

5 LA LUNE

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



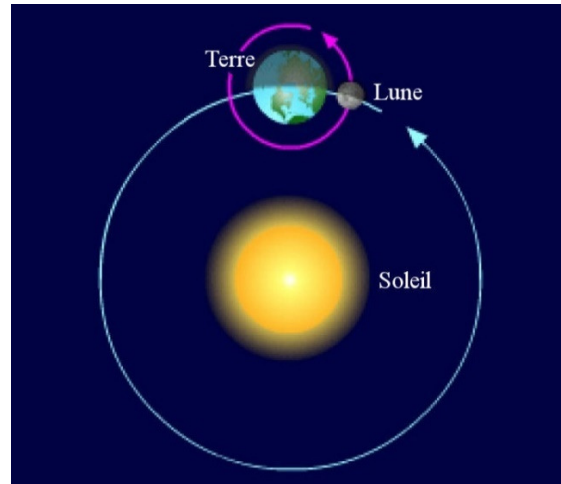
www.skyandtelescope.com/online-gallery/solar-eclipse-pictures/annular-eclipse-from-fluvanna-texas/

Découvrez la réponse à cette question dans ce chapitre.

5.1 LE SYSTÈME TERRE-LUNE-SOLEIL

Le mouvement de la Lune autour de la Terre

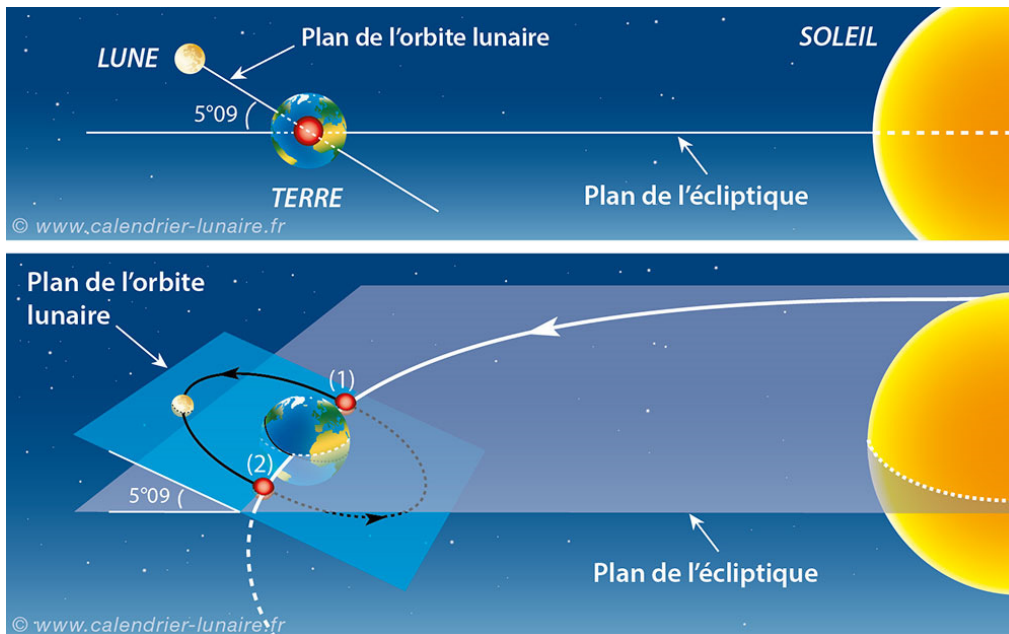
La Lune tourne autour de la Terre avec une période de 27,32 jours. Si on combine cette information avec le fait que la Terre tourne autour du Soleil, on a la situation suivante.



www.showme.com/sh/?h=IPQ3LQu

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

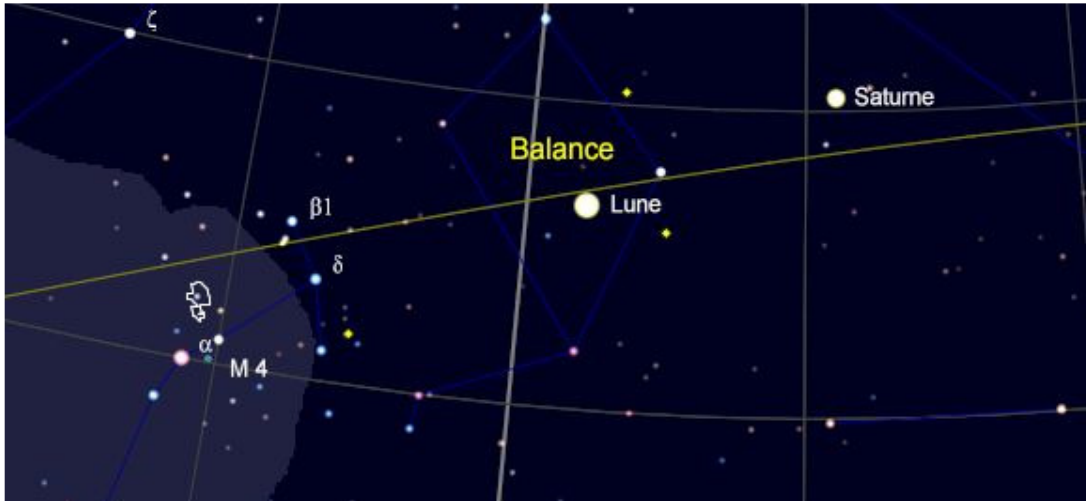
Le plan de l'orbite de la Lune n'est pas exactement le même que celui de la Terre autour du Soleil. Le plan de l'orbite de la Lune est incliné de $5,145^\circ$ par rapport au plan de l'orbite de la Terre.



[/www.calendrier-lunaire.fr/lune/noeuds-lunaires-lune-action-nature-plantes-jardin-terre/](http://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.



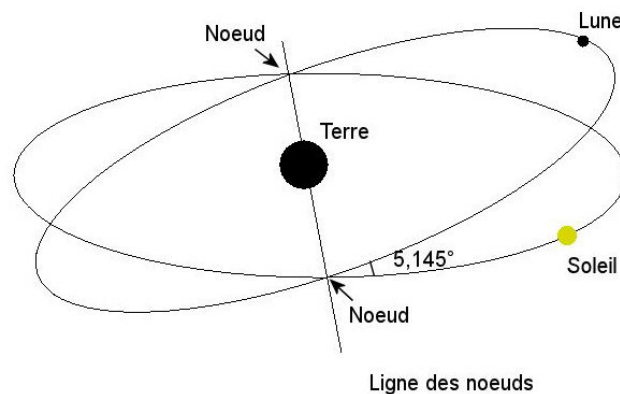
Sur la première image, elle est devant la constellation de la Balance alors qu'elle est devant la constellation du Scorpion sur la deuxième image, un déplacement d'un peu plus de 13° en 24 heures. La Lune se déplace ainsi par rapport aux étoiles pour revenir à peu près à la même place 27,32 jours plus 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 $5,145^\circ$ 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.

5.2 LA DISTANCE ET LA TAILLE 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.) Ces variations de distance font en sorte que la Lune n'a pas toujours la même grosseur dans le ciel



www.abovetopsecret.com/forum/thread653652/pg4

La valeur moyenne de la distance (qui est le demi-grand axe de l'ellipse) est

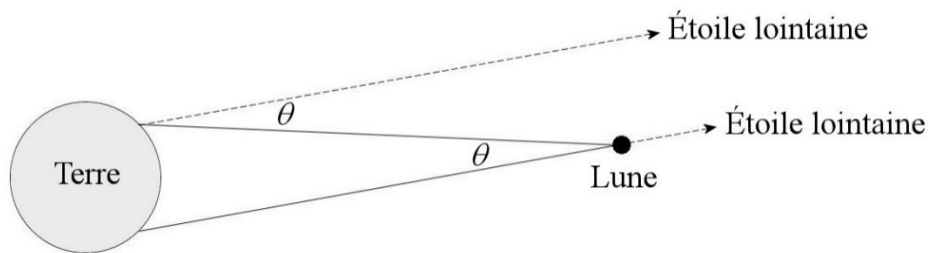
$$d_{\oplus\text{L}} = 384\,399 \text{ km}$$

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.



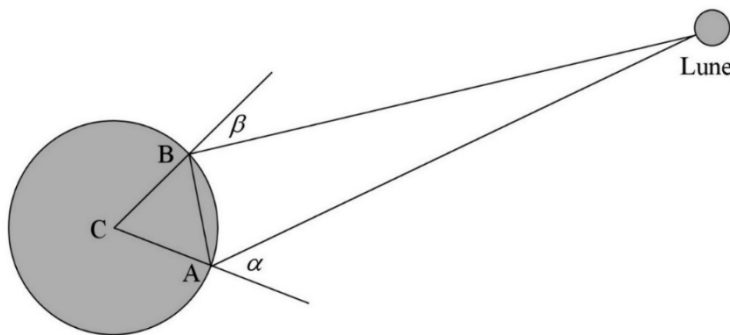
Notez que l'angle θ correspond également à l'angle entre les deux observateurs mesuré à partir de la Lune.

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 $0,83^\circ$ dans ce cas si on se fie à la Lune, qui a un diamètre angulaire d'environ $0,5^\circ$.



www.digitalsky.org.uk/lunar_parallax_NFIUE.html

Pour calculer la position, nos deux observateurs pourraient mesurer, par exemple, 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 mesures qu'ont fait deux savants français en 1751. Joseph Jérôme Lefrançois de Lalande a observé la Lune à partir de Berlin et Nicolas Louis de la Laille a observé la Lune à partir du Cap de Bonne-Espérance (pointe sud de l'Afrique). 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 différence de position du Soleil dans le ciel entre 2 observateurs est trop petite pour qu'on puisse calculer la distance avec précision.

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. On obtient alors le rayon suivant.

$$R_{\text{L}} = 1737 \text{ km}$$

(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.



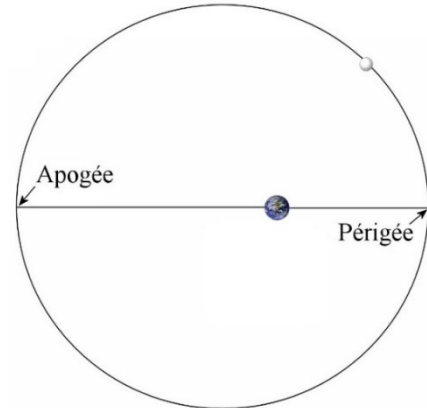
5.3 L'ORBITE DE LA LUNE

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.)

Ces valeurs de demi grand-axe et d'excentricité signifient que la distance au périégée devrait être de 363 400 km et que la distance à l'apogée devrait être de 405 500 km.

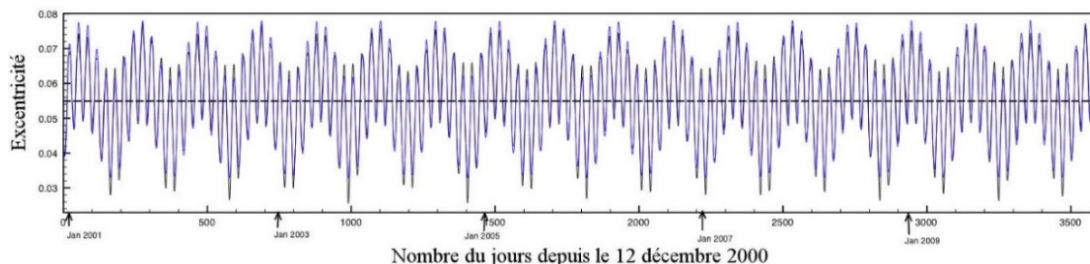


Effets des perturbations sur l'orbite de la Lune

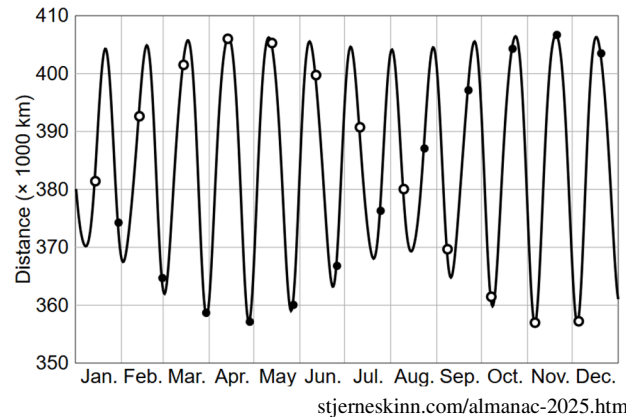
Les perturbations de l'orbite de la Lune, principalement faites par le Soleil, sont très importantes. Quand on tient compte des effets perturbateurs du Soleil, l'étude de l'orbite de la Lune devient assez complexe (et encore, ce qu'on voit ici n'est qu'une introduction). Isaac Newton a même déjà affirmé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

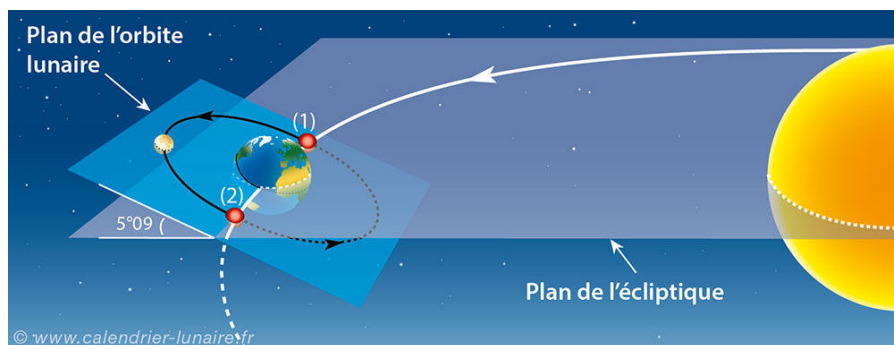


Cela affecte évidemment les distances au périégée et à l'apogée. Ainsi, la distance au périégée varie entre 356 355 km et 370 399 km, alors que la distance à l'apogée, moins affectée par les variations d'excentricité, varie entre 404 042 km et 406 725 km. On retrouve alors les valeurs minimale et maximale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



Variation de l'inclinaison de l'orbite

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



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

La rotation de la ligne des nœuds

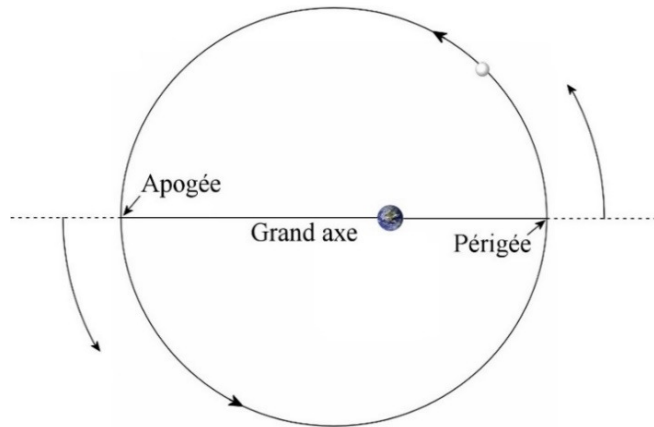
Les nœuds sont les endroits où la trajectoire de la Lune sur la sphère céleste traverse l'écliptique. Ce sont les points 1 et 2 sur la figure précédente et qui correspondent aux endroits où la Lune traverse le plan de l'orbite de la Terre. Si on relie ces deux nœuds par une ligne, on obtient la ligne 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 $19,35^\circ$ 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 périégée

Les perturbations font également tourner le grand axe de l'ellipse, qui est une ligne reliant le périégée 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 $40,7^\circ$ 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 périégée. Le temps que prend la Lune pour revenir au périégée 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.



5.4 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.



Côté visible de la Terre

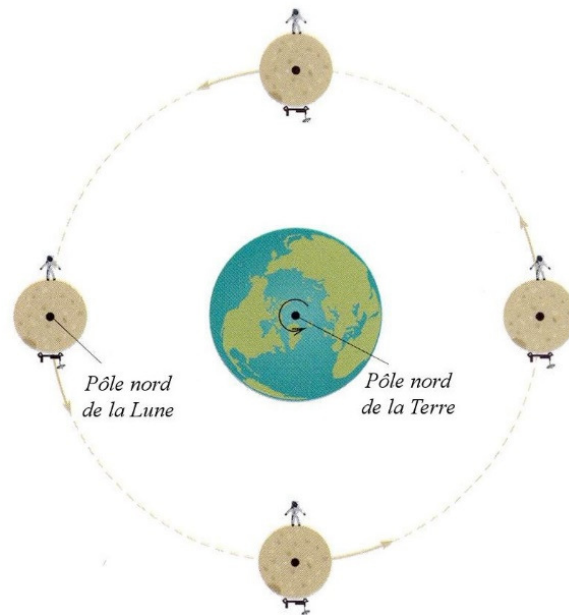
Côté qu'on ne voit jamais de la Terre

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.

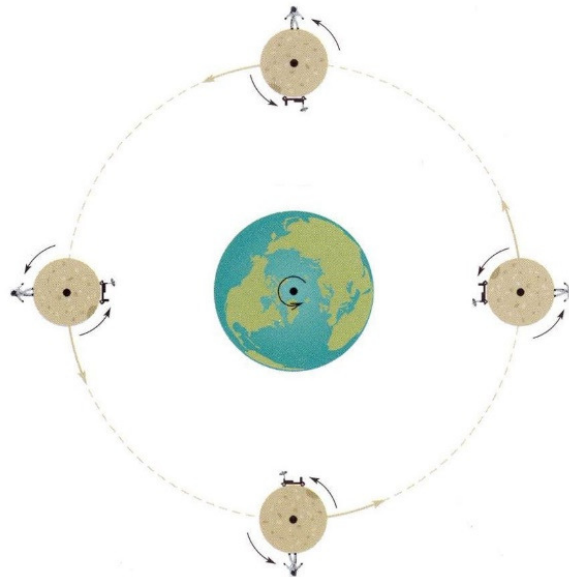
Sur cette première image, on peut voir ce qui se passerait si la Lune tournait autour de la Terre, mais ne tournait pas sur elle-même.

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.



hildaandrojanasteroids.net/TA062rotationofmoon.jpg

Le clip suivant reprend cette explication.

http://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.

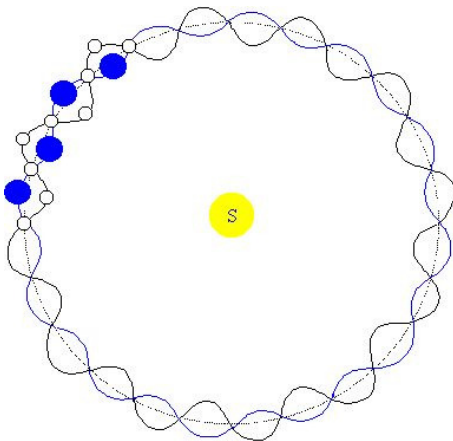
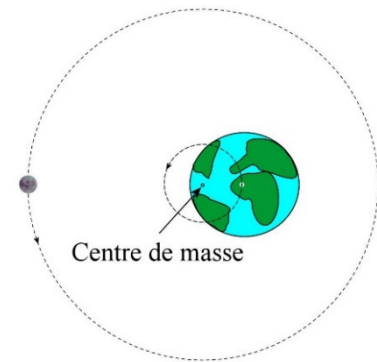
5.5 LA MASSE DE LA LUNE

On a vu qu'on peut trouver les masses à partir de la loi de la gravitation. Dès qu'il y a un objet en orbite autour d'un astre, on peut trouver la masse de l'astre. Toutefois, cette formule permet seulement de trouver la masse centrale. La masse de l'objet en orbite n'est pas dans la formule et on ne peut donc pas trouver la masse de l'objet en orbite.

On pourrait donc croire qu'on ne peut pas connaître la masse de la Lune parce que rien ne tourne autour de la Lune. Au pire, on aurait dû attendre la mise en orbite de la première sonde autour de la Lune en 1959 pour mesurer la masse de la Lune.

Cependant, les véritables orbites sont plus compliquées qu'un astre tournant simplement autour d'une masse centrale. En réalité, la Terre et la Lune tournent toutes les deux autour du centre de masse du système Terre-Lune.

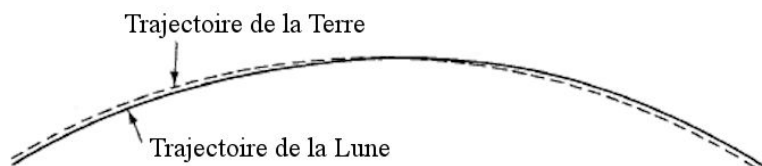
L'image ci-dessous montre l'orbite résultante pour la Terre et la Lune autour du Soleil. Notez que les oscillations sont exagérées pour la Lune et encore plus pour la Terre. On remarque que c'est le centre de masse du système Terre-Lune qui suit parfaitement l'orbite autour du Soleil.



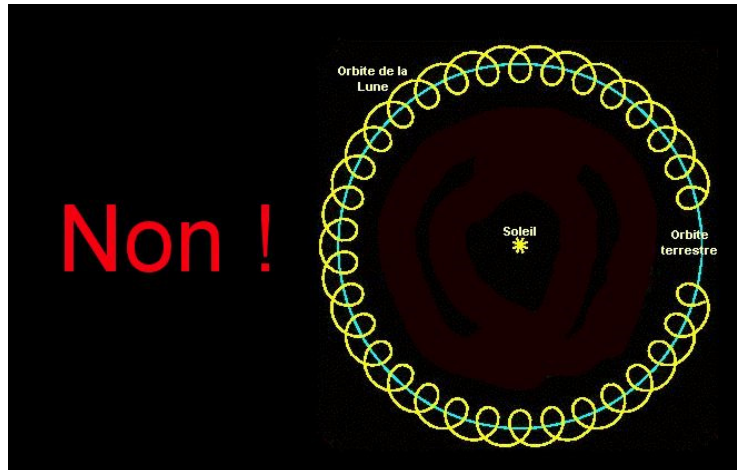
www.xena.ad/lcf/atelier/centre/stl.htm

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 courbées 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 de droite, 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/astonomie/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 courbure 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 en 1 an, mais j'en compte au moins 35 ici !).

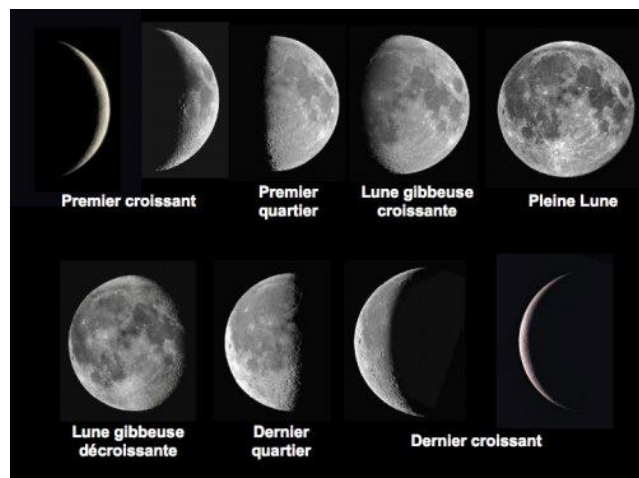
En utilisant la loi de la gravitation et en considérant que les deux astres tournent autour du centre de masse, on peut trouver la masse des deux objets à partir de la période de rotation et des distances. On peut donc trouver la masse de la Terre et de la Lune. Avec ces calculs, on obtient la masse suivante.

$$M_{\text{T}} = 7,34 \times 10^{22} \text{ kg}$$

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.

5.6 LES PHASES DE LA LUNE

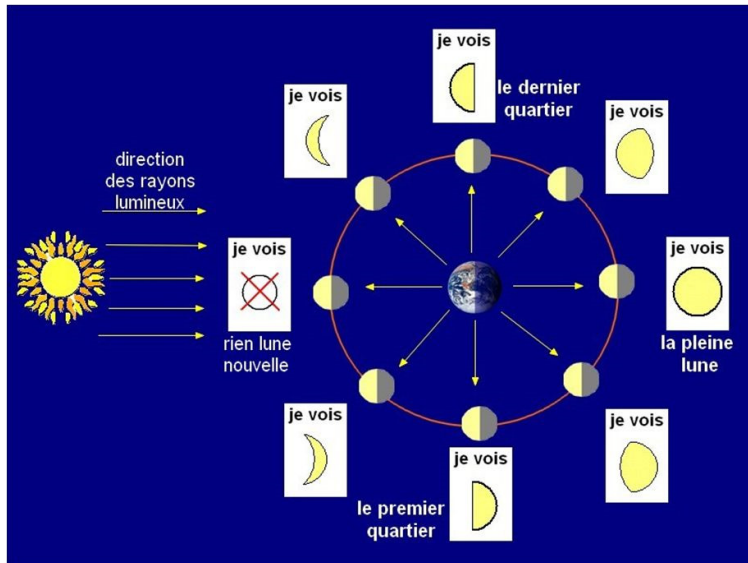
On remarque que la Lune change d'aspect durant le mois. C'est ce qu'on appelle les phases de la Lune. Ce cycle, d'une période de 29,53 jours, est illustré sur la figure de droite. Cette figure indique aussi le nom de ces phases de la Lune.



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 %).

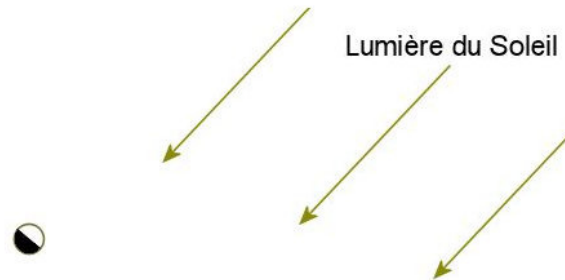
www.jaxa.jp/press/2008/10/20081009_kaguya_e.html



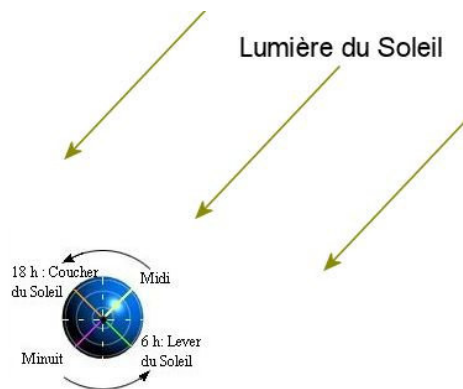
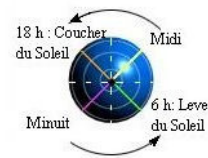
Malgré ce que laisse croire la brillance de la pleine Lune, la Lune est un astre plutôt sombre qui reflète très peu de lumière. L'albédo de la Lune est de seulement 7 % ce qui veut dire que même l'asphalte reflète mieux la lumière que la Lune.

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.

5.7 LE MOIS SIDÉRAL ET LE MOIS SYNODIQUE

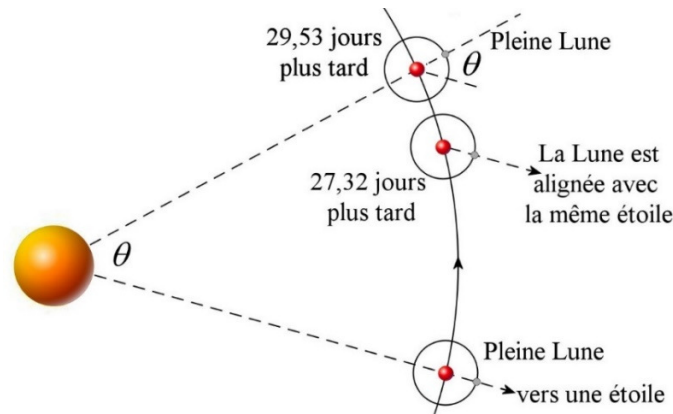
Pourquoi sont-ils différents ?

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.

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 jours 6 heures 22 minutes 40 secondes et 29 jours 20 heures 10 minutes 53 secondes.

5.8 LES ÉCLIPSES

Les éclipses de Soleil

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

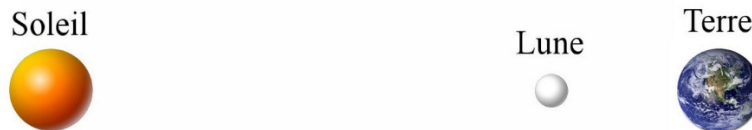
Rappelons-nous cette image montrant la position de la Lune et de Soleil dans le ciel par rapport aux étoiles pendant une période de 9 jours.



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.)

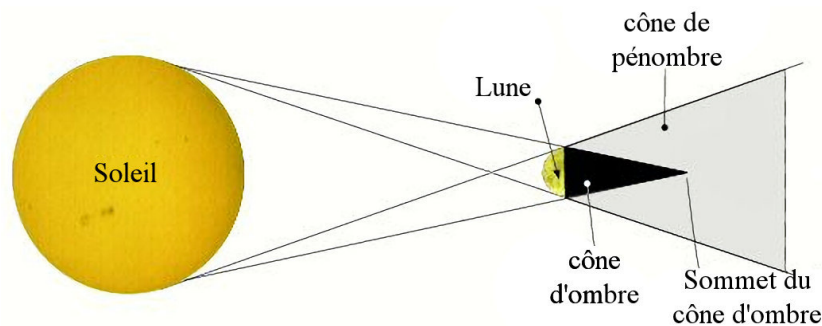
Lors d'une éclipse de Soleil, la Lune passe donc devant le Soleil et on a l'alignement suivant.



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.



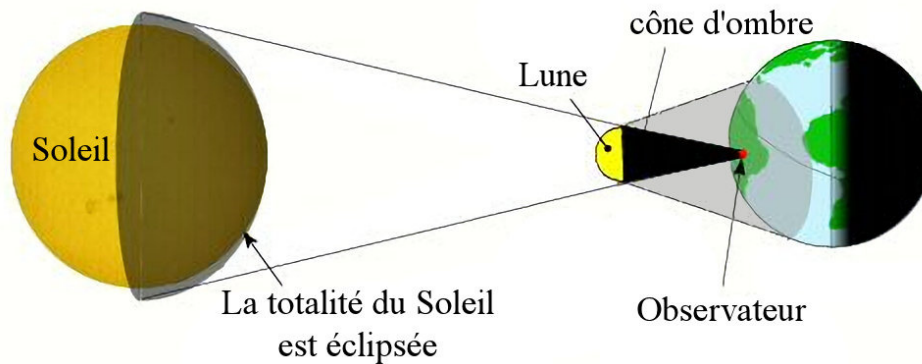
www.imcce.fr/fr/formations/cours/rocher/eclipses/soleil/soleil_type01.php

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

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.

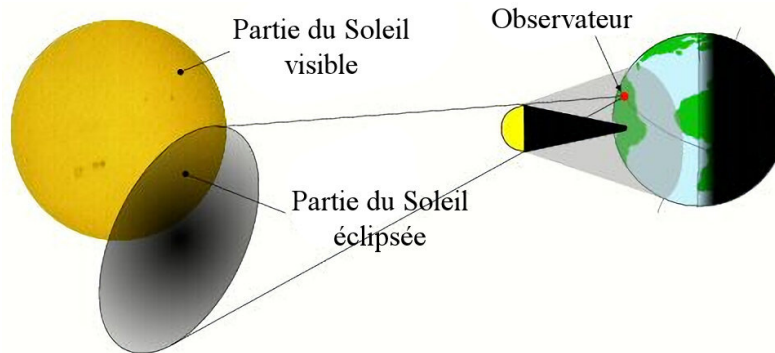
Dans les meilleures conditions, ce cône atteint 270 km de largeur à la surface de la Terre. Il faut donc être assez chanceux pour qu'il arrive exactement à l'endroit où nous sommes sur Terre, d'où la rareté des éclipses totales de Soleil. Le cône d'ombre se déplace à une vitesse se situant entre 1750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



apod.nasa.gov/apod/ap160311.html

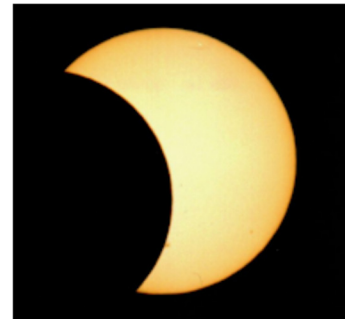
L'éclipse partielle de Soleil

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

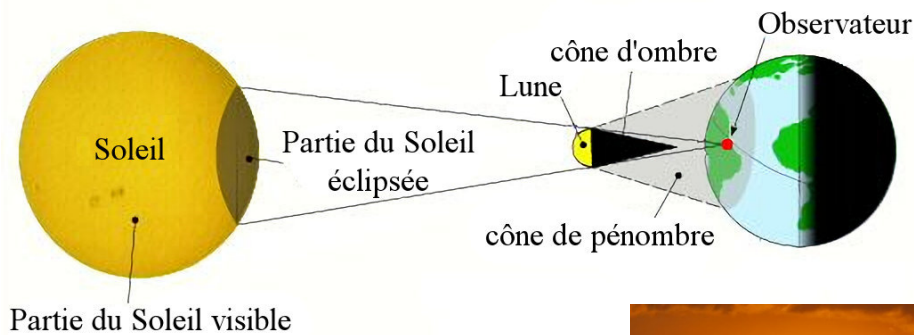


La figure de droite vous montre alors ce que peut voir cet observateur.

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.

L'éclipse annulaire de Soleil

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.

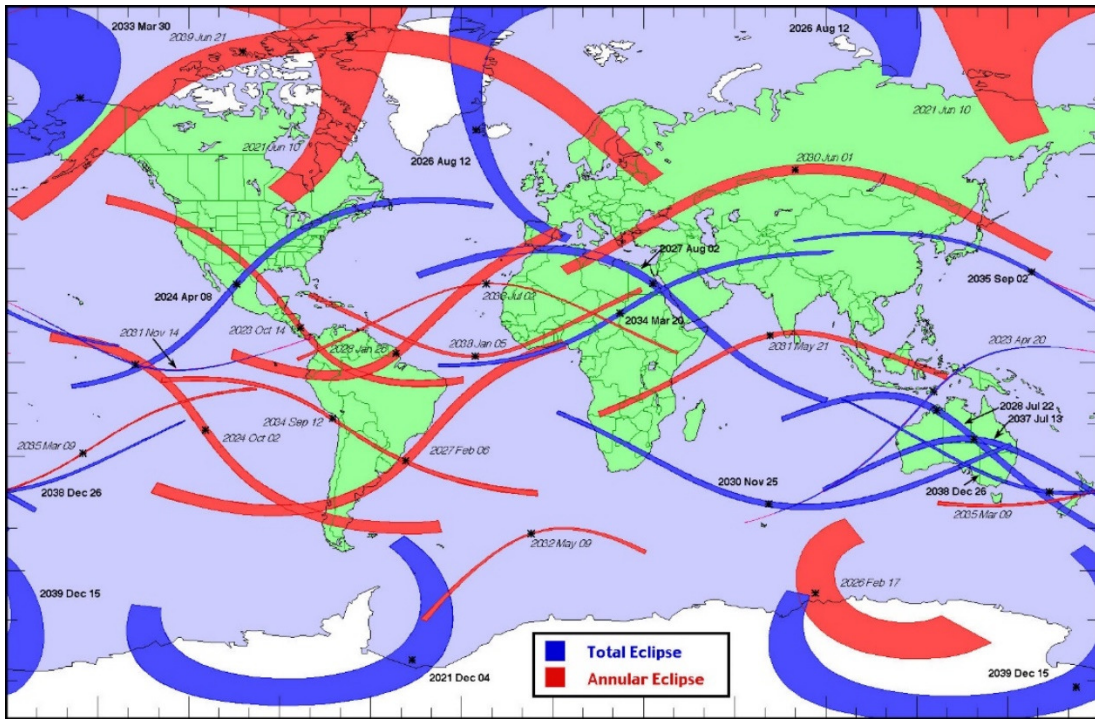


On a alors une éclipse annulaire de Soleil. L'observateur voit alors ce qu'on peut voir sur la figure de droite. La Lune ne cache que le centre du Soleil et il ne reste alors qu'un anneau de Soleil.



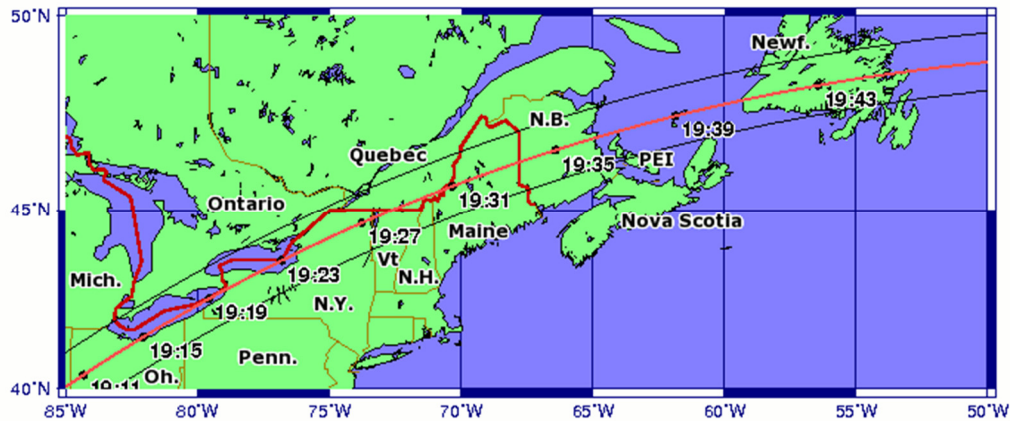
www.savory.de/blog_may_13.htm

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



eclipse.gsfc.nasa.gov/solar.html

Vous notez sûrement 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/

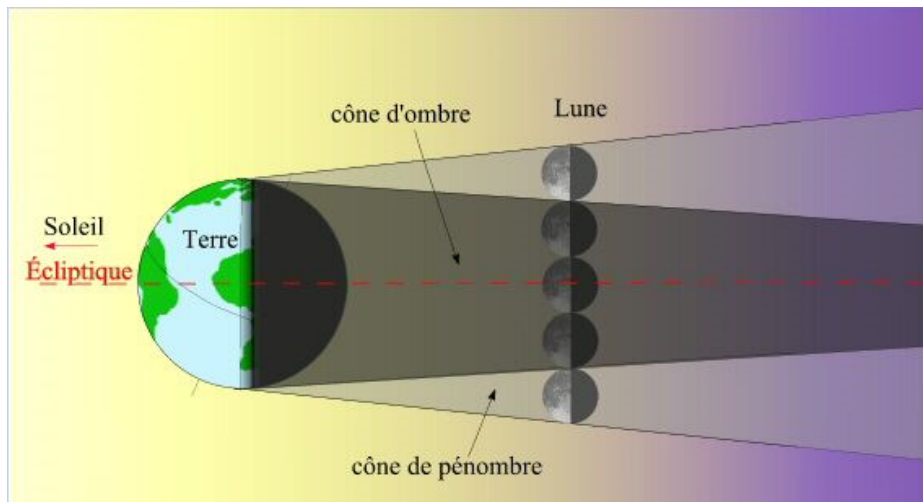
Il ne fallait pas la rater puisque la prochaine éclipse totale visible à partir du Québec sera le 3 mai 2106. Il y en aura une pas trop loin (Nouvelle-Angleterre et Maritimes) le 1er mai 2079. Il y aura toutefois une éclipse annulaire le 23 juillet 2093.

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.

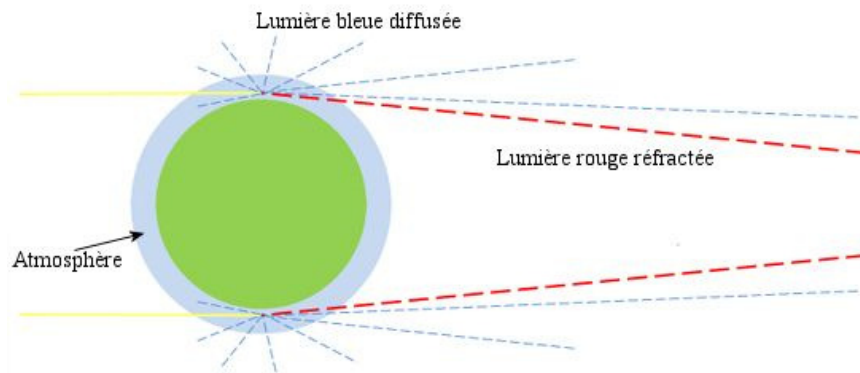
Juste avant que l'éclipse commence, la Lune est nécessairement pleine puisqu'est dans la direction opposée au Soleil vue de la Terre, ce qui veut dire qu'on voit son côté éclairé.

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

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



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



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.

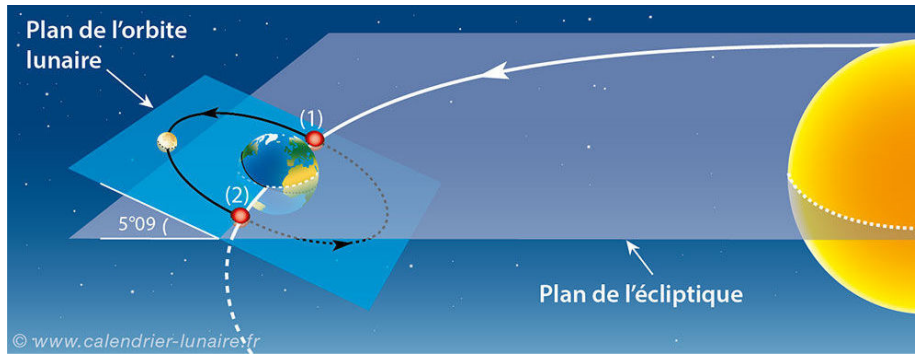
La forme circulaire de l'ombre de la Terre est bien évidente sur cette image. Cette forme circulaire est une autre preuve de la sphéricité de la Terre.



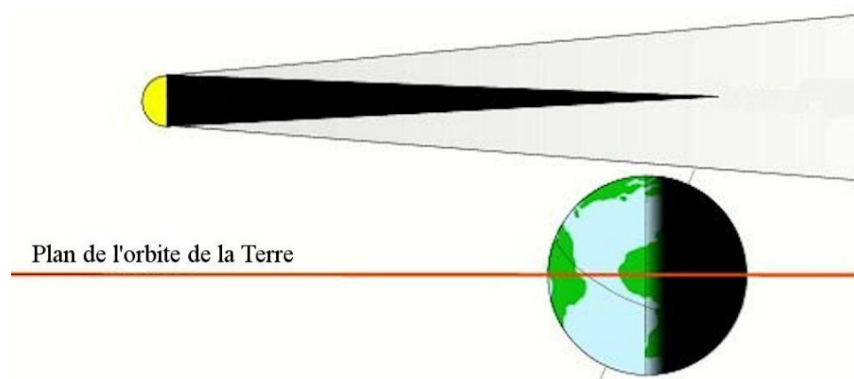
jintle.wordpress.com/2008/08/

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° .

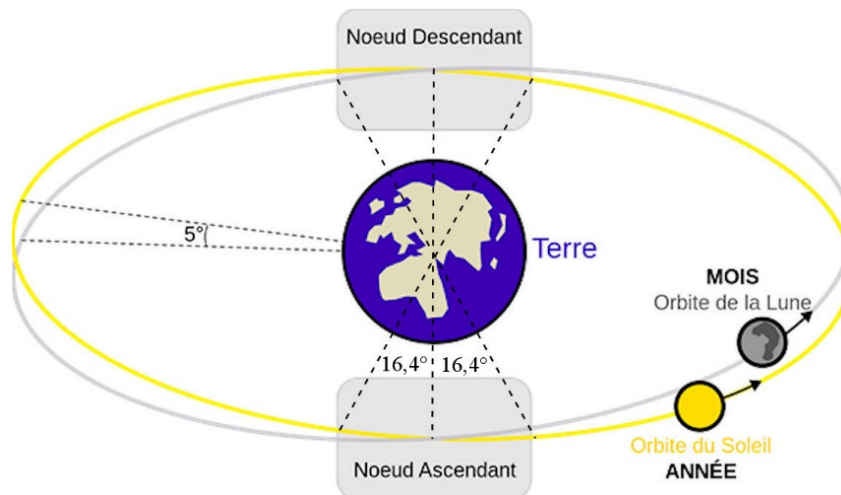


Cela fait que, la plupart du temps, l'ombre de la Lune passe au-dessus de la Terre ou au-dessous de la Terre et qu'il n'y a pas d'éclipse de Soleil.



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.

Pour que l'ombre ou la pénombre touche la Terre, 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 (totale, partielle ou annulaire).



mag.monchval.com/les-eclipses/

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

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 août 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.

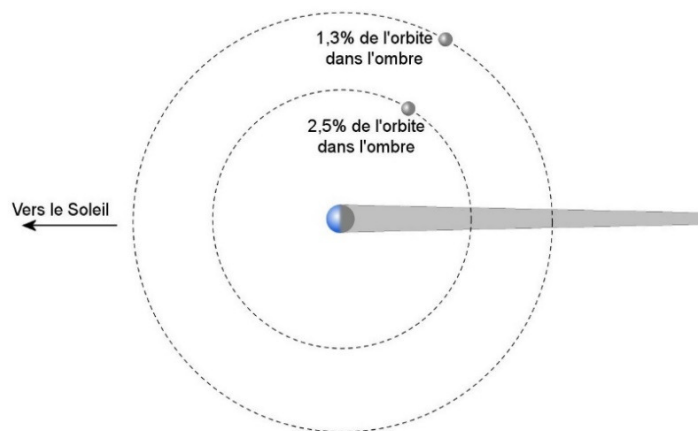
Pour qu'il y ait une éclipse totale ou partielle de Lune, la Lune doit être à moins de $11,3^\circ$ d'un nœud (varie entre $9,8^\circ$ et $11,8^\circ$). Pour qu'il y ait une éclipse totale, la Lune doit être à moins de $4,7^\circ$ d'un nœud (varie entre $4,0^\circ$ et $5,7^\circ$). Comme le temps de 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.

On peut trouver la distance de la Lune parce que cette distance 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

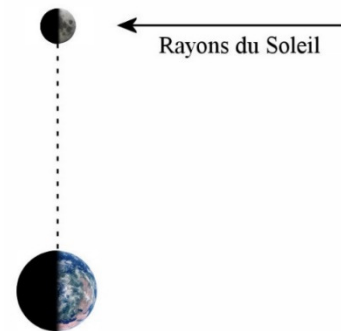


totale, on peut trouver la distance de la Lune. On trouve cette proportion à partir du temps que dure une éclipse par rapport au temps que prend la Lune pour faire le tour de la Terre.

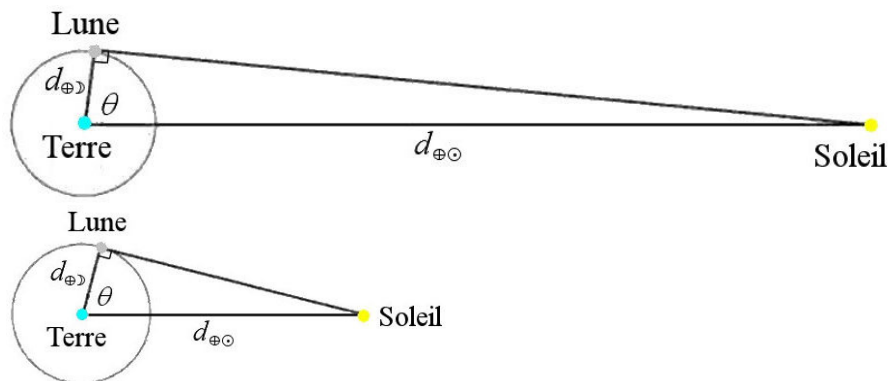
5.9 LA DISTANCE ENTRE LA TERRE ET LE SOLEIL, TROUVÉE GRÂCE À LA LUNE

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). 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

$$\cos \theta = \frac{d_{\oplus\lrcorner}}{d_{\oplus\odot}}$$

Toutefois, cette méthode n'est pas très précise. Une erreur d'angle de $0,05^\circ$ 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.

C'est pourquoi Aristarque de Samos est arrivé à une distance de près de 7 millions de km. Cette distance 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 $0,5^\circ$), les mesures d'Aristarque indiquaient que le diamètre du Soleil devait être 19 fois plus grand que celui de la Lune (en réalité, le Soleil est environ 400 fois plus gros que 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).

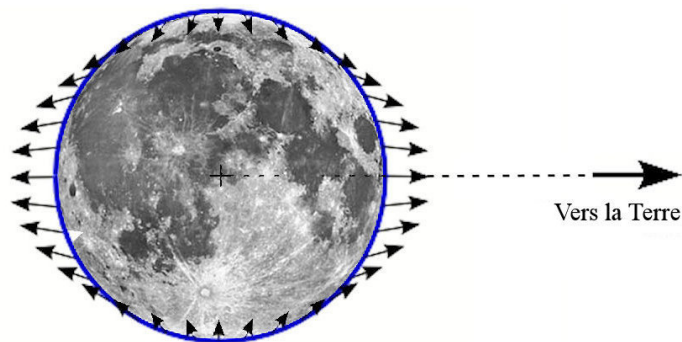
Pendant des siècles (jusqu'au 17^e siècle), c'était la seule méthode connue pour déterminer la distance entre la Terre et le Soleil. Son imprécision fait en sorte qu'elle donna toute sorte de résultats, allant d'un Soleil 19 fois plus loin que la Lune (Aristarque) à un Soleil 216 fois plus loin que la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

5.10 LES MARÉES

Direction de la force de marée

Les marées sont dues au fait qu'un objet ayant une certaine grosseur se retrouve dans un champ gravitationnel qui n'est pas uniforme. C'est le cas de la Lune qui est placée dans un champ gravitationnel non uniforme (celui de la Terre).

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.



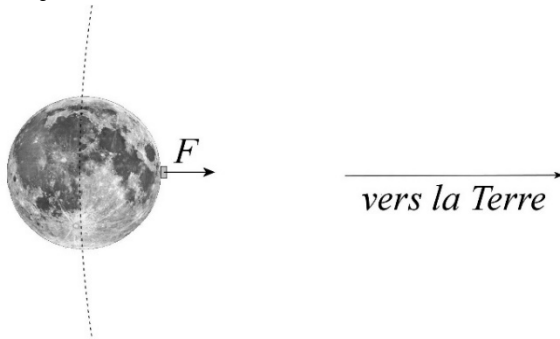
Essayons de comprendre un peu pourquoi il y a de telles forces. Commençons par dire que l'orientation de ces forces

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.

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 que le centre de la Lune, la force centripète nécessaire à ce mouvement est plus petite. En effet, la formule de la force centripète

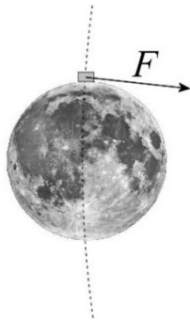
$$F = m \frac{4\pi^2 r}{T^2}$$

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 l'objet. 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. C'est pour ça que la force est opposée à la Terre de ce côté.



→
vers la Terre

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

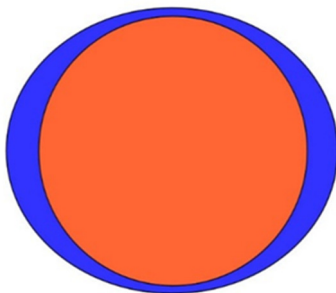
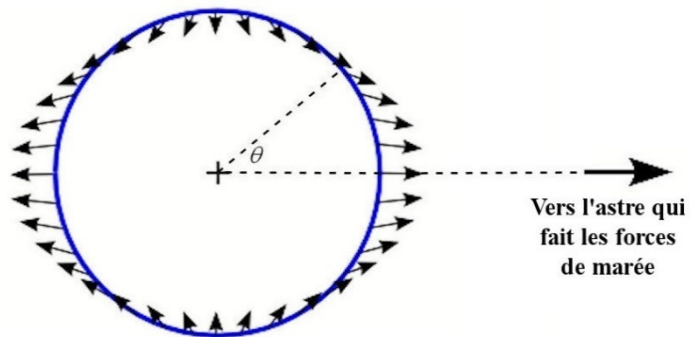
l'objet) est directement vers la droite (vers la Terre), alors que la force de gravitation faite par la Terre a l'orientation montrée sur la figure. Ainsi, sur l'objet, il y a une composante de la force vers la droite qui fait la force centripète et une composante de la force dirigée vers la surface 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 puisque les deux planètes sont en orbite autour du centre de masse du système Terre-Lune.

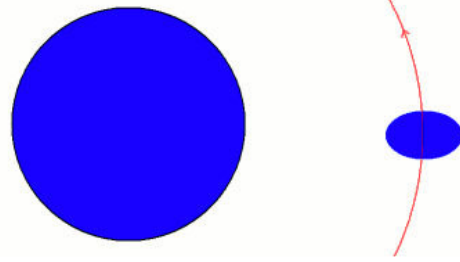
Les déformations faites par les forces de marée

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 apparaître 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).



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

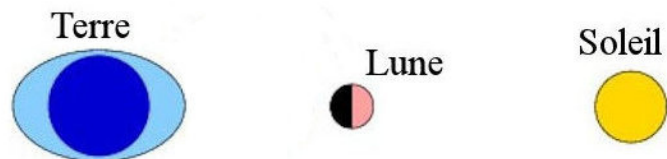
La Terre est assez fluide pour qu'il y ait cette déformation. La partie solide de la Terre est donc un peu allongée par les forces de marée.

Amplitude des marées

Le Soleil et la Lune font tous les deux des bosses de marée. Les calculs montrent que les marées faites par la Lune étirent les océans de 53,5 cm dans la direction de la Lune et que les marées faites par le Soleil étirent les océans de 24,6 cm dans la direction du Soleil.

Les marées faites par chacun de ces astres 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.

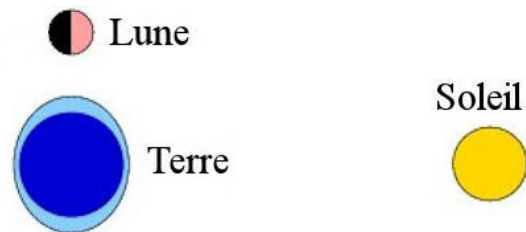
Quand la Lune, la Terre et le Soleil sont alignés (pleine Lune ou nouvelle Lune), les forces de marée faites par la Lune et par le Soleil s'additionnent, ce qui donne une accumulation d'eau importante.



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

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

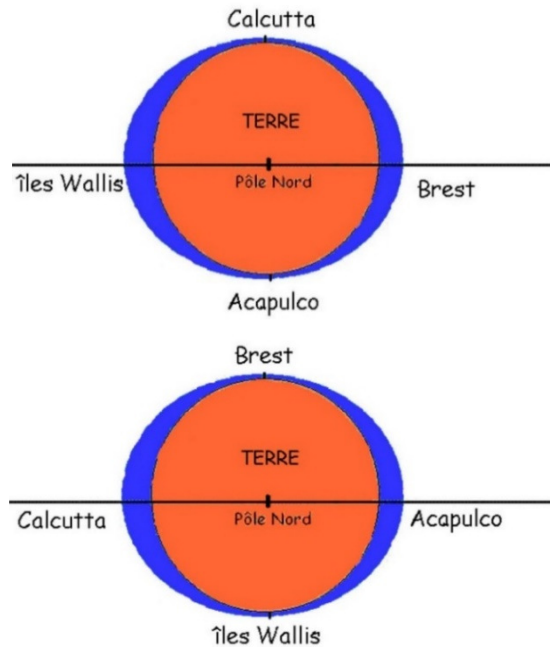
On sait qu'à la surface de la Terre, il y a des régions où l'eau s'accumule et des régions où il y a moins d'eau.

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.

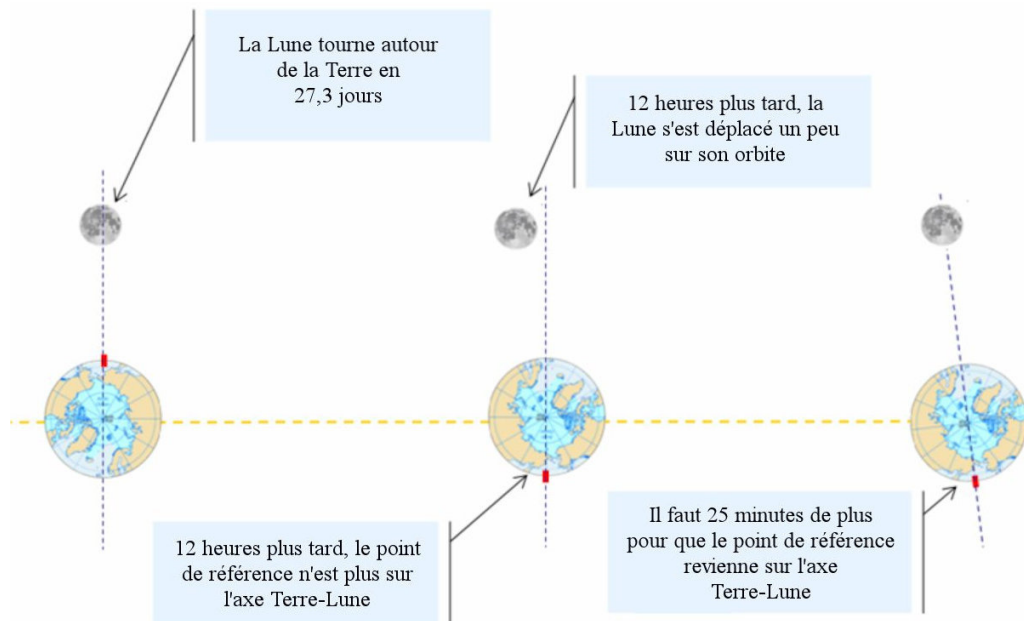
Comme la Terre tourne, on aura la situation montrée à droite 6 heures plus tard. Acapulco est maintenant dans la région où il y a beaucoup d'eau et c'est la marée haute. Brest est maintenant à l'endroit où il y a moins d'eau et c'est la marée basse.

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 heures et 50 minutes parce que la Lune tourne autour de la Terre et change donc d'orientation par rapport à la Terre, comme vous montre cette figure.



tpelesmarees.pagesperso-orange.fr/phenomene_maree.html

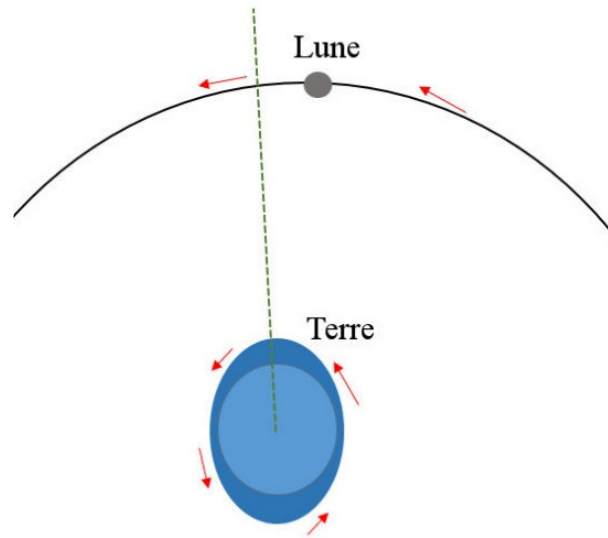


www.je-comprends-enfin.fr/index.php/?Eau-ondes-et-mouvement/eau-terre-lune-soleil-et-marees/id-menu-14.html

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

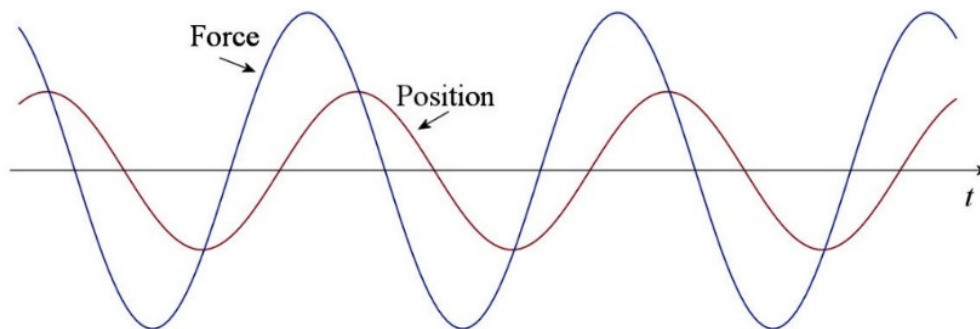
Jusqu'ici, nous n'avons pas tenu compte du déplacement de la Lune et du Soleil et de la rotation de la Terre. Sans ses mouvements, la bosse de marée est parfaitement alignée avec la Lune. Avec les mouvements, les calculs montrent que la bosse de marée n'est plus alignée avec la Lune (figure de droite).



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

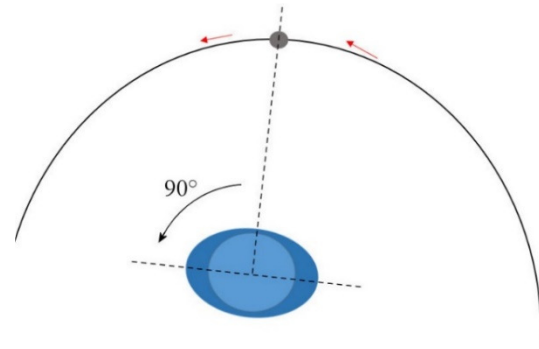
Dans cette théorie, on prend un point de vue dans lequel la Terre est immobile et la Lune tourne autour de la Terre. L'eau est alors un système oscillant soumis à l'action d'une force périodique (la Lune). On a ce qu'on appelle des *oscillations forcées*.

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 sur Terre 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.

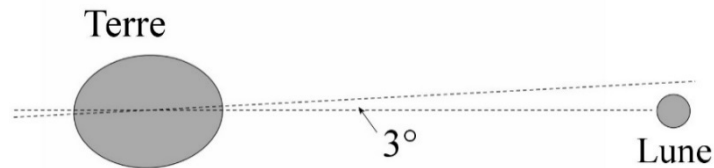
En étudiant les oscillations forcées, on peut trouver ce décalage. Le calcul nous amène à un résultat vraiment surprenant et contrintuitif. Les bosses de marée sont désalignées de presque 90° avec la direction de la Lune !



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.

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.

<http://www.youtube.com/watch?v=5W2sM1Ma7YA>

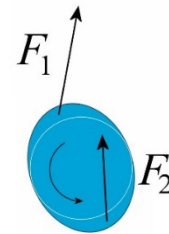
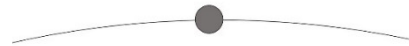
<http://www.youtube.com/watch?v=u3LtEF9WPt4>

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 $1,70 \pm 0,05$ 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 mouvement a une influence sur la période de rotation de la Terre.

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.

Comme le jour durait 86 400 s en 1900 et 86 400,0017 s en 2000, on peut dire que la durée moyenne du jour au 20^e siècle était de 86 400,00085 s (la moyenne des durées au début et à la fin du siècle). On a donc en moyenne un surplus de 0,00085 s chaque jour pendant les 36 525 jours du 20^e siècle. Au total, le retard est donc de

$$\begin{aligned}\Delta t &= 36525 \cdot 0,00085s \\ &= 31s\end{aligned}$$

La somme de toutes les 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 sera de 124 s au bout de 200 ans et de 279 s au bout de 300 ans, on comprend qu'il aurait fallu 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.

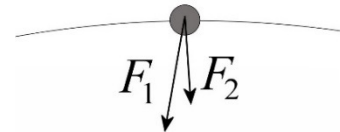
Ralentissement de la rotation de la Lune

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.

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 composante de la force dans le sens de déplacement de la Lune lui permet de gagner de l'énergie et de s'éloigner lentement de la Terre.

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.

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

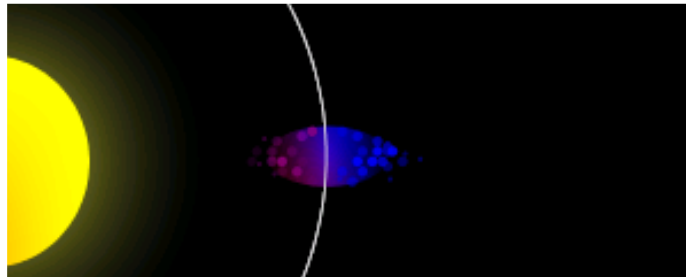
Les forces de marée dissipent beaucoup d'énergie. Dans le cas de la Terre, beaucoup de friction est engendrée par les mouvements des océans et des continents ce qui dégage beaucoup de chaleur. Cette énergie est responsable d'environ 2 % de la chaleur interne de la Terre (estimé à 2×10^{19} J par an comparativement 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.

Édouard Roche fit une analyse de ces forces 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. Il arriva alors à la conclusion que si les densités de la planète et de l'astre sont identiques, la limite de Roche est simplement 2,4 fois le rayon de la planète. Dans le cas de la Terre ($R_p = 6371$ km), cette limite est donc à 15 435 km du centre de la Terre.

Ainsi, si la Lune s'approchait à une distance inférieure à 15 435 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.

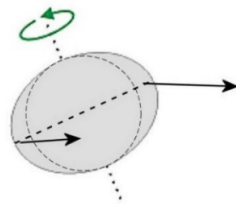
Remarquez que vous êtes actuellement à l'intérieur de la limite de Roche de la Terre. Vous ne vous faites pas déchirer par les forces de marée parce que ce n'est pas la force de gravitation qui garde les cellules de votre corps ensemble, mais plutôt la force électrique. Cette force étant beaucoup plus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

5.11 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.

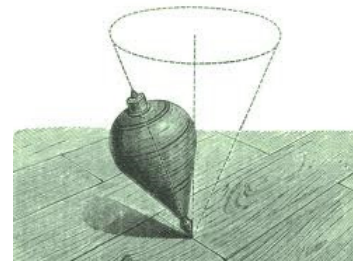


geophysics.ou.edu/solid_earth/notes/precess/

Il y a un 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.

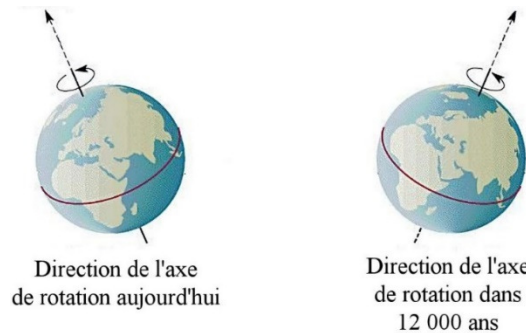
<http://www.youtube.com/watch?v=b3N1MDsZUF0>



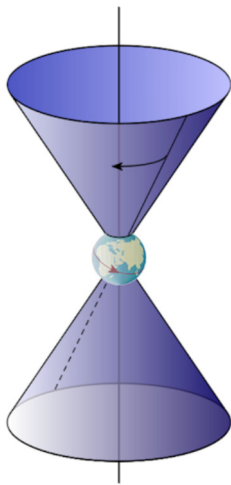
www.cosmovisions.com/CTprecession.htm

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.

<http://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 !

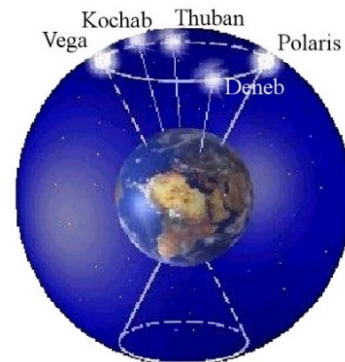
www.mhhe.com/physsci/astronomy/fix/student/chapter3/03f15.html et commons.wikimedia.org/wiki/File:Light_cone_ja.png

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 *nutaton* de la Terre.

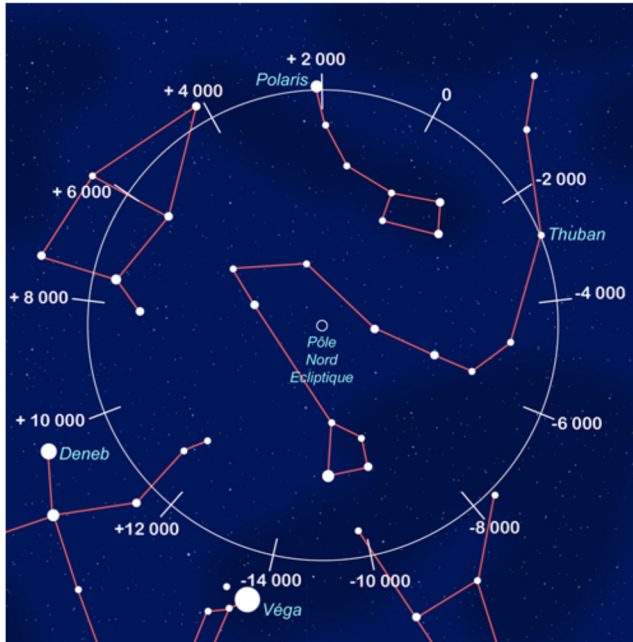
Changement d'étoile polaire

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



members.relia.net/thedane/fyi.html

12 000 ans, ce sera plutôt l'étoile 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 $1,39697^\circ$ 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.



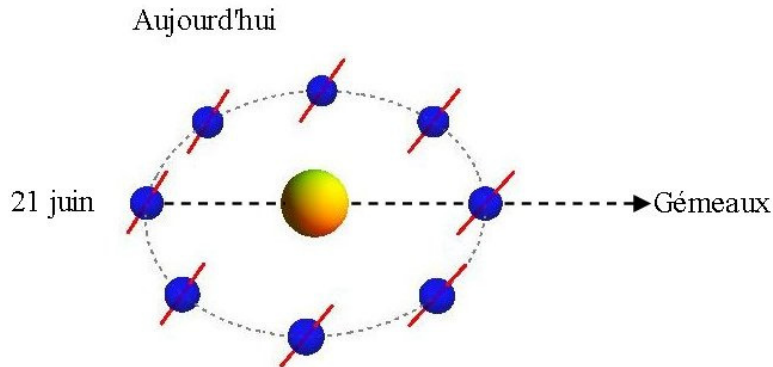
lecielquestions.over-blog.net/article-la-precession-des-equinoxes-65040191.html

Le vidéo suivant reprend ces explications.

<http://www.youtube.com/watch?v=0qHjtp4cdCA>

La précession du début des saisons

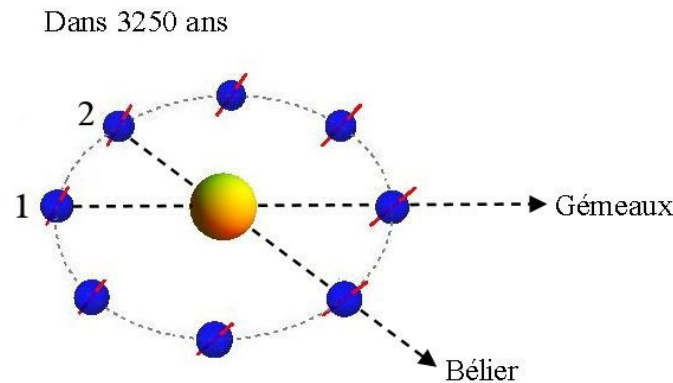
Voici le système Terre-Soleil.



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.

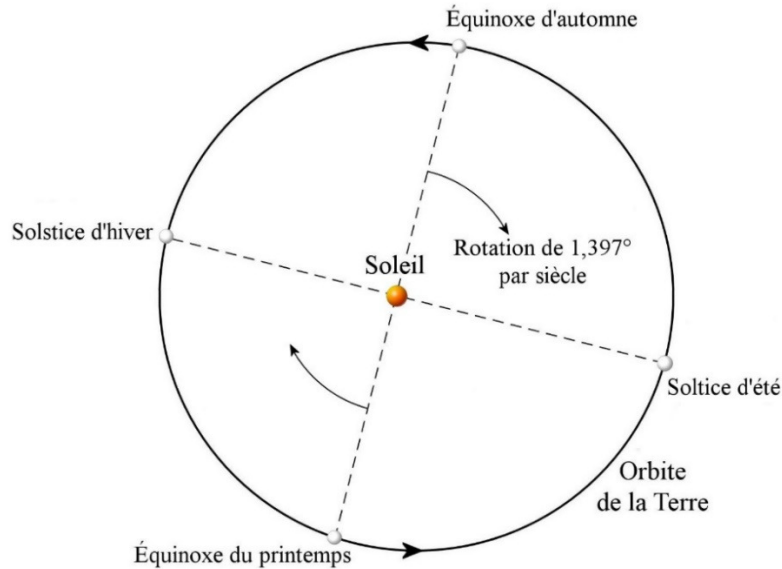
Examinons maintenant comment sera le système Terre-Lune dans 3250 ans, sachant que l'orientation de l'axe de la Terre change. (Observez bien les deux images pour voir le changement d'orientation de l'axe de la Terre.)



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 $1,39697^\circ$ par siècle dans la direction opposée à la rotation de la Terre autour du Soleil. Il faudra donc 25 770 ans avant que l'équinoxe de printemps fasse un tour complet sur l'orbite.

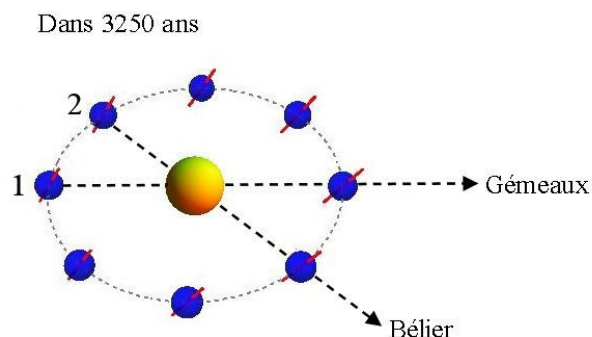
Comme le déplacement se fait dans le sens contraire de la rotation de la Terre, on parle de *précession*. La position de tous les équinoxes et de tous les solstices fait une précession, même si on a donné le nom de *précession des équinoxes* à ce phénomène.



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 jours 5 heures 48 minutes 45,17 secondes. 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 jours 6 heures 9 minutes 9,75 s. 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 45,17 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.

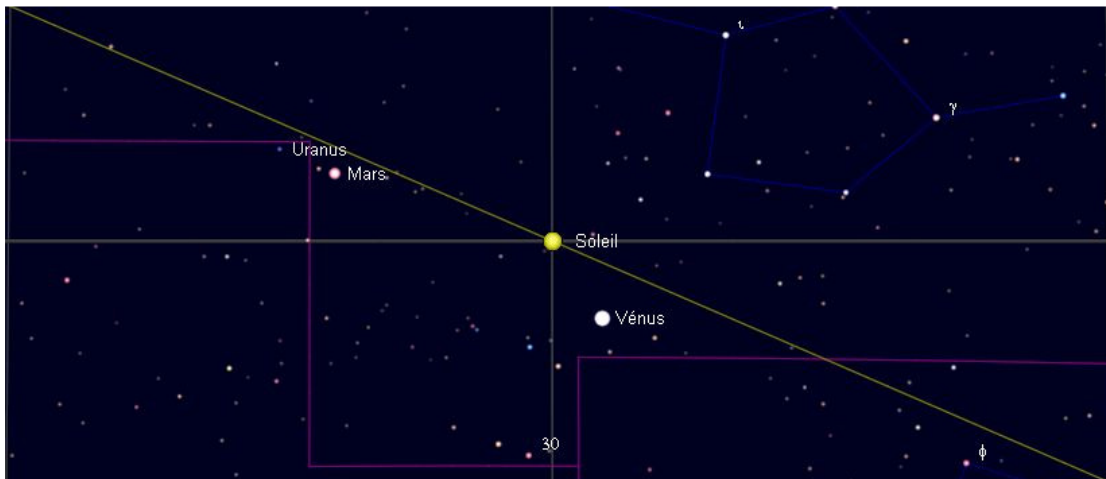
Le fait que notre calendrier suive l'année tropique veut dire qu'en ce moment, la Terre est à la position 1 sur la figure le 21 juin, mais que le 21 juin sera à position 2 dans 3250 ans. (Comme notre calendrier suit les saisons, l'été commencera toujours aux alentours du 21 juin.) À la position 1, ce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



Le point vernal dans le ciel

La figure précédente montre que le Soleil est en face de la constellation des Gémeaux le 21 juin en ce moment alors qu'il sera en face de la constellation du Bélier à la même date dans 3250 ans. Cela signifie que si on observe bien les étoiles et le Soleil, on verra que la position du Soleil par rapport aux étoiles à une certaine date décale lentement avec le temps. On avait dit au chapitre 2 que, vu de la Terre, le Soleil revient toujours devant les mêmes étoiles à la même date. On voit maintenant que cela n'était pas tout à fait vrai.

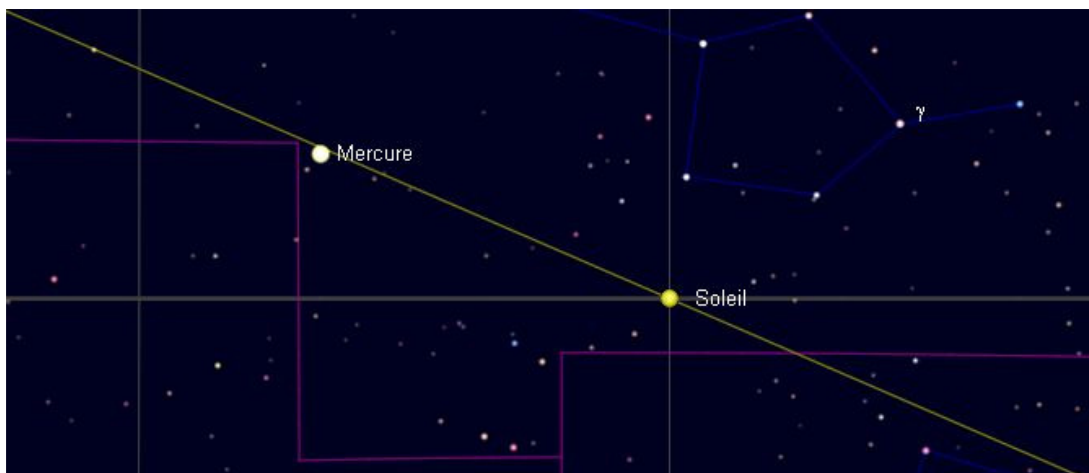
Par exemple, voici la position du Soleil devant les étoiles le 20 mars 2013 à 11 h 1 min 55 s UT (Heure universelle = heure de Londres).



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). On se rappelle que la position du Soleil dans le ciel au début du printemps s'appelle le point vernal. En 2013, ce 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 $4,19^\circ$ en 300 ans ($1,39697^\circ$ 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.

Le changement de coordonnées des étoiles

Le point vernal est le point de référence pour la mesure de l'ascension droite (mesure utilisée, avec la déclinaison, pour donner la position d'une étoile dans le ciel). 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.

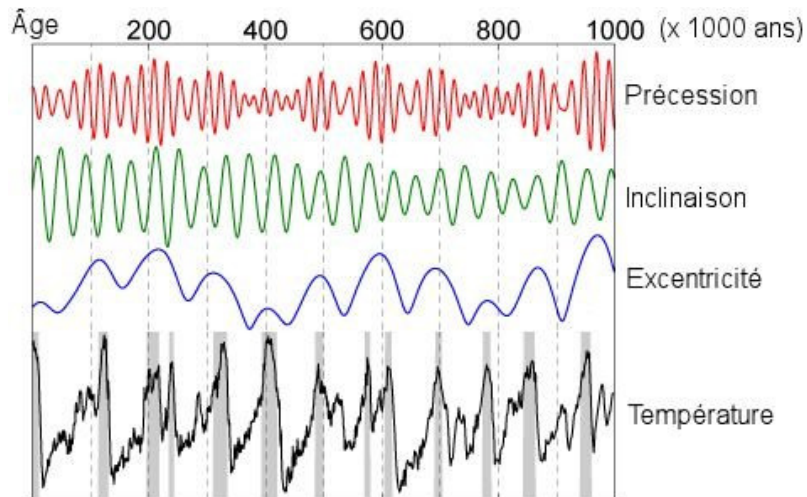
Constellation	Date
Capricorne	19 janvier – 15 février
Verseau	16 février – 11 mars
Poissons	12 mars – 18 avril
Bélier	19 avril – 13 mai
Taureau	14 mai – 20 juin
Gémeaux	21 juin – 20 juillet
Cancer	21 juillet – 9 août
Lion	10 août – 16 septembre
Vierge	17 septembre – 30 octobre
Balance	31 octobre – 22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

5.12 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 est de $1,62 \text{ N/kg}$ et la température moyenne est de $0 \text{ }^\circ\text{C}$. C'est la température moyenne, mais il peut y avoir de grandes variations de température. En effet, la température sur la Lune varie entre $-173 \text{ }^\circ\text{C}$ et $117 \text{ }^\circ\text{C}$.

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-crateres-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.

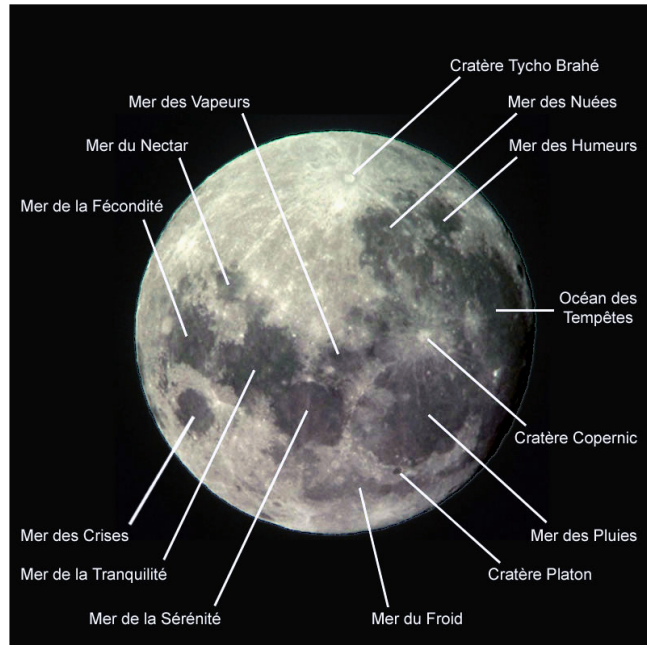


www.orlandosentinel.com/space/apollo-11-anniversary/os-ne-apollo-11-memory-018-20190720-mkguhoxrcvffboz36yddlkjnvu-story.html

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*.

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.



fr.wikipedia.org/wiki/Liste_des_mers_lunaires

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 croûte moins dense flottait sur le magma plus dense. Cette croûte 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 remplis 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.

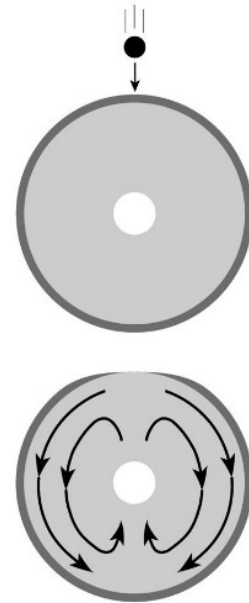
Voici un petit film qui résume l'évolution de la surface de la Lune et qui montre comment ces mers se sont créées.

<http://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 croûte 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 2^e 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 croûte 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. Comme la vitesse de libération est de seulement 2375 m/s, pratiquement tous les gaz peuvent s'échapper dans l'espace.

Inutile d'apporter beaucoup d'air sur la Lune pour faire une atmosphère, elle se perdrait dans l'espace.

5.13 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

$$\bar{\rho} = \frac{M}{Vol} = \frac{7,34 \times 10^{22} \text{ kg}}{\frac{4}{3} \pi (1,737 \times 10^6 \text{ m})^3} = 3344 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

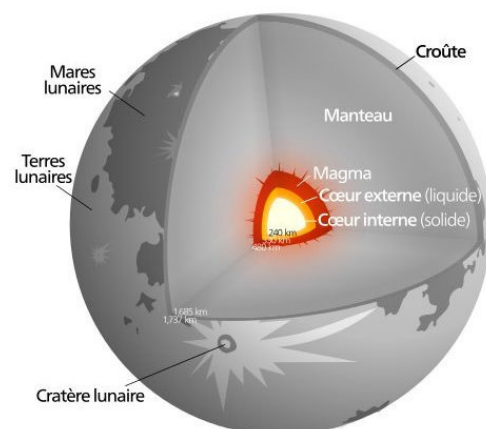
Cependant, la densité moyenne de la Terre est de

$$\bar{\rho} = \frac{M}{Vol} = \frac{5,972 \times 10^{24} \text{ kg}}{\frac{4}{3} \pi (6,371 \times 10^6 \text{ m})^3} = 5513 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

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.

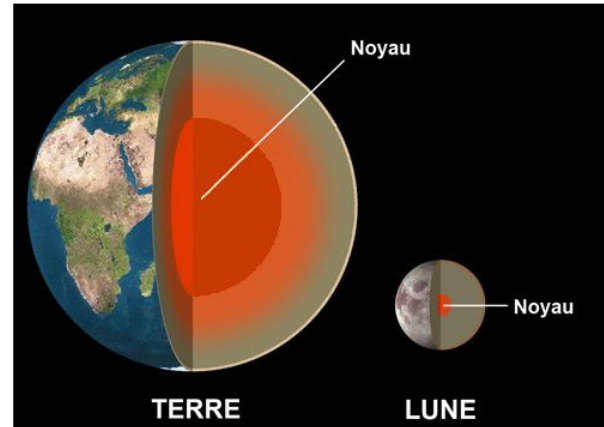
Cette différence de densité provient sans doute d'un noyau métallique proportionnellement plus petit pour la Lune. La densité du métal étant plus grande que celui des roches, la densité moyenne de la planète diminue si le noyau est proportionnellement plus petit. On aurait donc la structure montrée à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

En 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.



en.wikipedia.org/wiki/Moon

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.

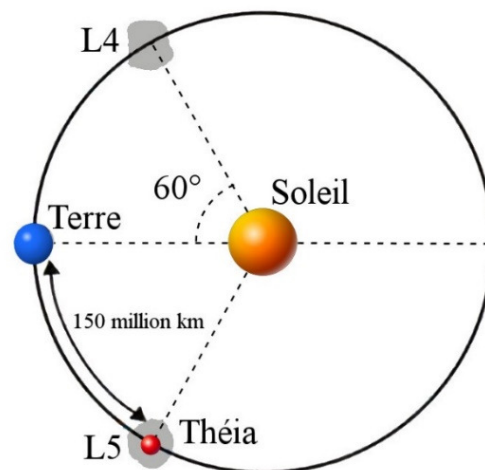


herboyves.blogspot.ca/2012_11_04_archive.html

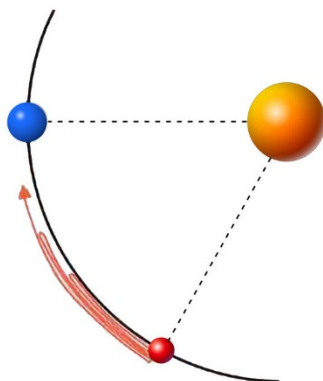
Une origine particulière

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.

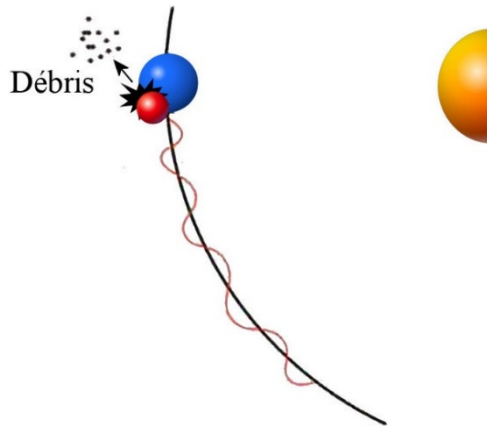


Il y a toutefois une limite à la masse de la planète qui peut être à ces points de Lagrange. Si la masse dépasse une masse critique, la position devient instable et la planète commence à faire des oscillations.

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'impact_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_\(impacteur\)](https://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 croûte des deux planètes, se seraient par la suite regroupés pour former la Lune. Puisque ces débris proviendraient surtout du manteau et de la croûte, 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=PnhfL7-I3I>