

La Lune éclaire nos nuits

Dossier pour cycle 3 et cycle 4



Département Éducation et Formation
educ-formation@universcience.fr

Avril 2020

Sommaire

I	Les phases de la Lune	4
II	L'aspect de la Lune en fonction de la saison et de la latitude	
	II.1 Rappels	7
	II.2 Visibilité des planètes à l'œil nu	7
	II.3 L'écliptique et les constellations du zodiaque	7
	II.4 Inclinaison de l'écliptique sur l'horizon	9
III	La hauteur de la Lune	10
IV	Les lois de Kepler et l'orbite de la Lune	10
	IV.1 Première loi de Kepler	11
	IV.2 Deuxième loi de Kepler	15
	IV.3 Troisième loi de Kepler	16
V	Les librations	17
	V.1 Libration en longitude	17
	V.2 Libration en latitude	17
	V.3 Libration diurne	18
	V.4 Libration physique	18
VI	Quelques périodes importantes	
	VI.1 Période sidérale	19
	VI.2 Période synodique	19
	VI.3 Période anomalistique	20
	VI.4 Période draconitique	20
VII	Les calendriers lunaires	
	VII.1 Rappels sur les calendriers solaires	21
	VII.2 Principes des calendriers lunaires	22
	VII.3 Le calendrier musulman	22

VIII	Les éclipses de Soleil et de Lune	25
	VIII.1 Quelques rappels astronomiques	26
	VIII.2 Description d'une éclipse de Soleil	27
	VIII.3 Description d'une éclipse de Lune	29
IX	Les marées océaniques	31
X	Éléments de sélénographie	34
XI	L'exploration de la Lune	37
	XI.1 Les missions <i>Apollo</i> du programme américain	37
	XI.2 Les « premières » du programme soviétique	40
	XI.3 Exploration récente et future	42
	XI.4 Quel est aujourd'hui l'intérêt d'explorer la Lune ?	43
XII	Un scénario possible de formation de la Lune	44
XIII	L'âge des terrains lunaires	
	XIII.1 Datation absolue par désintégrations radioactives	45
	XIII.2 Datation relative	45

Comme nous l'avons toutes et tous appris à l'école ou auprès de nos parents, la Lune est le satellite naturel de la Terre. Comme les planètes, c'est un corps opaque. Elle n'est observable que parce qu'elle réfléchit la lumière solaire qui lui parvient. C'est le seul corps extraterrestre à avoir été visité par l'Homme. Elle effectue un tour sur elle-même dans le même temps qu'elle fait un tour autour de la Terre. Aussi n'en voyons-nous qu'une seule face. Environ quatre-vingts moins massive que notre planète, elle tourne autour d'elle en un peu moins d'un mois, à la distance moyenne de 384 400 km. On peut aujourd'hui mesurer cette distance au centimètre près. La Lune n'a pas d'atmosphère stable, aussi les températures annoncées dans le tableau suivant sont-elles les températures en surface.

Données physiques et orbitales

Propriétés	La Lune
Distance moyenne à la Terre	384 400 km
Période de révolution	27 j 8 h
Période de rotation	27 j 8 h
Diamètre équatorial	3 476 km
Masse	$7,35 \cdot 10^{22}$ kg
Densité par rapport à l'eau	3,34
Température	Min. : - 230 °C, max. : 120 °C

À titre de comparaison

La Terre	Mercure
-	-
-	-
23 h 56 min	58 j 16 h
12 756 km	4 879 km
$5,97 \cdot 10^{24}$ kg	$3,30 \cdot 10^{23}$ kg
5,52	5,43
Min. : - 90 °C, max. : 57 °C	Min. : - 190 °C, max. : 430 °C

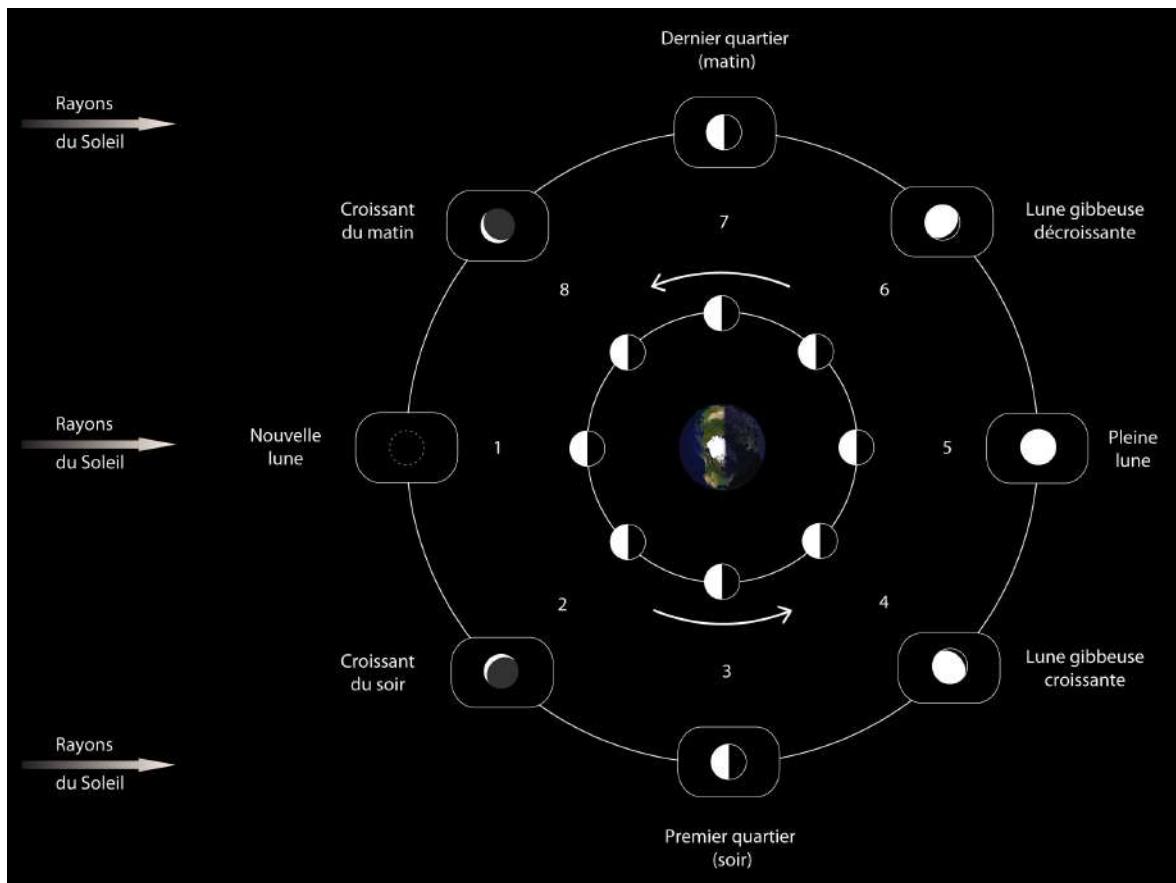
I Les phases de la Lune

À chaque instant, un hémisphère de la Lune est éclairé par le Soleil. Notez bien que ce n'est jamais le même. Toute la surface lunaire voit le Soleil à un moment où à un autre !... à part, peut-être, le fond de certains cratères polaires, mais ceci est une autre histoire.

En raison du mouvement de la Lune autour de la Terre, **les positions relatives du Soleil, de la Terre et de la Lune changent en permanence**. Puisque la Lune n'est observable que parce qu'elle réfléchit la lumière du Soleil, **la seule partie de la Lune visible par un observateur terrestre est celle orientée à la fois vers la Terre et vers le Soleil**.

La ligne qui sépare la partie éclairée et la partie non éclairée s'appelle le **terminateur**. Elle a la forme d'une demi-ellipse, sauf lorsque la Lune est en quartier : le terminateur est alors un segment de droite. La convexité de cette ellipse est tournée vers le Soleil. **La droite perpendiculaire à la ligne des cornes est toujours dirigée selon le grand cercle qui passe par les centres de la Lune et du Soleil** – un grand cercle de la sphère céleste est le plus grand cercle qui peut être tracé sur elle. L'horizon, l'équateur céleste, l'écliptique et les méridiens célestes en sont des exemples.





Position 1

La Lune se trouve dans la direction du Soleil, à qui, bien évidemment, elle présente sa face éclairée. Elle présente son côté nuit à la Terre ; par conséquent, elle est inobservables. C'est la **nouvelle lune**.

Position 2

Entre 3 et 4 jours après la nouvelle lune, notre satellite s'est suffisamment écarté de la direction du Soleil pour être bien visible en soirée sous la forme d'un **premier croissant**. On remarque que le reste du globe lunaire est observable, quoique moins lumineux. Ce phénomène s'appelle la **lumière cendrée**. Il s'agit de la lumière solaire incidente ayant subi une première réflexion sur la Terre et illuminant le côté nuit de la Lune.

Position 3

Environ une semaine après la nouvelle lune, notre satellite se trouve à 90° à l'est du Soleil, vu depuis la Terre, et se présente à nous sous la forme d'une demi-Lune ; c'est le **premier quartier**, bien visible en soirée et en première partie de nuit. Il se couche approximativement 6 h après le Soleil.

Position 4

La phase lunaire est plus grande qu'un premier quartier mais ce n'est pas encore la pleine lune. La Lune nous apparaît "bossue", on parle de **lune gibbeuse**. Ici, nous sommes en phase de lune gibbeuse croissante, puisque sa phase va en augmentant.

Position 5

Environ une semaine après le premier quartier, soit deux semaines après la nouvelle lune, notre satellite se trouve à l'opposition, dans la direction opposée au Soleil, à 180° de lui vu depuis la Terre. Nous voyons alors l'intégralité de son hémisphère éclairé, c'est la **pleine lune**. Visible toute la nuit, la pleine lune se lève au moment où le Soleil se couche et se couche au moment où le Soleil se lève. À cause de son éclat, la pleine lune est extrêmement gênante et constitue une véritable source de pollution lumineuse, au même titre que les halos des grandes villes. On estime qu'un millier d'étoiles disparaissent du ciel lorsque la Lune est pleine.

Position 6

C'est la lune gibbeuse décroissante.

Position 7

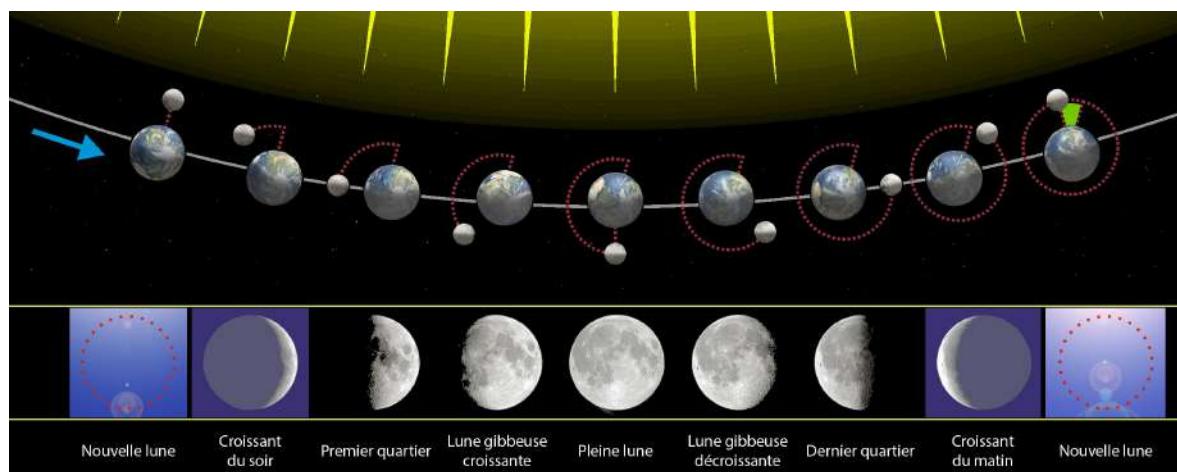
Environ trois semaines après la nouvelle lune, notre satellite se trouve à 270° à l'est du Soleil, soit à 90° à l'ouest de celui-ci. Il se présente à nous sous la forme d'une demi-Lune ; c'est le **dernier quartier**, qui se lève en seconde partie de nuit, approximativement 6 h avant le Soleil.

Position 8

Plus les jours passent, plus l'intervalle de temps entre le lever de la Lune et le lever du Soleil diminue. Nous sommes maintenant entre 3 et 4 jours avant la nouvelle lune et notre satellite est visible le matin sous la forme d'un **dernier croissant**, là aussi nimbé de sa lumière cendrée.

Environ un mois après la nouvelle lune, on retourne dans la position 1, et ainsi de suite.

Notons que la Lune est tellement brillante qu'on peut la voir sans problème en plein jour, lorsque les conditions le permettent. Le schéma suivant résume ce que nous venons de voir.



II L'aspect de la Lune en fonction de la saison et de la latitude

II.1 Rappels

Le système solaire est constitué d'**une** étoile, le Soleil, autour de laquelle gravitent **huit planètes**, leurs **satellites**, des **planètes naines** et des **milliards de petits corps** (astéroïdes, comètes, poussières). Les **planètes telluriques**, à surface solide, proches du Soleil sont, par ordre de distance à notre étoile, Mercure, Vénus, la Terre et Mars. Les **planètes géantes et gazeuses**, plus éloignées, sont Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune.

La Terre est animée de plusieurs mouvements, les deux principaux étant sa **rotation d'ouest en est autour de l'axe des pôles** en 23 h 56 min 4 s (*grossost modo* une journée), le second étant sa **révolution autour du Soleil** en 365 j 6 h 9 min 10 s si on la mesure par rapport aux étoiles (*grossost modo* un an). Le premier mouvement a pour conséquence le **mouvement diurne**, qui emporte la voûte céleste dans une rotation d'est en ouest autour d'un axe passant près de l'étoile Polaire et fait faire à cette voûte un tour complet en 23 h 56 min 4 s... Soleil compris. Le second a pour conséquence le **mouvement annuel**, un léger glissement quotidien du Soleil vers l'est, à hauteur de 1° par jour. En un an, la trajectoire du Soleil définit un grand cercle sur la sphère céleste que les astronomes appellent l'**écliptique**.

II.2 Visibilité des planètes à l'œil nu

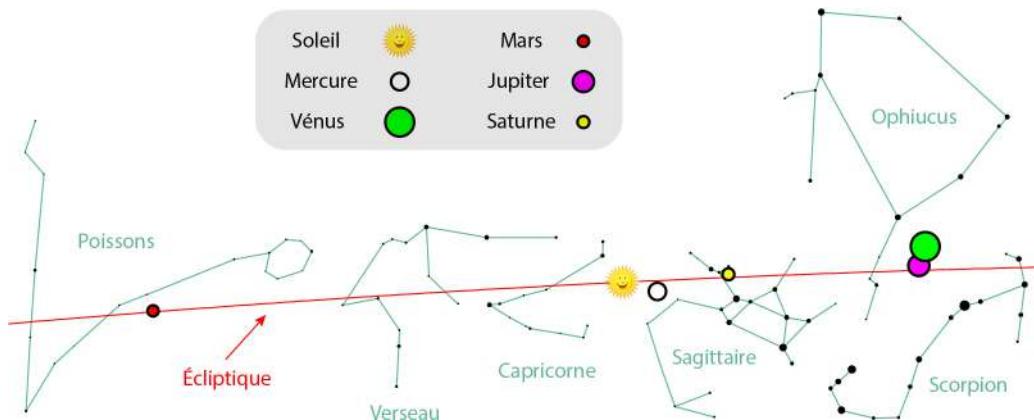
Cinq des huit **planètes sont visibles** sans difficulté à l'**œil nu**. Elles font même partie des objets les plus lumineux du ciel nocturne. Il s'agit de Mercure, Vénus, Mars, Jupiter et Saturne.

Dès l'Antiquité, les anciens ont fait la différence entre *étoile* et *planète* : les étoiles restent fixes les unes par rapport aux autres au fil des années, alors que les planètes se déplacent à travers les champs d'étoiles. D'ailleurs, en ancien grec, πλανήτης αστέρ (planêtēs astér) signifiait « astre errant, astre vagabond ». Certaines planètes sont rapides (Mercure, Vénus) et leur mouvement par rapport aux étoiles est aisément perceptible d'un jour sur l'autre. D'autres planètes comme Jupiter et Saturne sont beaucoup plus lentes. Quelques jours à quelques semaines d'observation suffisent toutefois à prouver leur nature planétaire. La vitesse de déplacement des planètes dépend de leur distance au Soleil, les plus proches étant les plus rapides.

II.3 L'écliptique et les constellations du zodiaque

De même, on s'est rapidement aperçu que le Soleil, la Lune et les planètes ne se déplacent pas n'importe où dans le ciel, mais uniquement devant les **constellations du zodiaque**. Sur la sphère céleste, celles-ci forment une bande d'une quinzaine de degrés d'épaisseur centrée sur l'écliptique. Attention à ne pas confondre *constellation du zodiaque* et *signe du zodiaque* ! Il existe douze signes, ayant tous la même largeur (30°), mais treize constellations du zodiaque, de largeurs inégales et qui ne coïncident pas avec les signes. À titre d'exemple, au niveau de l'écliptique, la constellation du Scorpion n'a que 6,5° de largeur contre 45° pour la Vierge ! La treizième constellation du zodiaque se situe entre le Scorpion et la Sagittaire et se nomme Ophiucus. Elle est traversée par le Soleil entre le 30 novembre et le 17 décembre.

Ainsi, vues depuis la Terre, les planètes, le Soleil et la Lune sont toujours plus ou moins alignés (voir schéma ci-dessous). Il n'y a rien d'étonnant à cela : prenez du recul et imaginez les planètes tournant autour du Soleil. Toutes tournent quasiment dans le même plan, plan auquel la Terre appartient. Il porte le nom de *plan de l'écliptique*. L'intersection de ce plan avec la sphère céleste n'est autre que l'écliptique, que nous avons déjà rencontré.



Configuration du ciel le 21 mars 2019. Le Soleil, la Lune et les planètes visibles à l'œil nu sont pratiquement alignés sur l'écliptique. Notez que Vénus et Jupiter se trouvent alors dans la treizième constellation du zodiaque, Ophiucus. La Lune, dans la constellation du Cancer, n'est pas montrée ici. Les disques représentant les planètes ont des surfaces proportionnelles à la luminosité de celles-ci.

Une **carte du ciel** fournit l'aspect du ciel visible à un instant donné pour une latitude donnée et la position des constellations. Comparez ce qui figure sur la carte à ce que voyez là-haut. Si, dans les constellations du zodiaque, apparaît un point au moins assez brillant qui ne figure pas sur la carte, c'est certainement une planète. En effet, on n'indique jamais les planètes (ni la Lune d'ailleurs) sur les cartes du ciel ! La raison en est simple : les planètes se déplacent, il faudrait créer une nouvelle carte pour chaque jour... Pour vérifier que l'astre que vous soupçonnez être une planète en est bien une, il vous suffit de l'observer nuit après nuit. S'il se déplace par rapport aux étoiles, il s'agit bien d'une planète !



La célèbre carte du ciel du regretté Pierre Bourge (1921 – 2013).

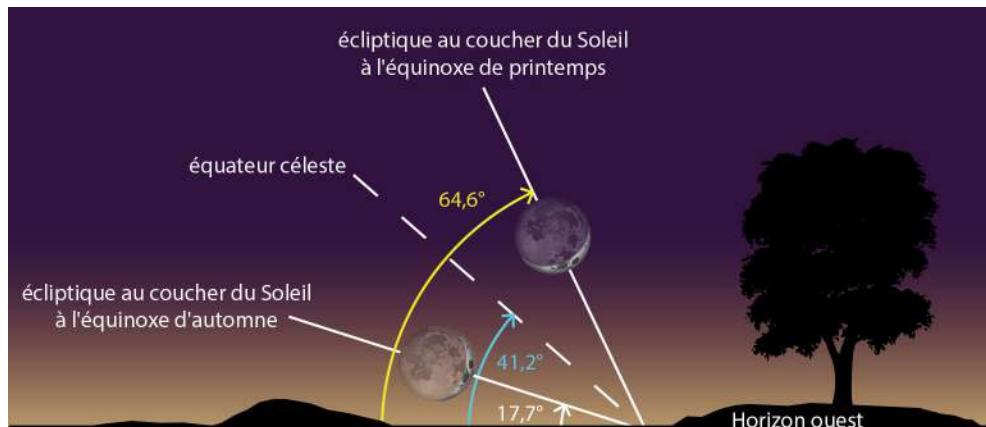
Un grand classique !

II.4 Inclinaison de l'écliptique sur l'horizon

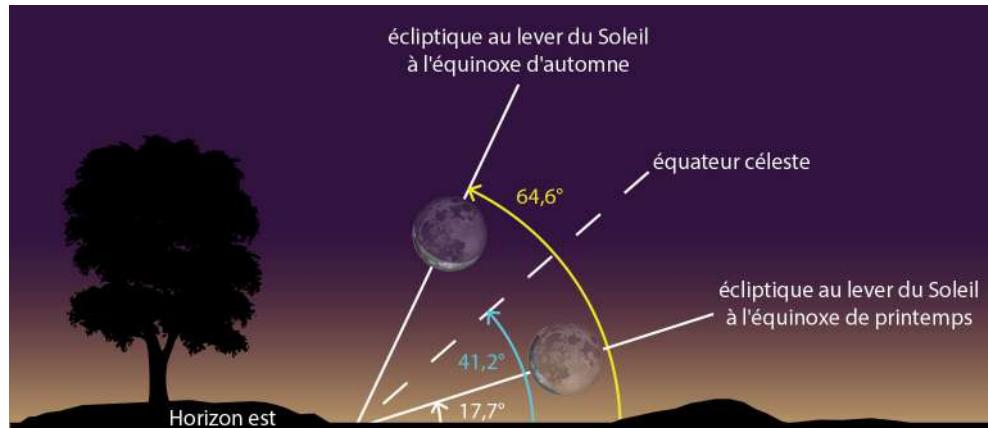
Nous savons que la Terre ne tourne pas « droite » autour du Soleil. Son axe de rotation est incliné d'environ $23,5^\circ$ par rapport à la perpendiculaire au plan de son orbite. En d'autres termes, l'écliptique et la projection du plan de l'équateur sur la sphère céleste – l'**équateur céleste** – forment un angle de $23,5^\circ$. Tous deux sont emportés par le mouvement diurne mais, à la différence de l'équateur céleste qui est invariant par cette transformation, l'écliptique, lui, voit sa position modifiée en permanence. Conséquence : il est plus ou moins incliné sur l'horizon. Ceci est d'une importance primordiale pour qui souhaite observer les planètes et de la Lune quand elles ne sont pas très éloignées de la direction du Soleil.

Prenons deux exemples :

1. Nous sommes à Paris, non loin de l'équinoxe de printemps, en soirée. C'est à ce moment que l'écliptique est le plus incliné – *relevé* – sur l'horizon ouest. L'angle formé entre l'écliptique et l'horizon ouest s'élève à près de 65° . Les conditions d'observation sont alors très favorables. Si la planète Vénus atteint son élévation maximale orientale à cette période, nous la verrons trôner à une bonne quarantaine de degrés de hauteur, immanquable par son éclat. Si la Lune est en premier croissant, elle sera également haute dans le ciel occidental, presque sous la forme de barque (ou d'un sourire) puisque « *la droite perpendiculaire à la ligne des cornes est toujours dirigée selon le grand cercle qui passe par les centres de la Lune et du Soleil* ». De telles conditions favorables se rencontrent aussi au début de l'automne, le matin vers l'est.
2. Nous sommes toujours à Paris, mais cette fois non loin de l'équinoxe d'automne, en soirée. L'écliptique est alors peu incliné sur l'horizon ouest ; l'angle formé entre les deux cercles n'atteint même pas 18° ! Dans des conditions similaires à celles du premier point, Vénus et la Lune sont basses. De plus, la Lune ne ressemble plus de tout à une barque : elle est droite et semble reposer sur sa corne inférieure. Des conditions aussi défavorables se présentent au début du printemps, le matin vers l'est.



Au coucher du Soleil, à Paris, le premier croissant de Lune se trouve dans les meilleures conditions d'observation au début du printemps.



Au lever du Soleil, à Paris, le dernier croissant de Lune se trouve dans les meilleures conditions d'observation au début de l'automne.

L'inclinaison de l'écliptique sur l'horizon est également fonction de la latitude du lieu d'observation. Entre le tropique du Cancer dans l'hémisphère nord et le tropique du Capricorne dans l'hémisphère sud, l'écliptique est perpendiculaire à l'horizon deux fois par jour vers l'est et deux fois par jour vers l'ouest. C'est donc dans les zones intertropicales que se rencontrent les meilleures conditions d'observation du croissant lunaire et des planètes inférieures (Mercure et Vénus), toujours peu éloignées de la direction du Soleil.

III La hauteur de la Lune

Avez-vous déjà remarqué qu'en hiver, la pleine lune culmine haut dans le ciel et qu'au contraire, en été, elle est très basse ?

L'explication en est simple : en été, le Soleil est haut dans le ciel, il occupe la partie de l'écliptique située au-dessus de l'équateur céleste. Puisque la Lune est pleine, elle se trouve dans la direction opposée au Soleil sur l'écliptique, donc dans la partie située sous l'équateur céleste. La pleine lune d'été est basse ! Un raisonnement similaire mène à la conclusion qu'en hiver, la pleine lune est haute. En fait, elle occupe la position qu'occupait le Soleil six mois plus tôt.

De même, le premier quartier monte haut dans le ciel au début du printemps mais bas dans le ciel au début de l'automne, car il occupe la position qu'occupera le Soleil... trois mois plus tard.

Pareillement, le dernier quartier monte haut dans le ciel au début de l'automne mais bas dans le ciel au début du printemps, car il occupe la position qu'occupait le Soleil... trois mois plus tôt.

Cette gymnastique intellectuelle est excellente et s'acquiert rapidement !

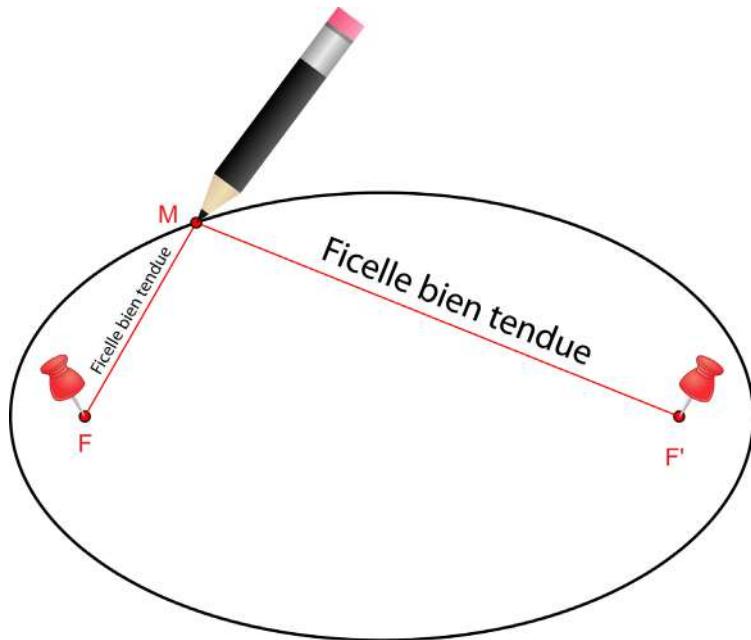
IV Les lois de Kepler et l'orbite de la Lune

Les trois lois de Kepler gouvernent le mouvement des planètes autour du Soleil mais, en première approximation, elles peuvent s'appliquer au mouvement de la Lune autour de la Terre. Johannes Kepler (1571 – 1630) publia ses deux premières lois en 1609 dans *l'Astronomie Nova* et sa troisième en 1619 dans *l'Harmonices Mundi*.

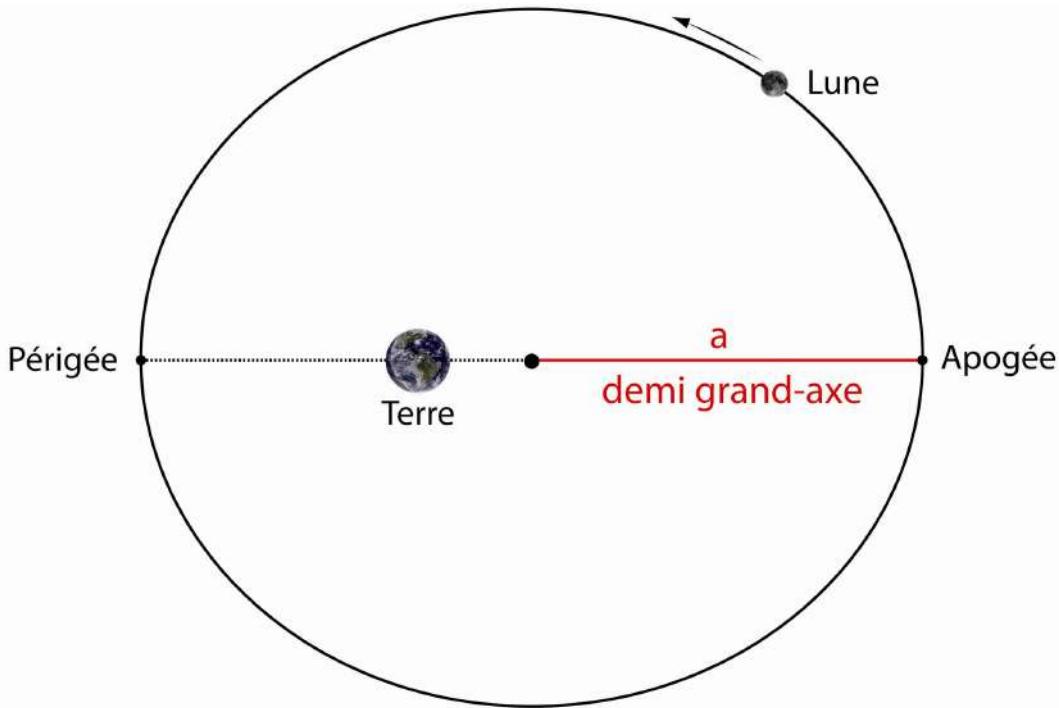
Pour les établir, il exploita la masse considérable d'observations des positions planétaires effectuées par l'astronome danois Tycho Brahé (1546 – 1601) dont il fut l'assistant pendant un an et demi. Certes, les lois de Kepler ne sont enseignées qu'en cycle terminal scientifique, mais en prenant les élèves plus jeunes par la main, il est possible de leur faire ressentir ce qui se cache derrière les deux premières lois.

IV.1 Première loi de Kepler

La première de ces lois nous enseigne que **les planètes décrivent autour du Soleil des ellipses dont le Soleil occupe l'un des foyers**. Pour nous, donc, **la Lune décrit autour de la Terre une ellipse dont la Terre occupe l'un des foyers**. Comment introduire le concept d'ellipse ? C'est la forme que l'on perçoit en regardant un cercle en perspective ou la figure formée par l'ombre qu'un disque projette sur une surface plane. Vous pouvez facilement construire une ellipse en mettant en pratique une définition mathématique de cet objet. Soit F et F' deux points distincts du plan. L'ensemble des points M qui vérifient $d(M,F) + d(M,F') = 2a$ définit une **ellipse de foyers F et F' et de grand axe $2a$** , d étant la distance entre les deux points entre parenthèses. Bref, l'ellipse est le lieu des points dont la somme des distances à deux points fixes est constante. Ainsi, si l'on plante deux piquets dans le sol ou deux punaises sur une plaquette de liège (les deux foyers) et que l'on se munit d'une corde ou d'une ficelle non élastique (la somme constante) que l'on attache aux piquets ou aux deux punaises, le trajet que l'on parcourt ou que la pointe d'un feutre parcourt en maintenant la corde ou la ficelle tendue est une ellipse.



Si l'on veut être plus précis, il convient de dire que la Terre et la Lune décrivent des ellipses autour du barycentre du système Terre – Lune. Celui-ci est situé sur une droite reliant le centre de la Terre et le centre de la Lune, à l'intérieur de notre planète, à environ 1 700 km sous sa surface. De plus, cette figure théorique est perturbée par l'action gravitationnelle des autres corps du système solaire, principalement par le Soleil. L'établissement d'une théorie du mouvement de la Lune fait partie des problèmes les plus complexes de l'astronomie. À titre d'exemple, les théories ELP (pour *Éphéméride Lunaire Parisienne*) développées au Bureau des Longitudes et à l'Observatoire de Paris comportent des dizaines de milliers de termes !

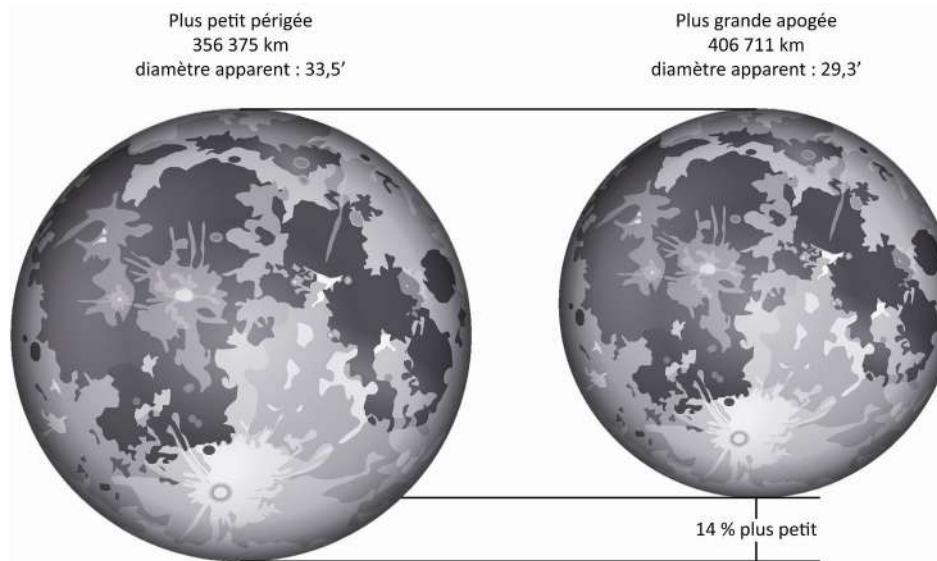


L'**aplatissement de l'ellipse est grandement exagéré** sur le schéma ci-dessus ; les trajectoires des planètes autour du Soleil et de la Lune autour de la Terre **ne diffèrent que de peu du cercle**. À titre d'exemple, dessinons l'orbite lunaire sous la forme d'un cercle d'un mètre de rayon : l'ellipse serait quasiment contenue dans l'épaisseur du trait puisqu'elle posséderait un grand axe d'un mètre et un petit axe de... 99,85 cm ! À l'œil nu, donc, vous ne feriez pas la différence entre ce cercle et l'ellipse décrite par la Lune. Toutefois, la Terre n'occuperait pas le centre du cercle d'un mètre de rayon, on la trouverait en moyenne à 5,5 cm de celui-ci.

Ainsi, sur une révolution lunaire, la distance séparant la Lune de la Terre varie. Si, en moyenne, elle s'élève à 384 400 km, elle change en permanence. Elle présente donc un minimum (**le périgée**) et un maximum (**l'apogée**). Sur la période 1800 – 2050, les valeurs extrêmes du périgée et de l'apogée furent atteintes respectivement le 4 janvier 1912 (356 375 km) et le 2 mars 1984 (406 712 km). Toutes les distances s'entendent depuis le centre de la Terre jusqu'au centre de la Lune.

Cette variation de la distance qui nous sépare de la Lune se traduit par une variation du diamètre apparent de notre satellite dans le ciel. Pratiquement indiscernable à l'œil nu, elle peut néanmoins être facilement mise en évidence à l'aide d'un instrument d'optique muni d'un oculaire réticulé à graduations.

D'ailleurs, et malgré les apparences, l'angle sous lequel nous voyons la Lune dans le ciel est petit, proche d'un demi-degré ($0,5^\circ$ soit $30'$). C'est l'angle sous-tendu par une pièce de 1 euro vue depuis une distance de 2,50 m. Le diamètre apparent de notre satellite varie ainsi d'une bonne dizaine de pourcent, entre $29,3'$ à l'apogée et $33,5'$ au périgée.



On a parfois l'impression, voire la certitude, que la Lune est beaucoup plus grosse quand elle est proche de l'horizon, en particulier à son lever ou à son coucher, que lorsqu'elle est haute dans le ciel. Déjà mentionné par Aristote (384 av. J.-C. – 322 av. J.-C.), ce phénomène est une illusion d'optique dont la cause est encore débattue aujourd'hui.

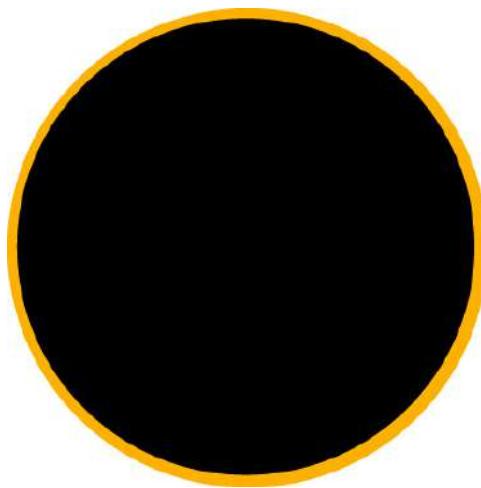
Rappel sur les angles. Quelques exemples de tailles et de diamètres apparents.

Dans un degré, il y 60 minutes d'arc (60') et dans une minute d'arc, on compte 60 secondes d'arc (60''). Le pouvoir de résolution de l'œil humain est d'environ 1'. Cela signifie que deux points séparés par moins de 1' seront vus comme un seul et même point.

Objet observé	Taille apparente
Distance angulaire entre l'extrémité du petit doigt et celle du pouce (bras tendu, main ouverte et doigts écartés)	Environ 20°
Distance angulaire entre l'extrémité du pouce et celle du poing (bras tendu, main fermée et pouce tendu)	Environ 15°
Taille apparente du poing fermé (bras tendu)	Environ 10°
Largeur apparente de l'index (bras tendu)	Environ 1°, soit 60'
Lune	De 29,3' à 33,5'
Soleil	De 31,5' à 32,5'
Vénus (planète)	De 9,5'' à 65'', soit 1' 5''
Pouvoir de séparation de l'œil humain	Environ 1', soit 60''
Jupiter (planète)	De 30,5'' à 50''
Mars (planète)	De 3,5'' à 25,1''
Neptune (planète)	De 2,2'' à 2,4''
Pluton (planète naine)	De 0,06'' à 0,11''
Pouvoir de séparation du télescope spatial Hubble	0,05''
Bételgeuse (étoile supergéante rouge)	0,05''
Sirius (étoile la plus brillante du ciel nocturne)	0,006''
Pouvoir de séparation du SVLBI (interféromètre radio)	0,0001''

Le Soleil et la Lune exceptés, les astres sont donc vus à l'œil nu sous la forme de points. Plus ou moins brillants certes, mais toujours sous la forme de points.

Il est intéressant de remarquer que le diamètre apparent du Soleil change lui aussi : de 32,5' au début du mois de janvier, période où la Terre passe au plus près de lui (au périhélie), il décroît jusqu'à atteindre 31,5' au début du mois de juillet, période où la Terre est au plus loin de lui (à l'aphélie). La Lune est donc susceptible de masquer totalement notre étoile, donnant par là naissance au féérique phénomène d'**éclipse totale de Soleil**. Une autre conséquence de ces variations de diamètre apparent est de rendre possible les éclipses *annulaires*, prévues par l'astronome et mathématicien Al-Battānī (vers 858 – 929). La Lune est alors apparemment plus petite que le Soleil et, ne pouvant le recouvrir complètement, ne laisse apparaître de lui qu'un mince anneau (*annulus* en latin).



Aspect d'une éclipse annulaire.

La dernière éclipse annulaire de Soleil eut lieu le 26 février 2017 et débute au Moyen-Orient (Arabie saoudite, Qatar, Émirats arabes unis, Oman), traversa l'océan Indien et le golfe du Bengale en survolant le sud de l'Inde et le Sri Lanka, poursuivit sa route sur l'île de Sumatra, en Malaisie, à Singapour, sur l'île de Bornéo et finit sa course dans l'océan Pacifique non sans avoir parcouru l'île de Guam. Attention, nous parlons ici des lieux où l'éclipse fut réellement vue comme annulaire. En effet, elle fut observable sous forme d'éclipse partielle de Soleil sur une fraction bien plus importante du globe terrestre.

La prochaine éclipse annulaire de Soleil aura lieu le 21 juin 2020. Elle commencera en Afrique de l'Est, traversera le sud de la péninsule arabique, le Pakistan, la Chine, Taïwan et terminera sa course dans l'océan Pacifique.

Quant à la **prochaine éclipse annulaire de Soleil visible en France**, il vous faudra être patient car elle sera visible dans le sud-ouest du pays au petit matin du... **5 novembre 2059** ! Si vous la manquez, réservez dès à présent votre matinée du **13 juillet 2075** (extrême sud-est de l'hexagone) ou votre fin d'après-midi du **27 février 2082** (sud de la France).

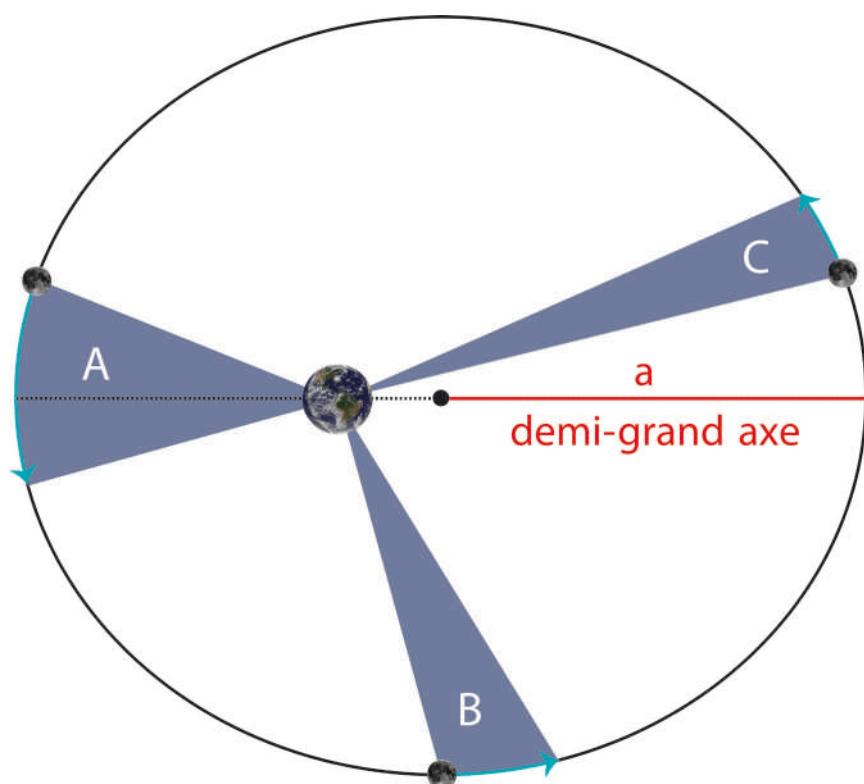
D'avance, bonnes observations !



Le plan de l'orbite lunaire n'est pas confondu avec le plan de l'écliptique. Ce fait est très important pour les éclipses, comme nous le verrons. Il est incliné en moyenne de $5^{\circ} 9'$. L'intersection entre le plan de l'orbite lunaire et le plan de l'écliptique est une droite appelée **ligne des noeuds**. Les points où la Lune traverse l'écliptique sont les **noeuds de l'orbite lunaire**. Il y a le noeud ascendant (elle passe de l'hémisphère céleste sud à l'hémisphère céleste nord) et le noeud descendant (de l'hémisphère céleste nord à l'hémisphère céleste sud). Les éclipses ne peuvent se produire que lorsque la Lune est pleine ou nouvelle et proche d'un noeud.

IV.2 Deuxième loi de Kepler

Revenons aux lois de Kepler. La deuxième loi nous enseigne que **le rayon vecteur reliant la planète au Soleil balaye des aires égales en des intervalles de temps égaux**. Pour nous, **le rayon vecteur reliant la Lune à la Terre balaye des aires égales en des intervalles de temps égaux**.



Les arcs d'ellipse A, B et C sont décrits dans le même temps puisque les surfaces en violet possèdent la même aire. **Par conséquent, la Lune va d'autant plus vite qu'elle est proche de la Terre et bien sûr, d'autant moins vite qu'elle en est éloignée.**

Lorsque nous donnons la valeur de 384 400 km à la distance moyenne qui nous sépare de notre satellite, il s'agit en fait du demi-grand axe a de l'ellipse. Or, d'après la 2^e loi de Kepler, la Lune passe plus de temps près de son apogée qu'au voisinage de son périgée. La distance moyennée sur le temps a pour expression $a \cdot \left(1 + \frac{e^2}{2}\right)$ où e est l'excentricité de l'orbite, qui vaut 0,0549.

Nous obtenons alors une distance moyenne proche de 385 558 km.

IV.3 Troisième loi de Kepler

Enfin, **la troisième loi** est une relation mathématique qui indique que **le cube du demi-grand axe (a) divisé par le carré de la période de révolution (T) est une constante pour toutes les planètes du système solaire.**

$$\frac{a^3}{T^2} = cste$$

Pour aller plus loin

Déterminons l'expression de la constante dans le cas simple d'un mouvement circulaire uniforme de la Lune autour de la Terre. Cela revient à supposer que la masse m de notre satellite est négligeable devant la masse M de la Terre.

Un corps de masse m en mouvement circulaire uniforme subit une force centripète valant en norme $m \frac{v^2}{a}$ où v est sa vitesse et a le rayon du cercle parcouru. Ici, $v = \frac{2\pi a}{T}$ où T est la période sidérale de la Lune. Or, la Lune est soumise à une force centripète d'origine gravitationnelle, dont la norme vaut $\frac{GMm}{a^2}$. L'égalité de ces deux normes se traduit par l'égalité

$$\frac{GMm}{a^2} = m \cdot \frac{\left(\frac{2\pi a}{T}\right)^2}{a} \text{ d'où } \frac{a^3}{T^2} = \frac{GM}{4\pi^2}.$$

On connaît a , T et G . On peut ainsi calculer la masse de la Terre !

Avec $a = 384\,400$ km, $T = 27\ j\ 7\ h\ 43\ min$ et $G = 6,672 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$, on obtient en se restreignant à trois chiffres significatifs :

$$M = 6,03 \cdot 10^{24} \text{ kg}, \text{ à comparer à la valeur estimée aujourd'hui } 5,97 \cdot 10^{24} \text{ kg.}$$

La masse du système Terre – Lune s'élève à $6,04 \cdot 10^{24}$ kg. Avec notre hypothèse d'un mouvement circulaire uniforme, nous avons donc obtenu une bonne approximation de la masse de ce système. Appliquée au Soleil, la 3^e loi de Kepler permet d'accéder à la masse du Soleil, 330 000 fois supérieure à la masse de la Terre !

V Les librations

Dans l'introduction à ce chapitre, nous avons écrit : [la Lune] "effectue un tour sur elle-même dans le même temps qu'elle fait un tour autour de la Terre. Aussi n'en voyons-nous qu'une seule face". Ce n'est pas... tout à fait exact. La Lune est sujette à plusieurs oscillations qui ont pour conséquence que, depuis la Terre, on voit un peu plus de la moitié de sa surface. Pour être plus précis, **59 % de la surface lunaire est observable**. Ces oscillations portent le nom de **librations**.

V.1 Libration en longitude

La 2^e loi de Kepler nous enseigne que la Lune parcourt son orbite avec une vitesse variable. Imaginons-la s'éloignant du périgée, donc avec une vitesse supérieure à sa vitesse moyenne. Elle met moins de temps pour parcourir un quart de son orbite que pour tourner de 90° sur elle-même. Nous pouvons alors observer une mince bande supplémentaire sur son limbe oriental.

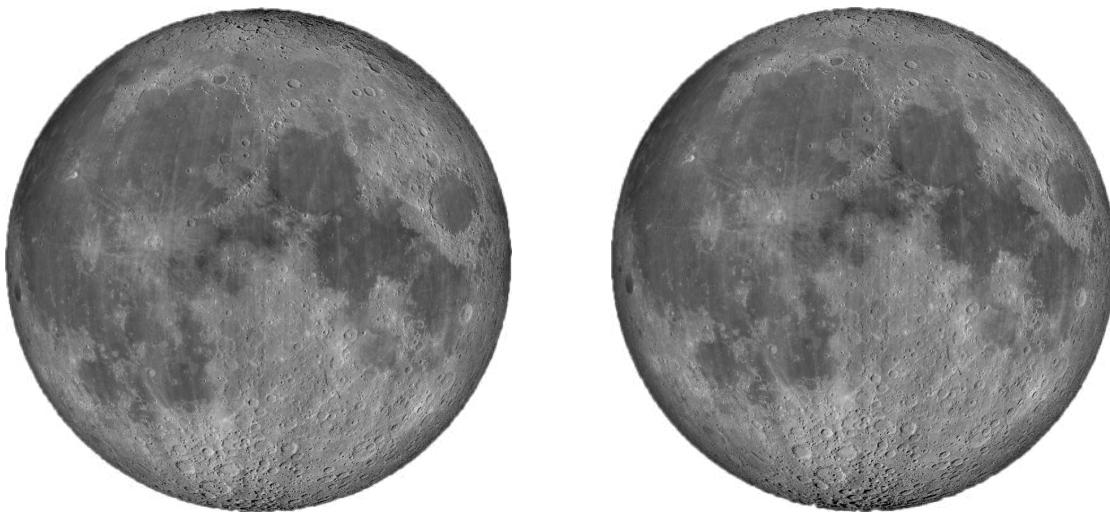
De même, considérons la Lune lorsqu'elle s'éloigne de l'apogée, donc avec une vitesse inférieure à sa vitesse moyenne. Elle met plus de temps pour parcourir un quart de son orbite que pour tourner de 90° sur elle-même. Nous pouvons alors observer une mince bande supplémentaire sur son limbe occidental.

On a l'habitude de dire que la Lune fait « non » de la tête. La libration en longitude permet de voir deux fuseaux de près de 8° d'épaisseur au cours d'une lunaison.

V.2 Libration en latitude

L'axe de rotation de la Lune n'est pas perpendiculaire au plan de son orbite autour de la Terre, mais fait un angle de 6° 41' avec cette perpendiculaire. Ainsi, depuis la Terre, on peut observer successivement les régions polaires boréale et australe au cours des lunaisons.

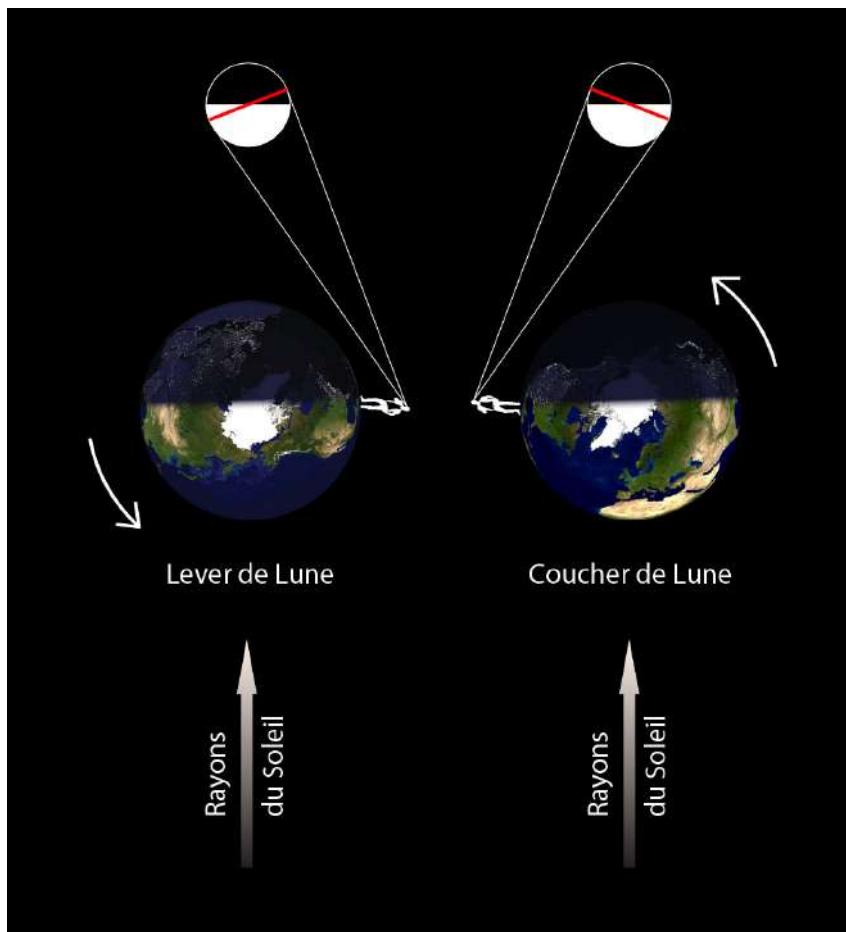
La coutume est de dire que la Lune fait "oui" de la tête.



Aspect de la Lune le 6 décembre 2014 à 13 h 30. À gauche, la libration est incluse, à droite, elle ne l'est pas.
Crédit : logiciel *Atlas Virtuel de la Lune Pro* 6.1, C. Legrand et P. Chevalley.

V.3 Libration diurne

Il est clair, d'après la figure ci-dessous, qu'un observateur voyant la Lune se lever est plus favorablement placé pour observer son limbe oriental. De même, lorsque la Lune se couche, il peut observer plus favorablement son limbe occidental. Cette libration diurne peut atteindre 1° mais en pratique, elle est inexploitable. En effet, les levers et couchers de la Lune sont les moments où l'épaisseur d'atmosphère terrestre que doivent traverser les rayons lumineux provenant de notre satellite est maximale, ce qui entraîne des déformations de l'image, ainsi qu'un rougissement et une atténuation de son intensité.



Les échelles de taille et de distance ne sont pas respectées.

V.4 Librations physiques

À la différence des trois librations que nous venons de présenter, la Lune est également soumise à de véritables oscillations physiques causées par l'influence gravitationnelle de la Terre. Leur amplitude est faible (quelques minutes d'arc), ce qui les rend indétectable à l'œil nu.

VI Quelques périodes importantes

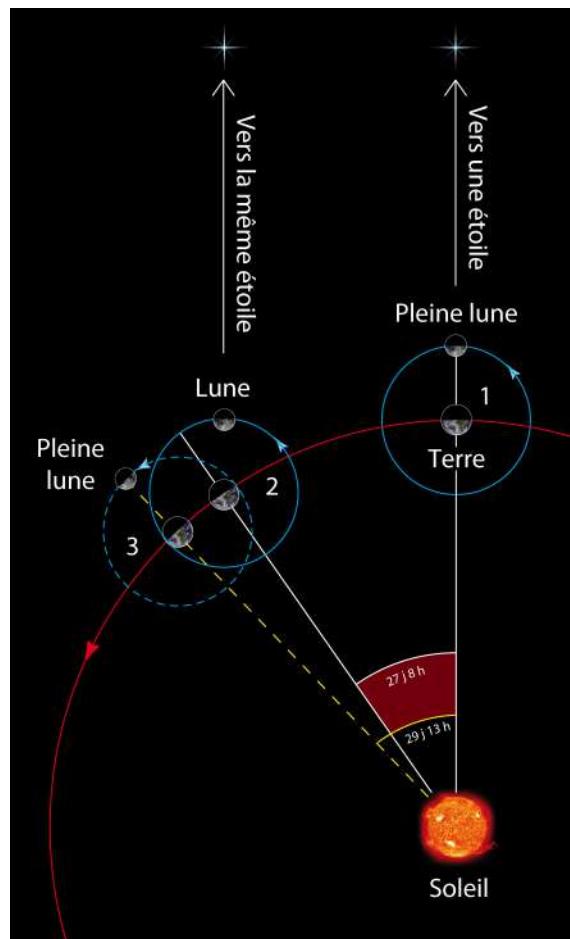
VI.1 Période sidérale

Depuis la Terre, repérons précisément la position de la Lune par rapport à une étoile lointaine, supposée fixe. Jour après jour, la Lune se déplace vers l'est. Elle reviendra dans la même position par rapport à cette étoile au bout d'une **période sidérale**, qui se monte en moyenne à **27 j 7 h 43 min 12 s**.

VI.2 Période synodique

La durée moyenne d'un cycle complet des phases de la Lune (une lunaison) s'appelle la **période synodique** (du grec συνοδικός « qui arrive en même temps »). Si elle varie de 29 j 4 h à 29 j 23 h, sa durée moyenne est de **29 j 12 h 44 min 3 s**.

D'où provient la différence entre ces deux périodes ? Le schéma ci-dessous nous aidera à le comprendre.



Dans la situation 1, la Lune se trouve dans la direction opposée au Soleil. C'est donc la pleine lune. On note sa position par rapport à une étoile lointaine.

Une période sidérale plus tard, la Lune est revenue dans la même position par rapport à l'étoile (situation 2). Les directions Terre – étoile sont parallèles car les distances dans le système solaire sont complètement négligeables par rapport aux distances qui nous séparent des étoiles. On remarque que la Lune n'est pas encore pleine car elle ne se trouve pas dans la direction opposée au Soleil, la Terre ayant accompli pendant le même temps une fraction de sa révolution autour de notre étoile.

Environ deux jours plus tard (situation 3), la Lune est enfin pleine. **Une période synodique s'est écoulée depuis la situation 1**. Il est ainsi clair qu'une période synodique est plus longue qu'une période sidérale.

VI.3 Période anomalistique

L'orientation de l'orbite lunaire n'est pas fixe. En particulier, la ligne des apses qui relie le périgée à l'apogée décrit un cercle complet en 8 ans et 10 mois, dans le même sens que la Lune tourne autour de la Terre. L'intervalle temps moyen séparant deux retours de la Lune au périgée, qui est donc plus long que la période sidérale, porte le nom de **période anomalistique**. Celle-ci s'élève à 27 j 13 h 18 min 33 s.

VI.4 Période draconitique

En raison de l'attraction gravitationnelle du Soleil sur la Lune, l'orbite lunaire a acquis un mouvement de précession vers l'ouest autour d'un axe perpendiculaire au plan de l'écliptique. Les nœuds de l'orbite lunaire sont donc animés d'un mouvement de rétrogradation sur l'écliptique, effectuant un tour complet de l'écliptique en 18 ans 7 mois (soit un déplacement de 19,3548° par an.). Aussi l'intervalle de temps moyen séparant deux passages consécutifs de la Lune au nœud ascendant est-il plus court que la période sidérale. Cet intervalle porte le nom de **période draconitique** et s'élève à 27 j 5 h 5 min 36 s.

Le nom donné à cette période fait référence à un dragon mythique supposé vivre dans les nœuds et dévorant le Soleil ou la Lune pendant une éclipse...

VII Les calendriers lunaires

VII.1 Rappel sur les calendriers solaires

Tout **calendrier solaire** est construit de sorte qu'à très long terme, il ne dérive pas par rapport aux saisons. Ainsi, il convient que la durée moyenne de l'année s'approche le plus possible du temps qu'il faut, sur Terre, pour voir le Soleil revenir à la même position dans le cycle des saisons. Cette durée vaut approximativement 365 j 5 h 48 min 45 s, soit environ 365,24219 j.

Notre calendrier, le calendrier grégorien, remplit-t-il correctement sa mission ?

→ Sans année bissextile, nous aurions toujours une année de 365 jours. Le décalage entre les saisons et le calendrier se monterait à près d'un jour en quatre ans et à 31 jours en 128 ans. Bref, au bout de quelques siècles, nous fêterions Noël sous un soleil de plomb ! Ce type de calendrier, surnommé *vague*, était en usage dans l'Égypte antique.

→ Avec l'ajout d'un jour bissextile tous les quatre ans (le 29 février), le décalage s'estompe mais ne disparaît pas totalement. Avec trois années de 365 jours et une année de 366 jours, nous obtenons une année moyenne de 365,25 jours, soit 365 j 6 h. Ce calendrier, dit julien, prend chaque année 11 min 15 s d'avance sur les saisons, soit environ 3 jours en 400 ans.

→ Voilà où en était la situation à la fin du XVI^e siècle. Depuis le premier concile de Nicée en 325, où l'on avait fixé la date de Pâques, le calendrier avait pris 10 jours d'avance sur les saisons. Le pape Grégoire XIII, aidé par un groupe d'astronomes dont le plus éminent était le jésuite Christopher Clavius, prit deux décisions drastiques en instituant en 1582 le calendrier qui porte désormais son nom :

- **suppression de dix jours** dans le calendrier. On passa directement du 4 octobre au 15 octobre 1582 ;
- **suppression de 3 années bissextilles en 400 ans**, pour que le décalage ne se reproduise plus. Les millésimes multiples de 100 sans être multiples de 400 compteront 365 jours. Ainsi, 1600 et 2000 furent bissextiles, mais 1700, 1800 et 1900 ne le furent pas.

Quelle est donc la durée moyenne d'une année grégorienne ?

En 400 ans, il y a $365 \times 300 + 366 \times 100 - 3 = 146\,097$ jours, c'est-à-dire une moyenne de 365,2425 jours par année, soit 365 j 5 h 49 min 12 s. C'est mieux !

Il n'y a ainsi que 27 s de décalage entre l'année moyenne du calendrier grégorien et l'année des saisons. Cela représente environ 3 jours en 10 000 ans. Nos lointains descendants auront sans doute à s'occuper de ce problème...

VII.2 Principes des calendriers lunaires

En fondant notre réflexion sur ce qui vient d'être dit au sujet des calendriers solaires, on peut affirmer que le but de tout **calendrier lunaire** est d'être construit de telle sorte qu'à très long terme, **il ne dérive pas par rapport au cycle des phases de la Lune**. Ainsi, il convient que la durée moyenne du mois s'approche le plus possible de la période synodique de la Lune, soit environ 29 j 12 h 44 min 3 s.

On peut donc imaginer une alternance de mois de 29 et 30 jours, ce qui donne une moyenne de 29,5 jours par mois.

Si l'on impose douze mois lunaires à l'année, celle-ci comptera $12 \times 29,5 = 354$ jours, valeur qu'il convient de comparer à la durée réelle de 12 périodes synodiques : 354 j 8 h 48 min 34 s.

Un écart aussi important, supérieur à 8 h par année lunaire, va rapidement faire dériver le calendrier par rapport aux phases de la Lune, d'un peu moins de 2 jours en cinq années lunaires, de 5 jours et demi en 15 années lunaires et... de presque exactement 11 jours en 30 années lunaires (plus précisément 11 j 0 h 16 min 49 s) ! Voilà qui est très intéressant.

Si donc, sur une période de 30 ans, on impose 19 années de 354 jours et 11 années à 355 jours, nous obtenons une très bonne approximation de douze périodes synodiques.

En 30 ans, il y a $354 \times 19 + 355 \times 11 = 10\,631$ jours, c'est-à-dire une moyenne de 354,3666... jours par année lunaire, soit 354 j 8 h 48 min 0 s.

Il n'y a ainsi que 34 s de décalage entre l'année moyenne des calendriers lunaires et douze périodes synodiques.

VII.3 Le calendrier musulman

Le calendrier musulman est un calendrier purement lunaire dont l'utilisation a un but essentiellement religieux. Les années de 354 jours sont appelées **années communes**, celles de 355 jours, **années abondantes**. Les mois débutent (en théorie) lorsque deux hommes de foi observent le premier croissant de Lune en soirée. Nous avons déjà vu combien la visibilité du premier croissant est sensible à la latitude du lieu d'observation, à la position de la Lune sur son orbite et à la période de l'année où l'on observe. En pratique, la situation est très complexe : de quelle autorité, de quel pays, de quelle ville faut-il suivre les recommandations ? Le calcul des conditions de visibilité doit-il avoir la primauté sur l'observation ? Ces questions sont encore débattues.

Ne comptant au maximum que 355 jours, le calendrier musulman glisse à travers les saisons et avance d'une année sur l'autre dans le calendrier grégorien.

L'Hégire, qui désigne le départ des compagnons de Mahomet de La Mecque vers l'oasis de Yathrib (ancien nom de Médine), marque le début du calendrier musulman. Dans le calendrier julien, cela correspond au 16 juillet 622.

Année		
Mois	Commune	Abondante
Mouharram	30	30
Safar	29	29
Rabi'a al Awal	30	30
Rabi'a ath-thani	29	29
Joumada al oula	30	30
Joumada ath-thania	29	29
Rajab	30	30
Chaabane	29	29
Ramadan	30	30
Chawwal	29	29
Dhou al qı'da	30	30
Dhou al hijja	29	30
Nombre de jours dans l'année	354	355

Comme nous l'avons vu, sur un cycle de 30 ans, il y aura 19 années communes et 11 années abondantes. Selon la version la plus commune, les années abondantes sont les 2^e, 5^e, 7^e, 10^e, 13^e, 16^e, 18^e, 21^e, 24^e, 26^e et 29^e d'un cycle.

→ Notez qu'il existe des calendriers luni-solaires (hébreïque, samaritain, bouddhiste, hindou, tibétain, chinois traditionnel, anciens calendriers grec et babylonien etc.) qui respectent à la fois le cycle annuel du Soleil et le cycle des phases de la Lune. Les mois sont lunaires mais, selon une fréquence bien déterminée, l'année est ajustée par l'ajout d'un mois intercalaire.

Ainsi, dans le calendrier hébreïque, l'année peut avoir douze mois (elle est dite « commune ») ou treize mois (« embolismique »). De plus, la durée de certains mois n'est pas fixe. Les 2^e et 3^e mois de l'année peuvent avoir 29 jours (mois « défectif ») ou 30 jours (mois « abondant »).

Une année commune peut donc avoir 353 jours (année « défective »), 354 jours (« régulière ») ou 355 jours (année « abondante »). Les années embolismiques peuvent aussi être défectives, régulières ou abondantes si elles comportent 383, 384 ou 385 jours.

→ L'Institut de mécanique céleste et de calculs des éphémérides (IMCCE) fournit un outil permettant d'effectuer la concordance entre différents calendriers. Vous le trouverez à cette adresse : <https://promenade.imcce.fr/fr/pages4/427.html>

De nombreux drapeaux d'État incluent des représentations simplifiées d'objets célestes. La combinaison d'une étoile et d'un croissant de Lune est ainsi reconnue aujourd'hui comme un des symboles des pays de l'islam, à l'exemple du Pakistan et de l'Algérie.



Algérie



Azerbaïdjan



Brunei



Comores



Iran



Libye



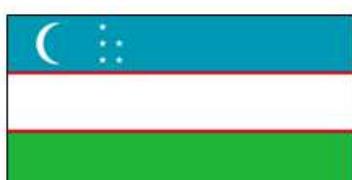
Malaisie



Maldives



Mauritanie



Ouzbékistan



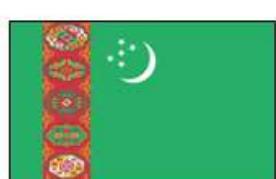
Pakistan



Singapour



Tunisie



Turkménistan



Turquie

VIII Les éclipses de Soleil et de Lune

La Terre et la Lune sont deux globes opaques éclairés par le Soleil : chacun d'eux peut porter ombre sur l'autre. Lorsque la Terre porte son ombre sur la Lune, il y a éclipse de la Lune. Si la Lune porte ombre sur la Terre, il y a éclipse du Soleil. À cela s'ajoute un singulier hasard : le Soleil et la Lune ont quasiment le même diamètre apparent. Ainsi, le disque lunaire peut recouvrir totalement le disque solaire.



Éclipse totale de Soleil photographiée au Togo le 29 mars 2006.

Notez que l'obscurité n'est pas complète. Bien qu'elles n'apparaissent pas sur l'image, les planètes et les étoiles de première grandeur deviennent visibles durant la phase de totalité.

Crédit : Sébastien Fontaine.

VIII.1 Quelques rappels astronomiques

La Terre tourne autour du Soleil en un an dans un plan nommé plan de l'écliptique. La Lune tourne autour de la Terre par rapport au Soleil en 29,53 jours. Le plan de l'orbite lunaire n'est pas confondu avec le plan de l'écliptique : l'inclinaison entre les deux est en moyenne de $i = 5^\circ 9'$. Au cours d'une révolution de la Lune autour de la Terre, la Lune est tantôt au nord de l'écliptique, tantôt au sud. Deux fois par mois, la Lune coupe l'écliptique en deux points : les nœuds, qui sont joints par la ligne des nœuds (fig. 1).

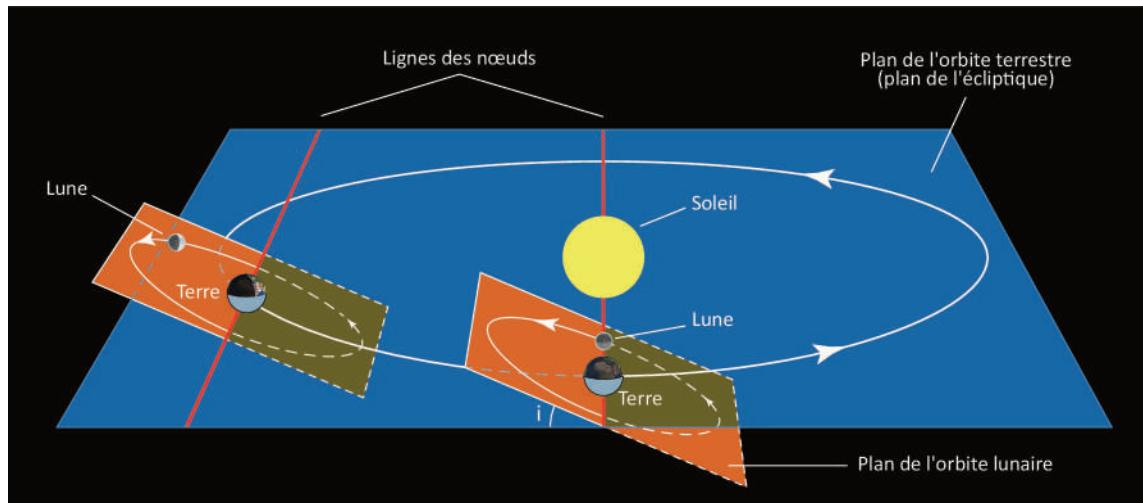


Figure 1 : Vision héliocentrique de la ligne des nœuds de l'orbite lunaire

Vue depuis la Terre, la trajectoire apparente décrite au cours de l'année par le Soleil dans le ciel est nommée écliptique, parce que les éclipses de Soleil et de Lune ne peuvent se produire que lorsque la Lune est très près de l'écliptique. Les nœuds de l'orbite lunaire ne sont pas fixes : à cause de l'action perturbatrice du Soleil et de la Terre sur l'orbite lunaire, ils rétrogradent vers l'ouest d'environ $1,5^\circ$ à chaque révolution. Donc à chacune de ses révolutions, la Lune ne recoupe pas l'écliptique au même point (fig. 2).

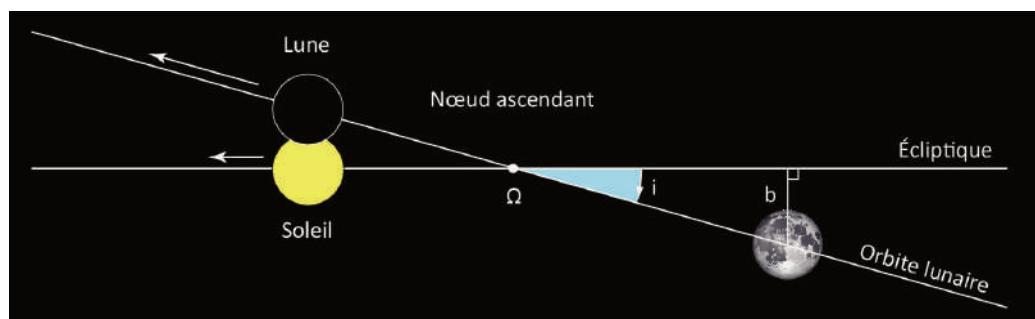


Figure 2. Pour qu'une éclipse de Soleil se produise, la latitude géocentrique de la Lune (b) doit être faible, ce qui impose qu'elle soit voisine d'un nœud de son orbite. On montre qu'une éclipse de Soleil se produira si, au moment de la nouvelle Lune, $b < 1,42^\circ$.

Elle se produira peut-être si $1,42^\circ < b < 1,58^\circ$ et elle ne se produira pas si $b > 1,58^\circ$.

Le Soleil avance sur l'écliptique vers l'est d'environ 1° par jour, les nœuds de l'orbite lunaire rétrogradent vers l'ouest : ainsi, tous les 173,31 jours en moyenne, le Soleil franchit un nœud (fig. 3). C'est à ce moment-là qu'il y a éclipse : soit de Soleil, si la Lune est en conjonction avec le Soleil (nouvelle Lune), soit de Lune si la Lune est en opposition avec le Soleil (pleine Lune). Une éclipse de Soleil est obligatoirement suivie ou précédée d'une éclipse de Lune. Les calculs montrent que, par année, il y a au minimum quatre éclipses (obligatoirement deux de Soleil et deux de Lune) et au maximum sept éclipses. Dans ce cas, il y a encore obligatoirement au moins deux éclipses de Soleil et deux éclipses de Lune. Pour les trois éclipses supplémentaires, toutes les combinaisons sont possibles.

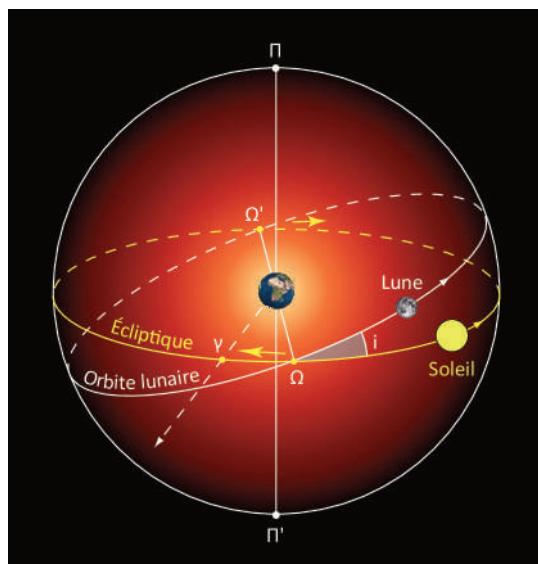


Figure 3. Mouvement de rétrogradation des nœuds de l'orbite lunaire.

VIII.2 Description d'une éclipse de Soleil

Lorsque la Lune passe devant le Soleil, il y a éclipse du Soleil par la Lune. Cela ne peut se produire que lorsque la Lune est dans la direction du Soleil (conjonction), c'est-à-dire en phase de nouvelle lune. Le Soleil, la Lune et la Terre sont alors alignés dans cet ordre. Si la Lune recouvre complètement le Soleil, c'est une éclipse totale ; si la Lune recouvre partiellement le Soleil, c'est une éclipse partielle. Au moment d'une éclipse de Soleil, les cônes d'ombre et de pénombre de la Lune sont portés sur la Terre : les observateurs terrestres situés dans le cône d'ombre voient une éclipse totale, ceux situés dans le cône de pénombre voient une éclipse partielle (fig. 4).

On notera que la section du cône d'ombre est beaucoup plus petite que celle du cône de pénombre. À titre d'exemple, dans les zones tempérées, le diamètre du cône d'ombre vaut près de 260 km et celui du cône de pénombre près de 7000 km. Voilà pourquoi une éclipse totale de Soleil est un phénomène rarissime en un lieu donné.

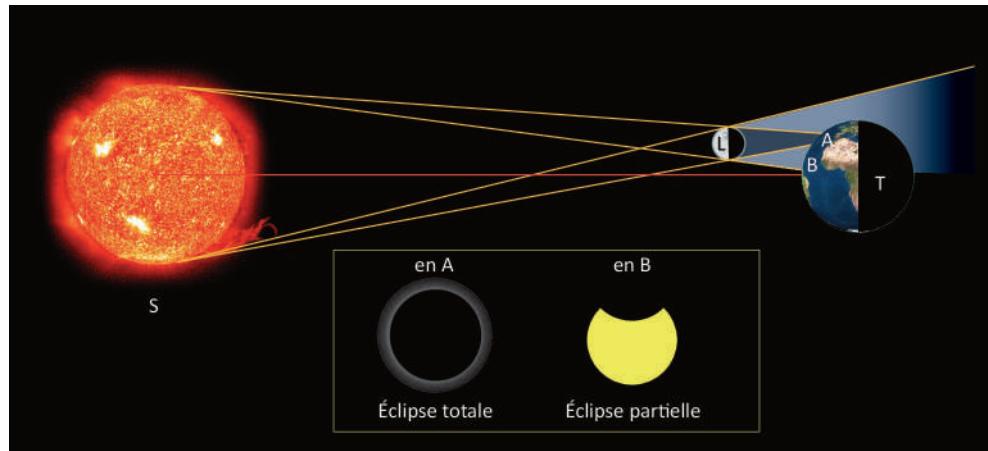


Figure 4. Éclipse totale de Soleil.

C'est un hasard singulier de la nature qui fait que le diamètre apparent de la Lune est sensiblement égal à celui du Soleil. Cependant, ce diamètre apparent est lié à la distance de la Lune à la Terre. L'orbite lunaire étant elliptique, lorsque la Lune est au voisinage du périhélie, son diamètre apparent est supérieur à celui du Soleil : depuis la Terre, l'observateur voit une éclipse totale. Lorsque la Lune est au voisinage de l'apogée de son orbite, son diamètre apparent est inférieur à celui du Soleil et la Lune ne masque plus totalement le Soleil : l'observateur voit une éclipse annulaire (fig. 5).

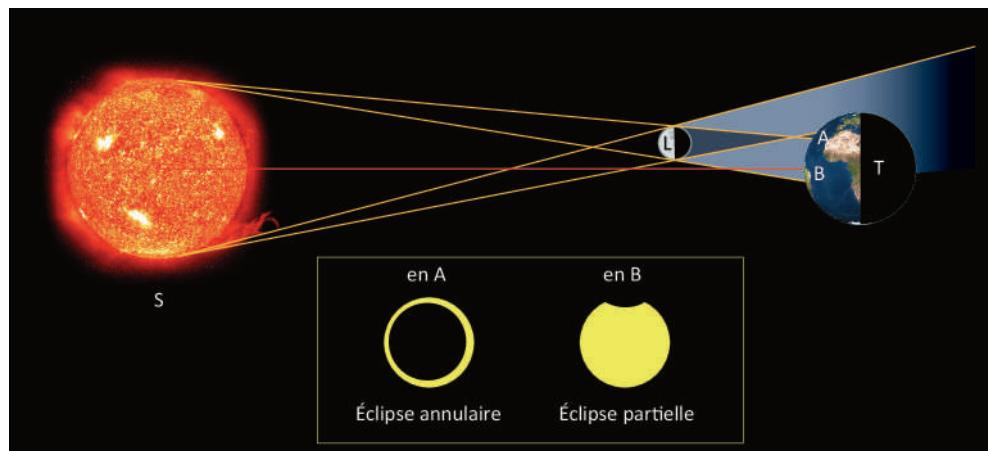


Figure 5. Éclipse annulaire de Soleil.

Il convient de prendre certaines précautions pour observer une éclipse de Soleil. Ce n'est pas l'éclipse qui est dangereuse, mais bien le rayonnement du Soleil ! Pendant le déroulement des phases partielles (tant que la Lune ne masque pas complètement le Soleil), il est impératif d'utiliser un filtre spécial. Le rôle de ce filtre est de réduire l'intensité lumineuse et de bloquer une partie des rayonnements ultraviolet et infrarouge, nocifs pour l'œil.

De tels filtres sont disponibles auprès de revendeurs spécialisés. Les lunettes en carton vendues à l'occasion d'éclipses, certifiées « CE » et non usagées, constituent une bonne protection (fig. 6).



Figure 6. Lunettes prévues pour l'observation des phases partielles des éclipses de Soleil.

VIII.3 Description d'une éclipse de Lune

Lorsque l'ombre de la Terre se projette sur la Lune, il y a éclipse de Lune par l'ombre. Les éclipses de Lune ne peuvent avoir lieu que lorsque la Lune est dans la direction opposée au Soleil (opposition), et donc en phase de pleine lune. Le Soleil, la Terre et la Lune sont alors alignés dans cet ordre. Si la Lune pénètre complètement dans l'ombre de la Terre, c'est une éclipse totale (fig. 7) ; si la Lune pénètre partiellement dans l'ombre de la Terre, c'est une éclipse partielle.

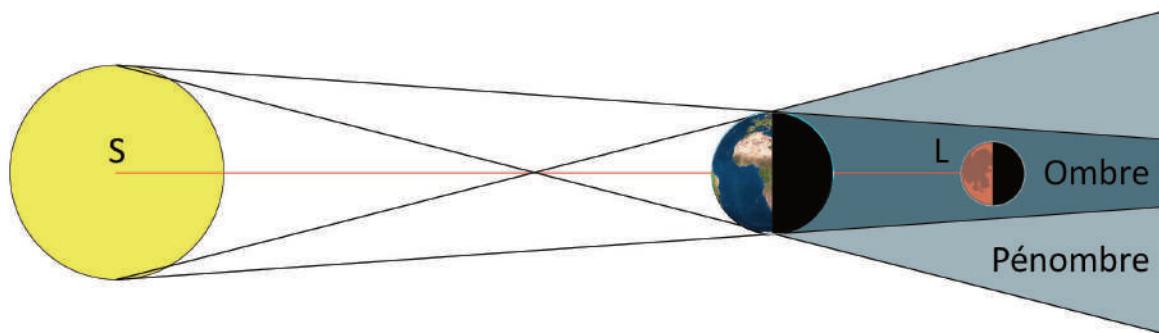


Figure 7. Principe d'une éclipse de Lune. Lors d'une éclipse totale de Lune, notre satellite pénètre complètement dans le cône d'ombre de la Terre.

Tant que la Lune est dans le cône de pénombre engendré par la Terre, l'aspect de la Lune ne change pas. Puis la Lune entre dans l'ombre et finit par y pénétrer complètement : la phase de totalité peut durer près de 1 h 45 min. Pendant l'éclipse, grâce à la réfraction atmosphérique, la Lune reste éclairée faiblement par une lumière rougeâtre, les rayons rouges étant ceux que l'atmosphère terrestre diffuse et absorbe le moins. Ensuite, la Lune sort de l'ombre, puis de la pénombre. Le phénomène peut durer dans sa globalité plus de 6 heures. Une éclipse de Lune est visible au même instant partout sur Terre où la Lune est au-dessus de l'horizon.

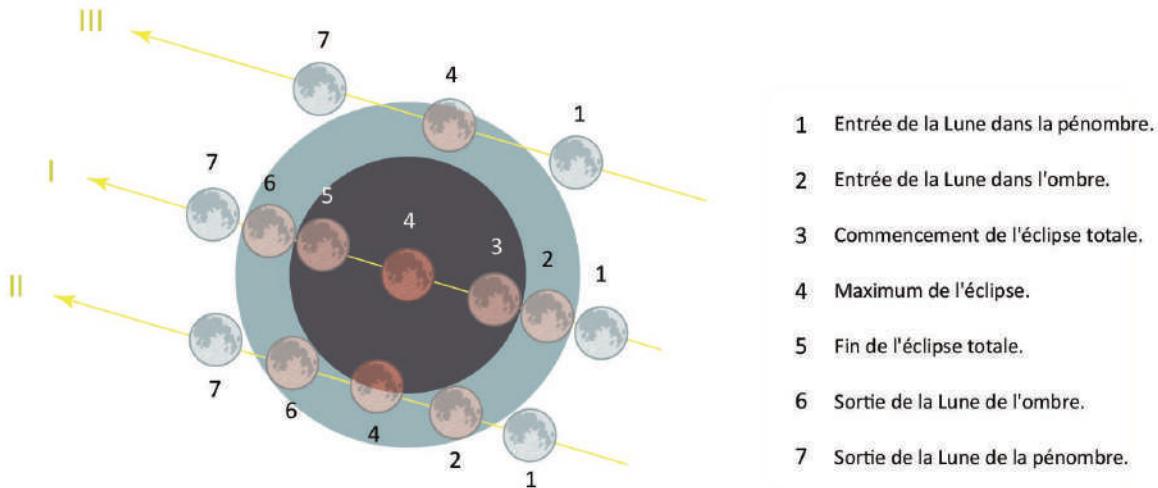


Figure 8. Phases d'une éclipse totale de Lune. I. Éclipse totale de Lune par l'ombre ; II. Éclipse partielle de Lune par l'ombre ; III. Éclipse partielle de Lune par la pénombre

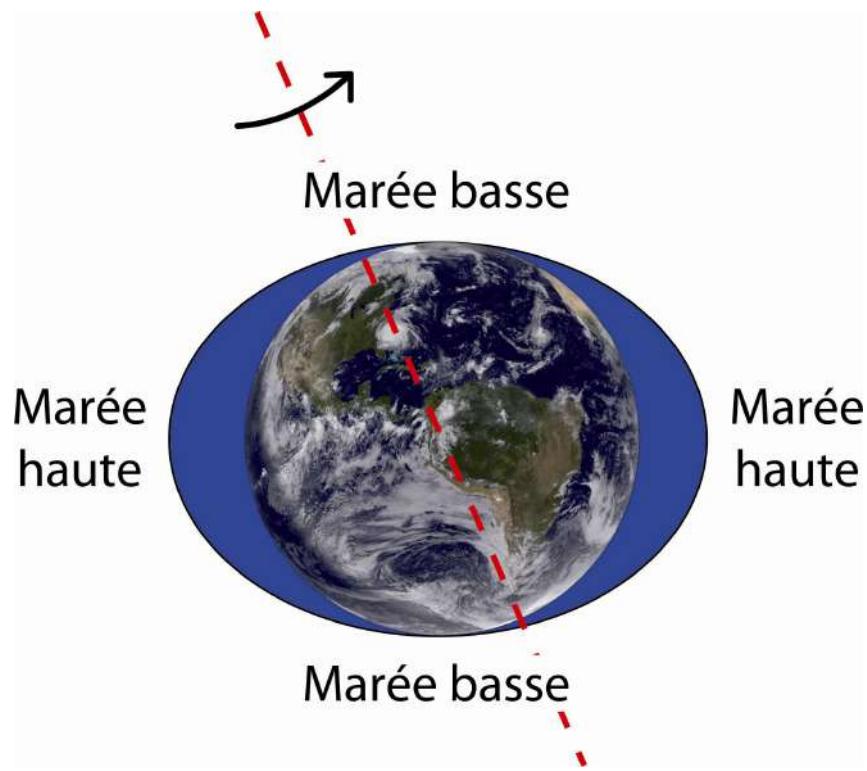
Les schémas de ce chapitre dédié aux éclipses trouvent leur inspiration dans l'excellent ouvrage de Denis Savoie, Cosmographie, paru en 2006 chez Belin dans la collection "Bibliothèque scientifique". Les illustrations de ce livre ont été réalisées par l'illustrateur Thomas Haessig.

<http://tessig.ultra-book.com>

IX Les marées océaniques

La marée désigne la variation de hauteur de l'eau des mers et des océans, accompagnée d'un mouvement montant puis descendant. Elle trouve son origine dans l'effet conjugué des forces de gravitation dues à la Lune, au Soleil et à la rotation de la Terre.

L'intensité des forces gravitationnelles est inversement proportionnelle au carré de la distance. Ainsi, une petite parcelle d'eau située à la surface de notre planète et surmontée par la Lune ressent-elle une force plus intense de la part de la Lune qu'une parcelle de même masse localisée au centre du globe terrestre. La parcelle d'eau en surface s'éloigne du centre de la Terre ; elle se soulève. De même, une petite parcelle d'eau située en surface mais à l'opposé de la Lune ressent une force moins intense de la part de la Lune qu'une parcelle de même masse localisée au centre de la Terre ; elle se soulèvera également. Ainsi, il y a **deux marées hautes opposées**.

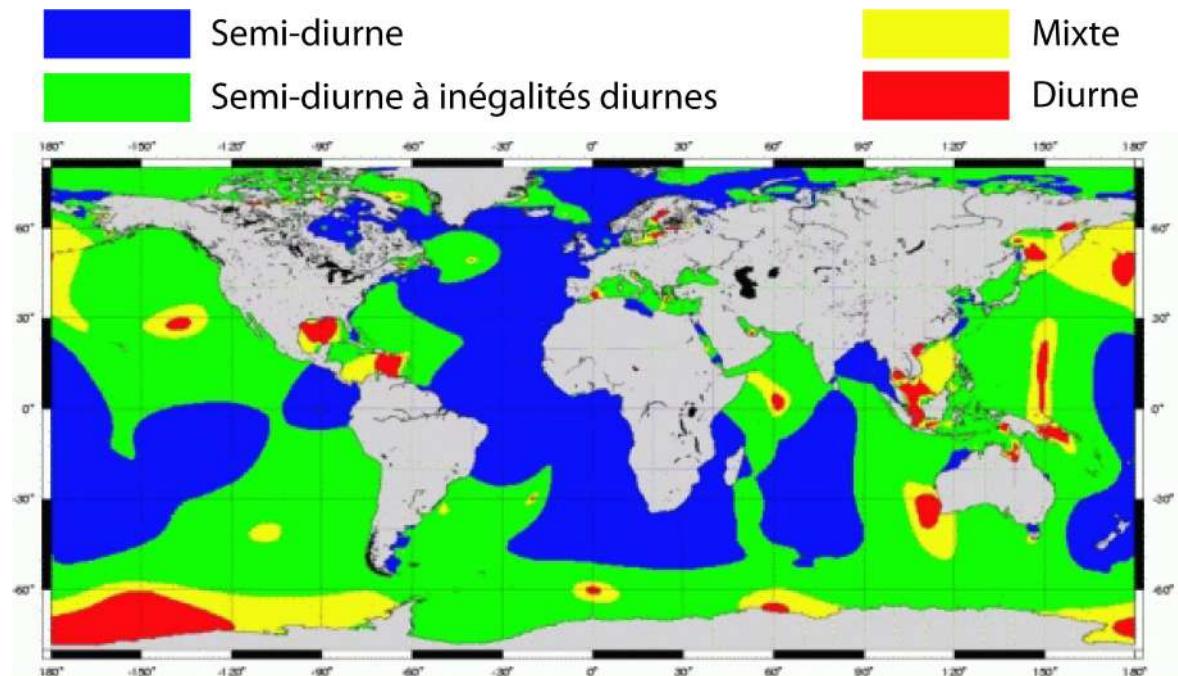


Les océans prennent la forme d'un bourrelet elliptique sous lequel tourne la Terre. En un lieu donné, il y a donc deux hautes mers par jour lunaire de 24 h 50 min, qui est l'intervalle de temps moyen entre deux passages de la Lune dans la même direction.

Nous venons de voir que les forces de marée résultent de la différence entre l'attraction de la Lune sur la parcelle d'eau et l'attraction de la Lune sur la Terre. On montre qu'elles sont inversement proportionnelles au cube de la distance Terre – Lune. Voilà pourquoi les forces de marées dues au Soleil, bien que cet astre soit 27 millions de fois plus massif que la Lune, ne contribuent qu'au tiers des forces de marées, les deux autres tiers trouvant leur origine dans la Lune. Bien que leur intensité soit très faible (un dix millionième de la pesanteur terrestre), elle suffit à produire des effets spectaculaires.

Au cœur des océans, les marées sont faibles et ne modifient la hauteur des eaux que d'une dizaine de centimètres. Près des côtes, la différence entre la marée haute et la marée basse (le marnage) peut devenir importante. De plus, le bassin dans lequel se propage l'onde de marée, selon sa taille, sa profondeur, le relief sous-marin, sa latitude etc., possède une influence capitale, non seulement sur le marnage, mais aussi sur le type de marée. Quatre types sont recensés :

- le régime **semi-diurne**, avec deux marées hautes et deux marées basses à chaque jour lunaire de 24 h 50 min. Ce régime est typique des côtes atlantiques européennes ;
- le régime **semi-diurne à inégalités diurnes**, identique au précédent, à la différence que les hauteurs des marées hautes et des marées basses consécutives ont des amplitudes différentes ;
- le régime **diurne**, avec une marée haute et une marée basse à chaque jour lunaire ;
- le régime **mixte**, avec deux marées par jour lunaire lorsque la Lune est proche de l'équateur céleste et une marée par jour lunaire lorsqu'elle en est éloignée.



Répartition des types de marées dans le monde.
Crédit : Service hydrographique et océanographique de la Marine.

Vous trouverez de nombreuses informations sur les marées sur le site internet du [Service hydrographique et océanographique de la Marine](#).

La marée étant générée par la Lune et le Soleil, les actions de ces deux astres peuvent s'ajouter ou se contrarier selon leurs positions relatives. Ainsi, lors de la pleine lune et de la nouvelle lune, c'est-à-dire lorsque la Terre, la Lune et le Soleil sont plus ou moins alignés, ces deux derniers agissent de concert et les marées sont de plus grande amplitude. On parle de marée de vive-eau. Au contraire, lors du premier et du dernier quartier, lorsque les trois astres forment un angle droit, l'amplitude est plus faible. On parle alors de marée de morte-eau.

Les marées les plus fortes de l'année se produisent normalement vers les équinoxes de printemps et d'automne, puisque le Soleil est alors proche de l'équateur céleste, en face du bourrelet, et qu'il tire dans la même direction que la Lune, nouvelle ou pleine. Inversement, les marées les plus faibles de l'année se produisent aux solstices d'hiver et d'été, quand la distance angulaire du Soleil à l'équateur céleste est maximale.

Notons enfin que, toutes choses égales par ailleurs, les marées sont plus fortes lorsque la Lune est au périgée, étant donné que l'intensité des forces de marée est fonction de l'inverse du cube de la distance qui nous sépare de notre satellite.

En théorie, le marnage maximal donc est atteint lorsque les trois conditions suivantes sont remplies : nous sommes à l'équinoxe de printemps ou d'automne, la Lune est nouvelle ou pleine et elle se situe au périgée.

→ Il se trouve que nous étions quasiment dans cette situation le 20 mars 2015, lors de l'éclipse de Soleil qui servit de prétexte à la création de la première version de ce document.

En effet :

1. la Lune est passée au périgée le 19 mars à 20 h 38 min, à 357 584 km de la Terre ;
2. la Lune était nouvelle le 20 mars à 10 h 36 min ;
3. l'équinoxe de printemps est tombé le 20 mars à 23 h 45.

On pouvait donc s'attendre à un fort marnage, ce que confirma le coefficient de marée de 119 prévu en soirée le 21 mars, sur un maximum théorique de 120. Le décalage d'une journée subit par rapport à la géométrie des astres s'appelle l'âge de la marée. Elle vaut environ 36 h sur les côtes françaises. Une marée aussi forte ne se reproduira que le 3 mars 2051.

Les marées ont des conséquences à long terme. Dans les zones côtières principalement, le frottement des courants de marée sur les fonds marins entraîne la conversion d'énergie cinétique en chaleur. Le bourrelet d'eau dont nous avons parlé plus haut freine la rotation de la Terre sur elle-même ; **la Terre ralentit et la durée du jour augmente d'environ deux millisecondes par siècle**. Par conservation du moment cinétique, cette dissipation d'énergie s'accompagne d'un **éloignement de la Lune de 3,8 centimètres par an**. Dans quelques centaines de millions d'années, la Lune se sera trop éloignée de nous pour que, même à son périgée, elle ne puisse plus recouvrir entièrement le Soleil. Les éclipses totales de Soleil auront à jamais disparu...

Les marées permettent aussi de comprendre pourquoi la Lune nous présente toujours la même face. Il faut pour cela remonter à sa naissance, à la période où elle était encore chaude et donc malléable. Les marées provoquées par la Terre sur la jeune Lune alors déformable ont ralenti sa rotation jusqu'à rendre **synchrones** sa période de rotation et sa période de révolution. Les satellites de Mars et les gros satellites des planètes géantes sont aussi en rotation synchrone.

X Éléments de sélénographie

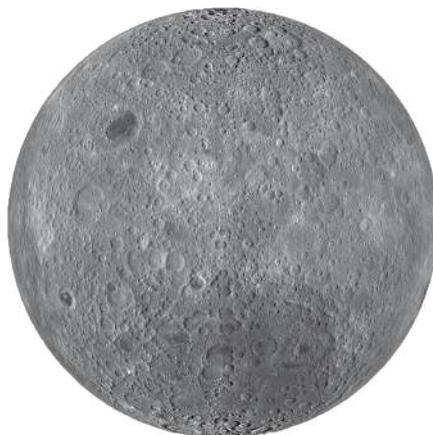
La Lune est un astre géologiquement mort. Sa surface criblée de cratères n'a pratiquement pas connu d'évolution depuis 3,5 milliards d'années, époque à laquelle a cessé le grand bombardement météoritique qui a touché tous les corps du système solaire.

On distingue deux types de régions à la surface de la Lune :

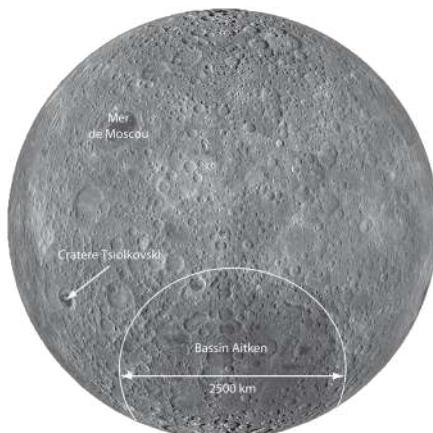
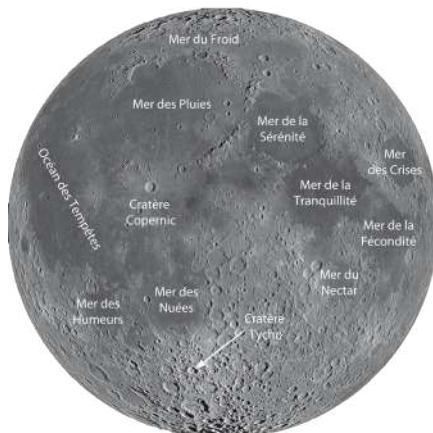
- les **mers**, qui sont des plaines volcaniques sombres de faible altitude. Elles sont constituées de roches basaltiques, des roches magmatiques issues d'une lave refroidie rapidement ;
- les **continents**. Ce sont des régions élevées plus claires, concentrées dans l'hémisphère sud de la face visible et sur toute la face cachée. Ils sont constitués de roches appelées anorthosites, composées principalement de feldspath plagioclase.



Face visible



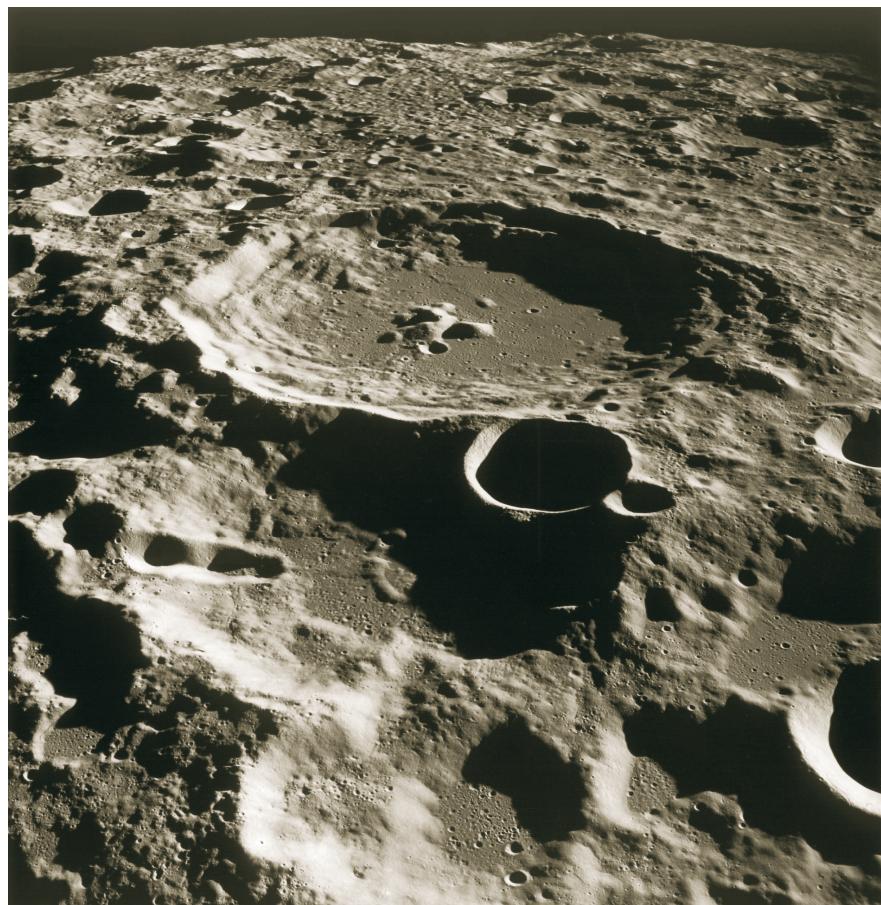
Face cachée



Crédit : NASA / GSFC / Arizona State University.

Pendant les centaines de millions d'années qui ont suivi sa formation, la Lune a subi un bombardement météoritique intense. En particulier, de grands bassins circulaires de plusieurs centaines de kilomètres de diamètre sont apparus. Sur la face visible, à la croûte fine, ces bassins ont été ultérieurement remplis de lave, donnant naissance aux mers lunaires. Sur la face cachée, ce volcanisme n'a pas eu lieu, vraisemblablement en raison de la grande épaisseur de la croûte.

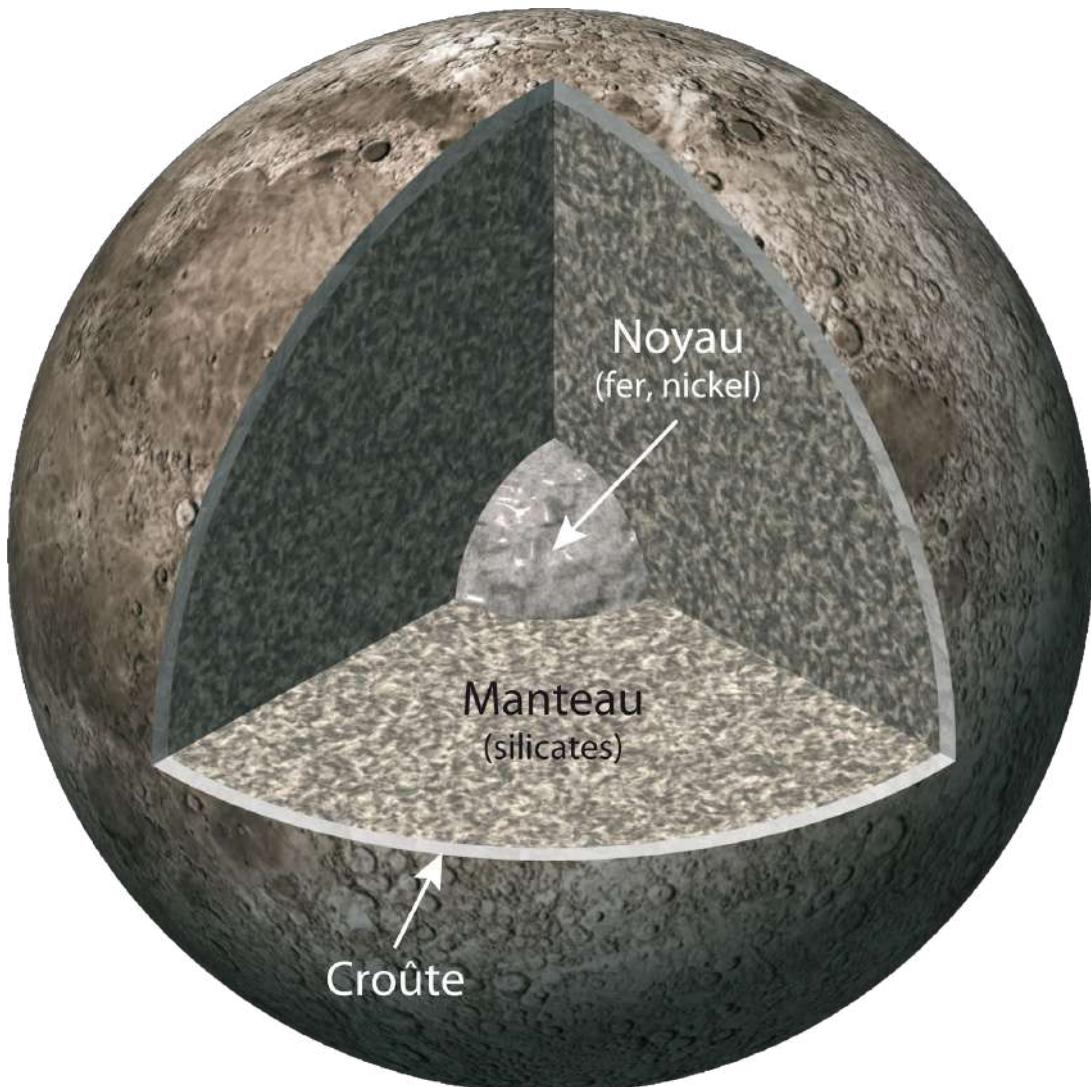
Les noms des principales structures de la face visible (mers, océans et cratères) ont été inventés au XVII^e siècle par le jésuite Giovanni Battista Riccioli. Publié en 1651, son ouvrage *Almagestum Novum*, en plus d'être une critique érudite de l'héliocentrisme, contient un système de nomenclature encore utilisé aujourd'hui. Il plaça sur la Lune des personnalités célèbres (savants, philosophes, religieux) de l'Antiquité, du Moyen Âge et quelques uns de ses contemporains. On retrouve ainsi les cratères Platon, Aristote, Tycho, Clavius etc. Il faut aussi reconnaître à Riccioli la grande probité d'avoir attribué de beaux cratères à Copernic, Kepler et Galilée, tous adversaires du géocentrisme cher aux jésuites. Quoique... les cratères en question se trouvent bien esseulés, loin des glorieux anciens. Bannis, en quelque sorte !



Prise par les astronautes de la mission *Apollo 11* en 1969, cette photographie présente une portion très cratérisée de la face cachée de la Lune. Le cratère central possède un diamètre de 80 km. La densité en cratères d'un terrain fournit un indice sur son âge : plus il est cratérisé, plus il est ancien.

Crédit : NASA.

Depuis des milliards d'années, les impacts incessants de météorites ont broyé les roches à la surface de la Lune. La croûte lunaire est donc entièrement recouverte par une couche de débris de quelques mètres appelée régolite. La croûte est plus épaisse sur la face cachée (100 km) que sur la face visible (60 km). Sous la croûte se trouve le manteau et au cœur existerait un petit noyau métallique partiellement fluide d'environ 400 km de rayon.



Crédit : Calvin Hamilton.

XI L'exploration de la Lune

En 1959, la sonde soviétique *Luna 1* est la première à survoler notre satellite. Dix ans plus tard, dans un contexte politique marqué par la compétition entre les États-Unis et l'Union soviétique, deux Américains réalisaient un des grands rêves de l'humanité : marcher sur la Lune. En tout, onze ingénieurs militaires et un scientifique américains ont foulé sa surface. Les données et les échantillons obtenus, complétés depuis par les observations d'une série de sondes internationales, ont permis entre autres de valider une théorie capable d'expliquer la formation de notre satellite. Plusieurs nations prévoient aujourd'hui de s'y poser, à la fois pour mieux le comprendre et pour l'exploiter en vue de l'exploration future du système solaire, notamment de la planète Mars.

XI.1 Les missions *Apollo* du programme américain

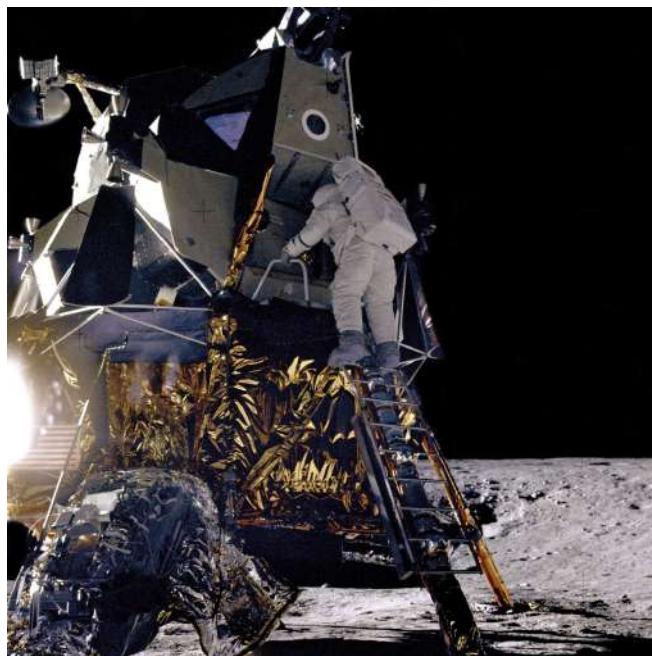
Pour parer à la suprématie naissante de l'Union soviétique dans le domaine spatial, le président américain John F. Kennedy décide en 1961 d'envoyer un astronaute sur la Lune. S'ensuivra une véritable course entre les deux superpuissances. Elle fut gagnée après de nombreux revers par les Américains le 20 juillet 1969, lorsque Neil Armstrong, commandant la mission *Apollo 11*, devint le premier homme à marcher sur la Lune.



L'équipage d'*Apollo 11* : de gauche à droite, Neil Armstrong (1930 – 2012), Michael Collins (né en 1930) et Buzz Aldrin (né en 1930). Crédit : NASA.



En ce 16 juillet 1969, la fusée *Saturn V* emporte les astronautes d'*Apollo 11* vers la Lune.
Crédit : NASA.

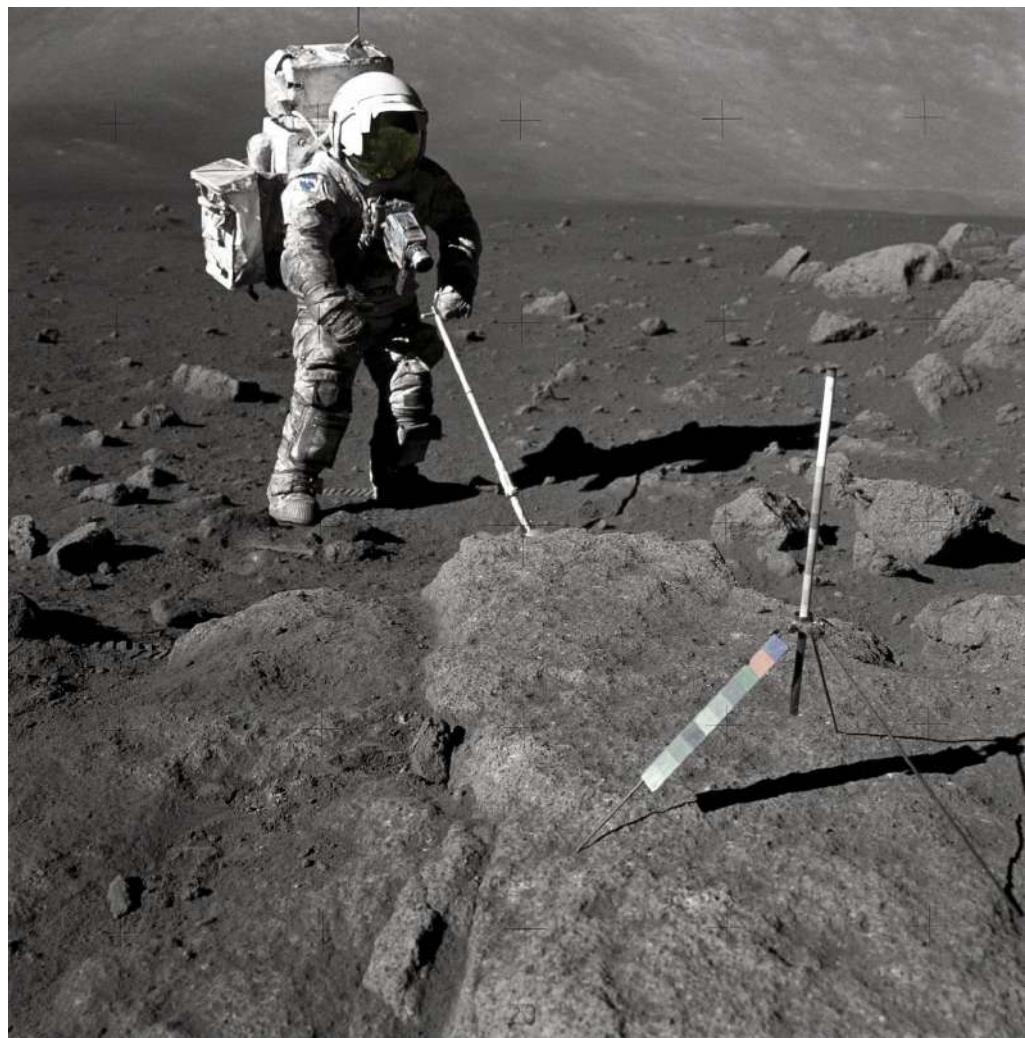


Le LEM (Lunar Exploration Module) permettait de descendre jusqu'à la surface. Il servait ensuite de base d'exploration après l'alunissage. Crédit : NASA.



Harrison Schmitt, pilote du module lunaire de la mission *Apollo 17*, déploie des panneaux solaires.

Crédit : NASA.

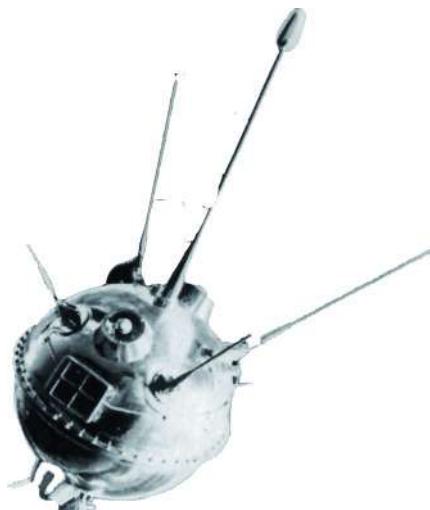


Les missions *Apollo* réservent de plus en plus de temps aux collectes d'échantillons et aux observations. Le sixième et dernier alunissage, celui d'*Apollo 17* le 11 décembre 1972, permet enfin l'étude directe de la surface par un scientifique, le géologue Harrison Schmitt. Crédit : NASA.

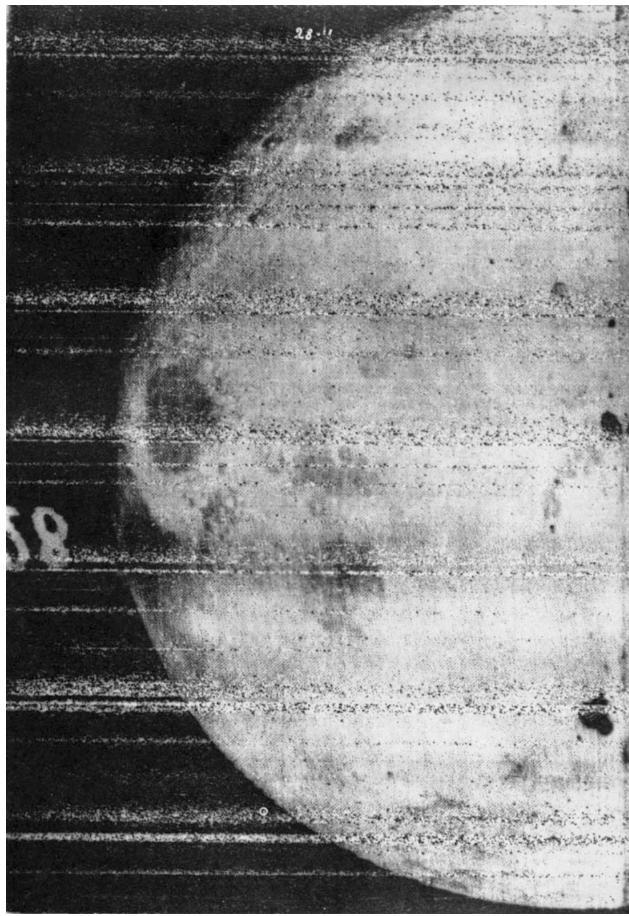


Les missions *Apollo* ont rapporté près de 2 200 échantillons de la surface lunaire totalisant 382 kg.
Crédit : NASA.

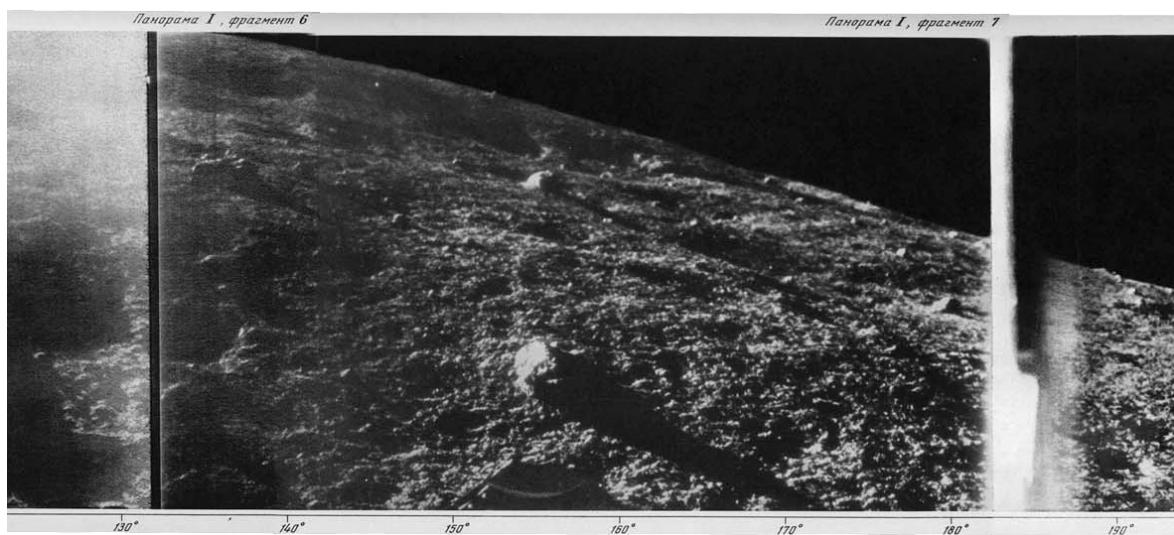
XI.2 Les "premières" du programme soviétique



Février 1959 : *Luna 1*, première sonde à survoler notre satellite.
Crédit : Programme d'exploration lunaire soviétique.



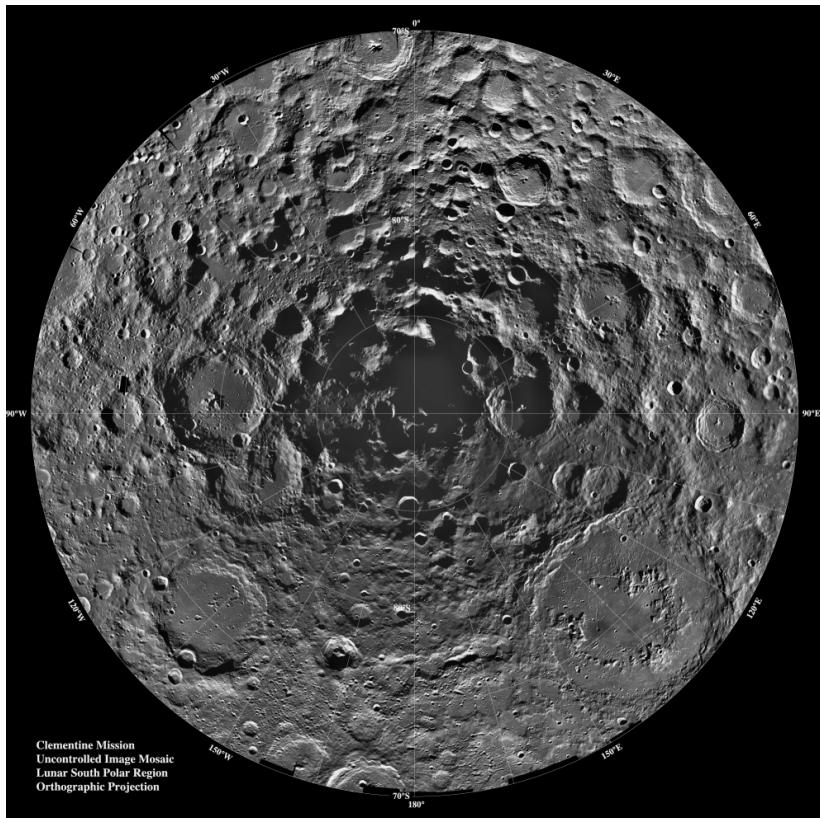
Octobre 1959 : la sonde *Luna 3* transmet les premiers clichés de la face cachée de la Lune.
Crédit : Programme d'exploration lunaire soviétique.



En mars 1966, *Luna 9* fut le premier engin à alunir en douceur et à envoyer des images depuis la surface.
Crédit : Programme d'exploration lunaire soviétique.

XI.3 Exploration récente et future

Après les programmes *Apollo* et *Luna*, l'exploration spatiale de la Lune cessa pendant près de vingt ans. Cependant, beaucoup restait à faire dans l'étude de notre satellite : par exemple, seules les régions proches de l'équateur avaient été survolées et cartographiées. C'est la raison pour laquelle un nouveau programme d'exploration plus modeste a été entrepris dans les années 1990, avec les petites missions *Clementine* (1994) et *Lunar Prospector* (1998).



Clementine réalisa la première cartographie complète de l'ensemble de la surface lunaire.

Crédit : NASA / JPL / USGS.

Notre satellite connaît un regain d'intérêt et de nouveaux pays se lancent dans son exploration. En 2007, le Japon et la Chine mirent en orbite respectivement en orbite les sondes *Kaguya* et *Chang'e 1*. En 2008, ce fut au tour de l'Inde avec *Chandrayaan 1*.

Depuis, les Américains ont réalisé l'essentiel des missions lunaires. Citons l'orbiteur *LRO* (pour Lunar Reconnaissance Orbiter) et l'impacteur *LCROSS* (pour Lunar Crater Observation and Sensing Satellite) en 2009, et les trois orbiteurs *Artemis*, *GRAIL* (pour Gravity Recovery and Interior Laboratory) et *LADEE* (pour Lunar Atmosphere and Dust Environment Explorer) respectivement en 2010, 2011 et 2013. Les Chinois ne sont pas en reste avec l'orbiteur *Chang'e 2* en 2013, l'orbiteur *Chang'e 3* et son rover baptisé *Yutu* en 2013 et l'atterrisseur *Chang'e 4* et son rover *Yutu 2* sur la face cachée de notre satellite. Le but avoué des Chinois est de déposer un homme à la surface de la Lune à l'horizon 2025-2030.

XI.4 Quel est aujourd'hui l'intérêt d'explorer la Lune ?

Sciences

Sur la face cachée : plate-forme idéale pour observer l'Univers à toutes les longueurs d'onde tout en étant protégé des interférences radio d'origine humaine.

Technologies

Banc d'essai pour les prochaines étapes de la colonisation du système solaire qui passeront par l'envoi de missions habitées vers la planète Mars.

Ressources

Base logistique et d'approvisionnement pour l'activité humaine dans l'espace. Exploitation éventuelle de l'hélium-3 déposé à la surface par le vent solaire comme carburant des futures centrales à fusion nucléaire. Exploitation éventuelle de l'eau présente dans les zones polaires sous forme de glace.



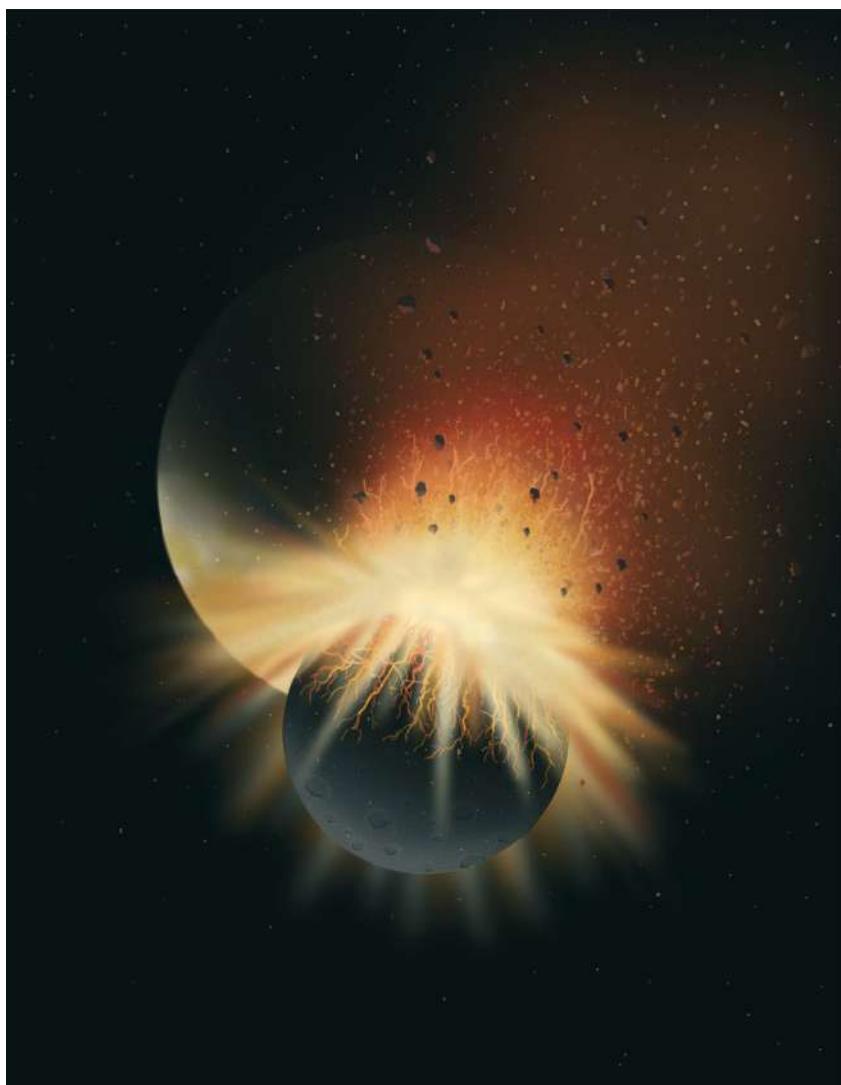
Concept d'installation humaine sur la Lune. Une base lunaire pourrait être utilisée pour les décollages vers Mars. En effet, ceux-ci seraient facilités par une gravité six fois plus faible que sur Terre. Crédit : NASA.



XII Un scénario possible de formation de la Lune

Les scientifiques pensent que la Lune s'est formée il y a 4,53 milliards d'années, conséquence de la collision d'un objet de la taille de la planète Mars avec la Terre. Du matériau rocheux, pauvre en fer, a été éjecté en orbite autour de la Terre et s'est agrégé pour produire la Lune. Cette théorie est étayée par plusieurs faits :

- le noyau de fer de la Lune est comparativement beaucoup plus petit que celui de la Terre ;
- notre planète et son satellite possèdent la même composition isotopique de l'oxygène et du titane. Les deux corps seraient donc constitués de matériaux de même origine ;
- l'étude des échantillons lunaires montrent que la Lune est appauvrie en éléments volatils (qui se volatilisent facilement). Ceci prouve que la Lune a connu un épisode très chaud, avec un océan magmatique global qui aurait cristallisé en moins de 200 millions d'années.

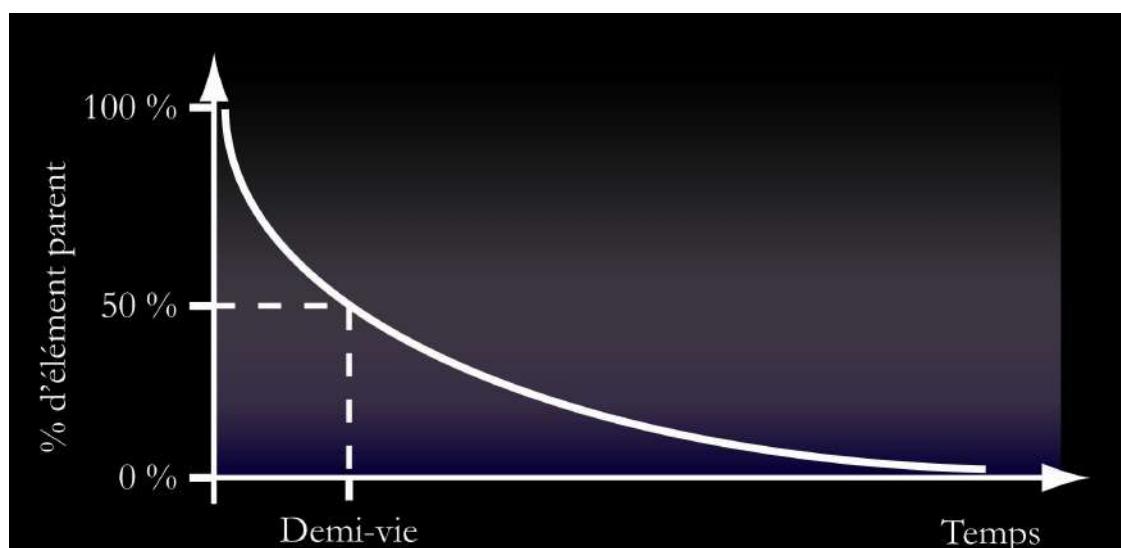


Vue d'artiste de la terrible collision ayant pu engendrer la Lune. Crédit : NASA / JPL / USGS.

XIII L'âge des terrains lunaires

XIII.1 Datation absolue par désintégrations radioactives

Certains éléments sont naturellement radioactifs. Instables, ils se désintègrent spontanément. Un élément « parent » se transforme en un élément « fils », qui peut être un nouvel élément, plus léger, ou bien un isotope du parent. Cette réaction de désintégration se produit selon une constante de temps caractéristique, indépendante des facteurs extérieurs. Ainsi, en mesurant la concentration en éléments parents et fils dans une roche, on peut calculer depuis combien de temps la réaction est active, et donc l'âge absolu de formation des minéraux de cette roche. Pour étudier les roches terrestres, les échantillons lunaires et les météorites, les géologues utilisent principalement les couples uranium/plomb ($^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$), rubidium/strontium ($^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$) et potassium/argon ($^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$).

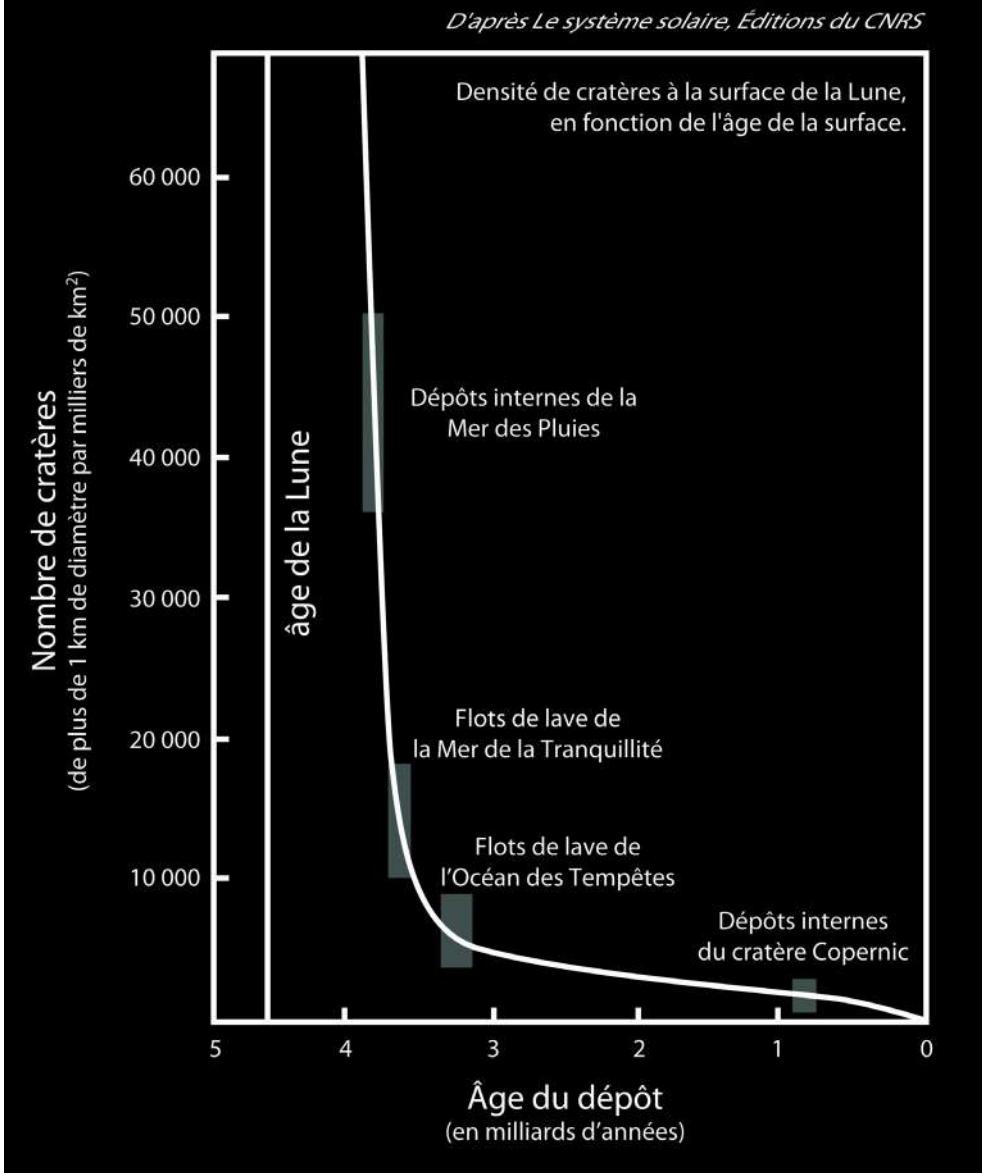


La réaction de désintégration d'un élément radioactif suit une courbe décroissante en exponentielle. La mesure de la proportion élément parent/élément fils dans un minéral permet de le positionner sur cette courbe et de déduire l'âge de sa formation.

XIII.2 Datation relative

Les cratères sont de bons indicateurs de l'âge d'une surface planétaire. En effet, depuis les missions *Apollo* et les datations absolues des échantillons lunaires rapportés, on sait que plus une surface présente de cratères d'impact, plus elle est vieille et que plus les cratères sont gros, plus ils sont vieux. On peut ainsi essayer de dater la surface des planètes telluriques et des satellites par étude de leur cratérisation.

D'après *Le système solaire*, Éditions du CNRS



Toutefois, l'activité géologique et l'érosion rendent les datations hautement incertaines car elles peuvent remodeler profondément les surfaces et effacer les traces du passé. De ce fait, l'étude des cratères ne suffit plus dans le cas de Mars : pour définir la chronologie précise de son histoire, il faudra attendre un retour d'échantillons de pierres martiennes afin de calibrer les datations de manière absolue.



FIN



Deux planches tirées de l'atlas céleste *Harmonia Macrocosmica* d'Andreas Cellarius, paru en 1660. Elles représentent les constellations de l'hémisphère boréal (planche du haut) et austral (planche du bas).