6 LA LUNE

Quelles conditions nous permettent de voir ce genre d'éclipse ?

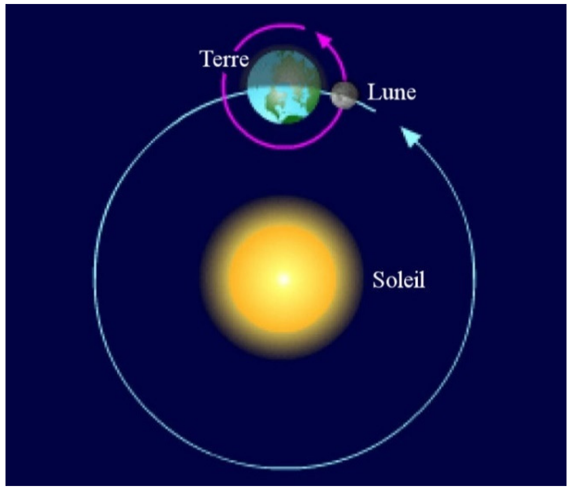
www.skyandtelescope.com/online-gallery/solar-eclipse-pictures/annular-eclipse-from-fluvanna-texas/

Découvrez la réponse à cette question dans ce chapitre.

6.1 LE SYSTÈME TERRE-LUNE-SOLEIL

Le mouvement de la Lune autour de la Terre

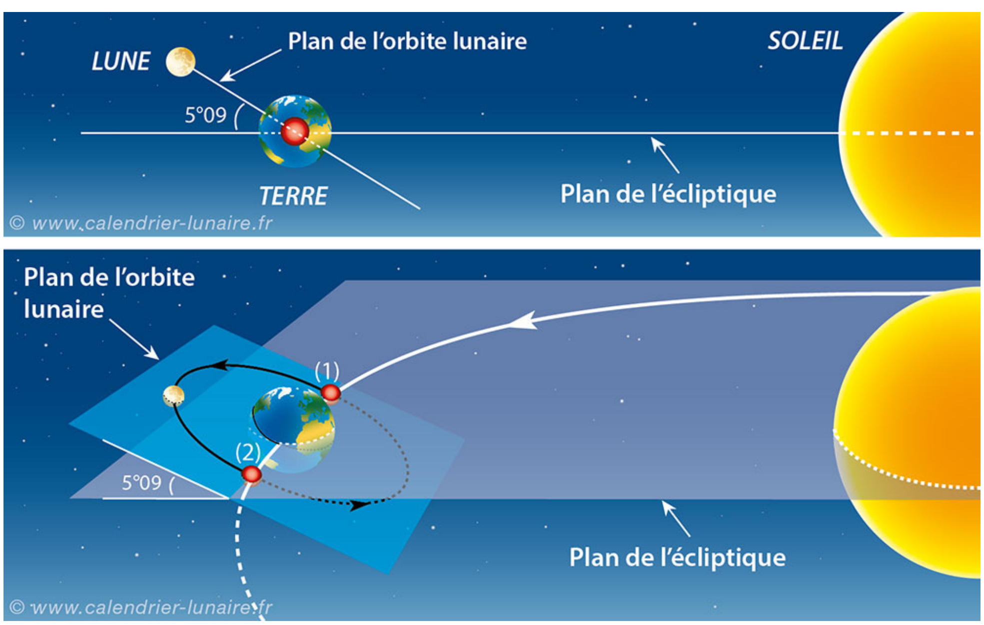
La Lune tourne autour de la Terre avec une période de 27,32 jours. Si on combine cette information avec le fait que la Terre tourne autour du Soleil, on a la situation suivante.



www.showme.com/sh/?h=lPQ3LQu

Pendant que la Terre fait une rotation autour du Soleil, la Lune fait un peu plus de 13 tours autour de la Terre.

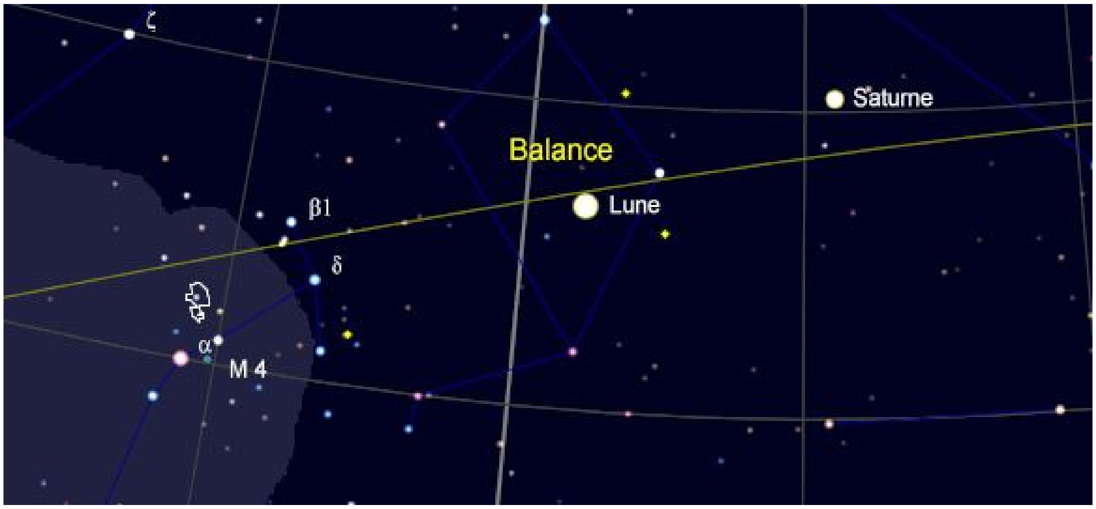
Le plan de l'orbite de la Lune n'est pas exactement le même que celui de la Terre autour du Soleil. Le plan de l'orbite de la Lune est incliné de 5,145° par rapport au plan de l'orbite de la Terre.



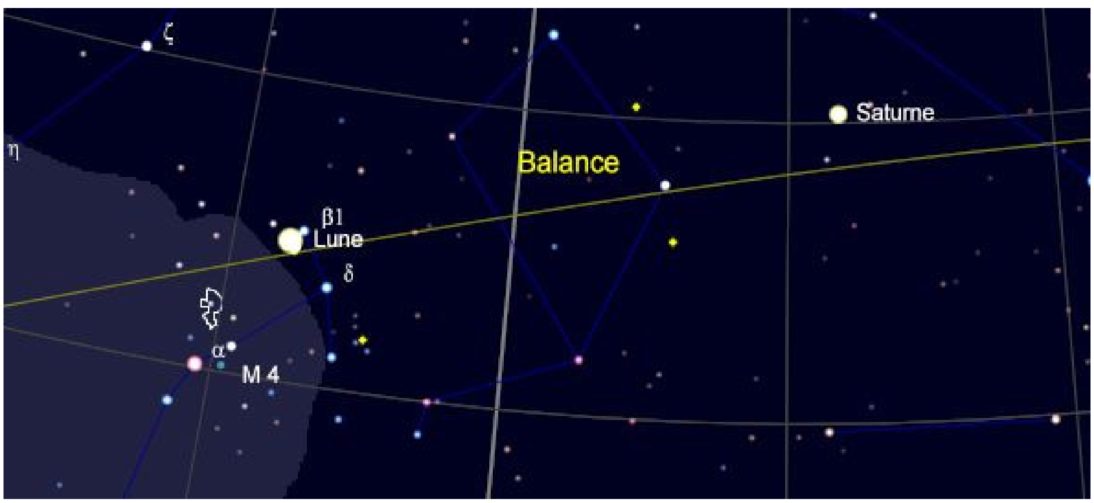
/www.calendrier-lunaire.fr/lune/noeuds-lunaires-lune-action-nature-plantes-jardin-terre/

La Lune dans le ciel

Puisque la Lune tourne autour de la Terre, elle se déplace par rapport aux étoiles dans le ciel. Voici, par exemple, la position de la Lune le 24 mai 2013 à 0 h.

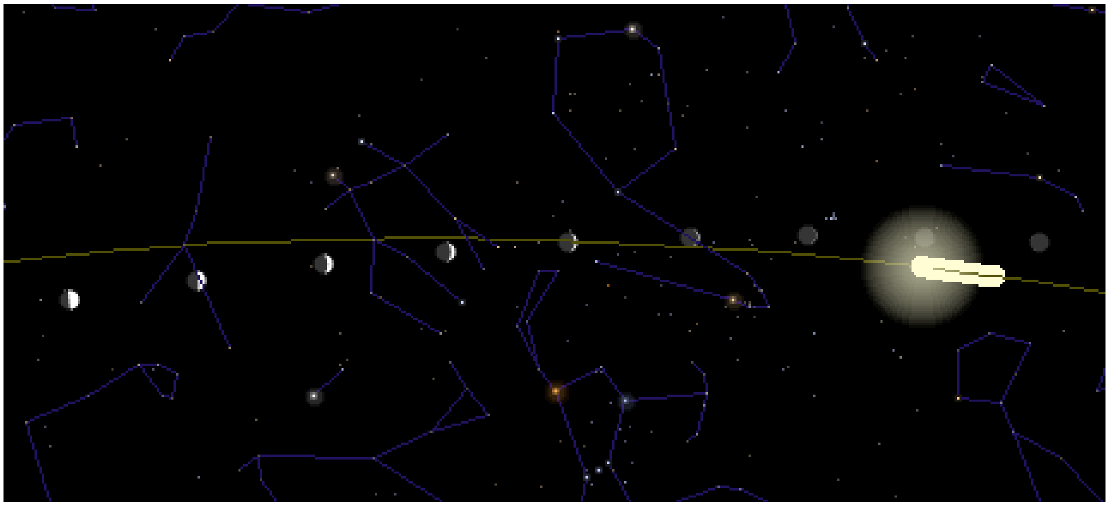


Voici maintenant sa position par rapport aux étoiles 24 heures plus tard.



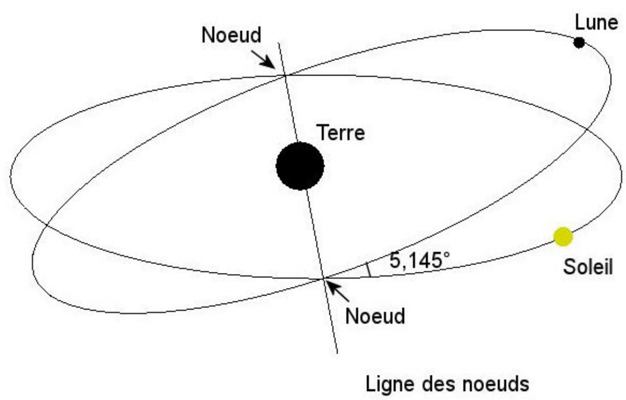
Sur la première image, elle est devant la constellation de la Balance alors qu'elle est devant la constellation du Scorpion sur la deuxième image, un déplacement d'un peu plus de 13° en 24 heures. La Lune se déplace ainsi par rapport aux étoiles pour revenir à peu près à la même place 27,32 jours plus tard.

Le déplacement de la Lune par rapport aux étoiles du ciel de 13° par jour est beaucoup plus grand que celui du Soleil, qui se déplace d'un peu moins que 1° par jour. La figure suivante montre cette différence de vitesse de déplacement sur une période de 9 jours. Sur cette image, le Soleil se déplace d'un peu moins que 9° alors que la Lune s'est déplacée de près de 120°.



physics.weber.edu/schroeder/ua/MoonAndEclipses.html

La ligne jaune sur cette figure est l'écliptique, c'est-à-dire le chemin que suit le Soleil dans le ciel. En gros, la Lune suit le même chemin, mais pas tout à fait. Sur son orbite, elle est un peu au-dessus de l'écliptique la moitié du temps et un peu au-dessous de l'écliptique l'autre moitié du temps.



www.nhn.ou.edu/~jeffery/astro/astlec/lec003.html

La trajectoire de la Lune dans le ciel croise l'écliptique à deux endroits, appelés les *nœuds*, sur la sphère céleste. La déviation maximale entre la trajectoire de la Lune et l'écliptique sur la sphère céleste est de 5,145° et elle se produit exactement entre les deux nœuds.

Cet écart entre les deux trajectoires est évidemment dû à l'inclinaison de l'orbite de la Lune par rapport à celle de la Terre autour du Soleil.

6.2 LA DISTANCE DE LA LUNE

Comme l'orbite de la Lune autour de la Terre est elliptique, la Lune n'est pas toujours à la même distance de la Terre. Sa distance peut varier entre 356 355 km et 406 725 km. (Il s'agit des distances entre le centre de la Terre et le centre de la Lune.) La valeur moyenne de la distance (qui est le demi-grand axe de l'ellipse) est

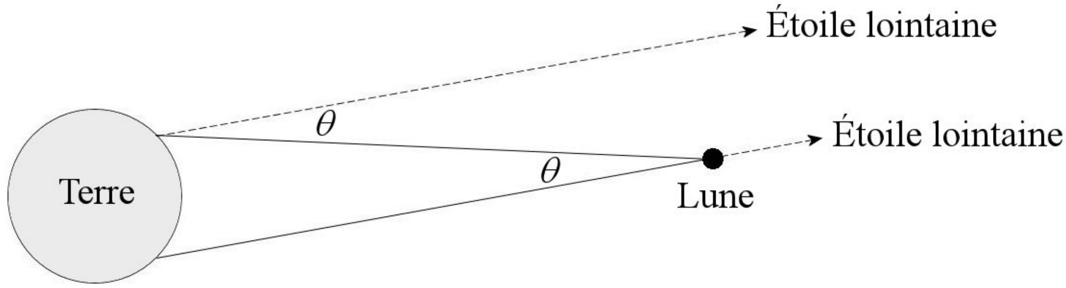
$$D_{\oplus☽} = 384\,399\ km$$

Notez ici le symbole utilisé en astronomie pour la Lune : ☽.

Aujourd'hui, cette distance est mesurée très précisément avec des lasers qui se reflètent sur des miroirs placés sur la Lune. Cela nous donne la distance de la Lune au centimètre près. En fait, il existe toute une variété de méthode pour déterminer la distance de la Lune. Pour illustrer, nous allons montrer la méthode de la parallaxe, une des méthodes les plus anciennes utilisées.

La distance de la Lune par parallaxe

Si deux observateurs notent la position de la Lune par rapport aux étoiles du ciel, ils ne vont pas voir la Lune exactement à la même place. Par exemple, un observateur pourrait voir la Lune directement en ligne avec une étoile lointaine, alors qu'un autre observateur noterait qu'il y a un angle θ entre la Lune et l'étoile.

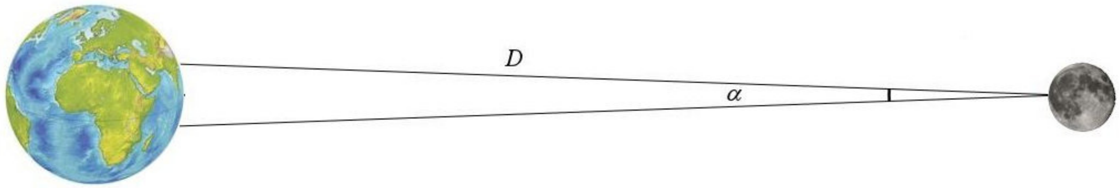


Notez que l'angle θ correspond également à l'angle entre les deux observateurs mesuré à partir de la Lune.

L'image de droite est une superposition de deux images prises simultanément lors d'une éclipse. Une photographie fut prise à Maldon au Royaume-Uni, et l'autre à Divide au Colorado. On les a superposées pour que les étoiles soient exactement à la même place. On remarque que la Lune n'est pas à la même position dans le ciel pour ces deux observateurs distants de près de 7200 km. L'angle est environ de 0,83° dans ce cas si on se fie à la Lune, qui a un diamètre angulaire d'environ 0,5°.

www.digitalsky.org.uk/lunar_parallax_NFIUE.html

On peut alors se servir de ce résultat pour trouver approximativement la distance de la Lune. On a la situation suivante.



En supposant que la ligne qui joint les deux observateurs est l'arc de cercle de l'angle θ, on a

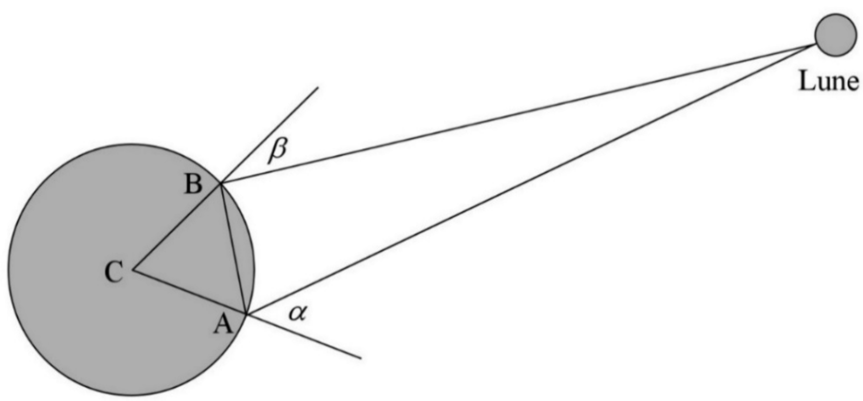
$$\frac{5200km}{D_{\oplus☽}} = \theta_{(rad)}$$

$$\frac{5200km}{D_{\oplus☽}} = 0,83° \cdot \frac{\pi}{360°}$$

$$D_{\oplus☽} = 359\,000km$$

C'est quand même assez près de la véritable valeur même si le calcul fait ici est un peu approximatif.

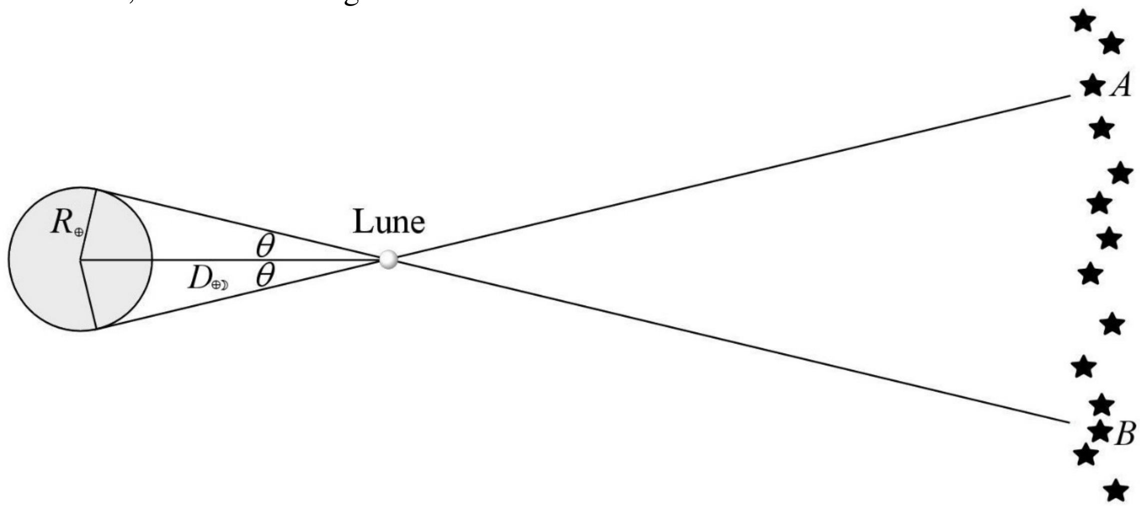
On peut faire un calcul plus complexe sans approximation. Par exemple, nos deux observateurs pourraient mesurer l'angle entre la Lune et le zénith (α et β sur la figure). Connaissant leur position sur Terre, ils peuvent calculer la longueur du côté AB. On résout ensuite le triangle A-B-Lune pour ensuite déterminer la distance entre le centre de la Terre et le centre de la Lune, en résolvant des triangles.



C'est ce genre de mesure qu'ont fait deux savants français en 1751. Joseph Jérôme Lefrançois de Lalande a observé la Lune à partir de Berlin (point B) et Nicolas Louis de la Lacaille a observé la Lune à partir du Cap de Bonne-Espérance (pointe sud de l'Afrique, point A). Leurs mesures ont permis d'obtenir une distance de 381 800 km. Le premier à obtenir une valeur assez correcte de la distance de la Lune par cette méthode est Hipparque au 2^{e} siècle av. J.-C.

Notez qu'Hipparque a tenté aussi d'utiliser cette méthode pour déterminer la distance du Soleil, mais a obtenu une valeur de la distance entre la Terre et le Soleil très loin de la réalité. En fait, la parallaxe solaire est trop petite (0,002 44°) pour qu'on puisse la mesurer avec précision.

L'angle maximum qu'on peut mesurer est obtenu avec deux observateurs de chaque côté de la Terre, comme sur la figure suivante.



Un observateur voit la Lune alignée avec l'étoile A et l'autre observateur voit la Lune alignée avec l'étoile B.

La moitié de cet angle maximum (θ sur la figure) est appelée la *parallaxe lunaire*. À partir de cet angle, on trouve facilement la distance de la Lune puisqu'on a un triangle rectangle.

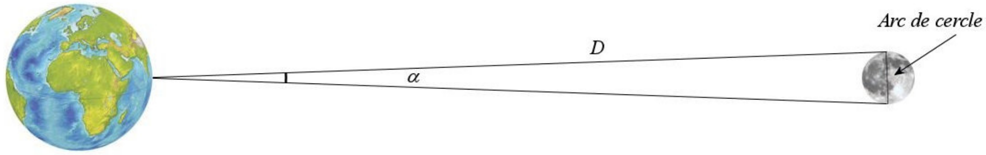
$$\sin\theta = \frac{R_\oplus}{D_{\oplus☽}}$$

Comme on mesure une parallaxe lunaire de 57′ 02,608″ (0,9507244°), la distance de la Lune est

$$\sin 0,9507244° = \frac{6371km}{D_{\oplus☽}}$$
$$D_{\oplus☽} = 60,26816 \cdot 6371km$$
$$D_{\oplus☽} = 384\,000km$$

La taille de la Lune

Avec la distance de la Lune, on peut facilement trouver le diamètre de la Lune en mesurant sa largeur angulaire.



Comme le diamètre de la Lune $d_☽$ est pratiquement égal à la longueur de l'arc de cercle de l'angle α, on a

$$\alpha_{(rad)} = \frac{d_{\rightmoon}}{D_{\oplus\rightmoon}}$$

Comme le diamètre de la Lune est une constante, cette formule nous indique que la largeur angulaire de la Lune (α) diminue si la distance de la Lune ($D_{\oplus\rightmoon}$) augmente. La figure suivante montre bien ce changement apparent de grosseur de la Lune vue de la Terre.

www.abovetopsecret.com/forum/thread653652/pg4

Des mesures montrent que quand la Lune est à une distance de 378 000 km d'un observateur à l'équateur, elle a une largeur angulaire de 1896″. En radians, cet angle est de

$$\alpha_{(rad)} = \left(\frac{1896}{3600}\right)^{\circ} \cdot \frac{\pi rad}{180°} = 0,009192 rad$$

On a donc

$$0,009192 = \frac{d_{\rightmoon}}{378\,000 km}$$
$$d_{\rightmoon} = 3475 km$$

Ce qui nous donne le rayon suivant.

$$R_{\rightmoon} = 1737 km$$

(En fait, la Lune est un peu aplatie et son rayon varie entre 1735,97 km et 1738,14 km.)

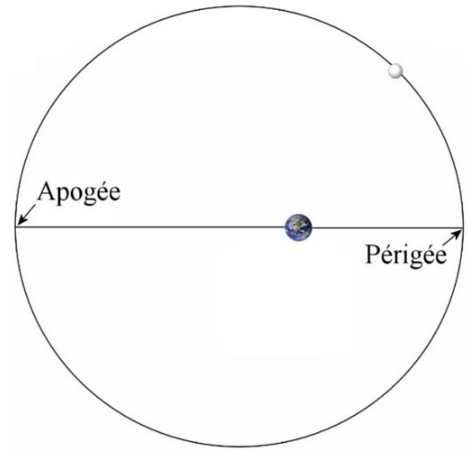
Cette image montre, à l'échelle, la taille de la Lune et de la Terre ainsi que la distance séparant la Terre et la Lune.

6.3 L'ORBITE DE LA LUNE

L'orbite de la Lune est elliptique et a les caractéristiques suivantes.

- Demi-grand axe a = 384 399 km
- Excentricité e = 0,0549

(L'excentricité est exagérée sur l'image.)



Comme elle tourne autour de la Terre, dont la masse est de 5,9722 x 10^{24} kg, on peut déterminer plusieurs éléments du mouvement orbital de la Lune.

Exemple 6.3.1

Quelles sont les distances entre la Lune et la Terre au périgée et à l'apogée ?

Au périgée, la distance est

$$\begin{aligned} r_p &= a(1-e) \\ &= 384\,399 km \cdot (1-0,0549) \\ &= 363\,295 km \end{aligned}$$

À l'apogée, la distance est

$$\begin{aligned} r_a &= a(1+e) \\ &= 384\,399 km \cdot (1+0,0549) \\ &= 405\,503 km \end{aligned}$$

(Ces valeurs sont différentes des valeurs de 356 355 km et 406 725 km données précédemment. Il y a une différence parce que l'excentricité de l'orbite de la Lune varie avec le temps.)

Exemple 6.3.2

Quelles sont les vitesses de la Lune au périgée et à l'apogée ?

La vitesse au périhélie est

$$\begin{aligned} v_p &= \sqrt{\frac{GM_c}{a}\frac{1+e}{1-e}} \\ &= \sqrt{\frac{6,6743\times 10^{-11} \frac{Nm^2}{kg^2} \cdot 5,9722\times 10^{24} kg}{3,84399\times 10^{8} m} \cdot \frac{1+0,0549}{1-0,0549}} \end{aligned}$$

$$= 1076 \tfrac{m}{s}$$

La vitesse à l'aphélie est

$$\begin{aligned}
v_a &= \sqrt{\frac{GM_c}{a}\frac{1-e}{1+e}} \\
&= \sqrt{\frac{6,6743\times 10^{-11} \tfrac{Nm^2}{kg^2} \cdot 5,9722\times 10^{24} kg}{3,84399\times 10^8 m} \cdot \frac{1-0,0549}{1+0,0549}} \\
&= 964 \tfrac{m}{s}
\end{aligned}$$

Exemple 6.3.3

Quelle est la période de rotation de la Lune autour de la Terre ?

La période vaut

$$\begin{aligned}
T &= 2\pi\sqrt{\frac{a^3}{GM_c}} \\
&= 2\pi \cdot \sqrt{\frac{\left(3,84399\times 10^8 m\right)^3}{6,6743\times 10^{-11} \tfrac{Nm^2}{kg^2} \cdot 5,9722\times 10^{24} kg}} \\
&= 2,3718\times 10^7 s \\
&= 27,45 j
\end{aligned}$$

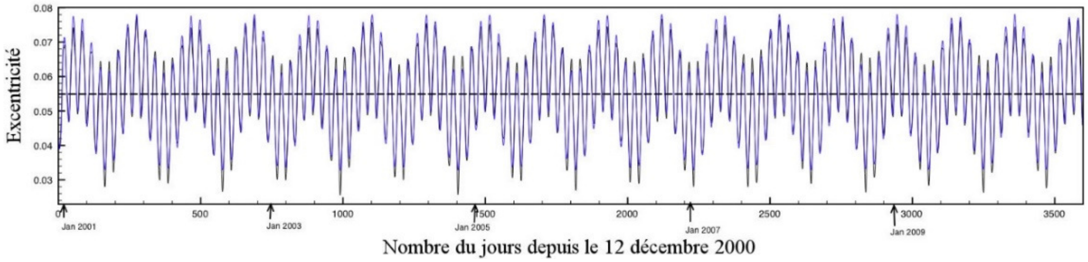
(Ce n'est pas exactement la valeur donnée précédemment qui était de 27,32 jours. On verra un peu plus loin pourquoi il y a cette différence.)

Effets des perturbations sur l'orbite de la Lune

Les perturbations de l'orbite de la Lune, principalement faites par le Soleil, sont très importantes. Quand on tient compte des effets perturbateurs du Soleil, l'étude de l'orbite de la Lune devient assez complexe (et encore, ce qu'on voit ici n'est qu'une introduction). Isaac Newton a même déjà affirmé que rien ne lui avait donné autant de maux de tête que ce sujet.

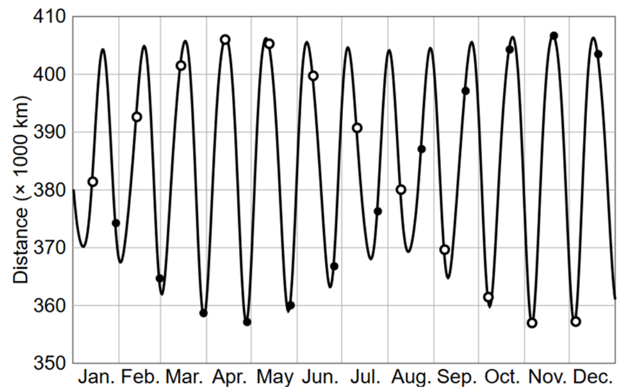
Variation de l'excentricité

L'excentricité de l'orbite de la Lune varie beaucoup et très rapidement. En deux semaines, elle peut passer de 0,06 à 0,03. La valeur moyenne de l'excentricité est de 0,0549, mais en réalité, l'excentricité peut varier entre 0,0255 et 0,0775. Voici un graphique montrant les variations d'excentricité sur une période d'un peu plus de 3500 jours.



clivebest.com/blog/?p=5525

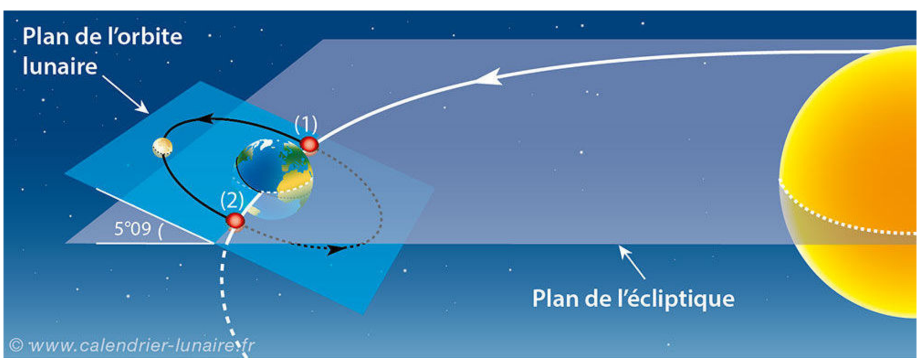
Cela affecte évidemment les distances au périgée et à l'apogée. Ainsi, la distance au périgée varie entre 356 355 km et 370 399 km, alors que la distance à l'apogée, moins affectée par les variations d'excentricité, varie entre 404 042 km et 406 725 km. On retrouve alors les valeurs minimale et maximale données auparavant. Le graphique de droite montre les changements de distance entre la Terre en 2025.



stjerneskinn.com/almanac-2025.htm

Variation de l'inclinaison de l'orbite

On avait donné une valeur d'inclinaison de 5,145°. Cette valeur n'est que la valeur moyenne. En réalité, elle varie entre 5,00° et 5,30°.



www.calendrier-lunaire.fr/fr_FR/noeuds-lunaires-lune-action-nature-plantes-jardin-terre.html

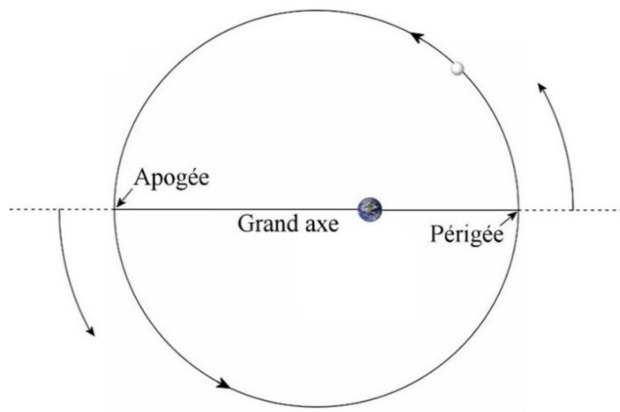
La rotation de la ligne des nœuds

Les nœuds sont les endroits où la trajectoire de la Lune sur la sphère céleste traverse l'écliptique. Ce sont les points 1 et 2 sur la figure précédente et qui correspondent aux endroits où la Lune traverse le plan de l'orbite de la Terre. Si on relie ces deux nœuds par une ligne, on obtient la ligne des nœuds (cette ligne traverse la Terre). En l'absence de perturbation, cette ligne garderait toujours la même orientation dans l'espace. Avec les perturbations, la ligne des nœuds tourne de 19,35° par année dans la direction opposée au déplacement de la Lune. Vu de la Terre, on voit donc les nœuds se déplacer sur l'écliptique pour revenir à la même place au bout de 18,6 ans. C'est la période de précession des nœuds. C'est pour ça qu'on a dit que la Lune revenait *à peu près* à la même place dans le ciel au bout de 27,32 jours. Au bout de cette période, elle sera revenue à la même place le long de l'écliptique, mais l'angle entre la Lune et l'écliptique sera un peu différent.

On peut mesurer le temps que prend la Lune pour revenir au même nœud. Cette période, appelée *période draconitique*, est de 27,21 jours (en fait, elle varie entre 27,004 jours et 27,487 jours). La Lune revient donc au nœud un peu avant de revenir devant les mêmes étoiles, ce qu'elle fait au bout de 27,32 jours.

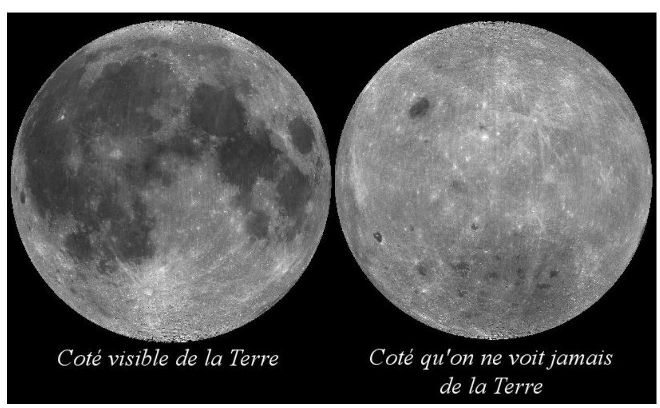
Déplacement du périgée

Les perturbations font également tourner le grand axe de l'ellipse, qui est une ligne reliant le périgée et l'apogée et qui passe, bien sûr, par la Terre. En l'absence de perturbation, cet axe garderait toujours la même orientation dans l'espace. Avec les perturbations, cet axe tourne de près de 40,7° par année dans la même direction que le mouvement de la Lune. Il faudra donc un peu plus que 27,32 jours pour que la Lune revienne au périgée. Le temps que prend la Lune pour revenir au périgée s'appelle le *mois anomalistique* et a une durée de 27,55455 jours (en fait, il varie entre 24,629 jours et 28,565 jours). Il faut donc 8,85 ans pour que le grand axe de l'orbite fasse un tour complet.



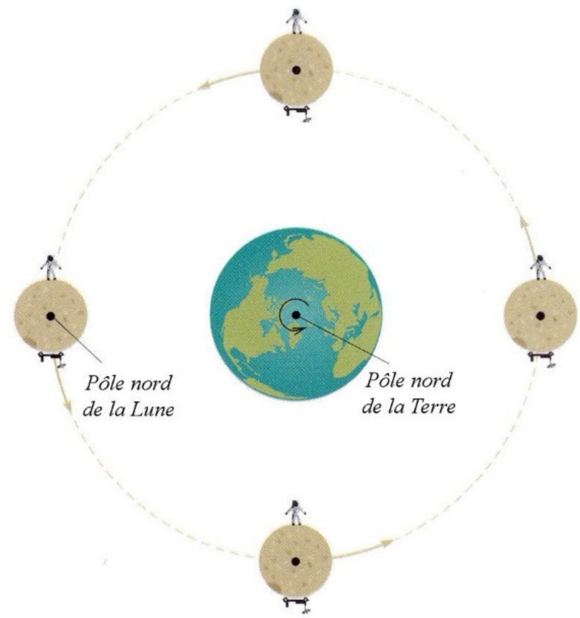
6.4 LA LUNE NOUS MONTRE TOUJOURS LA MÊME FACE

Vous ne l'avez peut-être pas remarqué, mais on voit toujours le même côté de la Lune.



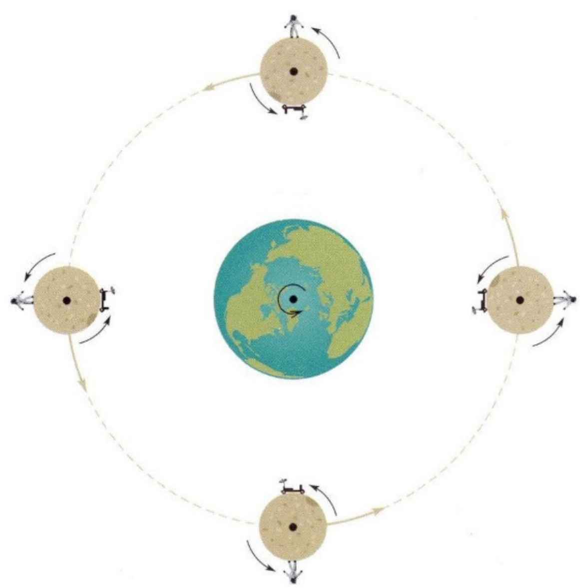
www.universetoday.com/94110/why-does-the-man-in-the-moon-face-earth/

Il en est ainsi parce que la période de rotation de la Lune autour de la Terre est très exactement la même que la période de rotation de la Lune sur elle-même.



Sur cette première image, on peut voir ce qui se passerait si la Lune tournait autour de la Terre, mais ne tournait pas sur elle-même.

Imaginons qu'il y a un astronaute sur la Lune et que son véhicule lunaire est de l'autre côté de la Lune. L'astronaute et le véhicule restent toujours à la même place à la surface de la Lune. On observe qu'à un moment donné, on voit le côté de la Lune avec le véhicule et que parfois on voit le côté de la Lune avec l'astronaute, ce qui signifie qu'on verrait alors les deux côtés de la Lune.



Voyons ce qui arrive maintenant si la Lune fait exactement un tour sur elle-même pendant qu'elle fait un tour autour de la Terre.

Quand la Lune se déplace de 90° sur son orbite, la Lune tourne aussi sur elle-même de 90°. Ainsi, on voit encore le même côté de la Lune, qui est ici le côté où l'astronaute a stationné son véhicule. On ne voit jamais l'astronaute et le côté de la Lune où se trouve ce dernier. L'astronaute ne peut jamais voir la Terre non plus.

hildaandtrojanasteroids.net/TA062rotationofmoon.jpg

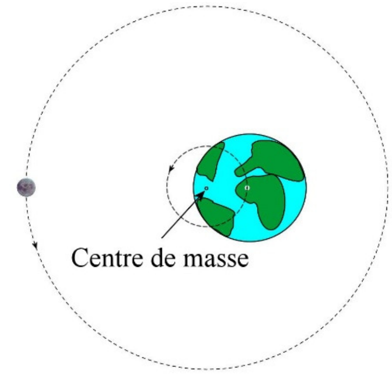
Le clip suivant reprend cette explication.
https://www.youtube.com/watch?v=OZIB_leg75Q
Notez qu'avant 1959, personne n'avait vu la face cachée de la Lune. Cette année-là, la sonde soviétique Luna 3 envoya, le 7 octobre, les premières photos de la face cachée de la Lune.

Il est pratiquement impossible que les deux périodes de rotation soient exactement les mêmes par hasard. On verra plus loin que ce sont les effets à long terme des forces de marée qui sont responsables de l'égalité des périodes de rotation.

6.5 LA MASSE DE LA LUNE

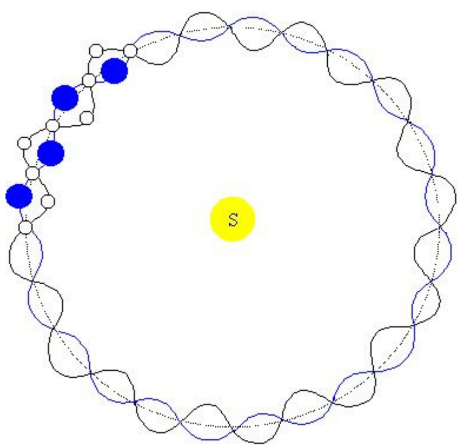
La Terre et la Lune tournent toutes les deux autour du centre de masse du système

On pourrait croire qu'on ne pouvait connaitre la masse de la Lune avant 1959 parce que rien ne tourne autour de la Lune. En effet, il faut qu'il y ait un objet en orbite autour de la Lune pour qu'on puisse appliquer la troisième loi de Kepler et ainsi obtenir la masse de l'objet central. On aurait alors dû attendre la mise en orbite de la première sonde autour de la Lune en 1959 pour mesurer la masse de la Lune.



Cependant, la situation est plus compliquée qu'une Lune tournant simplement autour de la Terre. En réalité, la Terre et la Lune tournent toutes les deux autour du centre de masse du système Terre-Lune.

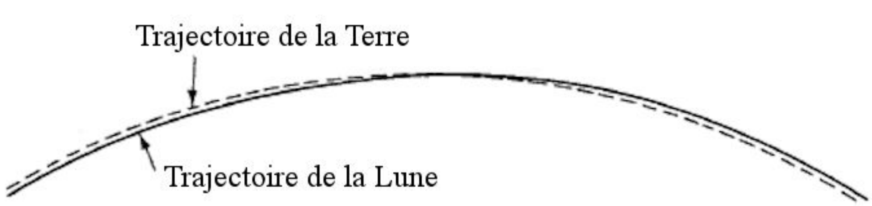
C'est le centre de masse de ce système qui tourne autour du Soleil. L'image de gauche montre l'orbite résultante pour la Terre et la Lune autour du Soleil. Notez que les oscillations sont exagérées pour la Lune et encore plus pour la Terre.



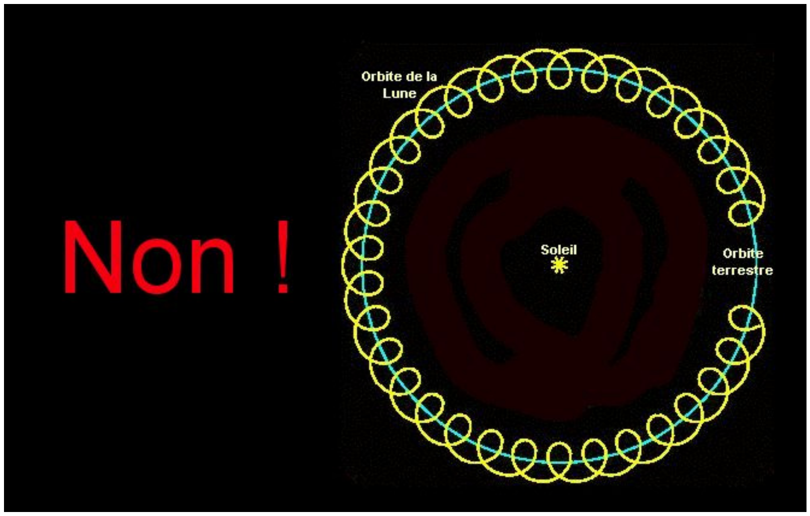
www.xena.ad/lcf/atelier/centre/stl.htm

En regardant cette image, on peut se demander si la Lune tourne autour de la Terre ou autour du Soleil. Si on calcule la force de gravitation faite par la Terre et par le Soleil sur la Lune, on se rend compte que la force faite par le Soleil est environ 2 fois plus grande que celle faite par la Terre. On pourrait donc dire que la Lune fait, principalement, une rotation autour du Soleil et que la force exercée par la Terre peut être considérée comme une simple perturbation de ce mouvement !

Notez que même cette image n'est pas correcte. La force gravitationnelle exercée par le Soleil sur la Lune étant toujours plus grande que celle faite par la Terre, les trajectoires de la Lune et de la Terre devraient toujours être concaves vers le Soleil. C'est ce qu'on aurait si on n'avait pas exagéré les oscillations de la Terre et de la Lune. L'image suivante, qui montre uniquement une partie de la trajectoire de la Lune et de la Terre, est plus exacte.



Il n’est pas rare de voir des images incorrectes pour représenter la trajectoire de la Lune autour du Soleil. En voici un exemple.



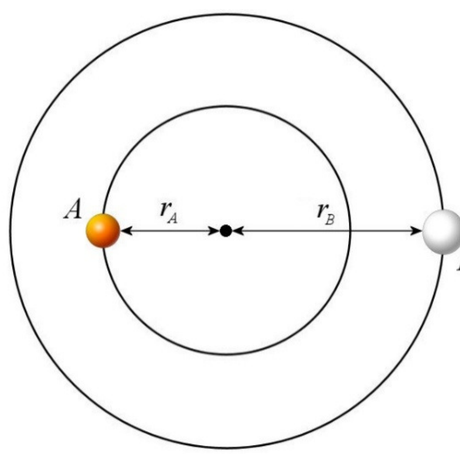
jcboulay.free.fr/astro/sommaire/astronomie/univers/galaxie/etoile/systeme_solaire/terre1/lune/page_lune.htm

Cette représentation est tout à fait incorrecte. La trajectoire de la Lune ne peut jamais avoir une concavité vers l’extérieur de l’orbite. (D’autant plus que la Lune fait beaucoup trop de tour autour de la Terre sur cette image. On a dit qu’elle faisait un peu plus de 13 tours, mais j’en compte au moins 35 ici !).

Quand deux objets forment un système double, on peut trouver la masse des deux objets à partir de la période de rotation et des distances. On peut donc trouver la masse de la Terre et de la Lune.

La période d’un système double

Ici, on va supposer que nos deux objets (étoile, planète ou satellite) sont sur des orbites circulaires. Ils tournent autour du centre de masse avec la période T. Ce temps est le même pour les deux objets, car ils doivent toujours être de chaque côté du centre de masse du système. La distance entre les deux objets sera notée r et les distances entre les objets et le centre de masse sera notée r_A et r_B.



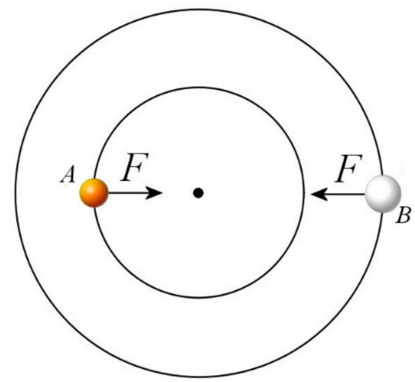
On a alors la situation montrée sur la figure.

Évidemment, la distance entre les objets du système double est

$$r = r_A + r_B$$

Puisque les objets font un mouvement circulaire, il doit y avoir une force centripète sur chacun des objets. Cette force est faite par la force de gravitation entre les objets.

On a donc



$$F_{centripète} = F_g$$

$$F_{centripète} = \frac{GM_A M_B}{r^2}$$

En appliquant cette équation à chaque objet, on a

objet A

$$\frac{4\pi^2 M_A r_A}{T^2} = \frac{GM_A M_B}{r^2}$$

$$\frac{4\pi^2 r_A}{T^2} = \frac{GM_B}{r^2}$$

objet B

$$\frac{4\pi^2 M_B r_B}{T^2} = \frac{GM_A M_B}{r^2}$$

$$\frac{4\pi^2 r_B}{T^2} = \frac{GM_A}{r^2}$$

Additionnons maintenant ces deux équations (la somme des côtés gauches des équations est égale à la somme des côtés droits des équations). On a alors

$$\frac{4\pi^2 r_A}{T^2} + \frac{4\pi^2 r_B}{T^2} = \frac{GM_B}{r^2} + \frac{GM_A}{r^2}$$

$$\frac{4\pi^2 \left(r_A + r_B\right)}{T^2} = \frac{G\left(M_A + M_B\right)}{r^2}$$

Puisque $r_A + r_B$ est égale à la distance entre les objets r, et que $M_A + M_B$ est la masse totale du système (M_{tot}), on a

$$\frac{4\pi^2 r}{T^2} = \frac{GM_{tot}}{r^2}$$

La période est donc

Période d'un système double avec des orbites circulaires (3e loi de Kepler)

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{r^3}{GM_{tot}}}$$

(Cette formule indique pourquoi on n'avait pas obtenu la bonne période auparavant. On avait calculé la période en prenant uniquement la masse de la Terre. On voit maintenant qu'il faut en fait prendre la masse totale du système si on tient compte du fait que les deux objets tournent autour du centre de masse.)

Calcul de la masse de la Lune

Puisque la Terre et la Lune tournent autour de leur centre de masse, on peut appliquer la formule précédente pour trouver la masse du système. (Les orbites ne sont pas circulaires pour la Terre et la Lune, mais on verra dans un autre chapitre que cette formule est aussi valable pour les orbites elliptiques, à condition de remplacer r par le demi-grand axe de l'orbite a.)

Si on isole la masse totale dans la formule de la période, on a

$$M_{tot} = \frac{4\pi^2 r^3}{GT^2}$$

La masse totale du système Terre-Lune est donc

$$\begin{aligned} M_{tot} &= \frac{4\pi^2 \left(3,84399\times10^8 m\right)^3}{6,6743\times10^{-11} \frac{Nm^2}{kg^2} \cdot \left(27,321661\cdot 24\cdot 60\cdot 60 s\right)^2} \\ &= 6,0292\times10^{24} kg \end{aligned}$$

En fait, il y aurait une petite correction à faire puisque le Soleil perturbe un peu ce système. La véritable masse totale du système est 6,0456 x 10^{24} kg.

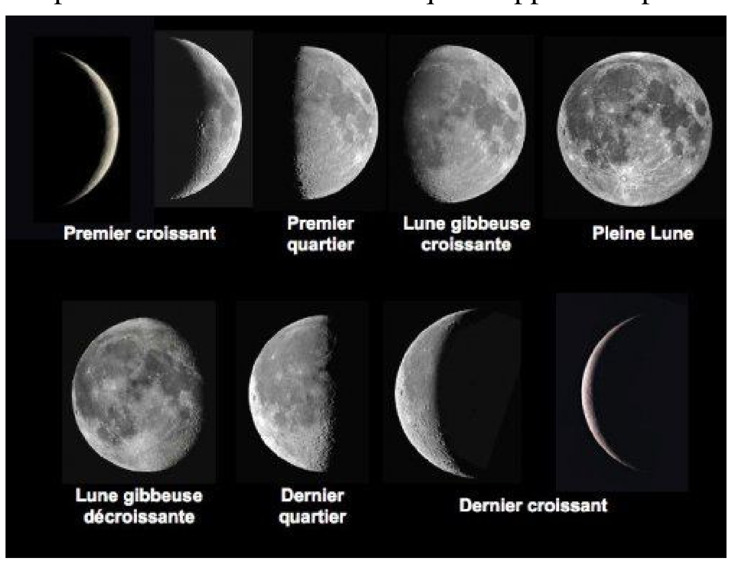
Comme on sait déjà que la masse de la Terre est de 5,9722 x 10^{24} kg, on a

$$\begin{aligned} M_{\oplus} + M_{☽} &= 6,0458\times10^{24} kg \\ 5,9722\times10^{24} kg + M_{☽} &= 6,0456\times10^{24} kg \\ M_{☽} &= 7,34\times10^{22} kg \end{aligned}$$

Cela veut dire que la masse de la Terre est 81,4 fois plus grande que celle de la Lune. La masse de la Lune n'est donc que 1,2 % de la masse de la Terre.

6.6 LES PHASES DE LA LUNE

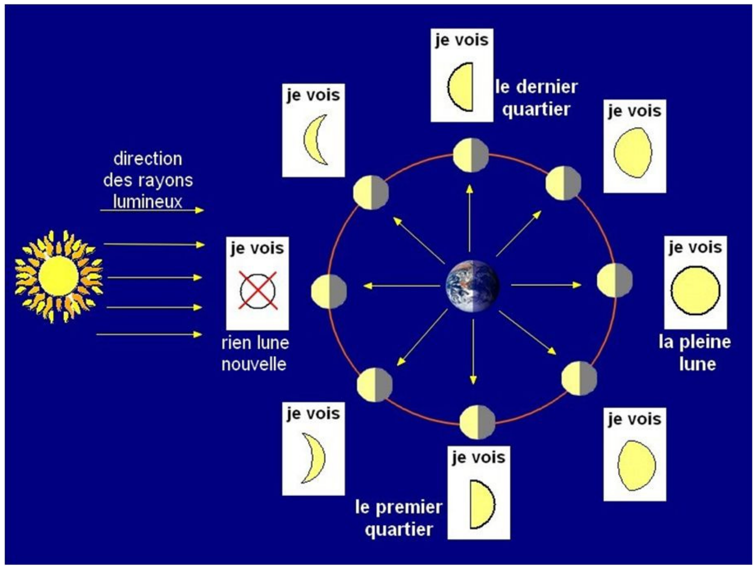
On remarque que la Lune change d'aspect durant le mois. C'est ce qu'on appelle les phases de la Lune. Ce cycle, d'une période de 29,53 jours, est illustré sur la figure de droite. Cette figure indique aussi le nom de ces phases de la Lune.



www.pecorella.org/spip.php?article116

Origine

Ces différents aspects de la Lune sont dus à la position relative de la Lune, de la Terre et du Soleil. La figure de droite vous montre ce que l'on voit à partir de la Terre selon la position de la Lune autour de la Terre.



www.astrosurf.com/gap47/scolaires/telluriques/roche.html

Vous avez peut-être déjà remarqué qu'on peut voir un peu le reste de la Lune quand elle est dans une phase de croissant très petit (image de gauche). C'est ce qu'on appelle *la lumière cendrée.* Pourquoi cette partie de la Lune non éclairée par le Soleil est-elle visible ? Ne devrait-elle pas être complètement noire puisqu'elle n'est pas éclairée par le Soleil ?

www.faaq.org/astroccd/ftp/diom/imagettes/lune__lumiere%20cendree-2.htm

Quand il y a ce mince croissant, un astronaute situé dans la partie non éclairée de la Lune verrait le côté éclairé de la Terre (figure de droite). On peut dire que dans le ciel de la Lune, la Terre est presque pleine. Tout comme la pleine Lune éclaire un peu la Terre la nuit, la pleine Terre éclaire un peu la Lune. C'est donc la lumière qui se reflète sur la Terre qui éclaire cette partie de la Lune.

www.futura-sciences.com/fr/news/t/astronomie/d/spectacle-celeste-observez-la-lumiere-cendree_17114/

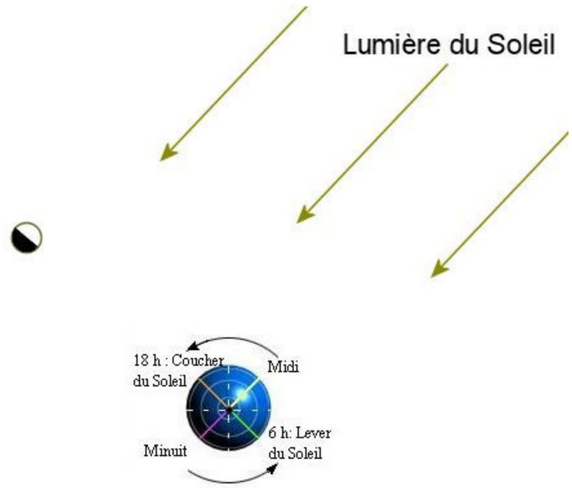
En fait, la pleine Terre éclaire beaucoup plus la Lune que la pleine Lune éclaire la Terre parce que la Terre est plus grande dans le ciel de la Lune que la Lune dans le ciel de la Terre et aussi parce que la Terre reflète beaucoup plus la lumière (30 %) que la Lune (à peine 7 %).

www.jaxa.jp/press/2008/10/20081009_kaguya_e.html

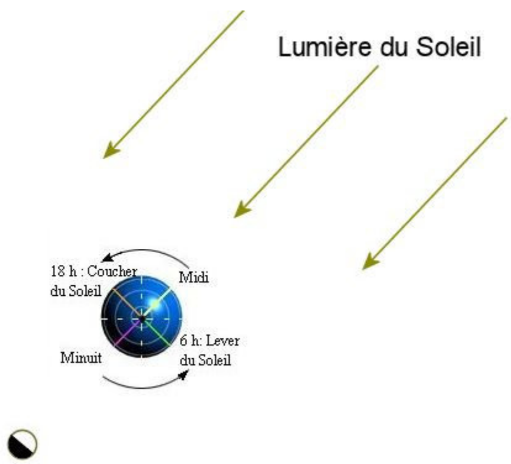
Malgré ce que laisse croire la brillance de la pleine Lune, la Lune est un astre plutôt sombre qui reflète très peu de lumière. L'albédo de la Lune est de seulement 7 % ce qui veut dire que même l'asphalte reflète mieux la lumière que la Lune.

Les heures de visibilité selon la phase

La position de la Lune autour de la Terre détermine les heures de la journée où la Lune est visible. Prenons l'exemple de la Lune au premier quartier pour illustrer comment on trouve ces heures. Au premier quartier, la configuration du système Terre-Lune-Soleil est celle illustrée sur la figure de droite.



On voit uniquement la Lune si on est du côté de la Terre où la Lune se trouve. Avec la rotation de la Terre, on arrive du côté où se trouve la Lune à midi, et on quitte le côté où on peut voir la Lune à minuit. Le premier quartier de Lune est donc visible de midi à minuit.



À la pleine Lune, on a la configuration montrée sur la figure de gauche.

On commence à voir la pleine Lune à 18 h, au même moment où la nuit commence. Le lever de la pleine Lune se produit donc en même temps que le coucher du Soleil. On cesse de voir la pleine Lune à 6 h, en même temps que le Soleil se lève.

6.7 LE MOIS SIDÉRAL ET LE MOIS SYNODIQUE

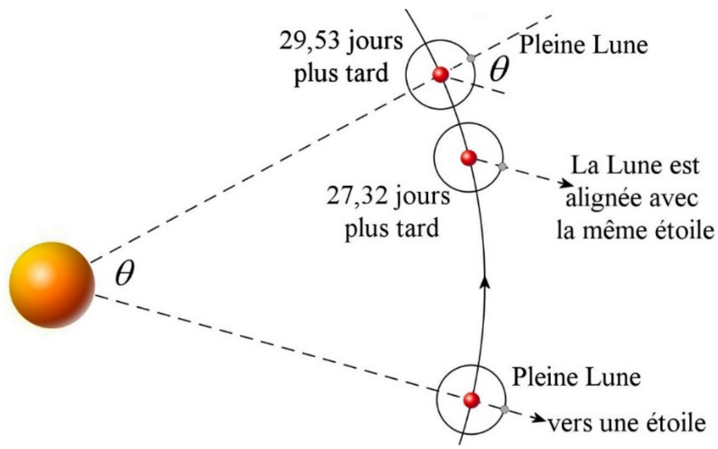
Pourquoi sont-ils différents ?

Les phases de la Lune se répètent tous les 29,53 jours. Pourtant, on a dit précédemment que la Lune fait une révolution autour de la Terre en 27,32 jours.

> La période de 27,32 jours est le *mois sidéral* de la Lune et elle correspond au temps que prend la Lune pour faire le tour de la Terre.

> La période de 29,53 jours est le *mois synodique* de la Lune et elle correspond à la période des phases de la Lune. Plus exactement, c'est le temps qu'il y a entre deux nouvelles Lunes.

Pourquoi y a-t-il cette différence ? Pourquoi les pleines Lunes ne reviennent-elles pas chaque fois que la Lune fait un tour de la Terre ? Examinons le mouvement orbital de la Lune autour de la Terre et de la Terre autour du Soleil pour trouver la réponse à cette question.



On commence par une pleine Lune (position du bas), ce qui correspond au moment où la Lune est dans la direction opposée au Soleil vu de la Terre. Au bout de 27,32 jours, la Lune a effectivement fait un tour autour de la Terre et elle est revenue en ligne avec la même étoile. Mais puisque la Terre s'est déplacée sur son orbite, la Lune n'est plus dans la direction opposée au Soleil. Pour revenir à cette direction opposée, elle devra continuer son mouvement sur son orbite pour finalement arriver en opposition au Soleil 29,53 jours après la pleine Lune précédente.

On remarque alors sur la figure que l'angle supplémentaire que la Lune a dû faire sur son orbite correspond à l'angle que la Terre a fait sur son orbite autour du Soleil. Cela veut dire que quand la Terre aura fait un tour complet autour du Soleil, l'angle supplémentaire fait par la Lune autour de la Terre sera de 360°. En un an, la Lune fait donc un tour de plus autour de la Terre qu'il y a eu de pleines Lunes. Vérifions cela. En un an, le nombre de pleines Lunes est

$$N_{PL} = \frac{365,2565654\,j}{29,53\,j} = 12,369$$

Cela signifie que la Lune a fait 13,369 tours autour de la Terre. Le mois sidéral est donc

$$T = \frac{365,2565654\,j}{13,369} = 27,32\,j$$

C'est effectivement la période sidérale. On pourrait appliquer cette méthode pour n'importe quel satellite d'une planète. On notera le mois sidéral M_{sid} , le mois synodique M_{syn} et la période de révolution de la planète autour de l'étoile par $T_{planète}$. Comme il y a toujours 1 tour de plus que le nombre de pleines Lunes, la durée du mois sidéral est

$$\begin{aligned} M_{sid} &= \frac{T_{planète}}{N_{PL}+1} \\ &= \frac{T_{planète}}{\frac{T_{planète}}{M_{syn}}+1} \\ &= \frac{1}{\frac{1}{M_{syn}}+\frac{1}{T_{planète}}} \end{aligned}$$

Ce qui nous donne

Lien entre le mois sidéral et le mois synodique (la rotation du satellite autour de la planète et la rotation de la planète autour de l'étoile sont dans le même sens)

$$\frac{1}{M_{sid}} = \frac{1}{M_{syn}} + \frac{1}{T_{planète}}$$

Si le satellite tourne autour de la planète dans le sens opposé à la rotation de la planète autour de l'étoile, le satellite va arriver en position opposée à l'étoile avant d'avoir fait un tour complet. En un an, le satellite aura fait un tour de moins qu'il y a eu cycle de phase. La formule devient alors

Lien entre le mois sidéral et le mois synodique (la rotation du satellite autour de la planète et la rotation de la planète autour de l'étoile sont dans le sens contraire).

$$\frac{1}{M_{sid}} = \frac{1}{M_{syn}} - \frac{1}{T_{planète}}$$

Il faut dire que cette rotation en sens inverse est plutôt rare, mais tout de même possible. C'est ce que fait Triton, un satellite de Neptune.

Exemple 6.7.1

Sur une planète, un satellite revient à sa phase pleine tous les 14,3 jours et il y a 224,3 jours en un an. Quelle est la durée du mois sidéral si la rotation du satellite autour de la planète est dans le même sens que la rotation de la planète autour de l'étoile ?

La durée du mois sidéral est

$$\frac{1}{M_{sid}} = \frac{1}{M_{syn}} + \frac{1}{T_{planète}}$$

$$\frac{1}{M_{sid}} = \frac{1}{14,3j} + \frac{1}{224,3j}$$

$$\frac{1}{M_{sid}} = 0,07439j^{-1}$$

$$M_{sid} = 13,443\,j$$

Variations du mois synodique

Le mois synodique de 29,53 jours (29 jours 12 h 44 min 3 s) n'est qu'une moyenne. En réalité, il n'y a pas toujours exactement le même temps entre les nouvelles Lunes. Avec la vitesse de la Lune qui varie sur une orbite elliptique et toutes les perturbations qui modifient cette orbite, la durée du mois synodique peut prendre une valeur se situant entre 29,26754 jours (29 jours 6 h 22 min 40 s) et 29,84089 jours (29 jours 20 h 10 min 53 s).

6.8 LES ÉCLIPSES

Les éclipses de Soleil

L'alignement de la Terre, de la Lune et du Soleil

Rappelons-nous cette image montrant la position de la Lune et de Soleil dans le ciel par rapport aux étoiles pendant une période de 9 jours.

physics.weber.edu/schroeder/ua/MoonAndEclipses.html

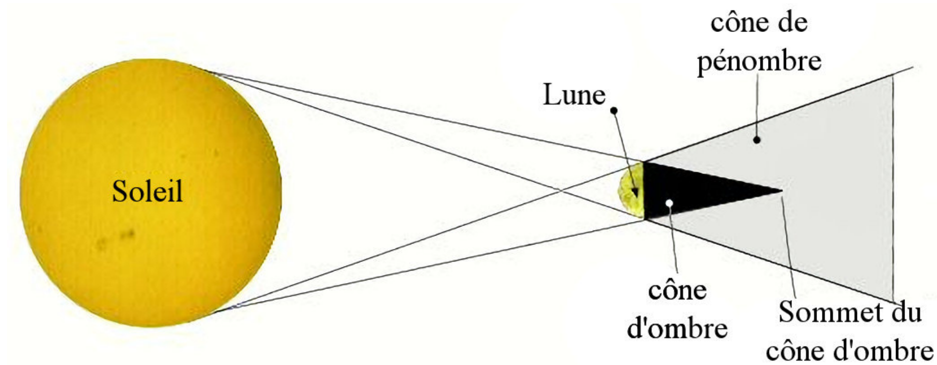
Cette image permet de constater que la Lune traverse parfois l'écliptique (aux nœuds). Bien que ce ne soit pas le cas sur cette figure, il se pourrait que la Lune et le Soleil arrivent à ce nœud en même temps pour alors occuper la même place sur l'écliptique. Comme la Lune est plus près du Soleil, la Lune passera donc devant le Soleil. Nous avons alors une éclipse de Soleil. (En d'autres mots, les éclipses peuvent se produire uniquement quand la Lune est près de l'écliptique. D'ailleurs, *écliptique* vient du latin *linea ecliptica*, qui signifie ligne des éclipses.)

Lors d'une éclipse de Soleil, la Lune passe donc devant le Soleil et on a l'alignement suivant.

Évidemment, cette image n'est pas à l'échelle. Si c'était le cas, on ne verrait même pas la Terre et la Lune sur la figure.

L'ombre et la pénombre

Pour bien comprendre ce qui se passe lors d'une éclipse, il faut regarder l'ombre qu'il y a derrière une planète éclairée par une étoile. On a deux zones : l'ombre et la pénombre.



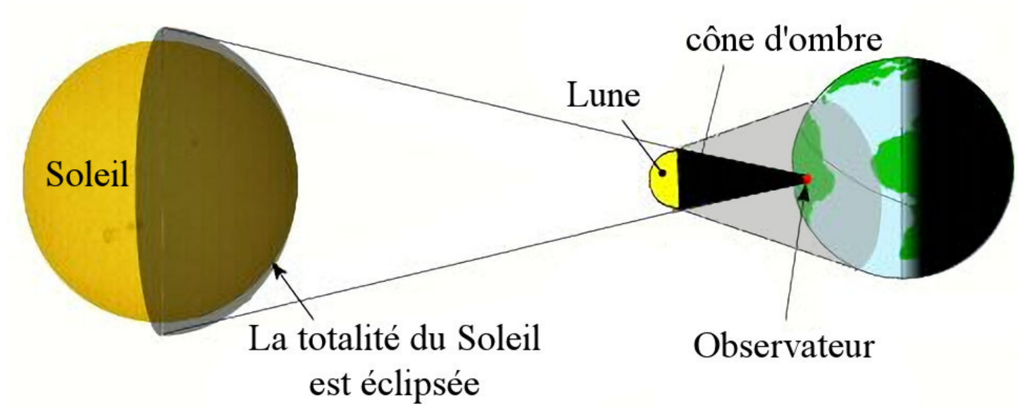
www.imcce.fr/fr/formations/cours/rocher/eclipses/soleil/soleil_type01.php

(Dans cette figure, les angles sont très exagérés. L'angle de l'ombre, mesuré à partir du bout, est d'environ 0,5° et l'angle fait par la pénombre est aussi d'environ 0,5°.)

Aucun rayon lumineux en provenance de l'étoile ne peut atteindre la zone d'ombre. L'étoile est complètement cachée par la planète pour un observateur situé dans cette zone. Dans la zone de pénombre, on reçoit certains rayons lumineux en provenance de l'étoile alors que d'autres rayons sont bloqués par la planète. Cela signifie que seulement une partie de l'étoile est cachée par la planète pour un observateur situé dans cette zone.

L'éclipse totale de Soleil

Quand vous êtes dans la zone d'ombre, le Soleil est complètement caché. C'est ce qui se passe pour l'observateur de la figure suivante.




en.wikipedia.org/wiki/Chromosphere

La figure de gauche montre ce que peut alors voir cet observateur. Par un curieux hasard, le diamètre de la Lune est près de 400 fois plus petit que celui du Soleil, mais la Lune est aussi près de 400 fois plus près de la Terre que le Soleil. Cela fait que la taille angulaire des deux astres est pratiquement identique vu de la Terre et que la Lune peut, dans certaines conditions, cacher la totalité du Soleil, mais de justesse.

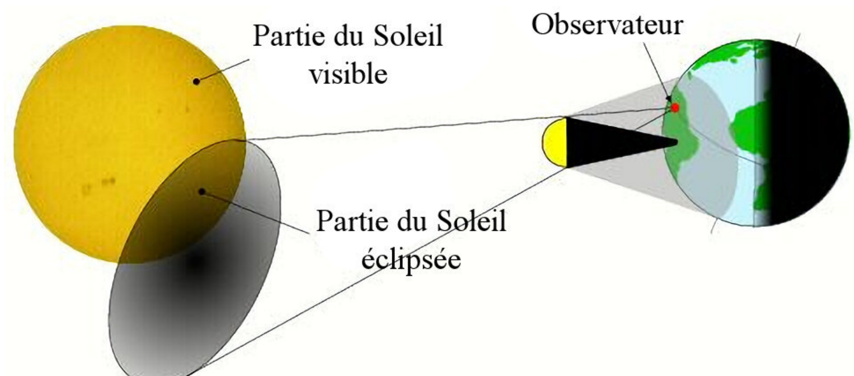
Cela veut dire aussi qu'il n'y a que le bout du cône d'ombre qui touche à la surface de la Terre. On peut voir sur l'image de droite l'endroit où le cône d'ombre arrive sur Terre.

Dans les meilleures conditions, ce cône atteint 270 km de largeur à la surface de la Terre. Il faut donc être assez chanceux pour qu'il arrive exactement à l'endroit où nous sommes sur Terre, d'où la rareté des éclipses totales de Soleil. Le cône d'ombre se déplace à une vitesse se situant entre 1750 km/h (équateur) et 8000 km/h (près des pôles) à la surface de la Terre.


apod.nasa.gov/apod/ap160311.html

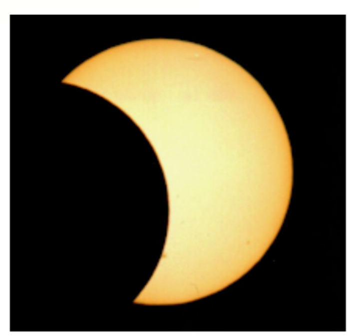
L'éclipse partielle de Soleil

Si l'observateur est dans la zone de pénombre, il n'y a qu'une partie du Soleil qui est cachée.



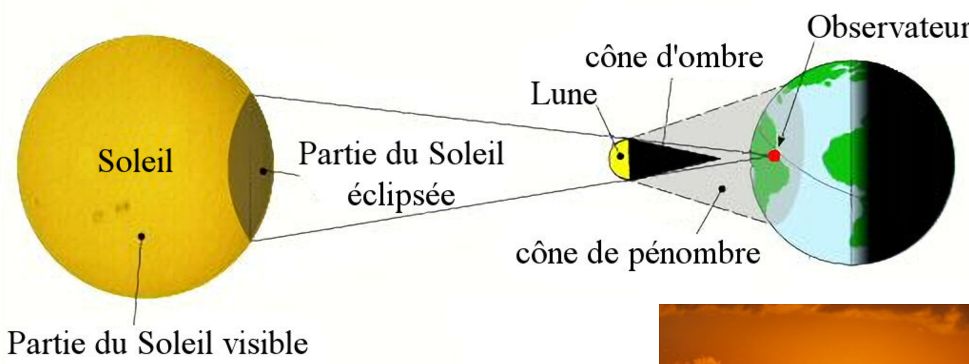
La figure de droite vous montre alors ce que peut voir cet observateur.

Il s'agit d'une éclipse partielle. Ce type d'éclipse est plus commun parce que la zone de pénombre a une largeur d'environ 6000 km sur la surface de la Terre. On a donc plus de chance d'être dans cette région que dans le cône d'ombre.



<u>L'éclipse annulaire de Soleil</u>

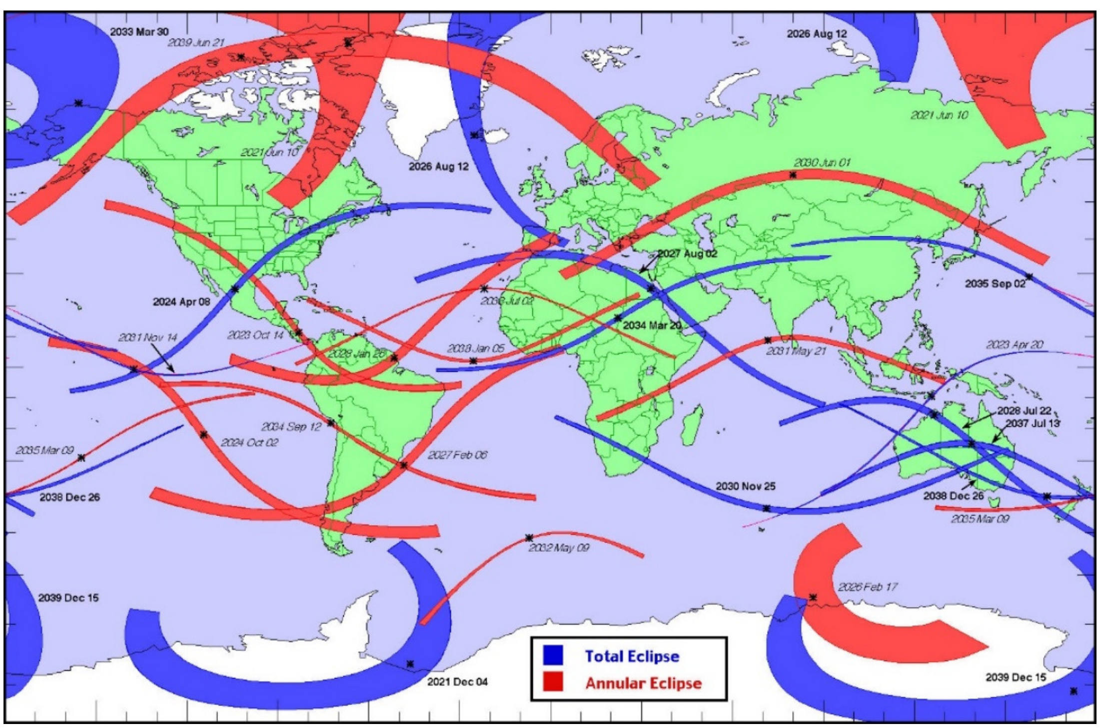
La Lune n'étant pas toujours à la même distance de la Terre, il arrive que le cône d'ombre ne se rende pas jusqu'à la surface de la Terre. Cela signifie que la Lune est alors trop loin de la Terre et que son diamètre angulaire n'est plus assez grand pour cacher complètement le Soleil.



On a alors une éclipse annulaire de Soleil. L'observateur voit alors ce qu'on peut voir sur la figure de droite. La Lune ne cache que le centre du Soleil et il ne reste alors qu'un anneau de Soleil.

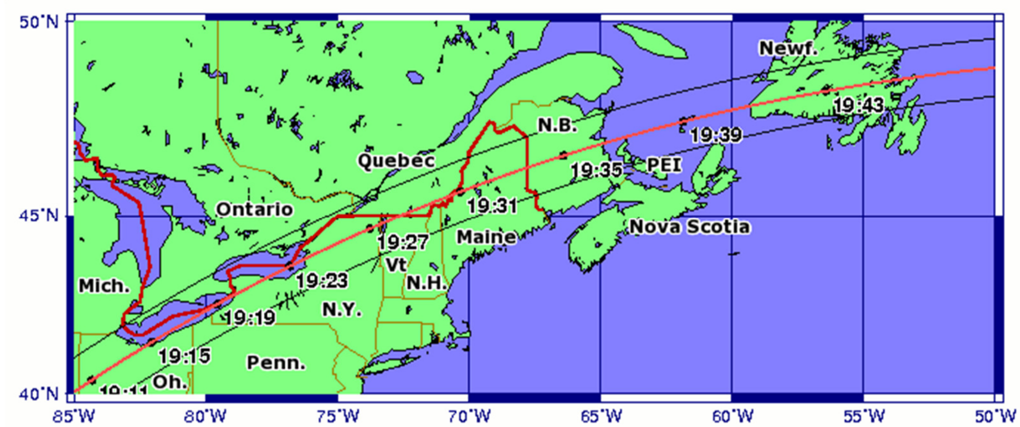
www.savory.de/blog_may_13.htm

La carte suivante vous montre les éclipses visibles entre 2021 et 2040.



eclipse.gsfc.nasa.gov/solar.html

Vous notez surement l’éclipse totale visible au Québec qui a été visible dans l’après-midi du 8 avril 2024.



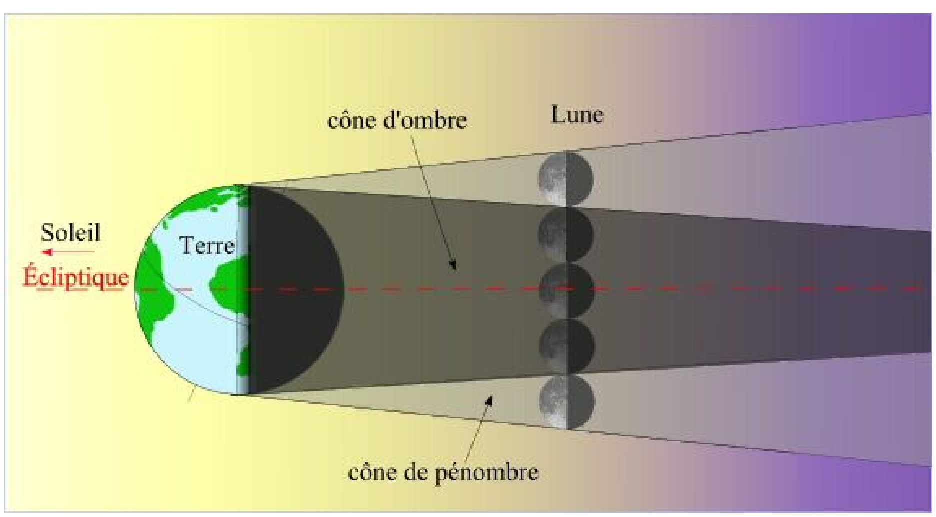
www.hermit.org/eclipse/2024-04-08/

Il ne fallait pas la rater puisque la prochaine éclipse totale visible à partir du Québec sera le 3 mai 2106. Il y en aura une pas trop loin (Nouvelle-Angleterre et Maritimes) le 1er mai 2079. Il y aura toutefois une éclipse annulaire le 23 juillet 2093.

Les éclipses de Lune

Si la Terre peut passer dans l’ombre de la Lune, la Lune peut aussi passer dans l’ombre de la Terre. On a alors l’alignement suivant.

La Lune passe alors dans le cône d’ombre de la Terre.



www.imcce.fr/fr/formations/cours/rocher/eclipses/lune/lune_type01.php

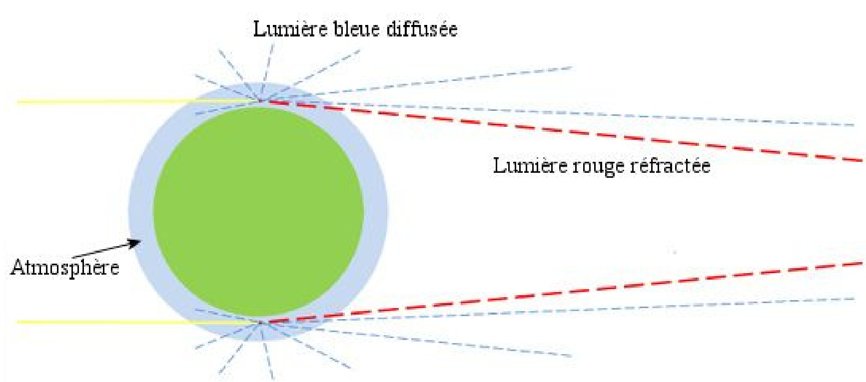
Cette fois, tous les habitants de la Terre qui sont du côté de la Lune, donc du côté où c'est la nuit, verront la Lune entrer dans le cône d'ombre de la Terre. Il est donc beaucoup plus commun de voir une éclipse de Lune qu'une éclipse de Soleil. Voici comment change l'aspect de la Lune pendant l'éclipse.

Juste avant que l'éclipse commence, la Lune est nécessairement pleine puisqu'est dans la direction opposée au Soleil vue de la Terre, ce qui veut dire qu'on voit son côté éclairé.

On remarque que la Lune ne disparait pas complètement durant l'éclipse, même en plein milieu du cône d'ombre, elle semble éclairée par une faible lumière rouge.

www.universetoday.com/81716/total-lunar-eclipse-december-21-2010/

Cette lumière est faite par des rayons lumineux qui atteignent la Lune après avoir été réfractés par l'atmosphère terrestre.



www.iucaa.ernet.in/~scipop/Sky/Eclipses/tle15jun11/lunar_eclipse_1106.htm

Chaque couleur des rayons solaires est déviée différemment par l'atmosphère, comme dans un prisme. Toutefois, l'atmosphère diffuse (dévie dans toutes les directions) davantage la lumière ayant de petites longueurs d'onde, comme le bleu. C'est pour ça que le ciel est bleu : on voit cette lumière bleue diffusée par l'atmosphère. Ainsi, il ne reste pratiquement que de la lumière rouge, qui a une grande longueur d'onde, dans la lumière quand elle sort de l'atmosphère. Après la réfraction des rayons par l'atmosphère, les rayons rouges ne semblent pas avoir dévié beaucoup sur la figure, mais c'est suffisant pour aller jusqu'à la Lune dans l'ombre de la Terre.

Ici, on a fait un montage de photo d'une éclipse partielle de Lune, pour montrer la taille de l'ombre de la Terre par rapport à la Lune.

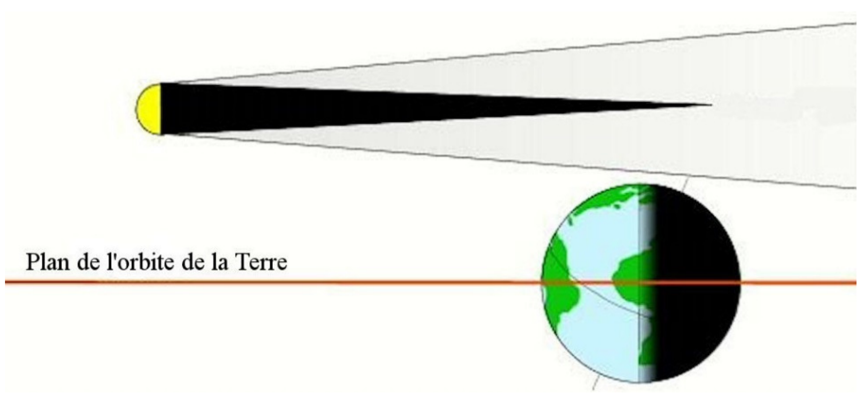
La forme circulaire de l'ombre de la Terre est bien évidente sur cette image. Cette forme circulaire est une autre preuve de la sphéricité de la Terre.

jtintle.wordpress.com/2008/08/

Pourquoi n'y a-t-il pas d'éclipse chaque mois ?

Si les plans de l'orbite de la Lune autour de la Terre et de la Terre autour du Soleil étaient les mêmes, il y aurait une éclipse chaque mois. Toutefois, on se rappelle que les deux plans sont inclinés d'un peu plus de 5°.

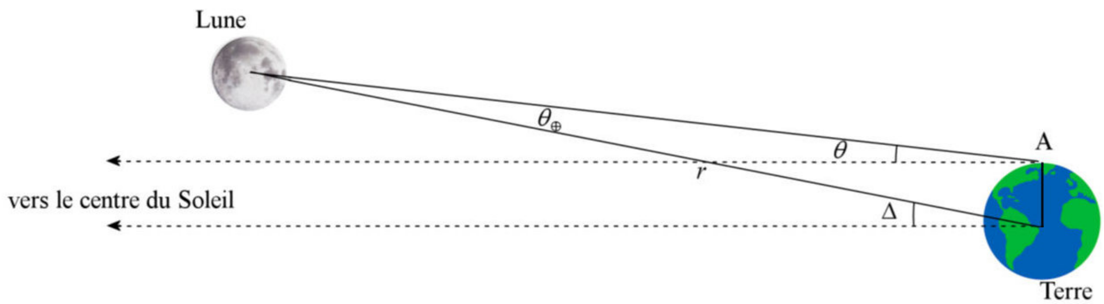
Cela fait que, la plupart du temps, l'ombre de la Lune passe au-dessus de la Terre ou au-dessous de la Terre et qu'il n'y a pas d'éclipse de Soleil.



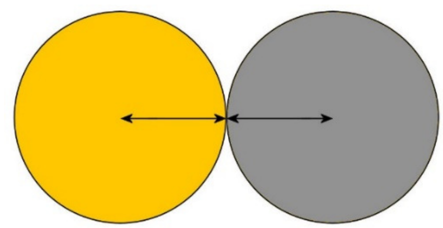
www.imcce.fr/fr/formations/cours/rocher/eclipses/soleil/soleil_type02.php

Dans le ciel, on voit alors la Lune et le Soleil se croiser le long de l'écliptique, mais la Lune passe au-dessus ou au-dessous du Soleil.

Voyons quel doit être l'angle minimum entre le Soleil et la Lune (Δ), mesuré à partir du centre de la Terre, pour qu'il y ait une éclipse de Soleil. Supposons que dans la situation montrée sur la figure, la Lune cache à peine le bord du Soleil pour un observateur au point A.



Pour cet observateur, l'angle θ sur la figure est l'angle entre le centre de la Lune et le centre du Soleil. Cet angle est la somme de la demi-largeur angulaire du Soleil et de la demi-largeur angulaire de la Lune.



La distance du Soleil est de 149 600 000 km. La demi-largeur angulaire du Soleil est alors

$$\theta_{\odot} = \frac{695\,700km}{149\,600\,000km} = 0,004650rad = 0,266°$$

La distance de la Lune est de 384 400 km et son rayon est de 1737 km. La demi-largeur angulaire de la Lune est donc

$$\theta_{☽} = \frac{1737km}{384\,400km} = 0,004519rad = 0,259°$$

L'angle θ est donc

$$\theta = \theta_{\odot} + \theta_{☽} = 0,525°$$

L'angle $\theta_{\oplus}$ sur la figure est approximativement la demi-largeur angulaire de la Terre vue de la Lune. L'angle est donc

$$\theta_{\oplus} = \frac{6371km}{384\,400km} = 0,01657rad = 0,950°$$

Finalement, la somme des angles du triangle formé de lignes continues sur la figure doit être de 180°. On a alors

$$\theta_{\oplus} + (90° + \theta) + (90° - \Delta) = 180°$$

$$\theta_{\oplus} + \left(90° + \theta_{\odot} + \theta_{☽}\right) + \left(90° - \Delta\right) = 180°$$

Si on isole l'angle Δ (angle entre le centre de la Lune et le centre du Soleil mesuré à partir du centre de la Terre), on arrive à

Angle minimum, mesuré à partir de centre de la Terre, entre le centre de la Lune et le Soleil pour qu'il y ait une éclipse de Soleil.

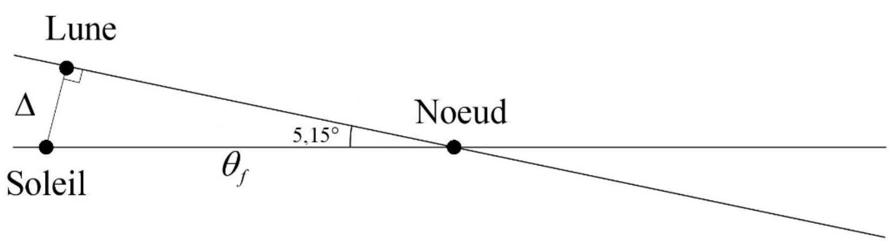
$$\Delta = \theta_{\oplus} + \theta_{\odot} + \theta_{☽}$$

La valeur de cet angle est

$$\Delta = 0,950° + 0,266° + 0,259°$$
$$\Delta = 1,475°$$

Cet angle entre le centre du Soleil et le centre de la Lune doit être inférieur à 1,475° pour que quelqu'un quelque part sur la Terre puisse voir une éclipse.

On sait que les trajectoires de la Lune et du Soleil se croisent aux nœuds. Près des nœuds, l'angle entre les deux astres est petit et peut être inférieur à 1,475°. Loin des nœuds, l'angle est grand et est supérieur à 1,475° (puisqu'il monte jusqu'à 5,145° au maximum). Déterminons jusqu'à quelle distance du nœud le Soleil peut être pour que l'angle entre les deux astres soit inférieur à 1,475°. Voici les trajectoires des deux astres près d'un nœud.

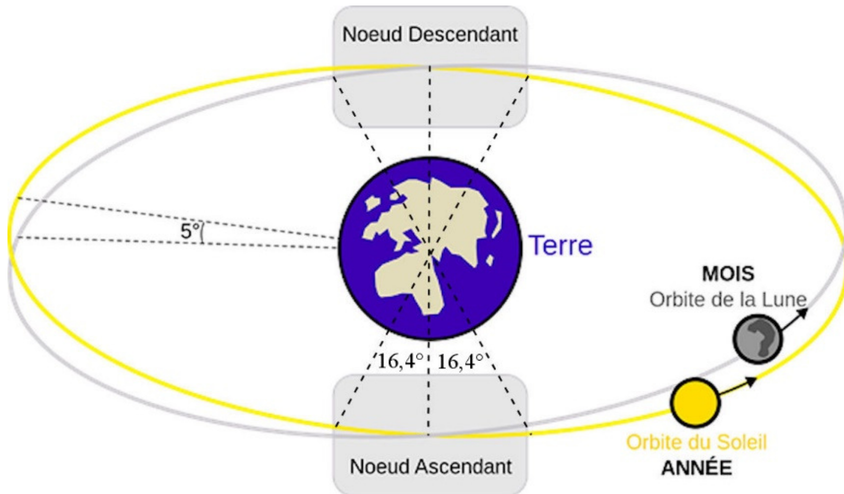


En prenant le triangle rectangle, on a

$$\frac{\Delta}{\theta_f} = \sin\left(5,145°\right)$$
$$\frac{1,475°}{\theta_f} = \sin\left(5,145°\right)$$
$$\theta_f = 16,4°$$

(En fait, avec les variations de distances dues à l'excentricité de l'orbite, les changements d'excentricité avec le temps pour les orbites terrestres et lunaires et les changements de l'angle d'inclinaison de l'orbite de la Lune, cette valeur varie entre 15,39° et 18,59°.)

Ainsi, pour qu'il y ait éclipse de Soleil (partielle, totale ou annulaire), il faut que la Lune passe devant le Soleil à moins de 16,4° d'un nœud sur l'orbite. Ce sont les deux fenêtres d'éclipse où il peut y avoir des éclipses de Soleil.



mag.monchval.com/les-eclipses/

Pour qu'il y ait une éclipse totale ou annulaire, la Lune doit être à moins de 11,3° du nœud (varie entre 9,8° et 11,8°).

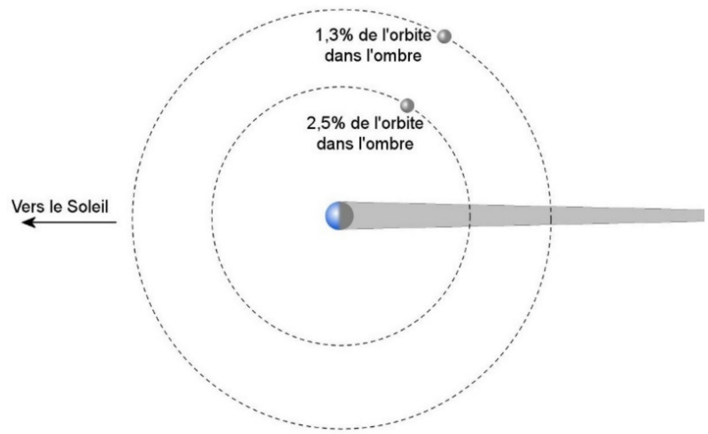
Il y a donc deux moments dans l'année où les éclipses sont possibles. Ce sont les saisons des éclipses. En 2025, les saisons sont en mars et en septembre. Comme la ligne des nœuds de l'orbite de la Lune change lentement de direction, le Soleil revient au même nœud au bout de 346,62 jours (en moyenne). Cela signifie que les saisons des éclipses décalent de près de 19 jours par an (pour être plus tôt). Ainsi, le passage au nœud qui se fait le 18 mars en 2025 décalera au 27 février en 2026 et le passage au nœud qui se fait le 11 septembre en 2025 décalera au 22 aout en 2026.

Comme le Soleil prend environ 35 jours pour traverser la fenêtre d'éclipse, il est inévitable que la Lune croise le Soleil dans cette fenêtre puisque la période synodique de la Lune de 29,5 jours est inférieure à ces 35 jours. Ainsi, il y aura une ou deux éclipses chaque fois que le Soleil passera dans la fenêtre. Par contre, la fenêtre pour les éclipses totales est traversée en environ 24 jours. Comme cette période est inférieure à la période synodique de la Lune, il se pourrait qu'il n'y ait pas d'éclipse totale lors du passage du Soleil dans une fenêtre. S'il y en a une, il ne peut y en avoir qu'une seule.

On pourrait aussi calculer la largeur des fenêtres pour qu'il y ait une éclipse de Lune sachant qu'il n'y a pas d'éclipse si la Lune passe au-dessus ou au-dessous de l'ombre de la Terre. Ainsi, les éclipses de Lune (partielle ou totale) sont possibles si la Lune est à moins de 11,3° d'un nœud (varie entre 9,8° et 11,8°) et les éclipses totales sont possibles si la Lune est à moins de 4,7° d'un nœud (varie entre 4,0° et 5,7°). Comme le temps de passage du Soleil dans la fenêtre des éclipses de Lune est inférieur à la période synodique de la Lune, il y aura 0 ou 1 éclipse de Lune par passage du Soleil dans la fenêtre.

Distance de la Lune à partir de la durée des éclipses de Lune

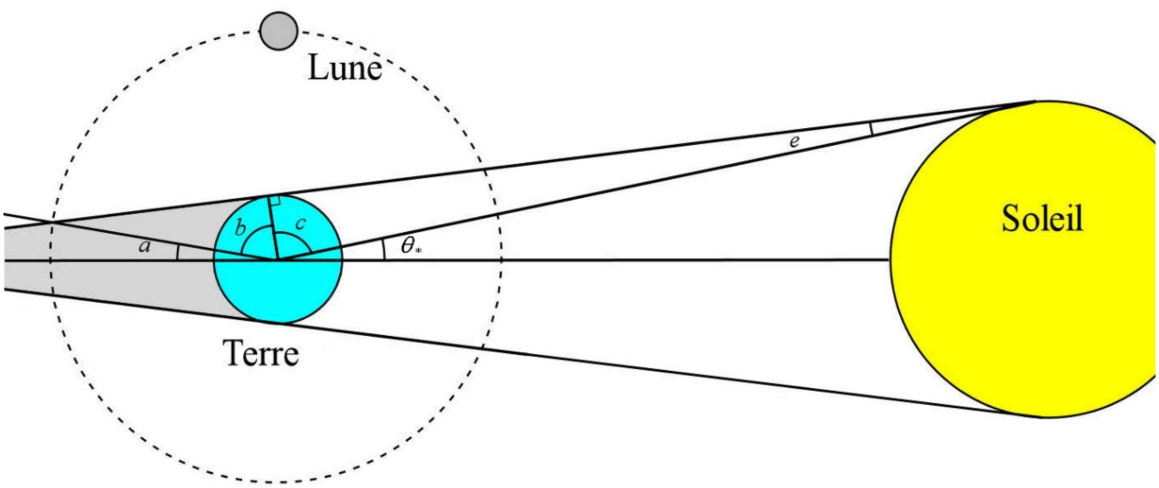
On peut aussi trouver la distance entre la Terre et la Lune avec les éclipses de Lune. Cette méthode fut utilisée dès 150 av. J.-C. par Hipparque.



Montrons premièrement que la distance de la Lune influence la durée d'une éclipse. Prenons deux orbites différentes pour la Lune : une plus près de la Terre et une autre plus éloignée.

Sur l'orbite plus petite, la proportion de l'orbite de la Lune dans le cône d'ombre de la Terre est plus grande que pour l'orbite plus grande puisque la longueur de l'orbite est plus petite, alors que la distance dans le cône d'ombre est plus grande que pour la grande orbite. En mesurant le rapport entre la longueur de l'orbite dans l'ombre par rapport à la longueur de l'orbite totale, on pourra trouver la distance. On trouve cette proportion à partir du temps que dure une éclipse.

Plus précisément, on a la situation suivante.



Notez que θ_* peut être simplement mesuré. C'est la moitié de la largeur angulaire de l'étoile vue de la planète.

La partie de l'orbite de la Lune dans l'ombre de la Terre fait un angle de $2a$ vu de la Terre. Par rapport à un tour complet (360°), cela représente une proportion de $2a$ / 360°.

Comme la vitesse de la Lune le long de son orbite est assez constante, le rapport des temps devrait aussi correspondre au rapport des distances le long de l'orbite. Le temps passé dans l'ombre est évidemment la durée de l'éclipse de Lune. En fait, on utilise la valeur de la durée maximale de l'éclipse qui se produit quand la Lune passe exactement au centre de l'ombre de la Terre. Cette durée maximale est facilement mesurable et elle vaut 158,2 minutes (éclipse du 26 juillet 1953). Nous appellerons cette valeur t_e. On compare cette valeur au temps qu'il faut pour que la Lune fasse un tour et revienne dans la même configuration, ce qui correspond au temps entre les pleines lunes. Ce temps est le mois synodique M_{syn}. Les deux proportions dans l'ombre étant les mêmes, on devrait avoir

$$\frac{2a}{360°}=\frac{t_e}{M_{syn}}$$

$$a=\frac{t_e}{M_{syn}}\cdot 180°$$

En utilisant t_e = 158,2 minutes et M_{syn} = 29,53 jours (42 523,2 min), on trouve que a est d'à peine 0,67° dans le cas de la Lune. La partie de l'orbite de la Lune dans l'ombre de la Terre n'est donc que 1,34° (2 · 0,67°) de la circonférence complète.

On va maintenant fait le lien avec la distance. Sur la figure, on a

$$a+b+c+\theta_*=180°$$

$$b=180°-a-c-\theta_*$$

L'angle e est vraiment minuscule. Il correspond à la demi-largeur angulaire de la Terre, vue du Soleil. Cet angle est à peine 0,0025° et on va donc le négliger. On peut donc affirmer que l'angle c est approximativement égal à 90°. Pour que cette approximation ne soit pas bonne, il faudrait avoir affaire à une planète relativement grosse très près de l'étoile. En posant donc que c vaut 90°, on arrive à

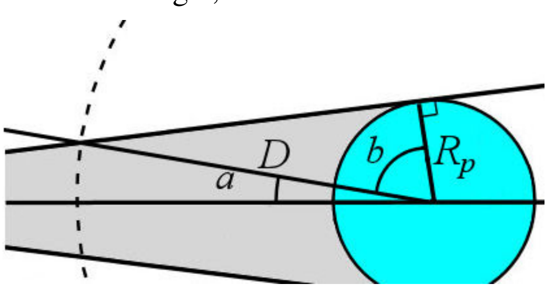
$$b=180°-a-90°-\theta_*$$

$$b=90°-a-\theta_*$$

En utilisant la valeur de a trouvée précédemment, on a

$$b=90°-\frac{t_e}{M_{syn}}\cdot 180°-\theta_*$$

On a alors le triangle suivant, R_p est le rayon de la planète et D est la distance du satellite. Avec ce triangle, on a



$$\cos(b)=\frac{R_p}{D}$$

On a donc

$$\cos\left(90°-\frac{t_e}{M_{syn}}\cdot 180°-\theta_*\right)=\frac{R_p}{D}$$

Puisque cos (90° - θ) = sin (θ), on a

$$\sin\left(\frac{t_e}{M_{syn}}\cdot 180°+\theta_*\right)=\frac{R_p}{D}$$

ce qui donne, en isolant D,

Distance d'un satellite autour d'une planète à partir de la durée des éclipses du satellite

$$D = \frac{R_p}{\sin\left(\frac{t_e}{M_{syn}} \cdot 180° + \theta_*\right)}$$

θ_* est la moitié de la largeur angulaire de l'étoile vue de la planète.
t_e est la durée maximale des éclipses
M_{syn} est la durée du mois synodique du satellite

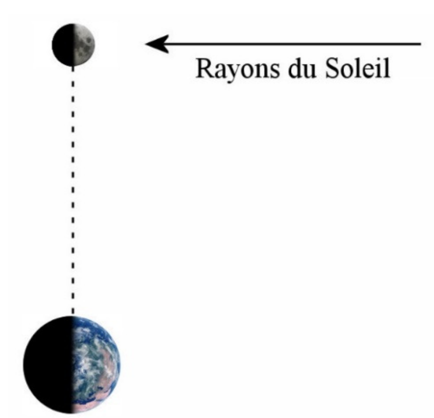
Voyons ce que donne ce résultat pour la Lune. La durée maximale des éclipses de Lune est de 158,2 minutes, le mois synodique est de 29,53 jours (42 523,2 min) et la largeur angulaire du Soleil vu de la Terre est de 0,533°. On a donc

$$\begin{aligned}
D_{\oplus☽} &= \frac{R_\oplus}{\sin\left(\frac{158,2\,\text{min}}{42523,2\,\text{min}} \cdot 180° + 0,2665°\right)} \\
&= \frac{R_\oplus}{\sin(0,6697° + 0,2665°)} \\
&= 61,2 R_\oplus \\
&= 61,2 \cdot 6371 km \\
&= 389\,942 km
\end{aligned}$$

Hipparque avait obtenu une distance de la Lune égale à 65 fois le rayon de la Terre, ce qui est quand même près de la véritable valeur varie entre 55,8 et 63,8. On connait donc assez bien la distance de la Lune depuis près de 2150 ans.

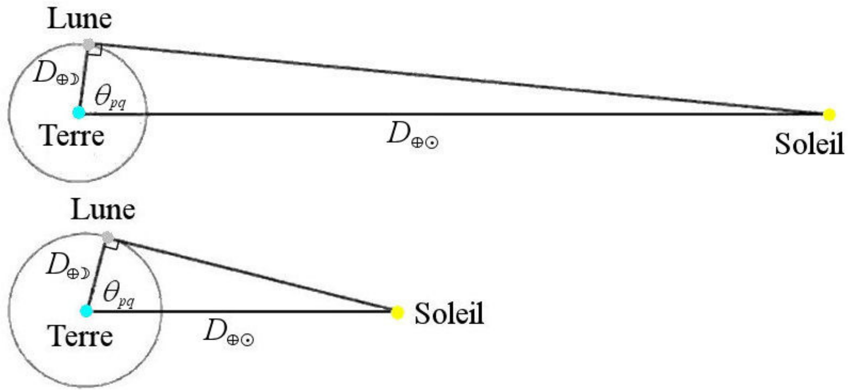
6.9 LA DISTANCE ENTRE LA TERRE ET LE SOLEIL, TROUVÉE GRÂCE À LA LUNE

L'observation de la Lune est à l'origine de la première technique utilisée pour tenter de déterminer la distance entre la Terre et le Soleil (l'unité astronomique). Elle a été utilisée pour la première fois par Aristarque de Samos aux environs de 150 av. J.-C.



Premièrement, il faut comprendre que quand on voit le premier quartier de Lune, les rayons du Soleil qui arrivent sur la Lune sont nécessairement perpendiculaires à une ligne allant de la Lune à la Terre (en pointillée sur la figure).

Comme les rayons sont dans la direction de la ligne allant du Soleil à la Lune, cela signifie que la ligne Soleil-Lune est toujours perpendiculaire à la ligne Lune-Terre au premier quartier de Lune. Sur la figure suivante, on peut alors voir comment on peut déterminer la distance du Soleil en mesurant l'angle entre la Lune et le Soleil lors du premier quartier (θ_{pq}). La figure montre deux situations : l'angle si le Soleil est loin et l'angle si le Soleil est plus près.



On remarque que plus le Soleil est près, plus l'angle est petit. Mathématiquement, on a

$$\cos\theta_{pq} = \frac{D_{⊕☽}}{D_{⊕⊙}}$$

La distance Terre-Soleil est donc

Distance du Soleil à partir de l'angle entre le Soleil et la Lune au premier quartier

$$D_{⊕⊙} = \frac{D_{⊕☽}}{\cos\theta_{pq}}$$

L'angle entre la Terre et la Lune au premier quartier est de 89,8527°, ce qui donne une distance de

$$\begin{aligned} D_{⊕⊙} &= \frac{D_{⊕☽}}{\cos(89{,}8527°)} \\ &= 389 \cdot D_{⊕☽} \\ &= 389 \cdot 3{,}844\times10^8 m \\ &= 1{,}495\times10^{11} m \end{aligned}$$

C'est très près de la véritable distance (149 597 871 km), mais il faut dire que cette méthode n'est pas très précise. Un changement d'angle de 0,05° fait varier la distance d'environ 50 millions de km ! Il ne faut donc pas se tromper quand on fait la mesure. Toutefois, c'est difficile d'être précis, car ce n'est pas si facile de déterminer le moment exact où on a le premier quartier.

Évidemment, la mesure d'Aristarque de Samos n'était pas suffisamment précise. Il a mesuré 87° entre la Lune et le Soleil au premier quartier, ce qui lui a donné une distance de

$$
\begin{aligned}
D_{\oplus\odot} &= \frac{D_{\oplus☽}}{\cos 87°} \\
&= 19 \cdot d_{\oplus☽} \\
&= 19 \cdot 3{,}844 \times 10^{8} m \\
&= 7{,}3 \times 10^{9} m
\end{aligned}
$$

Cette distance de près de 7 millions de km est beaucoup plus petite que la véritable distance qui est de près de 150 millions de km.

À cette époque, on savait évidemment que la Lune était plus près de la Terre que le Soleil puisque la Lune passe devant le Soleil lors des éclipses de Soleil, mais Aristarque était le premier à quantifier combien de fois le Soleil était plus loin que la Lune. Bien que sa valeur était beaucoup trop petite (19 fois plus loin que la Lune), elle permettait quand même de déterminer que le Soleil était beaucoup plus gros que la Lune. En effet, puisque les deux astres ont environ le même diamètre angulaire vu de la Terre (environ 0,5°), l'équation suivante

$$\alpha_{(rad)} = \frac{diamètre}{Distance}$$

nous permet de déduire que le diamètre du Soleil est supérieur à celui de la Lune. Si l'angle est le même, les mesures d'Aristarque indiquaient que le diamètre du Soleil est 19 fois plus grand que celui de la Lune.

De plus, comme on savait que le diamètre de la Terre (12 742 km) était un peu moins de 4 fois plus grand que celui de la Lune (3474 km), Aristarque pouvait déduire que le diamètre du Soleil devait être environ 5 fois grand que celui de la Terre (en réalité, il est plus de 100 fois plus grand que celui de la Terre). Aristarque était troublé par le fait que le Soleil était plus gros que la Terre. C'est pourquoi il a proposé un modèle qui plaçait le Soleil au centre de l'univers (mais qui n'a pas eu de succès à l'époque).

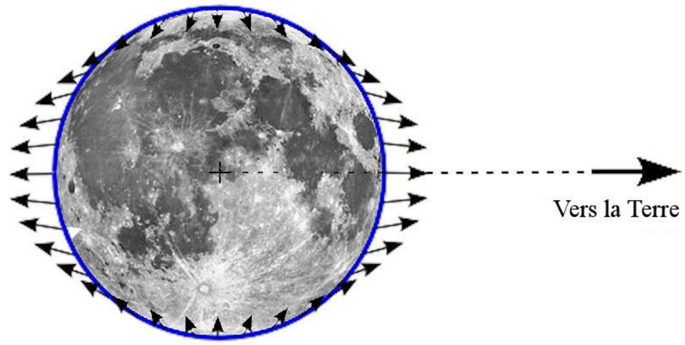
Pendant des siècles (jusqu'au 17e siècle), c'était la seule méthode connue pour déterminer la distance entre la Terre et le Soleil. Son imprécision fait en sorte qu'elle donna toute sorte de résultats, allant de 19 $d_{\oplus☽}$ (Aristarque) à 216 $d_{\oplus☽}$ (Posidonios en 100 av. J.-C.). Au 16e siècle, l'astronome Tycho Brahe utilisait encore la valeur trouvée par Aristarque de Samos.

6.10 LES MARÉES

Direction de la force de marée

Les marées sont dues au fait qu'un objet non ponctuel se retrouve dans un champ gravitationnel qui n'est pas uniforme. Par exemple, la Lune est un objet non ponctuel (puisqu'elle a un volume) placé dans un champ gravitationnel non uniforme (celui de la Terre, qui diminue avec le carré de la distance).

Les marées génèrent des forces à la surface de la planète placée dans le champ non uniforme. La figure de droite montre la direction des forces de marée faites par la Terre qui vont s'exercer sur un objet selon sa position sur la Lune.



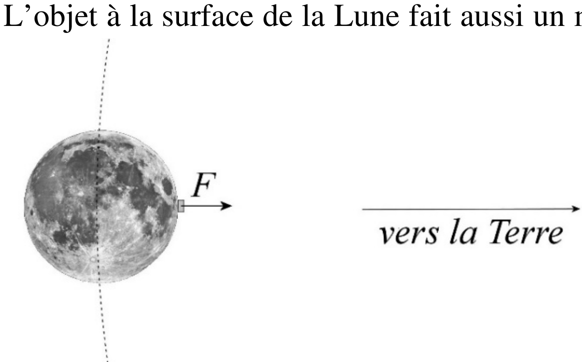
Essayons de comprendre un peu pourquoi il y a de telles forces. Commençons par dire que l'orientation de ces forces indique que l'explication n'est pas aussi simple que de dire que l'objet à la surface de la Lune est attiré par la Terre. C'est vrai que l'objet subit une force vers la Terre du côté droit de la Lune sur la figure. Mais si l'explication était si simple, comment expliquer que l'objet est repoussé par la Terre quand il est du côté opposé à la Terre (côté gauche de la Lune sur la figure) ? Comment un astre qui fait une attraction gravitationnelle peut-il faire une force de répulsion ?

L'explication correcte est plus subtile. Commençons par expliquer la force sur un objet du côté où est la Terre (côté droit de la Lune sur la figure).

La Lune fait un mouvement circulaire et elle a une accélération centripète. La force centripète nécessaire pour ce mouvement est faite par la force de gravitation exercée par la Terre.

$$M_{☽}\frac{4\pi^2 r}{T^2}=\frac{GM_{☽}M_{\oplus}}{r^2}$$

L'objet à la surface de la Lune fait aussi un mouvement circulaire puisqu'il doit suivre la Lune et c'est aussi la force d'attraction de la Terre qui fait la force centripète. Toutefois, comme l'objet est plus près de la Terre, la force centripète nécessaire à ce mouvement est plus petite. En effet, la formule de la force centripète

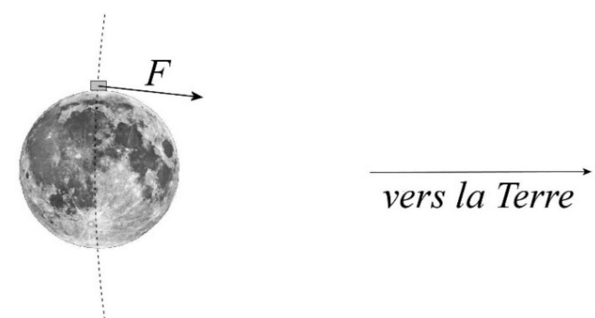


$$F=m\frac{4\pi^2 r}{T^2}$$

indique que la force centripète augmente avec le rayon de la trajectoire (la période est la même puisque l'objet doit suivre la Lune). Comme le rayon est plus petit, on a besoin d'un peu moins de force centripète. Or, la force de gravitation faite par la Terre est plus grande à cet endroit parce qu'on est plus près de la Terre. Il y a donc un excès de force vers le centre du mouvement circulaire par rapport à la force centripète nécessaire. Quand il y a trop de force vers le centre, l'objet cherche à s'approcher du centre de la trajectoire circulaire. Cet excès de force cherche donc à soulever donc l'objet. (L'objet ne s'approche pas du centre parce qu'en cherchant à se soulever un peu, la normale diminue de sorte que la normale n'est plus égale au poids de l'objet sur la Lune. Le surplus de poids par rapport à la normale vient alors annuler l'excès de force centripète.) C'est pour cela que la force est vers la Terre de ce côté.

Examinons maintenant ce qui se passe pour un objet de l'autre côté de la Lune.

Comme le rayon de la trajectoire circulaire est plus grand (on est plus loin de la Terre), on a besoin d'un peu plus de force centripète. Or, la force de gravitation faite par la Terre est plus petite parce qu'on est plus loin de la Terre. Il y a donc un manque de force vers le centre du mouvement circulaire. Quand il y a un manque de force vers le centre, l'objet cherche à s'éloigner du centre de la trajectoire circulaire. Ce manque de force cherche donc encore une fois à soulever l'objet de la surface. (L'objet ne s'éloigne pas du centre parce qu'en cherchant à se soulever un peu, la normale diminue de sorte que la normale n'est plus égale au poids de l'objet sur la Lune. Le surplus de poids par rapport à la normale vient alors combler le manque de force centripète.) C'est pour ça que la force est opposée à la Terre de ce côté.



Examinons finalement les forces sur un objet à la position montrée sur la figure.

Comme cet objet est presque à la même distance de la Terre que le centre de la Lune, la force de gravitation faite par la Terre est pratiquement égale à la force centripète nécessaire pour faire le mouvement circulaire. Toutefois, à ce moment, l'accélération de la Lune (et de l'objet) est directement vers la droite (vers la Terre), alors que la force de gravitation faite par la Terre a l'orientation montrée sur la figure. Ainsi, sur l'objet, il y a une composante de la force vers la droite qui fait la force centripète et une composante de la force dirigée vers la surface de la Lune qui écrase l'objet sur la surface. C'est pour ça que la force est dirigée vers la surface de la Lune à cet endroit.

La force de marée sur la Terre

On a expliqué l'origine des forces de marée sur la Lune, mais la même explication s'applique aussi pour les forces de marée sur la Terre. La situation de la Terre est exactement la même que celle de la Lune : les deux planètes sont en orbite autour du centre de masse du système Terre-Lune. La situation est donc exactement la même que celle de la Lune.

Formule de la force de marée

On peut trouver la formule de la force de marée en trouvant comment change la normale à la surface de l'astre. On trouve ce changement en comparant la force centripète nécessaire pour faire le mouvement circulaire à la force de gravitation faite par l'autre astre. La preuve est un peu longue, mais compréhensible pour un étudiant. Voici la preuve de la formule de la force de marée.
https://physique.merici.ca/astro/preuvemarees.pdf

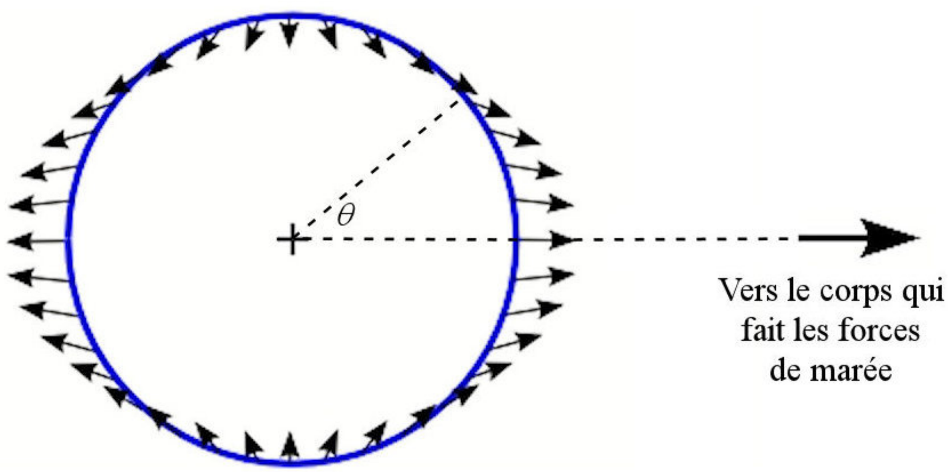
Voici la formule qu'on obtient avec cette preuve.

Force de marée

$$F_{marées} = \frac{GM_e m R_s}{r^3}\left[2\cos\theta\vec{i} - \sin\theta\vec{j}\right]$$

M_e est la masse de l'astre qui exerce les forces de marée
m est la masse de l'objet qui subit les forces de marée
R_s est le rayon de l'astre sur lequel est situé l'objet qui subit les forces de marée
r est la distance entre les centres des deux astres.
θ est l'angle entre la position sur l'astre qui subit les forces de marée, le centre de l'astre qui subit la force et l'astre qui fait les forces de marée (l'angle θ sur la figure suivante)

Selon l'angle θ, on obtient les directions suivantes pour la force de marée.



physics.stackexchange.com/questions/199675/tidal-forces-misunderstanding

Exemple 6.10.1

Quelle est la force de marée faite par la Lune sur un objet de 100 kg à la surface de la Terre (du côté de la Lune ou opposé à la Lune) ? La masse de la Lune est de 7,346 x 10^{22} kg.

Du côté exactement vers la Lune, l'angle est 0°. La force est donc

$$\begin{aligned}F_{marées} &= \frac{GM_e m R_s}{r^3}\left[2\cos 0°\vec{i} - \sin 0°\vec{j}\right]\\ &= \frac{GM_e m R_s}{r^3}\left[2\vec{i} - 0\vec{j}\right]\\ &= \frac{2\cdot 6{,}6743\times 10^{-11}\,\frac{Nm^2}{kg^2}\cdot 7{,}346\times 10^{22}\,kg\cdot 100kg\cdot 6{,}371\times 10^{6}\,m}{\left(3{,}844\times 10^{8}\,m\right)^3}\vec{i}\\ &= 1{,}1\times 10^{-4}\,N\vec{i}\end{aligned}$$

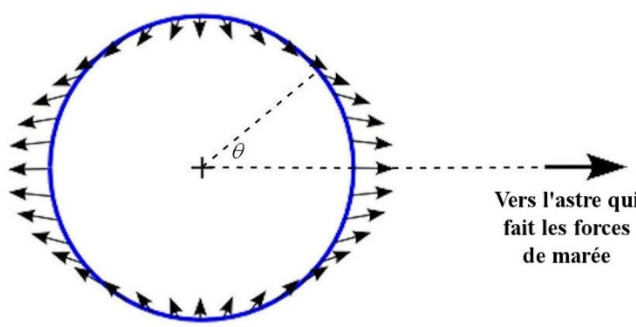
Comme la réponse est positive, la force est vers la Lune. (L'axe des x doit toujours être dirigé vers l'objet qui fait la force de marée quand on utilise cette formule.)

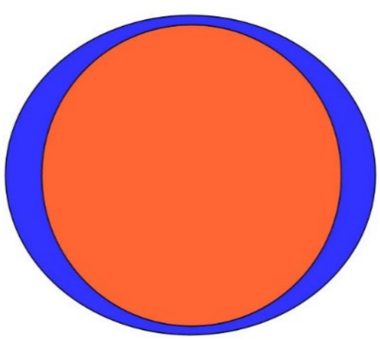
Du côté opposé à la Lune, l'angle est de 180°. Le cosinus valant alors -1, on obtient la même réponse, mais négative, ce qui signifie que la force est de 1,1 x 10^{-4} N dans la direction opposée à la Lune.

Ce n'est pas beaucoup. (C'est près de 10 millions de fois plus petit que le poids de la masse. Si l'objet était sur une balance, cette force vers le haut ferait diminuer la valeur affichée par la balance d'à peine 0,0001 g.) Même si c'est très faible, les forces de marée auront quand même un effet.

Les déformations faites par les forces de marée

L'image de droite montre que les forces de marée cherchent à étirer l'objet qui subit les forces de marée dans une direction parallèle à la direction de l'astre qui fait les forces de marée et à le comprimer dans une direction perpendiculaire.

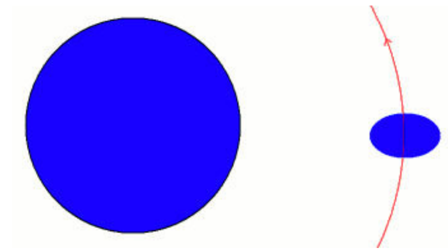




Si la planète qui subit les forces de marée est déformable, on pourra voir cet allongement. Pour la Terre, les océans sont facilement déformables et l'eau sera déplacée par les forces de marée. On voit donc apparaitre à la surface de la Terre des régions où l'eau s'accumule et des régions où il y a moins d'eau.

Mais les forces de marée n'agissent pas que sur l'eau, elles agissent aussi sur les roches qui forment la planète. Si ces roches sont déformables (parce qu'elles sont fondues par exemple), la planète pourrait prendre une forme allongée si les forces de marée sont assez grandes (figure de droite).

La Terre est assez fluide pour qu'il y ait cette déformation. La partie solide de la Terre est donc un peu allongée par les forces de marée.



large.stanford.edu/courses/2007/ph210/pavlichin2/

Amplitude des marées

Pour calculer l'amplitude des marées, on va supposer que la Terre est parfaitement sphérique et que les océans recouvriraient toute la surface de la Terre avec une épaisseur constante s'il n'y avait pas de marées. Le rayon de la planète qui subit les forces de marée est encore notée R_2.

La surface de l'eau est une surface où l'énergie potentielle de l'eau est toujours la même, peu importe sa position à la surface de la Terre. Si ce n'était pas le cas, l'eau se déplacerait pour aller aux endroits où l'énergie est plus basse, ce qui remplirait les endroits où l'énergie est plus basse.

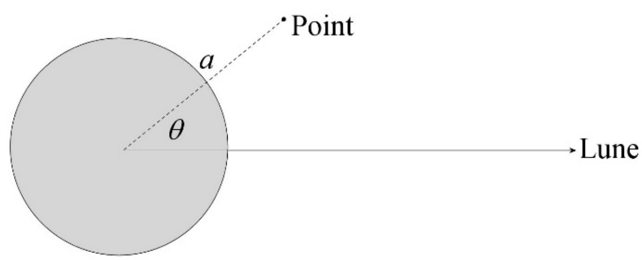
La force de marée modifie l'énergie potentielle d'un objet. En effet, l'énergie potentielle et la force sont liées par les équations suivantes.

$$F_x = -\frac{\partial U}{\partial x} \qquad F_y = -\frac{\partial U}{\partial y}$$

S'il y a une force de marée, il y a donc une énergie potentielle de marée. Trouvons cette énergie.

Si l'objet de masse m est à la position montrée sur la figure, alors on a

$$x = a\cos\theta \qquad y = a\sin\theta$$



Cela signifie qu'on peut écrire la force de marée sous la forme suivante.

$$F_{marées} = \frac{GM_e ma}{r^3}\left[2\cos\theta\vec{i} - \sin\theta\vec{j}\right]$$

$$F_{marées} = \frac{GM_e m}{r^3}\left[2x\vec{i} - y\vec{j}\right]$$

(Ici, M_e est la masse de l'objet qui exerce les forces de marée, donc la masse de la Lune si on examine les marées à la surface de la Terre.)

Cette force signifie que l'énergie potentielle est donnée par

$$U_{marées} = -\frac{GM_e m}{r^3}\left[x^2 - \tfrac{1}{2}y^2\right]$$

(En faisant les dérivées, vous allez constater qu'on obtient les bonnes composantes de la force en *x* et en *y*.)

Si on revient à a et θ avec $x = a \cos \theta$ et $y = a \sin \theta$, on a

$$U_{marées} = -\frac{GM_e ma^2}{r^3}\left[\cos^2\theta - \tfrac{1}{2}\sin^2\theta\right]$$

À l'endroit où il y a une marée haute ($\theta = 0°$) à la surface ($a = R_s$), l'énergie potentielle est

$$\begin{aligned} U_{marées} &= -\frac{GM_e mR_2^2}{r^3}\left[\cos^2 0° - \tfrac{1}{2}\sin^2 0°\right] \\ &= -\frac{GM_e mR_2^2}{r^3} \end{aligned}$$

À l'endroit où il y a une marée basse ($\theta = 90°$) à la surface ($a = R_s$), l'énergie potentielle est

$$\begin{aligned} U_{marées} &= -\frac{GM_e mR_s^2}{r^3}\left[\cos^2 90° - \tfrac{1}{2}\sin^2 90°\right] \\ &= \frac{GM_e mR_s^2}{2r^3} \end{aligned}$$

L'énergie totale d'un petit morceau d'eau de masse *m* à la surface de la Terre est alors

$$U = mgy + U_{marées}$$

(Le premier terme est l'énergie due à la gravitation terrestre et le 2e terme est l'énergie due aux marées.)

À $\theta = 0°$, l'énergie totale est

$$U = mgy - \frac{GM_e mR_s^2}{r^3}$$

À $\theta = 90°$, l'énergie totale est

$$U' = mgy' + \frac{GM_s mR_s^2}{2r^3}$$

Comme l'énergie doit être identique partout sur la surface, on doit avoir

$$mgy - \frac{GM_e mR_s^2}{r^3} = mgy' + \frac{GM_e mR_s^2}{2r^3}$$

On a alors

$$mgy - mgy' = \frac{GM_e mR_s^2}{2r^3} + \frac{GM_e mR_s^2}{r^3}$$

$$g\left(y - y'\right) = \frac{3GM_e R_s^2}{2r^3}$$

À la surface, g est

$$g = \frac{GM_s}{R_s^2}$$

(M_s est la masse de l'objet qui subit les forces de marée, donc la masse de la Terre si on examine les marées à la surface de la Terre.)

On a donc

$$\frac{GM_s}{R_s^2}\left(y - y'\right) = \frac{3GM_e R_s^2}{2r^3}$$

Si on isole $y - y'$ et qu'on appelle cette valeur Δy, on a

Hauteur des marées

$$\Delta y = \frac{3M_e R_s^4}{2M_s r^3}$$

M_e est la masse de l'astre qui exerce les forces de marée.
M_s est la masse de l'astre qui subit les forces de marée.
R_s est le rayon de l'astre qui subit les forces de marée.

Exemple 6.10.2

Quelle est la hauteur des marées générées par la Lune sur la Terre ?

La hauteur est

$$\begin{aligned}\Delta y &= \frac{3M_e R_s^4}{2M_s r^3}\\ &= \frac{3 \cdot 7,34\times 10^{22} kg \cdot \left(6,371\times 10^6 m\right)^4}{2 \cdot 5,972\times 10^{24} kg \cdot \left(3,844\times 10^8 m\right)^3}\\ &= 0,535m\end{aligned}$$

La distance de la Lune n'est pas toujours la même puisque son orbite est elliptique. La distance ne varie que de 7 % par rapport à la distance moyenne, mais cela entraine une variation des forces de marée de près de 20 % puisque les effets de marée varient avec le cube de la distance. Si la Lune est au périgée lors de la pleine Lune ou de la nouvelle Lune, l'amplitude des marées peut alors être exceptionnelle.

Il n'y a pas que la Lune qui exerce une force de marée sur la Terre. Le Soleil exerce aussi des forces de marée sur la Terre, mais celles-ci sont environ la moitié de la grandeur de celles exercées par la Lune même si la masse du Soleil est plus grande.

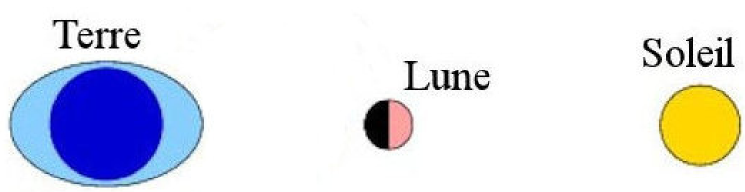
Exemple 6.10.3

Quelle est la hauteur des marées générées par le Soleil sur la Terre ?

La hauteur est

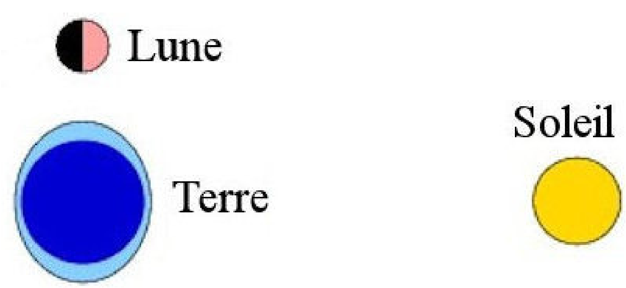
$$\begin{aligned}\Delta y &= \frac{3M_e R_s^4}{2M_s r^3} \\ &= \frac{3\cdot 1{,}9885\times 10^{30}kg\cdot\left(6{,}371\times 10^{6}m\right)^4}{2\cdot 5{,}972\times 10^{24}kg\cdot\left(1{,}496\times 10^{11}m\right)^3} \\ &= 0{,}246m\end{aligned}$$

Le Soleil et la Lune font tous les deux des bosses de marée. Elles vont parfois s'additionner et parfois se soustraire selon leur position. L'importance de l'accumulation d'eau sera donc bien différente selon la configuration du système Terre-Lune-Soleil.



www.ifremer.fr/lpo/cours/maree/forces.html

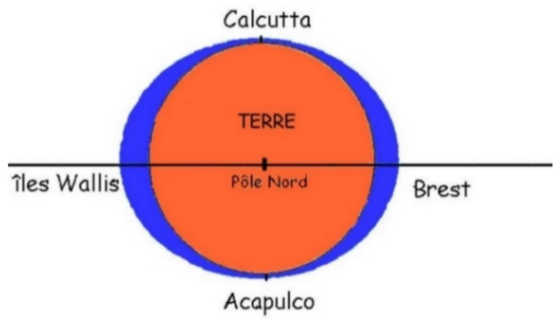
Quand la Lune, la Terre et le Soleil sont alignés (pleine Lune ou nouvelle Lune), les forces de marée faites par la Lune et par le Soleil s'additionnent, ce qui donne une accumulation d'eau importante. Les marées auront alors une amplitude maximale de 78,1 cm (24,6 cm pour le Soleil qui s'additionnent aux 53,5 cm pour la Lune). On parle alors de marée de vives-eaux.



Quand la Lune, la Terre et le Soleil forment un angle de 90° (on dit alors que le Soleil et la Lune sont en quadrature), les forces de marée du Soleil se soustraient à celle de la Lune. Les forces de marée résultantes sont alors plus faibles et les accumulations d'eau sont moins importantes. Les marées auront alors une amplitude minimale de 28,9 cm (24,6 cm pour le Soleil qui se soustraient aux 53,5 cm pour la Lune). On parle alors de marée de mortes-eaux.

Avec un océan d'épaisseur uniforme, la variation du niveau de l'eau devrait donc être d'environ 50 cm en moyenne (75 cm dans le meilleur des cas et 25 cm dans le pire des cas).

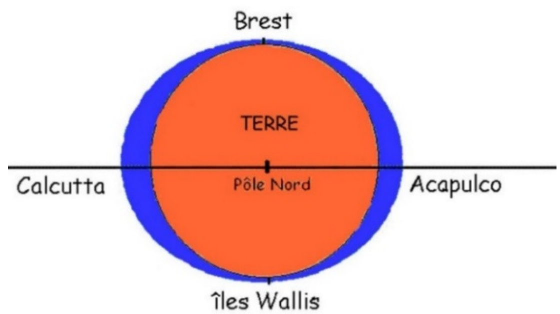
Le cycle des marées



tpelesmarees.pagesperso-orange.fr/phenomene_maree.html

On sait qu'à la surface de la Terre, il y a des régions où l'eau s'accumule et des régions où il y a moins d'eau.

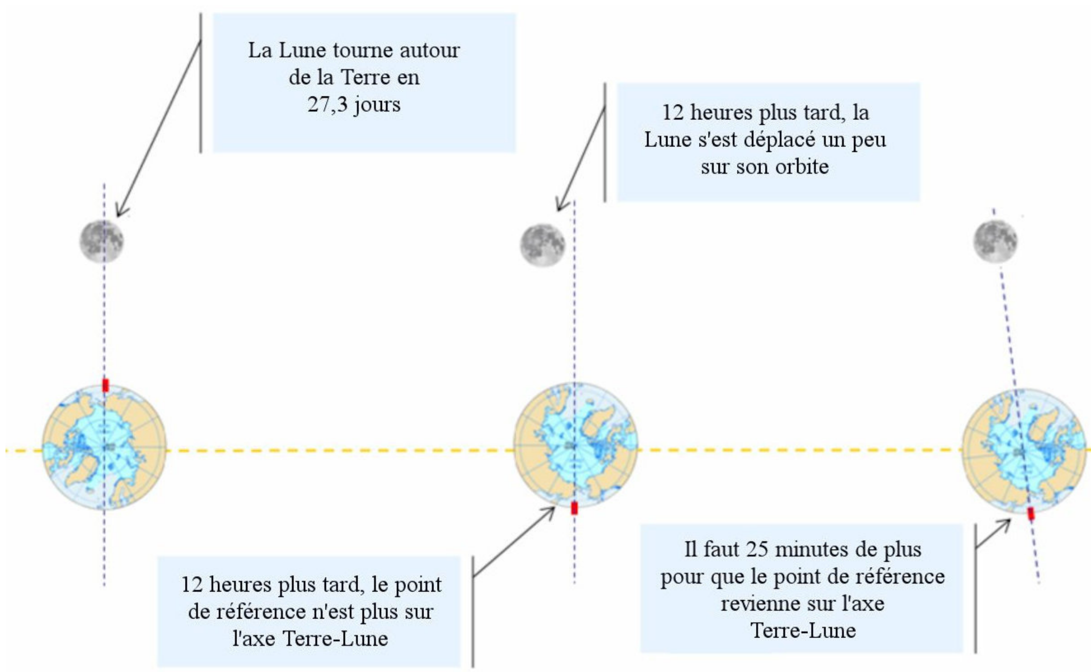
Dans la situation montrée à droite, il y a beaucoup d'eau à Brest et c'est la marée haute à cet endroit. Il y a peu d'eau à Acapulco et c'est la marée basse à cet endroit.



Comme la Terre tourne, on aura la situation montrée à droite 6 heures plus tard. Acapulco est maintenant dans la région où il y a beaucoup d'eau et c'est la marée haute. Brest est maintenant à l'endroit où il y a moins d'eau et c'est la marée basse.

Un autre 6 heures plus tard, Acapulco sera dans l'autre région où il y a peu d'eau pour ensuite aller dans l'autre région où il y a beaucoup d'eau (opposée à la Lune) 6 heures plus tard pour revenir à la région où il y a peu d'eau un autre 6 heures plus tard. En 24 heures, on a donc eu 2 marées hautes et 2 marées basses. Cela correspond à 2 cycles de marée, ce qui signifie que la période d'un cycle des marées est de 12 heures.

En fait, la période des marées est 24 h et 50 min parce que la Lune tourne autour de la Terre et change donc d'orientation par rapport à la Terre, comme vous montre cette figure.

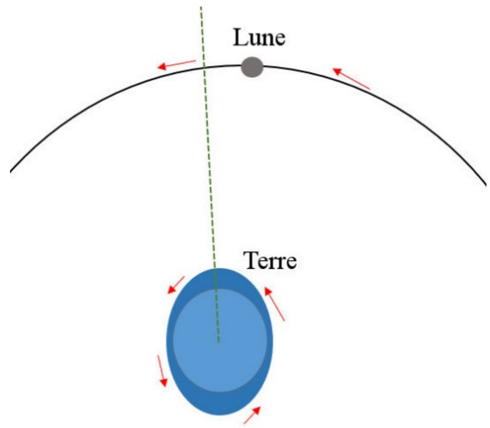


www.je-comprends-enfin.fr/index.php?/Eau-ondes-et-mouvement/eau-terre-lune-soleil-et-marees/id-menu-14.html

Le cycle des marées suit la période imposée par la Lune parce que la bosse de marée faite par la Lune est toujours plus imposante que celle faite par le Soleil.

Position des bosses de marée

Jusqu'ici, nous n'avons pas tenu compte du déplacement de la Lune et du Soleil et de la rotation de la Terre. Sans ses mouvements, la bosse de marée est parfaitement alignée avec la Lune. Avec les mouvements, la bosse de marée n'est plus alignée avec la Lune (figure de droite).

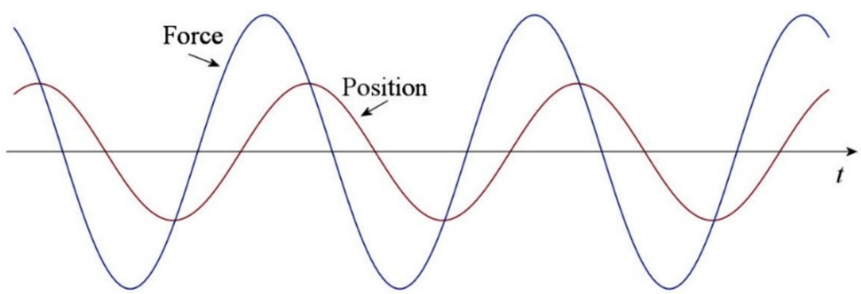


explainingscience.org/2022/01/04/overview-of-tides/

On peut souvent lire que ce désalignement est causé par la friction faite par la Terre sur la bosse de marée, mais ce n'est pas la bonne explication. Pour bien comprendre, il faut examiner la théorie dynamique des marées, suggérée par Laplace et développée par Airy.

Dans cette théorie, on prend un point de vue dans lequel la Terre est immobile et la Lune tourne autour de la Terre. L'eau est alors un système oscillant soumis à l'action d'une force périodique (la Lune). On a ce qu'on appelle des *oscillations forcées*.

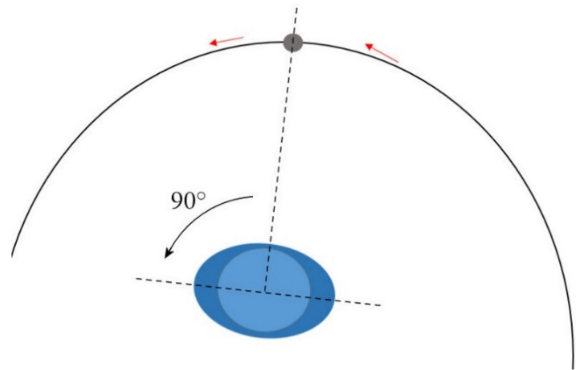
Dans un système d'oscillations forcées, la force variable génère un mouvement d'oscillation, mais le mouvement n'est pas nécessairement en phase avec la force. Par exemple, on pourrait avoir la force et le mouvement suivant dans un système oscillant.



Il peut y avoir un décalage entre le moment où la force est maximum et le moment où le déplacement est maximum. Pour les marées, le maximum du déplacement est toujours après le maximum de la force. Cela veut dire que la force est maximale quand on est à une position alignée avec la Lune et que le déplacement maximum de l'eau se produira après l'alignement avec la Lune. Cela veut dire que la bosse de marée n'est plus alignée avec la Lune comme sur la figure du haut de la page.

En étudiant les oscillations forcées, on peut trouver ce décalage. Ce calcul est un peu long et vous pouvez le voir dans ce document si cela vous intéresse.
https://physique.merici.ca/astro/bossesmaree.pdf

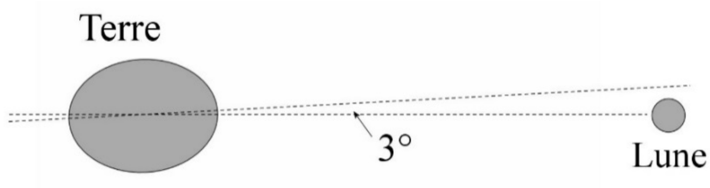
Le calcul nous amène à un résultat vraiment surprenant et contrintuitif. Les bosses de marée sont désalignées de presque 90° avec la direction de la Lune !



On n'a pas une marée haute quand la Lune est au-dessus de notre position. On a une marée haute quand la Lune est sur l'horizon. Étonnant non ?

L'amplitude des marées est également déterminée par les équations des systèmes soumis à des oscillations forcées. On obtient alors un peu moins d'amplitude que ce qu'on a calculé précédemment (environ 5 fois moins).

La situation est différente avec la bosse de marée faite dans le sol. Dans ce cas, le décalage est de seulement 3°.



Pour le sol, l'amplitude est d'environ 20 cm. Le sol monte et descend donc de 20 cm 2 fois par jour. Comme les bosses de marée d'eau et du sol sont décalées de presque 90°, les marées sont plus importantes. Quand le sol est à son plus bas, l'eau est à son plus haut. Quand le sol est à son plus haut, l'eau est à son plus bas. Les deux effets se combinent pour donner des marées ayant encore plus d'amplitude.

Les véritables marées sur Terre

En réalité, la Terre n'est pas uniformément recouverte d'un océan de profondeur constante. Parfois, la forme du rivage va diminuer, par divers mécanismes, l'amplitude des marées et parfois, la forme du rivage va augmenter l'amplitude des marées. Il y a donc certains endroits où il n'y a pratiquement pas de marées et d'autres où l'amplitude des marées est très grande.

Les plus grandes marées du monde se produisent dans la baie de Fundy, où il peut y avoir une variation de 17 mètres entre la marée basse et la marée haute.

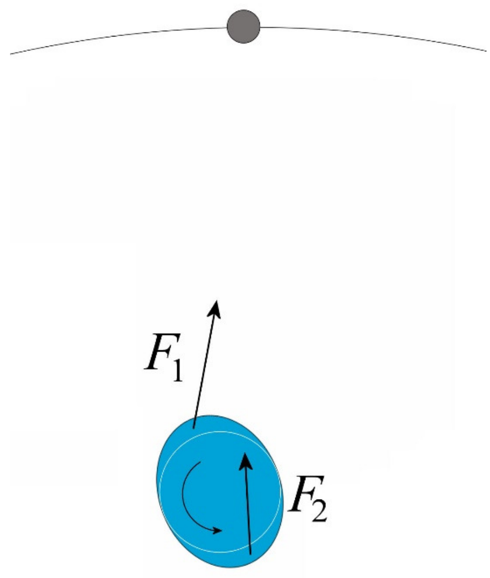
bayoffundy.blogspot.ca/2010/09/biggest-tides-of-year-today.html

Vous pouvez également voir les changements du niveau de l'eau dans la baie de Fundy dans ces clips.
https://www.youtube.com/watch?v=5W2sM1Ma7YA
https://www.youtube.com/watch?v=u3LtEF9WPt4

Les effets à long terme des forces de marée

Ralentissement de la rotation de la Terre

On a vu que les deux bosses de marée ne sont pas directement en ligne avec la Lune. Les bosses dans le sol sont décalées d'environ 3 ° par rapport à la direction de la Lune. Regardons l'attraction gravitationnelle faite par la Lune sur ces bosses de marée.



Chacune de ces forces fait un moment de force sur la Terre, mais le moment de force sur la bosse du côté de la Lune est plus important parce que la force y est plus grande puisque cette bosse est plus près de la Lune. Les deux moments de force ne s'annulent donc pas et il reste un petit moment de force qui s'exerce sur la Terre. Ce moment de force s'oppose à la rotation de la Terre et ralentit donc lentement cette rotation.

Il y a aussi un moment de force net sur les bosses de marées faites d'eau (il n'y en aurait pas si le décalage de bosses était exactement de 90 °, mais le décalage est un peu plus petit que 90 °).

On doit également tenir compte de la présence des continents qui bloquent le passage des bosses de marées faites d'eau. Ces dernières s'écrasent sur les continents comme une immense vague qui transporte de l'énergie et de la quantité de mouvement. Cela exerce une force sur les continents qui s'oppose aussi à la rotation de la Terre.

Au total, le ralentissement est toutefois très lent. La période de rotation de la Terre s'allonge d'environ 2,3 ms par siècle en moyenne, mais le rythme de changement est plutôt de 1,70 ± 0,05 ms par siècle en ce moment. Le rythme est actuellement plus faible parce que la Terre change lentement de forme suite à la dernière glaciation (certains continents auparavant écrasés sous les glaces se soulèvent très lentement). Ce lent changement de forme fait diminuer le moment d'inertie de la Terre de sorte qu'elle ralentit moins vite que ce qu'on prévoit avec les effets de marée.

Ce lent changement est quand même perceptible. Il y a longtemps, on avait défini la seconde comme étant 1/86400 de la durée moyenne du jour. Toutefois, cette définition n'était pas vraiment bonne puisque la longueur de la seconde aurait augmenté avec le ralentissement de la rotation de la Terre. Aujourd'hui, la seconde n'est plus définie à partir de la rotation de la Terre, mais à partir d'une transition atomique. On l'a quand même défini de sorte que la durée moyenne du jour en 1900 soit pratiquement égale à 86 400 s.

Avec le ralentissement de la rotation, la durée du jour moyen est donc passée de 86400 s en 1900 à 86 400,0017 s en 2000. Le changement ne semble pas très important, mais, à cause de lui, on a dû ajouter 27 secondes à l'UTC (un temps officiel appelé le *temps universel coordonné*) depuis 1972 pour que les horloges restent synchronisées avec la rotation de la Terre. On peut se demander pourquoi on a dû ajouter autant de secondes pour un changement de seulement 1,7 ms en un siècle. C'est parce que le ralentissement est cumulatif. À chaque rotation, on accumule du retard. Disons que le premier jour de 1900, la période de rotation était exactement de 86 400 s. À cause du ralentissement, le tour suivant fut un peu plus lent. Si la période augmente de 1,7 ms en 1 siècle, l'augmentation de la période en 1 jour est de

$$\begin{aligned}\Delta t &= \frac{1,7\times 10^{-3} s}{36525} \\ &= 4,65\times 10^{-8} s\end{aligned}$$

(On a divisé l'augmentation par siècle par le nombre de jours en un siècle.) Ainsi, la deuxième rotation a duré 86 400 s + Δt. Puis, la troisième rotation a duré 86 400 s + $2\Delta t$, la quatrième rotation a duré 86 400 s + $3\Delta t$ et ainsi de suite jusqu'à la 36525^e rotation qui a duré 86 400 s + $36524\Delta t$. Ainsi, la somme de tous ces petits ajouts est

$$\begin{aligned}t_{total} &= \Delta t + 2\Delta t + 3\Delta t + 4\Delta t + ... + 36524\Delta t \\ &= (1+2+3+4+...+36524)\Delta t\end{aligned}$$

On utilise maintenant

$$1+2+3+...+N = \frac{N(N+1)}{2}$$

pour calculer la somme. On arrive alors à

$$\begin{aligned}t_{total} &= 667\,019\,550\cdot\Delta t \\ &= 667\,019\,550\cdot 4,65\times 10^{-8} s \\ &= 31 s\end{aligned}$$

La somme de toutes ces petites différences finit quand même par donner 31 secondes pour les 100 premières années après 1900. Pour garder les horloges synchronisées avec la rotation de la Terre, il faut donc ajouter des secondes à l'occasion, ce qui se fait le 30 juin ou le 31 décembre (16 des 27 secondes supplémentaires ont été ajoutées le 31 décembre). Comme l'écart est de 124 s au bout de 200 ans et de 279 s au bout de 300 ans, on comprend qu'il faudrait ajouter des secondes de plus en plus fréquemment. Toutefois, on a décidé le 18 novembre 2022 de ne plus ajouter de secondes supplémentaires à partir de 2035 parce que cet ajout de secondes amène de sérieux problèmes de synchronisation des systèmes informatiques ou des satellites. On va donc accumuler les secondes de retard et remédier à la situation dans un avenir lointain quand le décalage deviendra trop important (on parle de plus d'une minute, ce qui devrait prendre entre 50 et 100 ans).

Durant les derniers 1500 ans, on a ainsi accumulé près de 2 heures de décalage (la rotation de la Terre a un retard de 2 heures par rapport à la rotation qu'elle aurait eue s'il n'y avait pas eu de ralentissement). Ce temps de décalage représente une rotation d'environ 30°. Ainsi, si on calcule la position de l'éclipse du 14 janvier 484 en faisant comme si la Terre tournait toujours à la même vitesse angulaire qu'aujourd'hui, on arrive à la conclusion que l'éclipse aurait dû se produire en Espagne. Pourtant, elle s'est produite en Grèce, qui est à 30° de longitude à l'est de l'Espagne. Pour prédire correctement la position de l'éclipse, il faut prendre en compte le ralentissement de la Terre.

À l'échelle géologique, le petit changement de période peut représenter une variation considérable, d'autant plus que l'effet de marée était un peu plus grand auparavant (parce que la Lune était plus près, comme on le verra). Lors de la formation de la Terre, il y a 4,5 milliards d'années, le jour avait une durée d'environ 6 heures. Puis la durée du jour a lentement augmenté pour passer à 15 h il y a 3 milliards d'années, puis à 22 heures il y a 380 millions d'années et finalement à 24 heures aujourd'hui.

Ralentissement de la rotation de la Lune

Le même phénomène s'est produit sur la Lune, mais avec plus d'intensité. Même s'il n'y a pas d'eau sur la Lune, il y a quand même des bosses de marée qui peuvent être faites par un soulèvement du sol, spécialement à l'époque où la Lune n'était pas encore solidifiée. Il s'est alors produit le même phénomène qu'il se produit avec la Terre : un ralentissement de la rotation. L'exemple suivant montre que les forces de marée sur la Lune exercées par la Terre sont beaucoup plus grandes que celles faites par la Lune sur la Terre.

Exemple 6.10.4

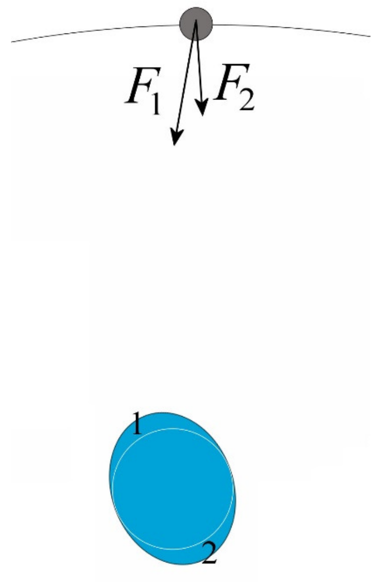
Quelle serait la hauteur des marées générées par la Terre sur la Lune s'il y avait de l'eau sur la Lune ?

La hauteur serait

$$\begin{aligned}\Delta y &= \frac{3M_e R_s^4}{2M_s r^3} \\ &= \frac{3\cdot 5,972\times 10^{24} kg\cdot\left(1,737\times 10^{6} m\right)^4}{2\cdot 7,34\times 10^{22} kg\cdot\left(3,844\times 10^{8} m\right)^3} \\ &= 19,6m\end{aligned}$$

Avec de telles forces de marée, il est beaucoup plus facile d'arrêter la rotation de la Lune (d'autant plus que son moment d'inertie est nettement plus petit). Le ralentissement de la rotation de la Lune s'est donc fait à un rythme beaucoup plus rapide que celui de la Terre. Le ralentissement fut assez grand pour que la Lune arrive à ce que tentent de faire les forces de marée : arrêter la rotation de la planète par rapport à l'astre qui fait les forces de marées. C'est pour ça que la Lune a toujours la même face tournée vers la Terre. On estime qu'il a fallu à peine quelques dizaines de millions d'années pour que la Lune se retrouve ainsi avec toujours la même face vers la Terre.

Augmentation de la distance entre les planètes



Si la Lune exerce une force sur les bosses de marée, alors les bosses de marée exercent aussi une force sur la Lune. Une bonne partie de cette force est dirigée vers la Terre et contribue à faire la force centripète, mais il reste cependant une petite composante tangentielle dirigée dans le même sens que le mouvement de la Lune autour de la Terre.

Cette force fait un travail positif sur la Lune et lui permet de gagner de l'énergie. On pourrait penser que ce travail fera augmenter l'énergie cinétique de la Lune, mais ce n'est pas le cas. Encore une fois, on a un résultat contrintuitif : la force dans la direction du mouvement fait ralentir la Lune ! Voyons pourquoi. Le travail fait augmenter l'énergie mécanique de la Lune qui est

$$E_{mec} = -\frac{GM_{\oplus}M_{☽}}{r}$$

Si l'énergie augmente, alors r doit augmenter. (Une augmentation de r rend l'énergie moins négative. Quand une quantité est moins négative, elle augmente.) La Lune va donc s'éloigner de la Terre en gagnant de l'énergie. Comme la vitesse de la Lune est

$$v = \sqrt{\frac{GM_{\oplus}}{r}}$$

on voit qu'une augmentation de r signifie une vitesse plus basse. Ainsi, le travail fait augmenter l'énergie gravitationnelle (éloigne la Lune) et diminuer l'énergie cinétique. L'augmentation de l'énergie gravitationnelle étant 2 fois plus grande que la diminution de l'énergie cinétique, l'énergie mécanique augmente. Tout ceci est en accord avec le théorème du viriel qui dit que $U_g = -2E_k$ pour les systèmes en équilibre gravitationnel.

La Lune s'éloigne donc lentement de la Terre, à un rythme de 3 à 4 cm par année (3,8 cm en moyenne entre 1970 et 2012). Le rayon de l'orbite de la Lune augmente continuellement ce qui a pour effet d'augmenter la durée du mois.

À l'équilibre

Les forces de marée cherchent donc à ralentir la rotation des deux planètes en interaction jusqu'à ce que chaque planète présente toujours la même face à l'autre. Si cela se produisait pour le système Terre-Lune, alors le mois et le jour auraient la même durée (47,7 jours) et la Lune serait à 557 900 km de la Terre, soit 1,45 fois plus loin qu'en ce moment.
(Vous pouvez voir le calcul de cette durée et de cette distance dans ce document https://physique.merici.ca/astro/EquilibreLune.pdf)

Toutefois, cet équilibre ne serait atteint que dans 50 milliards d'années. En fait, l'équilibre ne sera jamais atteint puisque la Terre et la Lune seront détruites par le Soleil dans environ 6 milliards d'années.

Normalement, la durée du jour ne change plus une fois que l'équilibre est atteint. Toutefois, dans le cas de la Terre (si on pouvait se rendre à cette configuration), les marées faites par le Soleil tenteraient de ralentir encore plus la rotation de la Terre. Ainsi, le jour deviendrait plus long que le mois. Cela ferait en sorte que les bosses de marée se déplaceraient alors avec une vitesse angulaire moins grande que la Lune. Les bosses de marée seraient donc en retard sur la Lune et les forces de marée feraient en sorte que la Lune se rapprocherait à nouveau de la Terre. Éventuellement, la Lune s'approcherait trop de la Terre et serait détruite par les forces de marée (c'est la limite de Roche qu'on verra dans très peu de temps).

La chaleur générée par les marées

Les forces de marée dissipent beaucoup d'énergie. Dans le cas de la Terre, beaucoup de friction est engendrée par les mouvements des océans et des continents ce qui dégage beaucoup de chaleur. Cette énergie est responsable d'environ 2 % de la chaleur interne de la Terre (estimé à 2×10^{19} J par an comparativement à 10^{21} J par an pour les désintégrations radioactives). Cette contribution devait être plus importante dans le passé puisque la Lune était plus près. Toutefois, la chaleur générée dans une planète diminue beaucoup une fois que la planète a toujours la même face tournée vers l'astre qui fait les forces de marée. Les forces de marée ne chauffent donc que très peu l'intérieur de la Lune en ce moment, contrairement à ce qui se passait avant que la Lune ne nous présente toujours la même face.

La limite de Roche

Les forces de marée augmentent très rapidement lorsque la distance entre les astres diminue. Ainsi, il peut arriver que les forces de marée sur une masse à la surface d'une planète excèdent le poids de cette masse si la planète est trop près de l'astre qui fait les forces de marée.

Voyons à quelle distance cela va se produire sur un astre (comme un satellite) qui s'approche trop d'un autre astre plus massif (comme une planète). Ici, les indices *e* font référence à l'astre qui exerce les forces de marée et les indices *s* font référence à l'astre qui subit les forces de marée. À la limite, appelée la *limite de Roche,* la force de marée qui cherche à soulever un objet à la surface de l'astre qui subite les forces de marée est égale à la force de gravitation qui attire l'objet vers le sol. On a donc

$$F_{marées} = F_g$$
$$\frac{2GM_e mR_s}{r^3} = mg$$
$$\frac{2GM_e mR_s}{r_{Roche}^3} = m\frac{GM_s}{R_s^2}$$
$$\frac{2M_e R_s}{r_{Roche}^3} = \frac{M_s}{R_s^2}$$
$$r_{Roche}^3 = \frac{2M_e R_s^3}{M_s}$$

On va maintenant relier les masses à la densité des astres, en supposant qu'ils sont sphériques.

$$M_e = \frac{4}{3}\pi R_e^3 \rho_e \qquad\qquad M_s = \frac{4}{3}\pi R_s^3 \rho_s$$

On a alors

$$r_{Roche}^3 = \frac{2M_e R_s^3}{M_s}$$
$$r_{Roche}^3 = \frac{2\left(\frac{4}{3}\pi R_e^3 \rho_e\right) R_s^3}{\left(\frac{4}{3}\pi R_s^3 \rho_s\right)}$$
$$r_{Roche}^3 = \frac{2\rho_e R_e^3}{\rho_s}$$
$$r_{Roche} = \sqrt[3]{\frac{2\rho_e}{\rho_s}} R_e$$
$$r_{Roche} = 1,26 \cdot \sqrt[3]{\frac{\rho_e}{\rho_s}} R_e$$

En fait, Édouard Roche fit une meilleure analyse en tenant compte du fait que le satellite allait se déformer sous l'effet des forces de marée et qu'il perdrait sa forme sphérique. Une meilleure solution est donc

Limite de Roche

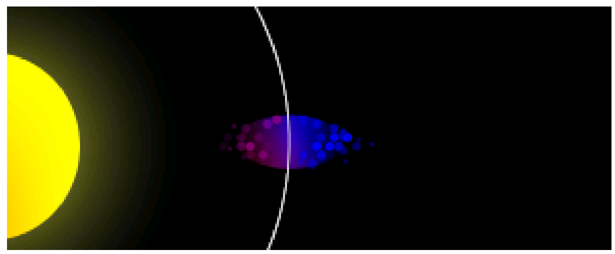
$$r_{Roche} = 2,42285 \cdot \sqrt[3]{\frac{\rho_e}{\rho_s}} R_e$$

ρ_e est la densité de l'astre qui exerce les forces de marée

ρ_s est la densité de l'objet qui subit les forces de marée
R_e est le rayon de l'astre qui exerce les forces de marée

Si les densités des 2 astres sont identiques, la limite de Roche est simplement 2,42285 fois le rayon de la planète. Dans le cas de la Terre (R_e = 6371 km, ρ_e = 5514 kg/m³) et de la Lune (ρ_s = 3344 kg/m³), cette limite est donc à 18 236 km du centre de la Terre.

Ainsi, si le centre de la Lune s'approchait à une distance inférieure à 18 236 km du centre de la Terre, elle serait lentement détruite par les forces de marée puisque les forces qui cherchent à étirer la Lune seraient plus grandes que la force de gravitation qui cherche à garder ensemble les matériaux de la Lune. La Lune étant à 384 400 km de distance, elle est bien loin de cette limite de Roche.


fr.wikipedia.org/wiki/Limite_de_Roche

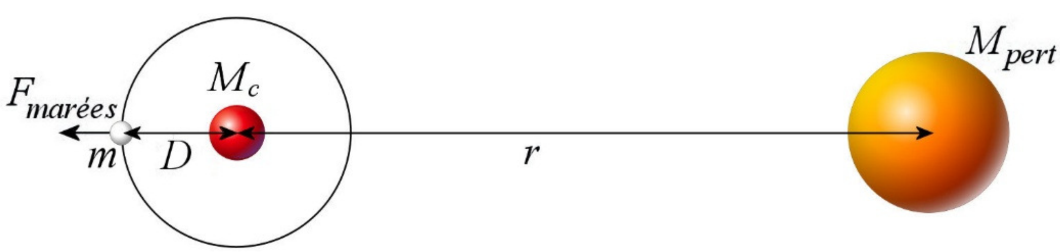
Les forces de marée empêchent aussi la matière de s'agglomérer par la force de gravitation pour former un satellite plus gros si cette matière est à l'intérieur de la limite de Roche.

Remarquez que vous êtes actuellement à l'intérieur de la limite de Roche de la Terre. Vous ne vous faites pas déchirer par les forces de marée parce que ce n'est pas la force de gravitation qui garde les cellules de votre corps ensemble, mais plutôt la force électrique. Cette force étant beaucoup plus grande que les forces de marée que vous subissez, vous ne vous faites pas déchirer.

La limite d'instabilité

Les forces de marée perturbent le mouvement d'un objet en orbite. Par exemple, les forces de marée faite par le Soleil perturbent le mouvement de la Lune autour de la Terre. Si on veut que la Lune reste en orbite autour de la Terre, il ne faudra pas que la force de marée sur le système Terre-Lune soit plus grande que la force d'attraction entre la Terre et la Lune. Calculons quelle devrait être la distance entre deux objets en orbite pour que les forces de marée soient égales à la force d'attraction.

On trouve la force de marée en imaginant que l'objet en orbite est une masse à la surface d'une immense planète ayant la grosseur de l'orbite de l'objet en orbite.



La force de marée sur l'objet en orbite est donc

$$F_{marées} = \frac{2GM_{pert}mD}{r^3}$$

Dans cette formule, *D* est le rayon de l'orbite, *r* est la distance du corps perturbateur, M_{pert} est la masse de l'objet perturbateur et *m* est la masse de l'objet en orbite. Cette force tend à séparer les deux corps en orbite et elle s'oppose donc à la force d'attraction faite par le la masse centrale central qui est

$$F_g = \frac{GM_c m}{D^2}$$

À la limite d'instabilité, ces deux forces sont égales. À cette limite, *D* porte le nom de *rayon de Hill* et est noté r_H. On a donc

$$\frac{2GM_{pert}mr_H}{r^3} = \frac{GM_c m}{r_H^2}$$

On a alors

$$\frac{2M_{pert}r_H}{r^3} = \frac{M_c}{r_H^2}$$

En isolant r_H, on arrive à

Limite d'instabilité (rayon de Hill)

$$r_H = \sqrt[3]{\frac{M_c}{2M_{pert}}}\, r$$

r est la distance l'objet perturbateur et la masse centrale
M_c est la masse centrale
M_{pert} est la masse de l'objet perturbateur

Exemple 6.10.5

Quelle est la limite d'instabilité de la Lune en orbite autour de la Terre en prenant le Soleil comme corps perturbateur ?

La limite est

$$\begin{aligned} r_H &= \sqrt[3]{\frac{M_c}{2M_{pert}}}\, r \\ &= \sqrt[3]{\frac{5,9722\times 10^{24} kg}{2\cdot 1,9885\times 10^{30} kg}} \cdot 1,496\times 10^{11} m \end{aligned}$$

$$= 1,713 \times 10^9 \, m$$
$$= 1\,713\,000 \, km$$

C'est environ 4,5 fois le rayon actuel de l'orbite de la Lune. Il faudrait donc que la Lune soit 4,5 fois plus loin de la Terre pour atteindre la limite d'instabilité.

6.11 LA PRÉCESSION DES ÉQUINOXES

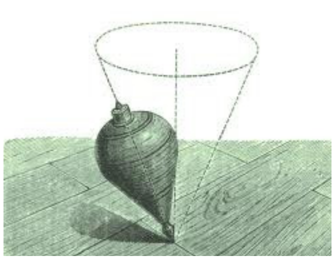
La gravitation de la Lune ne crée pas seulement les forces de marée, elle change aussi la direction de l'axe de rotation de la Terre.

Changement d'orientation de l'axe

La Lune exerce un moment de force sur la Terre. Si la Terre était une sphère parfaite, il n'y aurait pas de moment de force. Toutefois, nous avons vu que la Terre n'est pas une sphère parfaite et qu'elle est un peu aplatie parce qu'elle tourne sur elle-même. Avec cet aplatissement et l'inclinaison de l'axe de la Terre, nous avons la situation suivante.

geophysics.ou.edu/solid_earth/notes/precess/

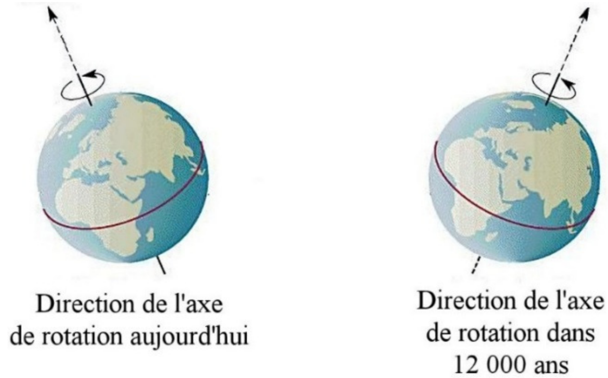
Il y a moment de force sur la Terre qui vient des forces faites par la Lune sur ces surplus de matière à l'équateur. Il y a une force partout sur ce bourrelet équatorial, mais elle est plus importante du côté où est la Lune parce que la force de gravitation est plus grande si la distance est plus petite. On voit que cette force sur le bourrelet le plus près de la Lune fait un moment de force qui cherche à redresser la Terre, c'est-à-dire que le moment de force fait par la Lune cherche à faire diminuer l'angle d'inclinaison de l'axe de la Terre.
Toutefois, la Terre tourne sur elle-même et quand on exerce un moment de force qui cherche à diminuer ou augmenter l'angle de l'axe de rotation d'un objet en rotation, alors il se passe quelque chose d'étonnant : l'angle d'inclinaison de l'axe reste le même, mais l'axe de rotation change de direction en suivant un cône. C'est ce qui se produit avec une toupie : la force de gravité exerce un moment de force sur la toupie et l'axe de rotation décrit un cône. Ce vidéo montre la précession d'une toupie.
https://www.youtube.com/watch?v=b3N1MDsZUF0



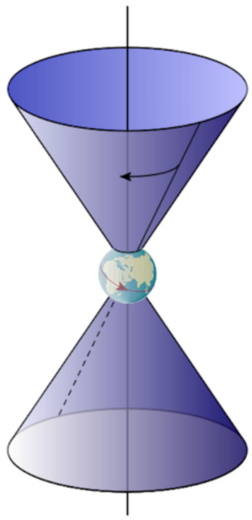
www.cosmovisions.com/CTprecession.htm

Notez que dans le vidéo, la force de gravitation cherche à faire augmenter l'angle d'inclinaison de l'axe de la toupie (elle cherche à faire tomber la toupie sur le côté) plutôt qu'à la redresser.

Le moment de force exercé par la Lune sur la Terre a exactement le même effet. Le moment de force qui cherche à diminuer l'angle d'inclinaison de l'axe provoque plutôt un changement de direction de l'axe. Ainsi, l'orientation de l'axe de rotation de la Terre n'est pas fixe, elle change constamment, si bien que dans 12 000 ans, l'axe aura une orientation bien différente.



www.mhhe.com/physsci/astronomy/fix/student/chapter3/03f15.html



En fait, l'axe de rotation de la Terre décrit un cône. Il faut 25 770 ans pour que l'axe fasse un tour complet du cône.

On peut également voir ce changement d'orientation dans ce vidéo.
https://www.youtube.com/watch?v=Dw4Xhw4q4ec
Dans ce vidéo, la précession est très exagérée par rapport à la rotation de la Terre. Il faudrait que la Terre tourne avec une période de 24 h et que le mouvement de précession ait une période de 25 770 ans !

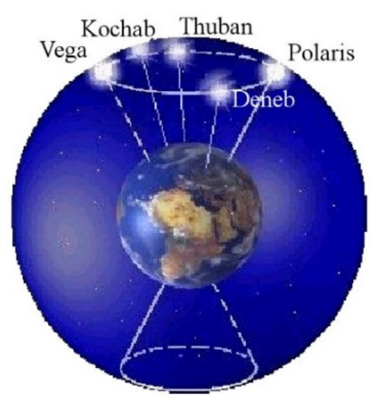
www.mhhe.com/physsci/astronomy/fix/student/chapter3/03f15.html et commons.wikimedia.org/wiki/File:Light_cone_ja.png

Le Soleil exerce aussi un moment de force qui cherche à faire redresser la Terre, mais il est moins important que celui fait par la Lune.

Comme la Lune n'est pas toujours à la même distance de la Terre et que son orbite est aussi un peu inclinée par rapport à l'écliptique, le moment de force n'est pas constant, ce qui fait que la précession ne se fait pas toujours exactement au même rythme. Il y a toute une série de variation périodique dans le rythme de précession qu'on appelle la *nutation* de la Terre.

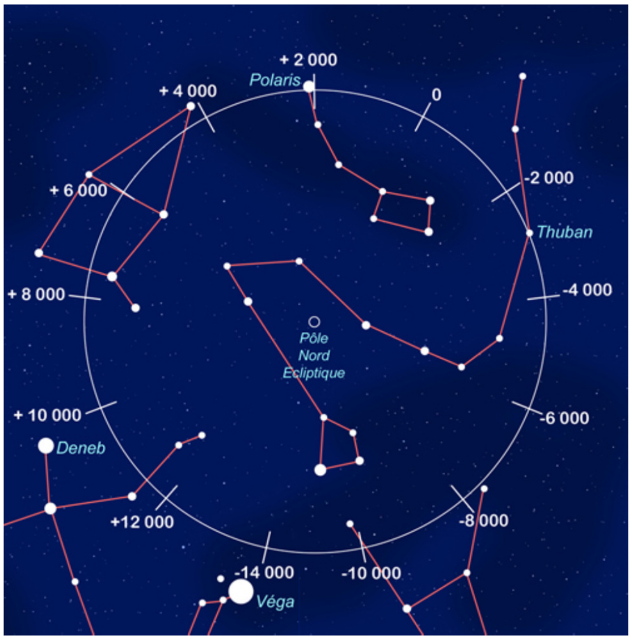
Changement d'étoile polaire

Ce changement de direction de l'axe fait en sorte que l'axe trace un cercle sur la sphère céleste avec une période de 25 770 ans. Cela a pour effet de changer constamment l'étoile qui se trouve dans la direction de l'axe de rotation de la Terre. En ce moment, il y a une étoile presque exactement dans la direction de l'axe : c'est Polaris (l'étoile Polaire). Toutefois, avec la précession, la direction de l'axe change et Polaris ne sera pas toujours dans la direction de l'axe. Dans 12 000 ans, ce sera plutôt l'étoile



members.relia.net/thedane/fyi.html

Véga qui sera dans la direction de l'axe de rotation. C'est alors cette étoile qui jouera le rôle d'étoile polaire.



L'image de gauche vous permet de voir dans quelle direction pointera l'axe de rotation du côté nord de la sphère céleste.

En ce moment (+2000 signifie l'an 2000), l'axe pointe presque exactement vers Polaris. Lentement, l'axe va changer de direction pour se déplacer sur ce cercle au rythme de 1,39697° par siècle dans le sens contraire des aiguilles d'une montre. L'axe pointera assez près de l'étoile Deneb en l'an 10 000 et pas trop loin de l'étoile Véga en l'an 14 000 pour revenir à Polaris en l'an 28 000.

L'image de droite vous permet de voir dans quelle direction pointera l'axe de rotation du côté sud de la sphère céleste.

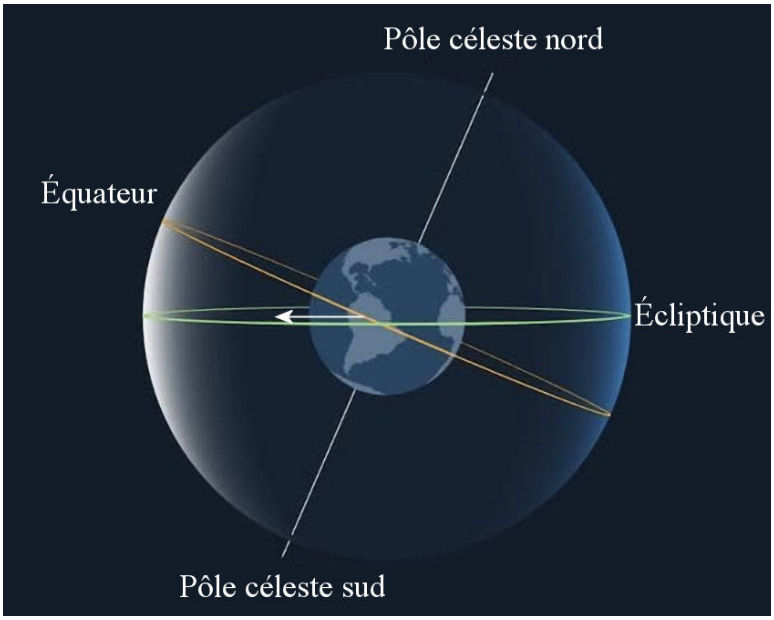
Il n'y a pas d'étoile polaire sud en ce moment, mais il y en aura une (Avior) en l'an 9000.

lecielenquestions.over-blog.net/article-la-precession-des-equinoxes-65040191.html

Le vidéo suivant reprend ces explications.
https://www.youtube.com/watch?v=0qHjtp4cdCA

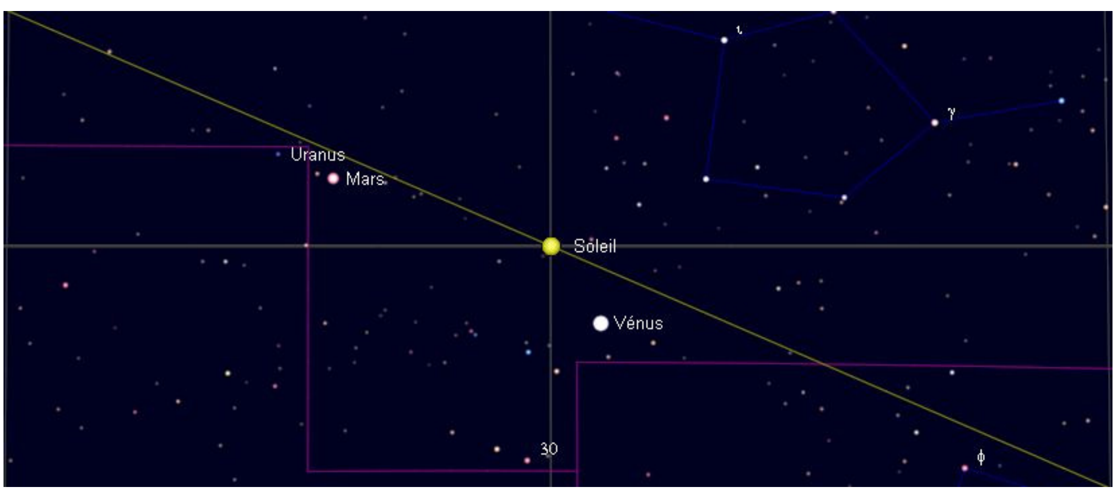
La précession des équinoxes

Quand la direction de l'axe de rotation de la Terre change, la position des pôles célestes et de l'équateur céleste change sur la sphère céleste. Cela fait en sorte que le point de croisement de l'équateur et de l'écliptique sur la sphère céleste se déplace lentement le long de l'écliptique dans la direction montrée sur la figure suivante.



Or, ces points de croisements correspondent à la position du Soleil dans le ciel aux équinoxes, c'est-à-dire au début du printemps (c'est le point vernal) et au début de l'automne. Cela signifie que la position du Soleil aux équinoxes dans le ciel décale très lentement. C'est ce qu'on appelle la *précession des équinoxes*.

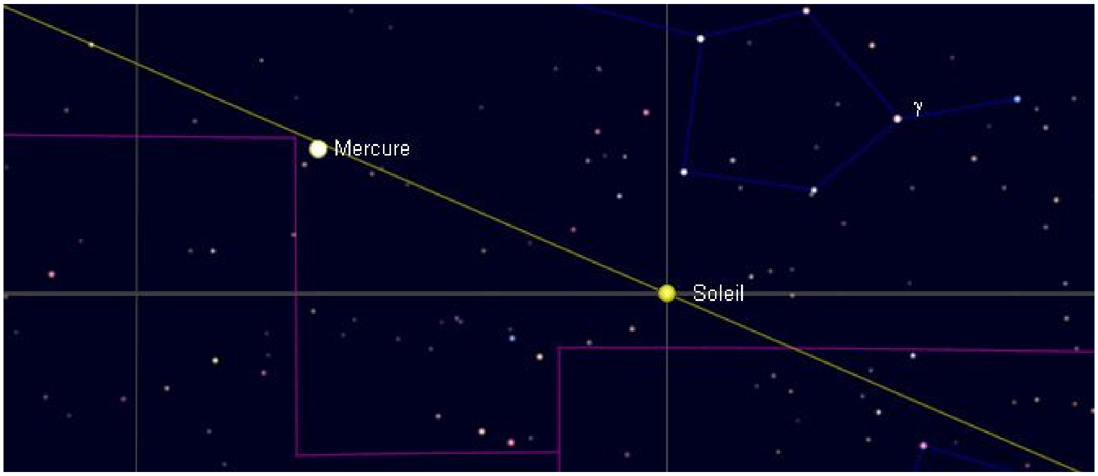
Par exemple, voici la position du Soleil devant les étoiles le 20 mars 2013 à 11 h 1 min 55 s UT (Heure universelle = heure de Londres).



Fait avec le programme *Cartes du ciel*

C'est alors le début du printemps et le Soleil, dans son mouvement sur l'écliptique (ligne jaune oblique) traverse l'équateur céleste (ligne horizontale). Cela signifie que, en 2013, le point vernal est dans la constellation des Poissons.

Regardons maintenant où sera le Soleil au début du printemps dans 300 ans.



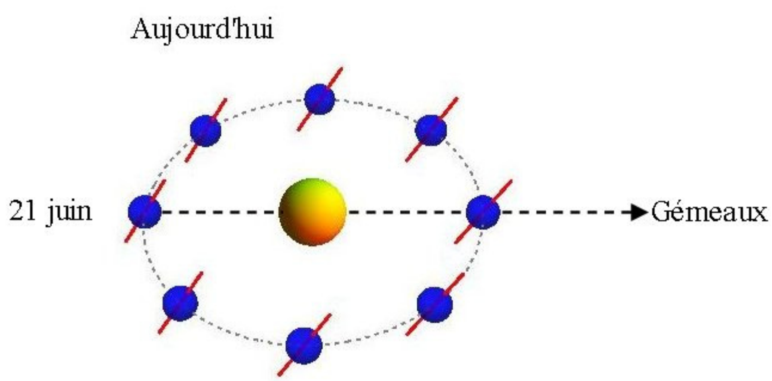
Fait avec le programme *Cartes du ciel*

Si on observe bien les deux images, on voit que le point vernal a légèrement changé de place. Il s'est déplacé vers la droite de 4,19° en 300 ans (1,39697° par siècle). La position du Soleil au début du printemps a donc décalé un peu.

La position du point vernal est ainsi passée de la constellation du Bélier à la constellation des Poissons en 67 av. J.-C. et elle passera de la constellation des Poissons à la constellation du Verseau en 2597 puis dans la constellation du Capricorne en 4312. Il faudra 25 770 ans pour que le point vernal fasse un tour complet du ciel pour revenir à la position qu'il avait le 20 mars 2013.

Comme le déplacement se fait dans le sens contraire du mouvement du Soleil dans le ciel, on parle de *précession*. La position des équinoxes et des solstices fait une précession, même si on a donné le nom de *précession des équinoxes* à ce phénomène.

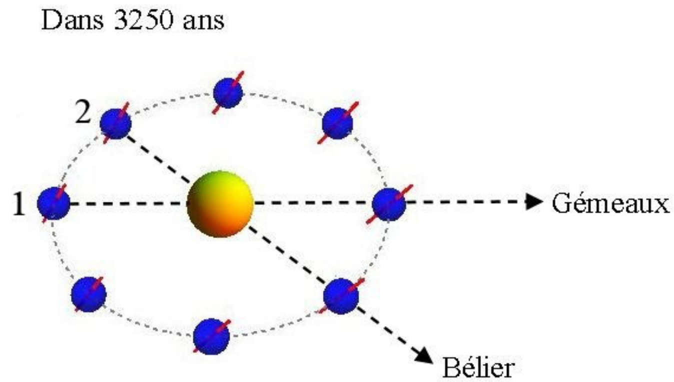
Examinons ce changement en prenant le point de vue de la Terre qui tourne autour du Soleil. Commençons par considérer la configuration du système aujourd'hui.



skepticsplay.blogspot.ca/2011/01/science-of-ophiuchus.html

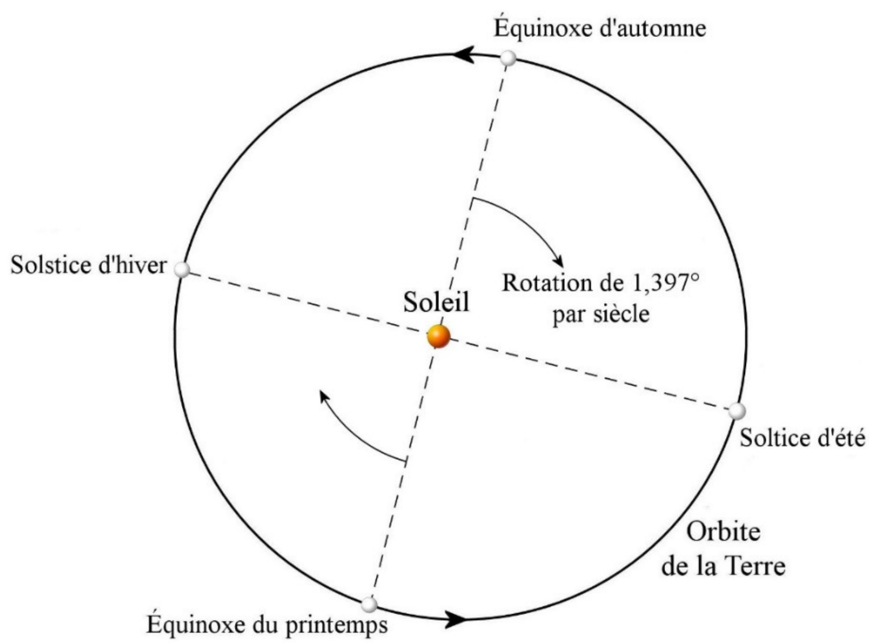
Quand la Terre est à la position identifiée 21 juin, c'est le début de l'été puisque le pôle nord de l'axe de rotation de la Terre est orienté vers le Soleil pour que l'hémisphère nord soit bien éclairé. En ce moment, le Soleil est en face de la constellation des Gémeaux quand débute l'été.

Examinons maintenant comment sera le système Terre-Lune dans 3250 ans, sachant que l'orientation de l'axe de la Terre change. (Observez bien les deux images pour voir le changement d'orientation de l'axe de la Terre.)



Quand la Terre est à la même position sur l'orbite 3250 ans plus tard (position 1 sur la figure), ce n'est pas le début de l'été puisque le pôle nord de l'axe n'est plus orienté vers le Soleil à cette position puisque l'axe a changé de direction. Il était plutôt orienté vers le Soleil 45 jours plus tôt (position 2). Ainsi, l'été commencera à la position 2 dans 3250 ans, et non plus à la position 1 comme en ce moment.

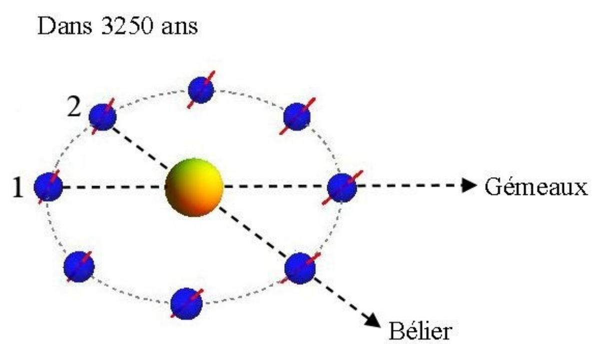
La position de la Terre au début de l'été, et au début de toutes les saisons par le fait même, change donc de place sur l'orbite de la Terre. Le changement est de 1,39697° par siècle dans la direction opposée à la rotation de la Terre autour du Soleil.



Le temps entre les passages de la Terre à l'équinoxe du printemps s'appelle l'*année tropique* et elle a une durée moyenne de 365,2421898 jours. Elle est donc un peu plus courte que l'année sidérale (qui est le temps que prend la Terre pour faire le tour du Soleil) qui vaut 365,2565654 jours. C'est normal qu'elle soit plus courte, car l'équinoxe va à la rencontre de la Terre, ce qui diminue le temps.

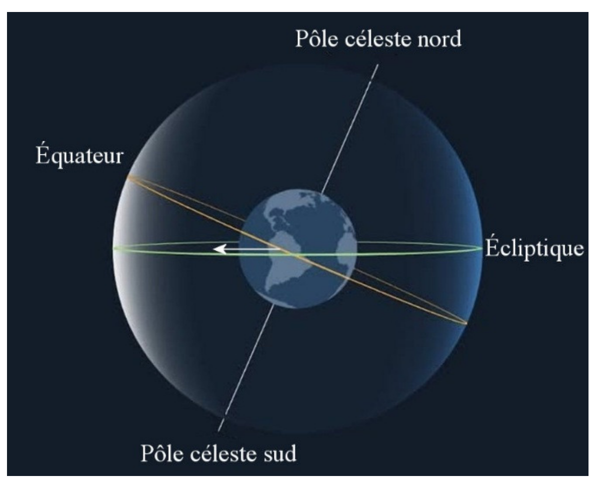
Notez que notre calendrier est fait pour suivre les saisons et que c'est donc l'année tropique de 365,2421898 jours (365 j 5 h 48 min 45,2 s) que notre calendrier doit suivre. Il le fait assez bien parce qu'avec notre calendrier, la durée moyenne de l'année est de 365,2425 jours. (Vous pensiez peut-être que c'était 365,25 jours, mais on enlève 3 années bissextiles par 400 ans. La prochaine année bissextile qu'on sautera sera en 2100. Il n'y aura pas de 29 février cette année-là.) La durée de l'année moyenne du calendrier est un peu plus longue que l'année tropique et il faudra penser à éliminer un jour du calendrier dans un peu plus de 3000 ans.

Le fait que notre calendrier suive l'année tropique veut dire qu'en ce moment, la Terre est à la position 1 sur la figure le 21 juin, mais que le 21 juin sera à position 2 dans 3250 ans. (Comme notre calendrier suit les saisons, l'été commencera toujours aux alentours du 21 juin.) À la position 1, ce sera le 5 aout dans 3250 ans.



Le changement de coordonnées des étoiles

Le point vernal est le point de référence pour la mesure de l'ascension droite. Si ce point change de place et que les étoiles restent fixes, alors l'ascension droite des étoiles change constamment à cause de la précession des équinoxes. De plus, comme l'équateur céleste se déplace avec le point vernal et qu'on mesure la déclinaison des étoiles par rapport à l'équateur céleste, la déclinaison des étoiles change constamment aussi !



Ces changements d'ascension droite et de déclinaison dus à la précession font qu'on doit spécifier l'année de référence quand on donne la position d'une étoile. Comme le changement est assez lent, on change l'année de référence aux 50 ans. Auparavant, on travaillait avec les positions de 1950 et on travaille maintenant avec les positions de 2000. Ça peut sembler peu pratique, mais il faudrait refaire les positions des étoiles régulièrement de toute façon, peu importe le système utilisé puisqu'elles changent lentement de places les unes par rapport aux autres.

Ce lent changement d'ascension droite et de déclinaison fut découvert dès 150 av. J.-C. par Hipparque. Il l'a découvert quand il a comparé les positions des étoiles qu'il avait mesurées avec des positions mesurées par d'autres astronomes grecs près de 150 ans plus tôt (Timocharis et Aristillus). Les positions mesurées par Hipparque étaient toutes décalées par rapport aux positions plus anciennes ce qui lui permit de conclure que le point vernal avait changé de place en 150 ans. (En fait, il venait de découvrir que le point vernal changeait de place, mais on hésita longtemps entre l'idée que le décalage se faisait toujours dans la même direction, qui est la précession des équinoxes, et l'idée que le point vernal faisait un mouvement d'oscillation, une théorie qui portait le nom de trépidation des équinoxes.)

Les signes astrologiques (vraiment ?)

L'astrologie prétend que la constellation alignée avec le Soleil lors de la naissance influence la personnalité de l'individu. On dit qu'une personne née le 17 novembre est un scorpion, ce qui voudrait dire que le Soleil était devant la constellation du Scorpion à cette date. Or, si on se fie au tableau donné au chapitre 2, le Soleil était plutôt devant la Balance à cette date.

Constellation	Date
Capricorne	19 janvier – 15 février
Verseau	16 février – 11 mars
Poissons	12 mars – 18 avril
Bélier	19 avril – 13 mai
Taureau	14 mai – 20 juin
Gémeaux	21 juin – 20 juillet
Cancer	21 juillet – 9 aout
Lion	10 aout – 16 septembre
Vierge	17 septembre – 30 octobre
Balance	31 octobre – 22 novembre
Scorpion	23 novembre – 30 novembre
Serpentaire	1er décembre – 17 décembre
Sagittaire	18 décembre – 18 janvier

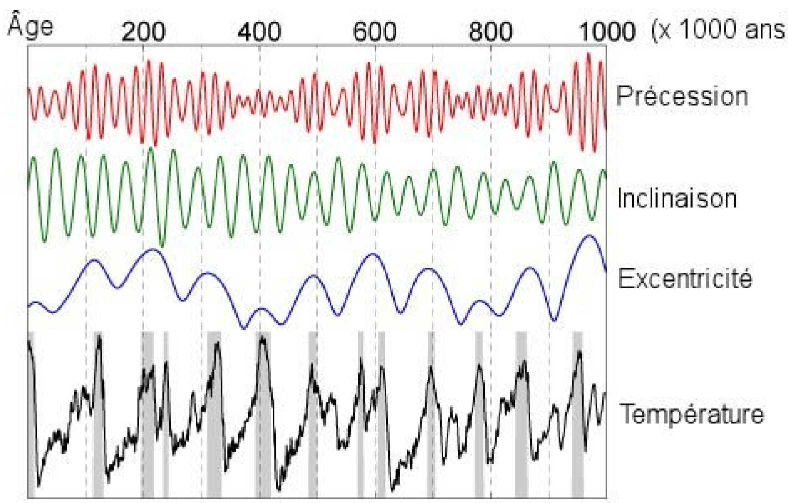
Presque toujours, le Soleil est, lors de notre naissance, devant la constellation du zodiaque précédent notre signe astrologique. C'est que ces signes ont été établis il y a près de 2000 ans et que, depuis ce temps, les signes ont décalé à cause de la précession des équinoxes. Rappelez-vous, dans l'exemple de 21 juin, on est passé d'un alignement du

Soleil avec les Gémeaux à un alignement du Soleil avec le Bélier en 3250 ans, un décalage de 2 constellations du zodiaque. C'est ce qui se produit avec toutes les constellations du zodiaque : il y a un décalage d'un signe à peu près tous les 2000 ans. Ainsi, pour être exacte (si on est assez imbécile pour croire à l'astrologie), on devrait plutôt se fier à ce tableau pour déterminer notre signe astrologique et ainsi obtenir les bonnes prévisions. Désolé pour ceux qui sont nés quand le Soleil était devant la constellation du Serpentaire, car ce signe n'existe même pas en astrologie.

Effet de la précession et des autres perturbations sur le climat

La précession et les perturbations de l'orbite et de l'axe de la Terre ont une influence sur le climat. Par exemple, avec un été se produisant à l'aphélie d'une orbite plus excentrique avec une inclinaison de l'axe de la Terre plus faible, on pourrait avoir des étés beaucoup moins chauds dans l'hémisphère nord, à tel point que la neige accumulée pendant l'hiver ne fondrait peut-être pas complètement durant l'été. Chaque hiver, de la nouvelle neige s'ajoute à celle qui reste des hivers précédents et on peut ainsi former des couches de neige et de glace de plusieurs kilomètres d'épaisseur. On entre alors dans une glaciation.

Ces variations seraient donc à l'origine des périodes glaciaires sur Terre, une hypothèse formulée au 19e siècle et supportée par les calculs de Milutin Milankovic faits en 1930.



math.ucr.edu/home/baez/week318.html

Les zones en blanc sur le graphique de la température correspondent aux périodes de glaciation alors que les zones en gris sont les périodes interglaciaires, plus chaudes. Nous sommes actuellement dans une période interglaciaire.

6.12 LA SURFACE DE LA LUNE

Voici à quoi ressemble la surface de la Lune.

www.scientificamerican.com/article.cfm?id=dueling-visions-stall-nasa

Le champ gravitationnel à la surface

Le champ gravitationnel à la surface de la Lune est moins grand qu'à la surface de la Terre. À la surface, on est à 1737 km du centre de la Lune. En prenant la formule du champ fait par une sphère, on obtient donc

$$\begin{aligned} g &= \frac{GM}{R^2} \\ &= \frac{6,6743\times 10^{-11} \frac{Nm^2}{kg^2} \cdot 7,346\times 10^{22} kg}{\left(1,737\times 10^6 m\right)^2} \\ &= 1,625 \frac{N}{kg} \end{aligned}$$

Ce champ est environ le sixième du champ à la surface de la Terre.

Température moyenne

Avec un albédo de 0,07, la température moyenne de la Lune est

$$\begin{aligned} T &= 278,3K \cdot \sqrt[4]{\left(\frac{L}{1L_\odot}\right)\left(\frac{1UA}{D}\right)^2 (1-A)} \\ &= 278,3K \cdot \sqrt[4]{\left(\frac{1L_\odot}{1L_\odot}\right)\cdot\left(\frac{1UA}{1UA}\right)^2 \cdot (1-0,07)} \\ &= 278,3K \cdot \sqrt[4]{(1-0,07)} \\ &= 273,3K \\ &= 0,1°C \end{aligned}$$

C'est la température moyenne, mais il peut y avoir de grandes variations de température. En effet, la température sur la Lune varie entre -173 °C et 117 °C. Pour mieux évaluer les variations, faisons le calcul de la température locale maximale.

De telles variations sont dues à la grande durée du jour et de la nuit (2 semaines chacun) et au fait qu'il n'y a pas d'eau et d'atmosphère pour équilibrer un peu la température à la surface de la planète.

Notez également qu'on ne sentira pas beaucoup ces variations de température puisqu'il n'y a pas d'air. On sentirait la température du sol si on était pieds nus sur la Lune et on sentirait probablement le rayonnement émis par la surface quand elle est très chaude, mais sans plus.

Température maximale locale

Au lieu de considérer la température moyenne de la planète, on va calculer la température maximale à un endroit précis de la planète. Pour ce faire, on va considérer une petite partie de la surface au lieu de considérer la planète au complet.

À l'endroit le plus chaud, les rayons du Soleil arrivent à 90° par rapport à la surface. Avec une lumière ayant une intensité *I*, la puissance captée, en tenant compte de l'albédo, est

$$P_{recue} = I \cdot aire \cdot (1 - A)$$

La puissance émise est

$$P_{émise} = \sigma \cdot aire \cdot T^4$$

En égalant les puissances, on arrive à

$$\sigma \cdot aire \cdot T^4 = I \cdot aire \cdot (1 - A)$$
$$\sigma T^4 = I(1 - A)$$

Comme l'intensité de la lumière du Soleil est

$$I = \frac{L}{4\pi D^2}$$

On arrive à

$$\sigma T^4 = \frac{L}{4\pi D^2}(1 - A)$$
$$T = \sqrt[4]{\frac{L}{4\pi\sigma D^2}(1 - A)}$$

Encore une fois, on va arranger un peu cette formule, en changeant les unités, pour qu'elle soit un peu plus facile à utiliser.

$$\begin{aligned} T &= \sqrt[4]{\frac{L}{4\pi\sigma D^2}(1-A)\cdot\left(\frac{3,828\times10^{26}W}{1L_\odot}\right)\cdot\left(\frac{1UA}{1,496\times10^{11}m}\right)^2} \\ &= \sqrt[4]{\frac{3,828\times10^{28}W\cdot(1-A)}{4\pi\sigma\cdot\left(1,496\times10^{11}m\right)^2}\cdot\left(\frac{L}{1L_\odot}\right)\cdot\left(\frac{1UA}{D}\right)^2} \\ &= \sqrt[4]{\frac{3,828\times10^{28}W}{4\pi\sigma\cdot\left(1,496\times10^{11}m\right)^2}}\cdot\sqrt[4]{\left(\frac{L}{1L_\odot}\right)\cdot\left(\frac{1UA}{D}\right)^2(1-A)} \end{aligned}$$

On peut alors calculer la première racine

$$\sqrt[4]{\frac{3,828\times10^{28}W}{4\pi\cdot5,67\times10^{-8}\frac{W}{m^2K^4}\cdot\left(1,496\times10^{11}m\right)^2}} = 393,6K$$

pour obtenir

Température maximale à la surface d'une planète

$$T = 393,6K\cdot\sqrt[4]{\left(\frac{L}{1L_\odot}\right)\left(\frac{1UA}{D}\right)^2(1-A)}$$

Dans le cas de la Lune, on arrive à

$$\begin{aligned} T &= 393,6K\cdot\sqrt[4]{\left(\frac{L}{1L_\odot}\right)\left(\frac{1UA}{D}\right)^2(1-A)} \\ &= 393,6K\cdot\sqrt[4]{\left(\frac{1L_\odot}{1L_\odot}\right)\cdot\left(\frac{1UA}{1UA}\right)^2\cdot(1-0,07)} \\ &= 393,6K\cdot\sqrt[4]{(1-0,07)} \\ &= 386,5K = 113,4°C \end{aligned}$$

Ce n'est pas loin de la température maximale de 117 °C mentionnée précédemment (probablement qu'il y a des endroits où l'albédo est plus faible.)

Pour que la surface d'une planète atteigne la température donnée par cette formule, il ne doit pas y avoir d'atmosphère et la planète doit tourner lentement sur elle-même pour que le Soleil ait le temps de bien réchauffer l'endroit.

Les cratères

On remarque premièrement que la surface est parsemée de cratères. Il y a 3000 cratères ayant un diamètre de 1 km et plus.

Ces cratères sont causés par l'impact d'un météorite à la surface de la Lune. En gros, l'impact d'un météorite ayant un certain diamètre va créer un cratère ayant un diamètre 10 à 20 fois plus grand que le météorite. Ainsi, l'impact d'un météorite de 5 m va créer un cratère d'environ 50 m de diamètre.

tyron29.kazeo.com/les-planetes/lune-cratere-copernicus,p984591.html

Encore aujourd'hui, il se forme de nouveaux cratères. Au rythme actuel, il se forme un nouveau cratère de 10 km de diamètre sur la Lune tous les 10 millions d'années, un nouveau cratère de 1 m de diamètre tous les mois et des cratères de 1 cm de diamètre chaque quelques minutes.

Toutefois, le rythme de formation des cratères était beaucoup plus grand à certaines époques. Ainsi, la plupart des cratères se sont formés pendant une de ces deux époques :

1) Lors de la formation du système solaire, il y a 4,6 milliards d'années.

2) Lors du *grand bombardement tardif*, qui s'est produit il y a entre 3,8 et 4,1 milliards d'années.

Nous verrons dans un chapitre ultérieur pourquoi il y avait beaucoup d'impact de météorites à ces époques.

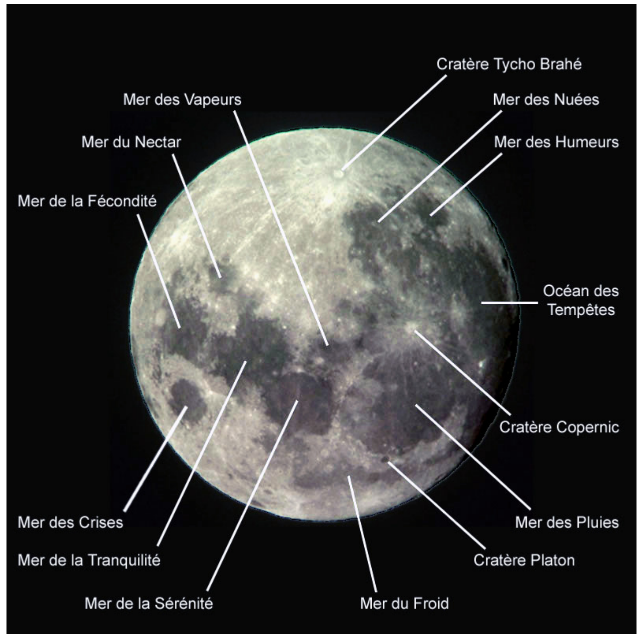
Puisqu'il n'y a pas d'eau ni d'atmosphère sur la Lune, il n'y a pas d'érosion et les traces d'impact sont restées pratiquement intactes.

En fait, les cratères disparaissent quand même lentement à la surface de la Lune. À chaque nouvel impact de météorite, il y a de la poussière de roche qui est projetée et qui retombe ensuite à la surface de la Lune. La surface de la Lune est donc recouverte d'une couche de poussière appelée *régolite* d'une épaisseur moyenne de 20 m. Elle peut même atteindre 100 m d'épaisseur à certains endroits. Cette poussière a un peu la consistance de la farine ou de poudre de ciment. L'image de droite montre de la marque d'un pas d'astronaute dans cette poussière. Cette poussière recouvre donc lentement les cratères et les enterre très lentement.

www.orlandosentinel.com/space/apollo-11-anniversary/os-ne-apollo-11-memory-018-20190720-mkguhoxrcvffboz36yddlkjnvu-story.html

Les « mers » lunaires

Sur la surface de la Lune, il y a de vastes régions sombres, appelées les *mers lunaires* (évidemment, ce ne sont pas de vraies mers puisqu'il n'y a pas d'eau), et des régions plus claires, appelées les *terres hautes*.



fr.wikipedia.org/wiki/Liste_des_mers_lunaires

Des mesures de datation radioactive effectuées sur des échantillons ramenés de la Lune ont montré que les mers sont des régions où la surface est plus jeune. L'âge de la surface à ces endroits se situe entre 3,16 et 3,9 milliards d'années, alors que les terres hautes ont 4,5 milliards d'années. Les roches des terres hautes ont une densité plus faible que celles des mers.

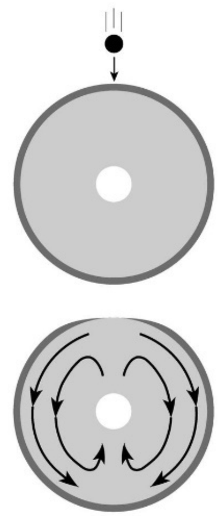
Il y a 4,5 milliards d'années, la surface de la Lune était un vaste océan de magma. Cette surface s'est alors solidifiée pour former les terres hautes. On estime qu'il a fallu environ 100 millions d'années pour que la surface se solidifie. Cette surface est relativement peu dense puisque la différenciation a amené en surface les matériaux les moins denses de la planète. Cette croute moins dense flottait sur le magma plus dense. Cette croute a maintenant une épaisseur de 60 à 100 km selon des études sismiques faites lors des missions Apollo.

Puis vint l'époque du Grand Bombardement. Des impacts gigantesques ont créé de vastes bassins. Le plus grand de ces bassins est le bassin *Imbrium* qui s'est formé il y a 3,86 milliards d'années. Ces bassins se sont ensuite rempli de lave pendant une période d'activité volcanique intense qui a duré environ 800 millions d'années.

Depuis la fin de l'activité volcanique, la surface de la Lune n'a pas beaucoup changé. Seuls des cratères se sont ajoutés. Comme une très grande partie des cratères se sont formés dans le premier milliard d'années de la vie de la Lune, il y a beaucoup moins de cratères d'impact sur les mers que sur les terres hautes.

Voici un petit film qui résume l'évolution de la surface de la Lune et qui montre comment ces mers se sont créées.
https://www.youtube.com/watch?v=ENi7pRASZwE
Les mers sont pratiquement toutes du côté visible à partir de la Terre.

Mais pourquoi y a-t-il des mers seulement sur un côté de la Lune ? La question est encore débattue, mais il semble y avoir un lien avec le fait que les mers sont à un endroit où certains éléments radioactifs sont nettement plus concentrés. La chaleur dégagée par ces isotopes radioactifs aurait rendu le magma sous la croute de ce côté de la Lune plus chaud et donc plus susceptible de former de vastes coulées de lave. En 2022, une équipe a formulé l'hypothèse que cette concentration d'éléments radioactifs a été provoquée par la collision avec la météorite qui a formé le Bassin Aitken près du pôle Sud. C'est la 2e plus grande marque d'impact du Système solaire et on peut voir cet impact dans le film de l'histoire de la Lune de la page précédente. Le cratère a un diamètre de 2500 km, ce qui est gigantesque pour une planète ayant un diamètre de 3470 km. Selon ces chercheurs, la collision a modifié les cellules de convection du magma à l'intérieur de la Lune (figure de droite) de sorte que les mouvements de magma auraient alors ramassé les isotopes radioactifs juste sous la croute pour les concentrer sur le côté opposé de la Lune.



www.science.org/doi/10.1126/sciadv.abm8475

L'atmosphère

Il n'y a pas d'atmosphère sur la Lune. C'est que la vitesse de libération de la Lune est très petite.

$$\begin{aligned} v_{lib} &= \sqrt{\frac{2GM}{R}} \\ &= \sqrt{\frac{2\cdot 6,6743\times 10^{-11}\,\frac{Nm^2}{kg^2}\cdot 7,346\times 10^{22}\,kg}{1,737\times 10^{6}\,m}} \\ &= 2\,376\,\tfrac{m}{s} \end{aligned}$$

Pour qu'un gaz ayant une température maximale de 117 °C puisse rester à la surface de la planète, sa masse moléculaire devrait être de

$$v_{lib} > 8\,\overline{v}_{mol}$$

$$2376\tfrac{m}{s} > 8\sqrt{\frac{2kT}{m_{mol}}}$$

$$2376\tfrac{m}{s} > 8\sqrt{\frac{2\cdot 1,38\times 10^{-23}\,\tfrac{J}{K}\cdot 390K}{m_{mol}}}$$

$$m_{mol} > 1,22\times 10^{-25}\,kg$$

Cette masse correspond à une masse molaire supérieure à 73 g/mol. Il n'y a pas beaucoup de gaz abondants dans l'univers qui ont une masse aussi grande, ce qui signifie que la Lune ne peut pas garder la moindre atmosphère, à part peut-être du radon provenant de la désintégration radioactive de l'uranium. Inutile d'apporter beaucoup d'air sur la Lune pour faire une atmosphère, elle se perdrait dans l'espace.

6.13 LA STRUCTURE DE LA LUNE

Une planète froide

La Lune est suffisamment petite pour qu'elle se soit refroidie beaucoup depuis sa formation. Il n'y aurait plus beaucoup de roche ou de métal liquide à l'intérieur de la Lune, ce qui élimine la possibilité d'observer du volcanisme actuel à la surface de la Lune et la possibilité qu'il y ait un champ magnétique.

Une planète anormalement peu dense

Avec la masse et le rayon de la Lune, on peut calculer la densité moyenne de la Lune. On a alors

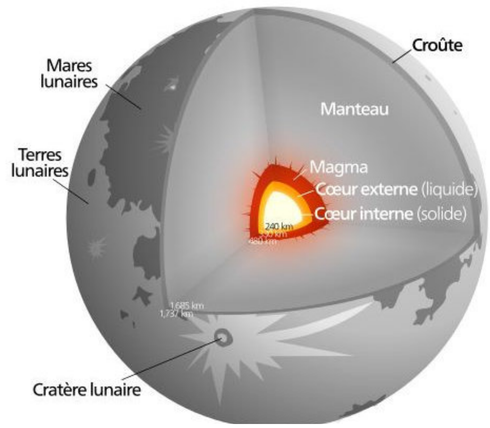
$$\overline{\rho} = \frac{M}{Vol} = \frac{7,346\times 10^{22}\,kg}{\tfrac{4}{3}\pi\left(1,737\times 10^{6}\,m\right)^{3}} = 3348\tfrac{kg}{m^3}$$

Cependant, la densité moyenne de la Terre est de

$$\overline{\rho} = \frac{M}{Vol} = \frac{5,9722\times 10^{24}\,kg}{\tfrac{4}{3}\pi\left(6,371\times 10^{6}\,m\right)^{3}} = 5513\tfrac{kg}{m^3}$$

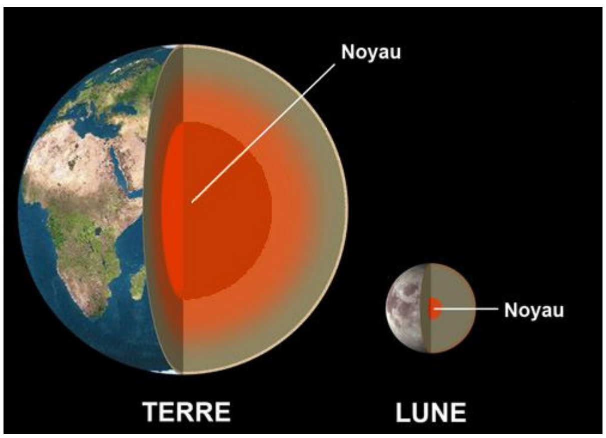
La densité de la Lune est plus petite que celle de la Terre. En partant, il est normal que la densité d'une planète plus grosse soit plus élevée parce que la pression plus grande dans la planète plus massive comprime davantage les roches. Il existe donc un calcul plus sophistiqué qui donne la densité de la planète s'il n'y avait pas cette compression par la pression. On appelle cette densité la *densité décomprimée*. La densité décomprimée de la Terre est de 4500 kg/m³. Or, la densité décomprimée de la Lune est de seulement 3340 kg/m³. La Lune est donc moins dense que la Terre.

Cette différence de densité provient sans doute d'un noyau métallique proportionnellement plus petit pour la Lune. La densité du métal étant plus grande que celui des roches, la densité moyenne de la planète diminue si le noyau est proportionnellement plus petit. On aurait donc la structure montrée à droite pour la Lune.



en.wikipedia.org/wiki/Moon

En proportion, le noyau de la Lune est plus petit que celui de la Terre. Le noyau de la Terre occupe 16 % du volume de la Terre alors que le noyau de la Lune, avec un rayon d'environ 330 km, occupe un volume inférieur à 1 % de la Lune.

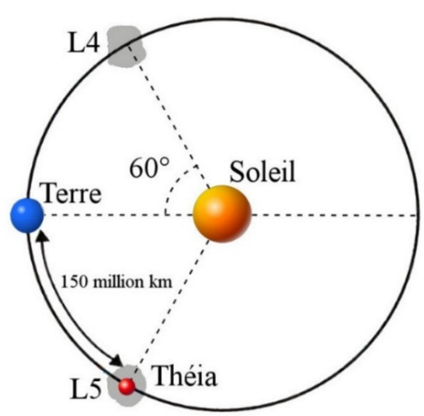


herboyves.blogspot.ca/2012_11_04_archive.html

Il ne faut pas croire que cela n'a rien de particulier. Il n'y a que deux planètes dans le Système solaire qui ont des noyaux ayant de proportions anormales et la Lune est un de ceux-là (l'autre étant Mercure). Il doit donc y avoir une explication particulière pour expliquer pourquoi la Lune a un si petit noyau.

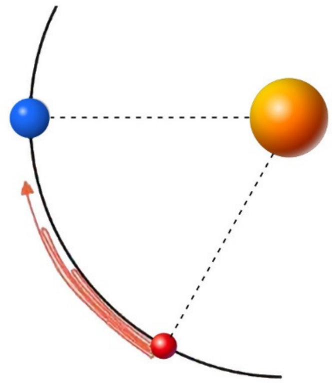
Une origine particulière

Un scénario assez spectaculaire a été développé pour expliquer pourquoi la Lune a un si petit noyau. La Lune se serait formée lors de la collision entre la Terre et une autre planète quand le Système solaire était encore tout jeune.



Il est possible que deux planètes aient commencé à se former sur l'orbite de la Terre. En effet, il y a un point de stabilité à 60° de chaque côté de la Terre sur l'orbite. On pourrait placer une planète à un de ces endroits et elle pourrait tourner avec la Terre sur son orbite en restant toujours à 60° de la Terre. Ce sont les points de Lagrange L4 et L5.

On a donné le nom de Théia (on utilise aussi parfois Orphée) à cette planète qui se serait formée sur la même orbite que la Terre.

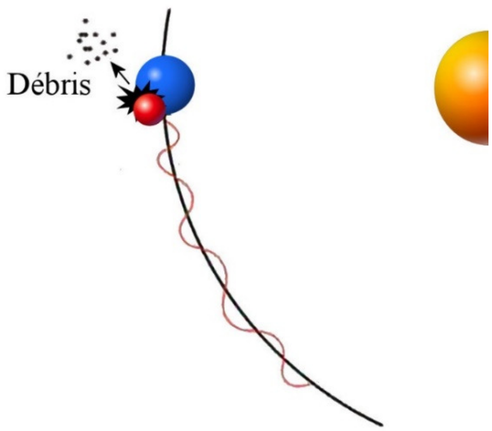


Il y a toutefois une limite à la masse de la planète qui peut être à ces points de Lagrange. Si la masse dépasse une masse critique, la position devient instable et la planète commence à faire des oscillations.

Théia aurait donc atteint cette masse critique à un certain moment et aurait commencé à osciller sur l'orbite. L'amplitude des oscillations aurait augmenté à mesure que Théia accumulait de la masse.

fr.wikipedia.org/wiki/Hypothèse_de_l%27impact_géant

Les oscillations se seraient amplifiées ainsi jusqu'à ce que Théia entre en collision avec la Terre au bout de 20 à 30 millions d'années



fr.wikipedia.org/wiki/Théia_(impacteur)

Théia et la Terre auraient alors fusionné pour former une planète plus grosse, alors qu'une partie de la matière aurait été éjectée. Ces débris éjectés, provenant surtout du manteau et de la croute des deux planètes, se seraient par la suite regroupés pour former la Lune. Puisque ces débris proviendraient surtout du manteau et de la croute, la Lune se serait formée avec beaucoup de roches et peu de métal. Cela expliquerait le déficit de métal dans la Lune.

Voici un film qui montre une simulation de cette collision.
https://www.youtube.com/watch?v=PnhflL7-I3I

RÉSUMÉ DES ÉQUATIONS

Période d'un système double avec des orbites circulaires (3e loi de Kepler)

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{r^3}{GM_{tot}}}$$

Lien entre le mois sidéral et le mois synodique (la rotation du satellite autour de la planète et la rotation de la planète autour de l'étoile sont dans le même sens)

$$\frac{1}{M_{sid}} = \frac{1}{M_{syn}} + \frac{1}{T_{planète}}$$

Lien entre le mois sidéral et le mois synodique (la rotation du satellite autour de la planète et la rotation de la planète autour de l'étoile sont dans le sens contraire)

$$\frac{1}{M_{sid}} = \frac{1}{M_{syn}} - \frac{1}{T_{planète}}$$

Angle minimum, mesuré à partir de centre de la Terre, entre le centre de la Lune et le Soleil pour qu'il y ait une éclipse de Soleil.

$$\Delta = \theta_{\oplus} + \theta_{\odot} + \theta_{☽}$$

Distance d'un satellite autour d'une planète à partir de la durée des éclipses du satellite

$$D = \frac{R_p}{\sin\left(\frac{t_e}{M_{syn}} \cdot 180° + \theta_*\right)}$$

Distance du Soleil à partir de l'angle entre le Soleil et la Lune au premier quartier

$$D_{\oplus\odot} = \frac{D_{\oplus☽}}{\cos\theta_{pq}}$$

Force de marée

$$F_{marées} = \frac{GM_e m R_s}{r^3}\left[2\cos\theta\vec{i} - \sin\theta\vec{j}\right]$$

Hauteur des marées

$$\Delta y = \frac{3M_e R_s^4}{2M_s r^3}$$

Limite de Roche

$$r_{Roche} = 2,42285 \cdot \sqrt[3]{\frac{\rho_e}{\rho_s}} R_e$$

Limite d'instabilité (rayon de Hill)

$$r_H = \sqrt[3]{\frac{M_c}{2M_{pert}}}\, r$$

Température maximale à la surface d'une planète

$$T = 393,6K \cdot \sqrt[4]{\left(\frac{L}{1L_\odot}\right)\left(\frac{1UA}{D}\right)^2 (1-A)}$$

EXERCICES

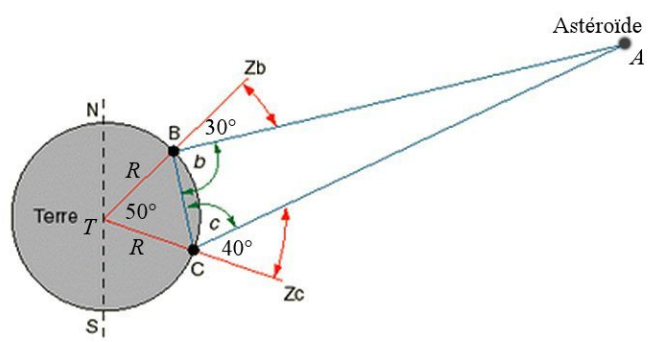
Utilisez les données suivantes pour ces exercices.

Lune		
	Masse = 7,346 x 10^{22} kg	Rayon = 1737 km
	Distance Terre-Lune = 384 400 km	Albédo = 0,07
Terre		
	Masse = 5,9722 x 10^{24} kg	Rayon = 6371 km
	Distance Terre-Soleil = 149 600 000 km	
Soleil		
	Masse = 1,9885 x 10^{30} kg	Rayon = 695 700 km

6.2 La distance entre la Terre et la Lune

1. Un signal radar envoyé sur la Lune revient 2,56 s plus tard. Quelle est la distance entre la Terre et la Lune ?

2. Un astéroïde passe tout près de la Terre et deux observateurs mesurent l'angle entre le zénith et l'astéroïde montrés sur la figure. Quelle est la distance entre l'astéroïde et le centre de la Terre ?



6.6 Les phases de la Lune

3. 3,6 jours après la nouvelle Lune, nous avons un beau croissant de Lune dans le ciel. À ce moment, la Lune est exactement entre la nouvelle Lune et le premier quartier. À quelle heure se lève et se couche la Lune à ce moment ?

6.7 Le mois sidéral et le mois synodique

4. Sur sa planète Naboo, Padmé regarde Tasia, une des trois lunes de la planète. Tasia revient pleine tous les 15 jours et la planète fait le tour de l'étoile en 225 jours. Sachant que Tasia tourne dans le même sens que la planète autour de l'étoile, calculez la période sidérale de Tasia.

5. La période sidérale de Triton autour de Neptune est de 5,877 jours. Quant à Neptune, elle tourne autour du Soleil en 60 190 jours (165 ans). Combien de temps y a-t-il entre les « pleins Triton » vu dès la planète Neptune sachant que Triton tourne dans le sens inverse de la rotation de Neptune autour du Soleil ?

6.8 Les éclipses

6. Sur sa planète Naboo, Padmé regarde la lune Tasia. Vu de Naboo. Tasia a une largeur angulaire de 0,7° et le « Soleil » de Naboo a une largeur angulaire de 1,5°. L'orbite de la Lune est inclinée de 10° par rapport au plan de l'orbite de Naboo autour de l'étoile. Naboo a un rayon de 8000 km et la distance entre Naboo et Tasia est de 300 000 km.
   a) Quelle est la largeur de la fenêtre des éclipses (dites jusqu'à combien de degrés du nœud la fenêtre va) ?
   b) Sachant que l'année sur Naboo dure 225 jours et que la période synodique de Tasia est de 15 jours, combien d'éclipses au maximum peut-on avoir chaque fois que le Soleil croise Tasia ?

7. Toujours sur sa planète Naboo, Padmé regarde la lune Tasia. Les pleines Tasia reviennent tous les 15 jours et la planète fait le tour de l'étoile en 225 jours. Les éclipses de Tasia durent 90 minutes au maximum. Le rayon de Naboo est de 8000 km et le « Soleil » de Naboo a un diamètre angulaire de 1,5° vu de Naboo.
   a) Quelle est la distance entre Naboo et Tasia ?
   b) Quelle est la masse de Naboo si l'orbite est circulaire (en supposant que la masse de Tasia est très petite) ?
   c) Quelle est la grandeur du champ gravitationnel à la surface de Naboo ?

6.9 La distance entre la Terre et le Soleil, trouvée grâce à la Lune

8. Quel serait l'angle entre le Soleil et la Lune au premier quartier si le Soleil était seulement deux fois plus loin que la Lune ?

6.10 Les marées

9. Une personne de 60 kg est la surface de la Terre. Quelle est la force de marée (grandeur et direction par rapport à la surface de la Terre) exercée sur la personne si elle est à…

   a) $\theta = 0°$?
   b) $\theta = 90°$?
   c) $\theta = 45°$?

10. À quelle valeur de θ la force de marée est-elle exactement tangente au sol de la planète (en supposant que la Terre reste sphérique) ?

11. Calculer le rapport exact entre la force de marée exercée par la Lune et la force de marée exercée par le Soleil dans la direction $\theta = 0$.

12. Quelle devrait être la distance entre la Terre et la Lune pour que la force de marée s'exerçant sur votre corps soit égale à 1 % du poids de votre corps dans la direction $\theta = 0$?

13. Quelle est la hauteur des marées générées par Jupiter sur la Terre quand les deux planètes sont au plus près l'un de l'autre ? (Masse de Jupiter = 1,9 x 10^{27} kg, distance minimale entre Jupiter et la Terre = 4,2 UA.)

14. À quelle distance doit s'approcher Mercure du Soleil pour être détruit par les forces de marée du Soleil ? (Densité du Soleil = 1408 kg/m³, densité de Mercure = 5427 kg/m³)

15. À cause des effets de marée causée par son satellite Ypp, la durée du jour sur la planète Stromgol (planète fictive) est passée de 36 000 s à 36 000,025 s en 50 000 jours stromgoliens. Combien de secondes supplémentaires les habitants de la planète ont-ils dû ajouter en 50 000 jours pour garder les horloges en phase avec les journées ?

16. Combien faudra-t-il de temps pour que le ralentissement de la Terre ait enlevé exactement une rotation à la rotation de la Terre si la période de rotation augmente au rythme de 1,7 ms par siècle ?

17. Combien d'énergie cinétique de rotation la Terre perd-elle chaque seconde à cause du ralentissement de la rotation si la période de rotation augmente au rythme de 1,7 ms par siècle sachant que le moment d'inertie de la Terre est 0,3397MR^2 (rappel : l'énergie cinétique de rotation est $\frac{1}{2}I\omega^2$) ?

18. Quelle devrait être la masse de Jupiter pour qu'elle rende instable l'orbite de la Terre ? (La distance entre Jupiter et le Soleil est $7,8 \times 10^{11}$ m.) Sachant que la véritable masse de Jupiter est $1,9 \times 10^{27}$ kg, la masse trouvée correspond à combien de fois la masse de Jupiter ?

6.11 La précession des équinoxes

19. En ce moment, l'hiver commence le 21 décembre et le périhélie se produit le 4 janvier. Toutefois, la position du début de l'hiver décale de 1,397° par siècle pour être plus tôt sur l'orbite. Par contre, la position du périhélie décale de 0,326° par siècle pour être plus tard sur l'orbite. Sachant que le calendrier est fait pour suivre les saisons (donc pour que l'hiver commence toujours le 21 décembre), calculez à quelle date se produira le périhélie dans 1000 ans. (Simplifiez un peu en posant que la vitesse angulaire de la Terre est constante.)

6.12 La surface de la Lune

20. Imaginons que la Lune soit deux fois plus loin du Soleil.

    a) Quelle serait la température moyenne de la Lune ?
    b) Quelle serait la température maximale sur la Lune ?
    c) La Lune pourrait-elle garder une atmosphère d'oxygène ? (Prenez la température maximale pour calculer la vitesse des molécules.)

6.13 La structure de la Lune

21. On va montrer ici que le noyau de la Lune doit être plus petit, en proportion, que celui de la Terre. Supposons que la Terre et la Lune sont formées d'un noyau ayant une densité de 12 000 kg/m³ et d'un manteau ayant une densité de 3000 kg/m³.

    a) Quelle doit être le rayon du noyau de la Terre par rapport au rayon total de la Terre pour que sa densité soit de 4500 kg/m³ (qui est la densité décomprimée) ?

b) Quelle doit être le rayon du noyau de la Lune par rapport au rayon total de la Lune pour que sa densité soit de 3348 kg/m³ ?

RÉPONSES

6.2 La distance entre la Terre et la Lune

1. 384 000 km
2. 20 969 km

6.6 Les phases de la Lune

3. Elle se lève à 9 h et elle se couche à 21 h

6.7 Le mois sidéral et le mois synodique

4. 14,0625 jours
5. 5,87642 jours

6.8 Les éclipses

6. a) 15,1° b) 1 ou 2 éclipses par fenêtre
7. a) 305 612 km b) $1,144 \times 10^{25}$ kg = 1,92 fois la masse de la Terre
   c) 11,93 N/kg

6.9 La distance entre la Terre et le Soleil, trouvée grâce à la Lune

8. 60°

6.10 Les marées

9. a) $6,60 \times 10^{-5}$ N vers le haut b) $3,30 \times 10^{-5}$ N vers le bas c) $5,22 \times 10^{-5}$ N dirigée à 18,43° vers le haut par rapport au sol.
10. À $\theta = 54,74°$
11. Les forces de marée de la Lune sont 2,178 fois plus grandes que celles faites par le Soleil
12. 8607 km du centre de la Terre
13. 0,0031 mm
14. 1,545 rayon solaire, donc à 1,075 million de km
15. 625 secondes
16. 5268 ans
17. $2,346 \times 10^{17}$ J/jour
18. $1,41 \times 10^{32}$ kg = 74 000 fois la masse de Jupiter

6.11 La précession des équinoxes

19. Le 21 janvier

6.12 La surface de la Lune

20. a) -79,9 °C b) 0,2 °C c) Non

6.13 La structure de la Lune

21. a) R'/R = 0,550 b) R'/R = 0,338