des astronomes et même celle de tout le monde, le jour étant pratiquement une unité de base du temps (1 jour solaire moyen = 86.400 s).

Pour apprécier le phénomène, il faut considérer le système Terre-Lune dans son ensemble, le mouvement cinétique de rotation de la Terre sur elle-même, celui de rotation de la Lune sur elle-même, celui de la "rotation" de la Lune autour de la Terre.

Tout se passe comme si une partie du moment cinétique de la Terre était transférée au moment cinétique de la Lune.

Résultat :
Allongement du jour de 0,0016s par siècle,
Allongement de la distance Terre-Lune d'environ 3 cm par siècle,
(on a rudement bien fait d'y aller en 1969 avant qu'elle ne soit trop loin !).

à suivre !