

# LE JOUR, LA NUIT, LES SAISONS

## I- Repérage sur la Terre

*Pierre BOUTELOUP*

### 1- Méridiens, parallèles

La Terre tournant sur elle-même autour d'un axe approximativement invariable, possède deux points fixes en ce qui concerne ce mouvement, les pôles nord et sud.

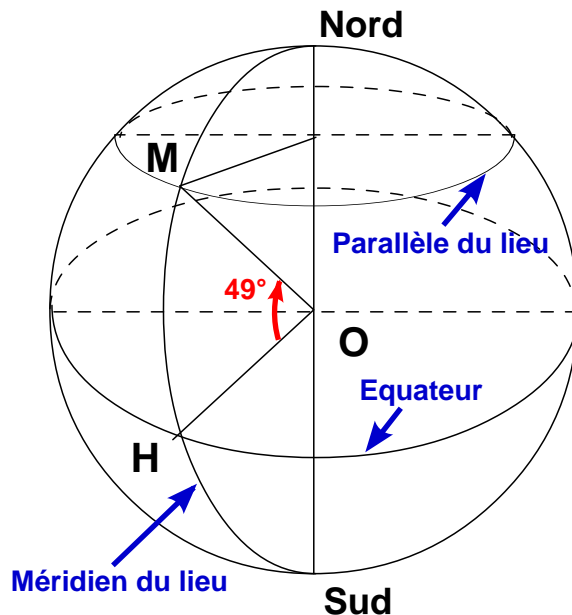
Les méridiens sont des demi-cercles reliant un pôle à l'autre. On en a choisi un conventionnellement comme origine pour repérer les longitudes, le méridien de Greenwich passant par l'observatoire de Greenwich (banlieue de Londres).

Les parallèles sont des cercles situés dans des plans parallèles au plan équatorial contenant un parallèle particulier, qui s'impose comme origine des latitudes, l'équateur. Il existe d'autres parallèles particuliers, comme nous le verrons avec les saisons : les tropiques et les cercles polaires.

### 2- Longitude, latitude

Au pôle, les méridiens convergent et sont localement très proches de droites concourantes, ce qui permet de définir la longitude comme l'angle au pôle entre le méridien du lieu et le méridien de Greenwich.



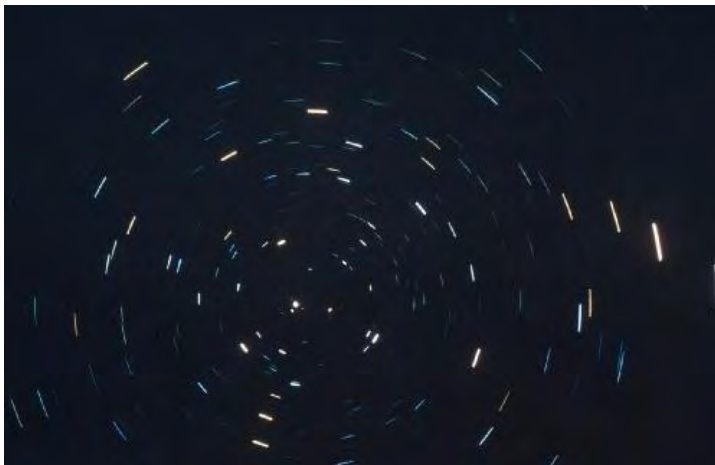


La latitude est l'angle  $H\hat{O}M$ ,  $O$  étant le centre de la Terre,  $M$  le lieu considéré, et  $H$  le point de l'équateur de même longitude que  $M$ . Cergy est environ à  $49^\circ$  de latitude Nord et  $2^\circ$  de longitude Est, comme on le voit facilement avec le logiciel Google Earth. En tout point de la surface terrestre, il passe un méridien et un parallèle. Ces derniers sont localement deux droites perpendiculaires qui définissent les quatre points cardinaux, Nord, Sud, Est, Ouest, comme on le voit sur la figure ci-dessus.

## II- Le Jour et la nuit

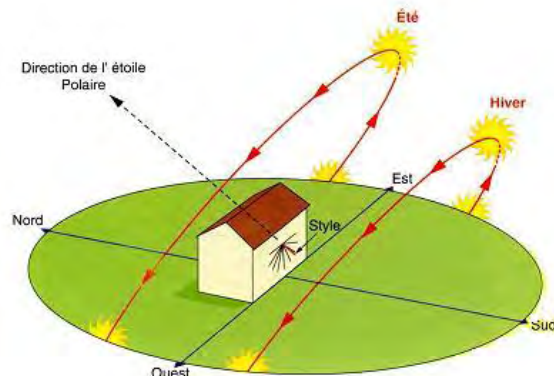
### 1- Les faits expérimentaux

On constate que le Soleil se déplace dans le ciel. Mais il n'est pas le seul, tous les objets astronomiques se déplacent dans un mouvement d'ensemble dans lequel ils sont solidaires, et de période environ 24h. Bien sûr, ce mouvement est interprété comme la conséquence du mouvement de rotation de la Terre sur elle-même. On voit sur la photo ci-dessous, une pose montrant la rotation des étoiles dans le ciel autour de l'étoile polaire au centre. La rotation se fait dans les sens inverse des aiguilles d'une montre. La hauteur de l'étoile polaire au-dessus de l'horizon est égale à la latitude du lieu.



## 2- Le mouvement apparent du Soleil

Mais voyons plus en détail comment on peut étudier le mouvement du Soleil. La photographie ci-dessous nous montre un petit tube dont la direction est repérée par deux angles par rapport à l'ensemble, qui est supposé être placé sur un sol horizontal et orienté vers le Sud (à l'aide de la boussole que l'on voit sur l'arrière de la photographie) : l'angle de direction horizontal, ou *azimuth*, et l'angle de hauteur au-dessus de l'horizon. On peut par la mesure de ces deux angles, complètement repérer la position du Soleil dans le ciel pour différents moments de la journée, car quand le tube a la même direction que le Soleil, la lumière du Soleil le traverse (on peut également utiliser un saladier transparent pour cette expérience et coller à différents moments de la journée des gommettes pour que leurs ombres aillent toujours au centre). On se rend compte que peu importe la distance du Soleil pour ce genre d'observation, et on peut considérer que tous les astres sont à la même distance sur une sphère fictive, la **sphère céleste**. On arrive alors à la représentation du mouvement du Soleil sur le dessin, extrait du livre de la collection Tournesol *CM1* par Marc Antoine Hatier 1996. Ce dessin est une représentation en perspective d'une maquette où l'on voit que la trajectoire du Soleil est un cercle sur la sphère céleste. Comment retrouver théoriquement ces résultats?



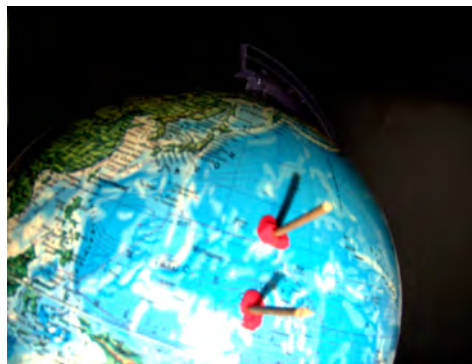
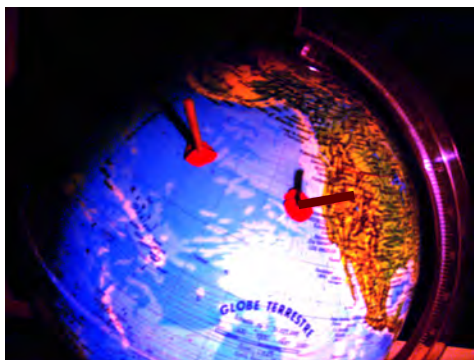
En ce qui concerne l'utilisation de la boussole, l'angle actuel entre le Nord géographique et le Nord magnétique appelé déclinaison magnétique est négligeable.

Sur la photo où les étoiles tournent autour de l'étoile polaire, on observe que les étoiles sont colorées. Le temps que met une étoile pour revenir au même endroit dans le ciel après avoir fait un tour autour de l'étoile polaire est **le jour sidéral de 23 heures 56 minutes**. Pendant ce temps, le Soleil a dérivé sur le fond des étoiles, dans le sens des aiguilles d'une montre autour de la polaire, de  $1^\circ$  environ. Ce mouvement apparent du Soleil sur le fond des étoiles est dû au mouvement de rotation de la Terre autour du Soleil en un an ( $\approx 365,25$  jours). Il faut donc un peu plus de temps, soit **24 h** en moyenne pour que le Soleil revienne au sud par exemple après avoir fait un tour; c'est **le jour solaire**.

## 3- Rotation de la Terre sur elle-même

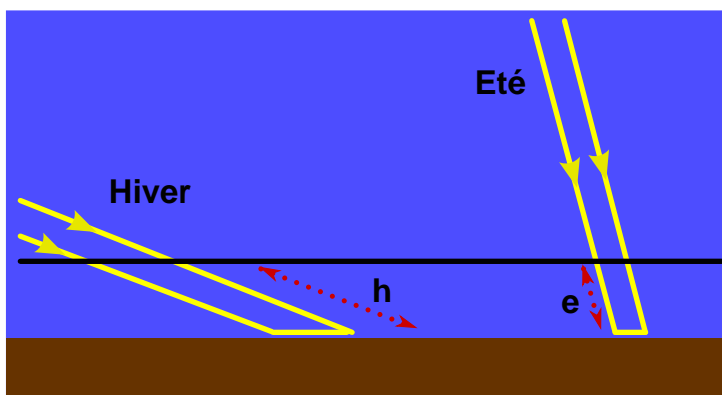
Pour repérer plus simplement le mouvement apparent du Soleil, on peut étudier le mouvement de l'ombre d'un bâton vertical (Gnomon). On constate qu'elle tourne dans le sens des aiguilles d'une montre, en diminuant puis en augmentant de longueur. On constate que la longueur est minimale quand l'ombre pointe vers le nord; le soleil culmine au sud, il est midi au soleil. On retrouve ces résultats expérimentaux en faisant tourner un globe terrestre autour de l'axe des pôles, dans le sens inverse des

aiguilles d'une montre, en l'éclairant avec un projecteur et en ayant au préalable planté des allumettes dedans. Bien sûr ce n'est pas une preuve que la Terre tourne sur elle-même, mais de toute façon, aucune preuve ne peut exister, vu qu'avec la relativité générale d'Einstein, on peut considérer que c'est tout l'Univers qui tourne autour de la Terre en 23 heures 56 minutes. La soi-disant preuve du pendule de Foucault (une masse oscillant au bout d'une ficelle voit son plan d'oscillation lentement tourner par rapport au sol) n'en est pas une. Si l'on considère que l'Univers tourne autour de la Terre, l'effet gravitomagnétique fait bien tourner le pendule de Foucault (effet de Lense et Thirring, Univers de Gödel).



On constate le phénomène du décalage horaire pour deux allumettes de longitudes différentes, et on constate que plus l'allumette est près de l'équateur, plus son ombre est courte. Cela vient du fait que la direction de l'axe des pôles est toujours voisine d'être perpendiculaire à la direction Terre-Soleil.

Le Soleil est donc vu plus haut dans le ciel près de l'équateur, et cela implique qu'il chauffe plus, un faisceau de lumière solaire étant ainsi concentré sur une plus petite surface. C'est pour cela que lorsqu'on va vers l'équateur, il fait de plus en plus chaud.

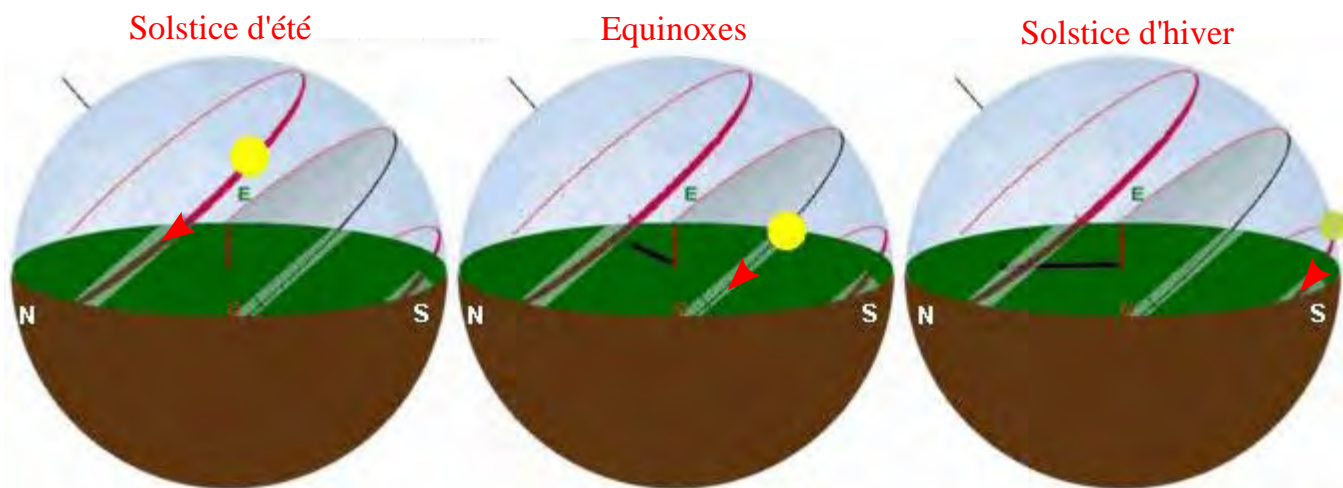


En plus, la lumière d'un soleil haut traverse moins d'atmosphère ( $e < h$ ) et un soleil haut est donc plus ardent.

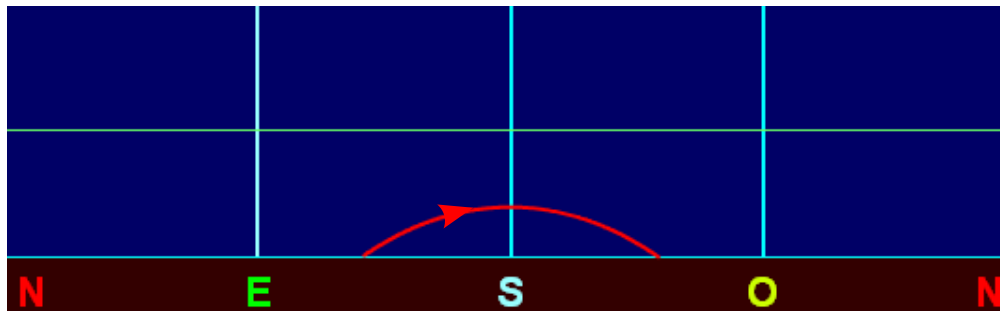
En résumé, dans son mouvement apparent, vu depuis un observateur sur le sol terrestre, le Soleil semble se déplacer sur une sphère, la sphère céleste. Sur cette sphère, il décrit en une journée un cercle parcouru dans le sens des aiguilles d'une montre, vu depuis l'hémisphère nord. Ce cercle est dans un plan perpendiculaire à l'axe des pôles, centré sur le point d'intersection de cet axe des pôles avec son plan.

Vu en regardant l'horizon sud, le soleil se déplace vers la droite, vu dans l'hémisphère nord, en se levant vers l'est et en se couchant vers l'ouest. Le Soleil culmine au sud. Dans nos régions, il ne passe jamais au Zénith (à la verticale). La trajectoire apparente du Soleil change d'une saison à l'autre, comme le montrent les schémas à la page suivante.



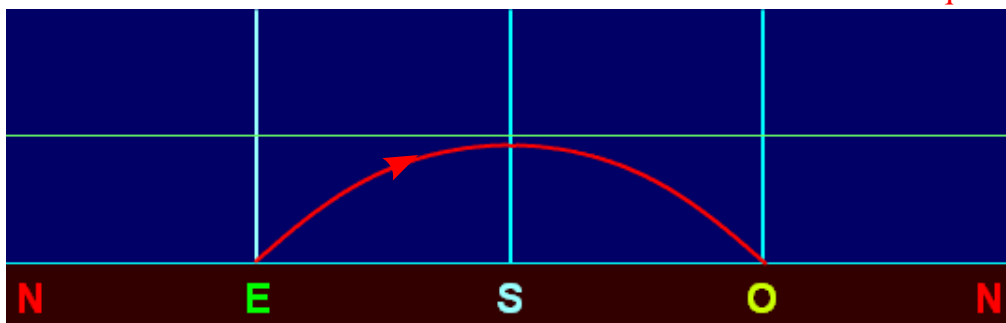


Solstice d'hiver



Lever au sud-est, coucher au sud-ouest

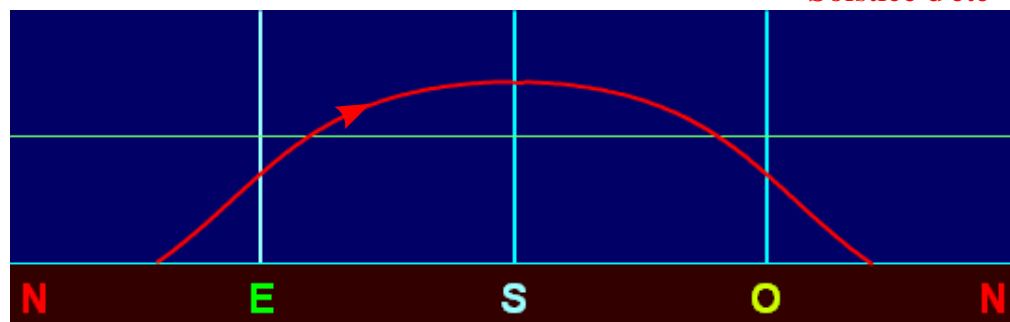
Equinoxes



Lever à l'est, coucher à l'ouest

Solstice d'été

Lever au nord-est, coucher au nord-ouest

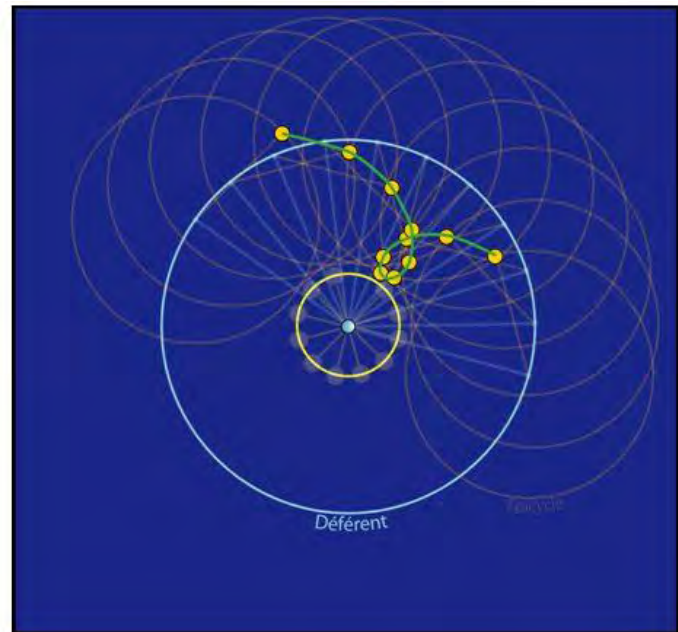
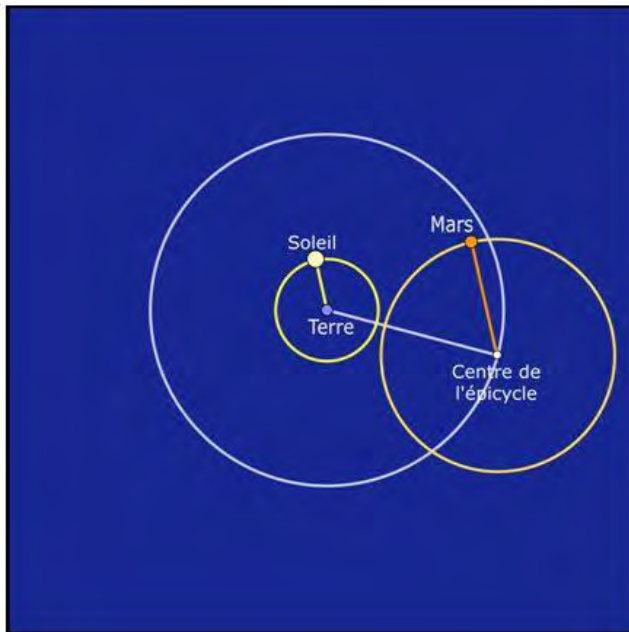


### III- Les saisons

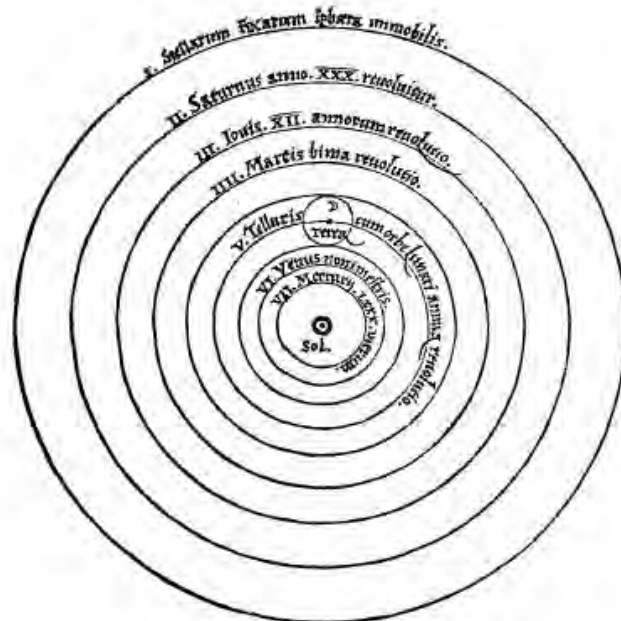
#### 1- Quelques repères d'histoire de l'astronomie

Dans l'antiquité, les hommes pensaient que la Terre était immobile et au centre du monde. Le Soleil et les planètes tournaient autour de la Terre en décrivant des cercles, c'est la représentation géocentrique.

Ptolémée (90-168) décrit dans *l'Almageste* (publication en 141) le mouvement des planètes et du Soleil autour de la Terre à base d'emboîtement comme des poupées russes de mouvements circulaires (Epicyles). Ce modèle, très complexe, permet de faire des prévisions quant à la position future d'une planète dans le ciel parmi les étoiles. Aucune observation à l'œil nu ne permet de contredire ce modèle. Cela explique pourquoi il a été conservé aussi longtemps.



Copernic (1473-1543) dans *De Revolutionibus* publié en 1543 propose un modèle géométrique plus simple que celui de Ptolémée : le Soleil est au centre et toutes les planètes, y compris la Terre, tournent autour de lui en décrivant des cercles. Ce modèle héliocentrique, contrairement à celui de Ptolémée, permet d'expliquer la rétrogradation de Mars sans ajout d'hypothèse ad hoc supplémentaire.



Galilée (1564-1642) fait pour la première fois des observations du ciel avec un instrument d'optique, une lunette astronomique. Il découvre des choses incroyables pour ses contemporains : des montagnes sur la Lune, des taches sur le Soleil « le monde du ciel n'est donc pas parfait », des satellites autour de Jupiter « tout ne tourne donc pas autour de la Terre », les phases et les variations de taille apparente de Vénus, qui falsifient définitivement le modèle de Ptolémée. Ses observations confirment parfaitement le modèle de Copernic, la Terre tourne sur elle-même et autour du Soleil. Le 12 mars 1610, il publie à Venise ses découvertes dans *Sidereus Nuncius* (Le Messager céleste).

Képler (1571-1630) comprend grâce aux observations extrêmement précises de Tycho Brahé (1546-1601) que Mars a une orbite elliptique et non circulaire. La Terre et les autres planètes ont aussi une

orbite elliptique. Kepler a ainsi découvert les trois lois dites de Kepler qui régissent les mouvements des planètes sur leurs orbites. Les deux premières sont publiées en 1609 dans un livre intitulé *Astronomia Nova*. La troisième seulement en 1618.

Newton (1642-1727) publie en 1687 son œuvre majeure : *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*. Il y démontre les trois lois de Képler dans le cadre d'une théorie physique, la mécanique de Newton, totalement mathématisée, et apportant de nouveaux concepts : masse, inertie, force, gravitation universelle. Cette théorie résout définitivement le problème des marées.

Foucault (1819-1868) réalise en 1851 avec son pendule la première expérience qui montre que la Terre tourne sur elle-même. Cette expérience peut être observée au musée des arts et métiers à Paris et au palais de la découverte.

Einstein (1879-1955) prouve définitivement en 1915 avec sa théorie de la relativité générale, que la question de savoir si c'est la Terre qui tourne sur elle-même ou si c'est tout l'Univers qui tourne autour de la Terre n'a pas de sens et est pure convention du choix de référentiel.

## 2- Direction fixe de l'axe des pôles

Une toupie laissée à elle-même dans l'espace a son axe de rotation qui garde une direction fixe. On peut vérifier cela en faisant léviter une toupie qui tourne vite au-dessus d'aimants. La force magnétique annule la gravitation.

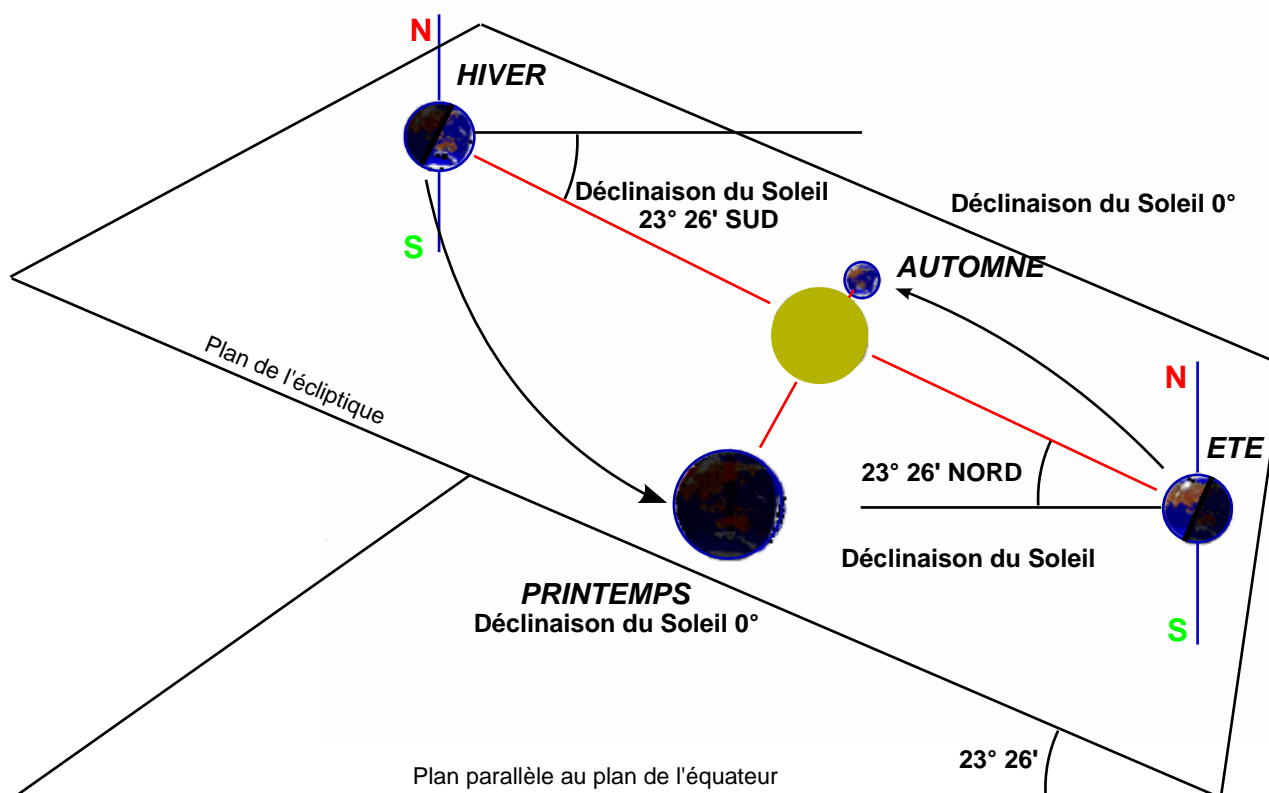


Tel est le cas de la Terre qui tourne autour du Soleil. On peut considérer qu'elle est en permanence en chute libre vers le Soleil, comme tout objet attiré par un centre attracteur. Or Einstein a montré que la physique dans un objet en chute libre est exactement la même que si l'objet était placé dans un endroit où toute gravitation est exclue (principe d'équivalence entre l'inertie et la gravitation). D'autre part, la Terre peut être considérée comme une toupie, puisqu'elle tourne sur elle-même. L'axe de la Terre garde donc une direction fixe par rapport aux étoiles lointaines, et cela peut se vérifier par l'observation en constatant qu'au cours de l'année, l'étoile polaire reste toujours étoile polaire.

### 3- Obliquité de l'écliptique

La Terre tourne autour du Soleil dans un plan, appelé **plan de l'écliptique**, car c'est quand la Lune est dans ce plan que les éclipses ont lieu. Ce plan est oblique par rapport au plan de l'équateur, d'où le terme **obliquité** de l'écliptique. Autrement dit, l'axe des pôles est incliné de  $23^{\circ}26'$  ou  $23,5^{\circ}$  par rapport à la perpendiculaire au plan de l'écliptique. Ce phénomène est à l'origine des saisons, car on voit sur l'image ci-dessous que suivant les moments de l'année (la Terre tourne autour du Soleil en un an), le pôle Nord par exemple, est éclairé ou non.

La Terre monte « au-dessus » du Soleil l'hiver et descend « en dessous » du Soleil l'été (dessus et dessous fond référence à la maquette). La direction du Soleil fait donc un angle variable avec le plan de l'équateur. Cet angle est appelé la **déclinaison** du Soleil. Le mécanisme des saisons peut donc s'expliquer en disant que le Soleil monte au-dessus du plan de l'équateur l'été, et descend en dessous du plan de l'équateur l'hiver. Ces positions sont repérées par la déclinaison du Soleil, qui est maximale (nord ou sud) aux solstices (21 juin, début de l'été et 21 décembre, début de l'hiver) et vaut zéro aux équinoxes (le Soleil est dans le plan de l'équateur) les 21 mars, début du printemps et 23 septembre, début de l'automne. Remarquons que ce modèle explique bien pourquoi les saisons sont inversées dans l'hémisphère sud.

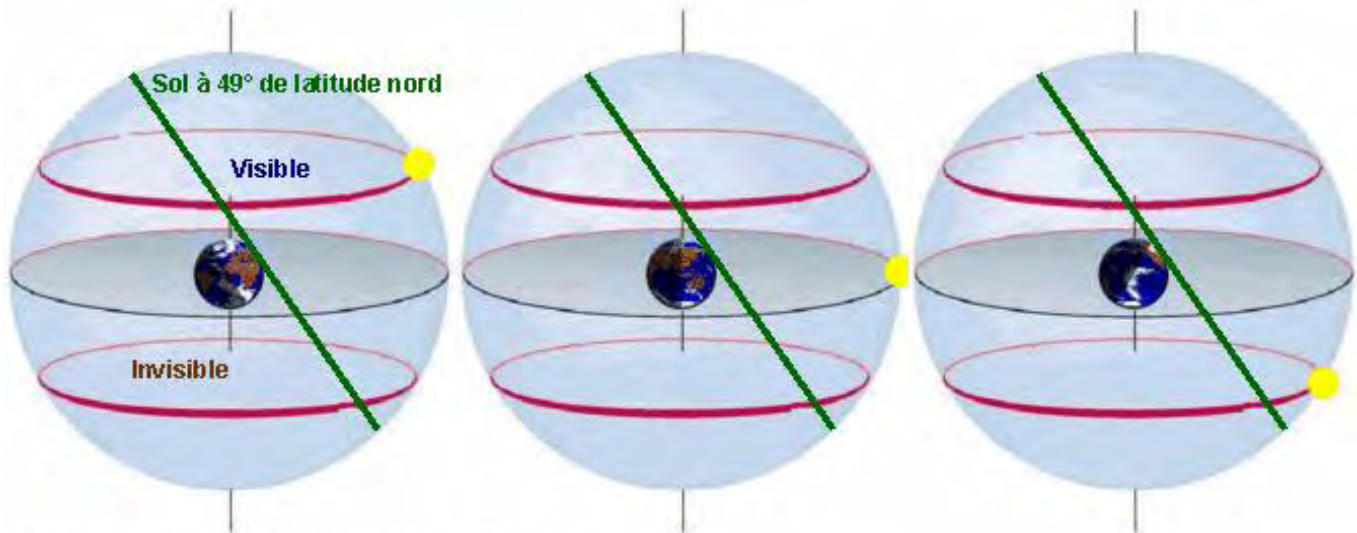


### 4- Saisons astronomiques

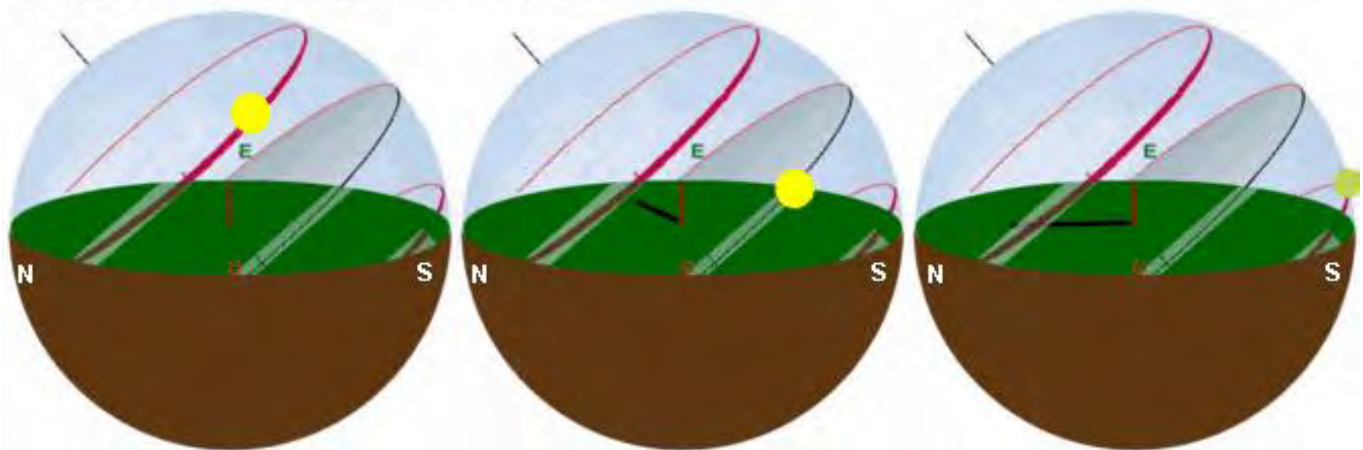
Le dessin ci-dessous montre le lien entre la position du Soleil sur la sphère céleste suivant les saisons : au-dessus, en dessous ou dans le plan de l'équateur, et la trajectoire apparente du Soleil dans le ciel, donc sur la sphère céleste. On voit que l'été, la durée du jour est plus grande, 16 heures pour Cergy au solstice d'été (12h aux équinoxes et 8h au solstice d'hiver), et le Soleil culmine au sud (à midi au soleil) plus haut



dans le ciel. Ces deux effets sont à l'origine de la plus grande température l'été. Quand le Soleil est plus haut, il chauffe plus ardemment, car sa lumière se disperse sur une plus petite surface. D'autre part, l'été, le Soleil se lève au nord-est et se couche au nord-ouest, l'hiver il se lève au sud-est et se couche au sud-ouest, et il se lève à l'est et se couche à l'ouest uniquement aux équinoxes (latin *aequinoctium*, de *aequus*, égal, et *nox*, noctis, nuit : jour égal nuit) ; solstice : latin *solstitium*, de *sol* soleil et *stare*, rester sur sa position (anglais *to stare* = regarder fixement).



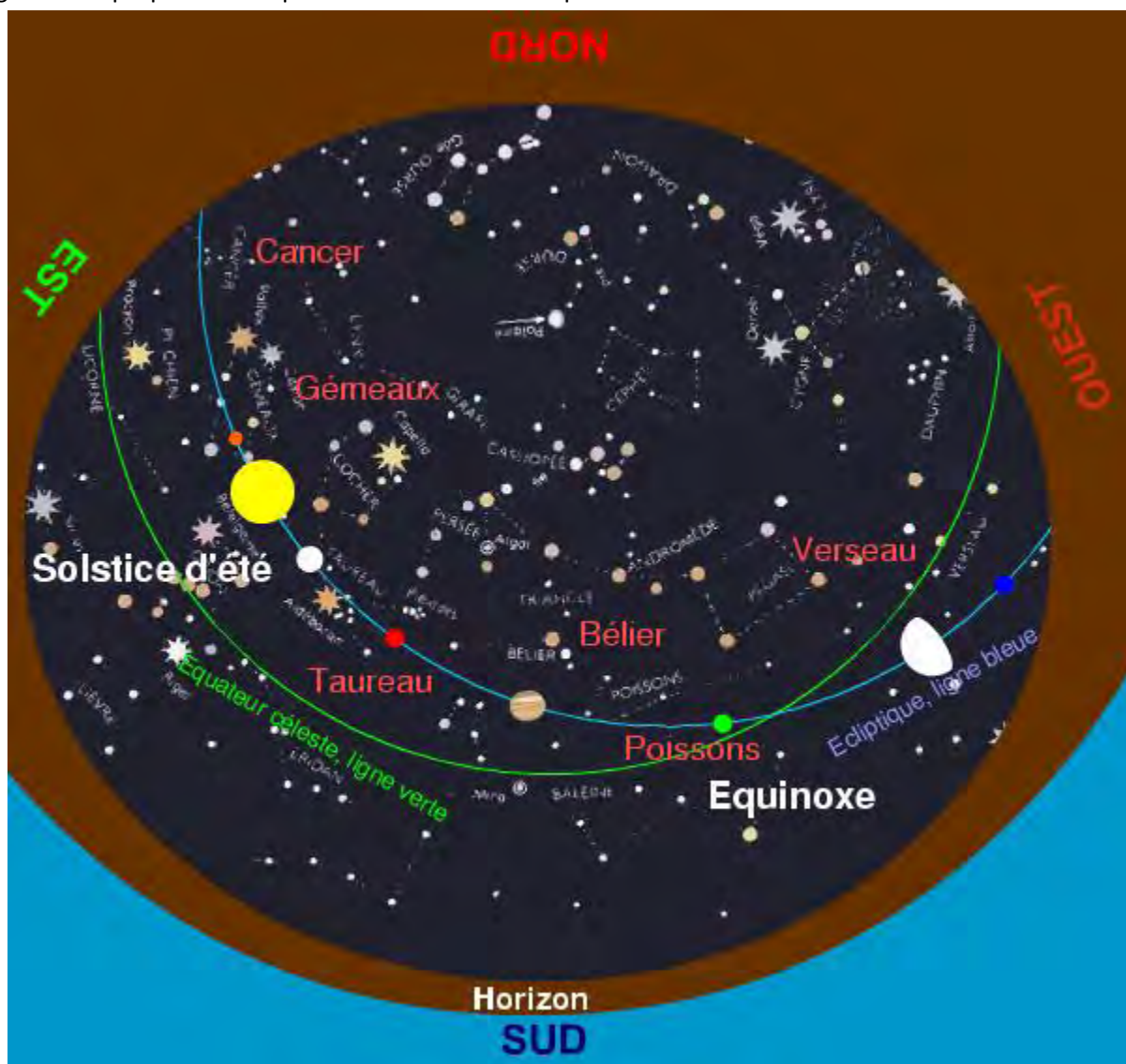
Le rayon de la sphère céleste n'intervient pas



## 5- Saisons et astrologie

Le Soleil, vu depuis la Terre considérée comme fixe, monte donc au-dessus du plan de l'équateur ou descend en dessous du plan de l'équateur sur la sphère céleste. Quand la saison varie, le Soleil s'éloigne donc ou se rapproche, en direction, de l'étoile polaire. Le Soleil se déplace parmi les constellations du Zodiaque. En effet, la Terre tournant autour du Soleil, de la Terre, le Soleil est vu devant des constellations différentes suivant les différents moments de l'année. Ces douze constellations du Zodiaque qui sont les constellations traversées par le Soleil dans les douze mois de l'année sont les constellations situées dans le plan de l'écliptique. On vérifie qu'au cours de ce déplacement apparent du Soleil sur le fond des étoiles, sur la ligne bleue qu'on appelle aussi écliptique, il se rapproche puis s'éloigne de l'étoile polaire. La ligne verte correspond à l'équateur céleste, ensemble des points à l'infini

situés dans le plan de l'équateur. L'inclinaison de l'axe des pôles se traduit ici par le fait que les deux lignes « écliptique » et « équateur céleste » ne sont pas confondues.

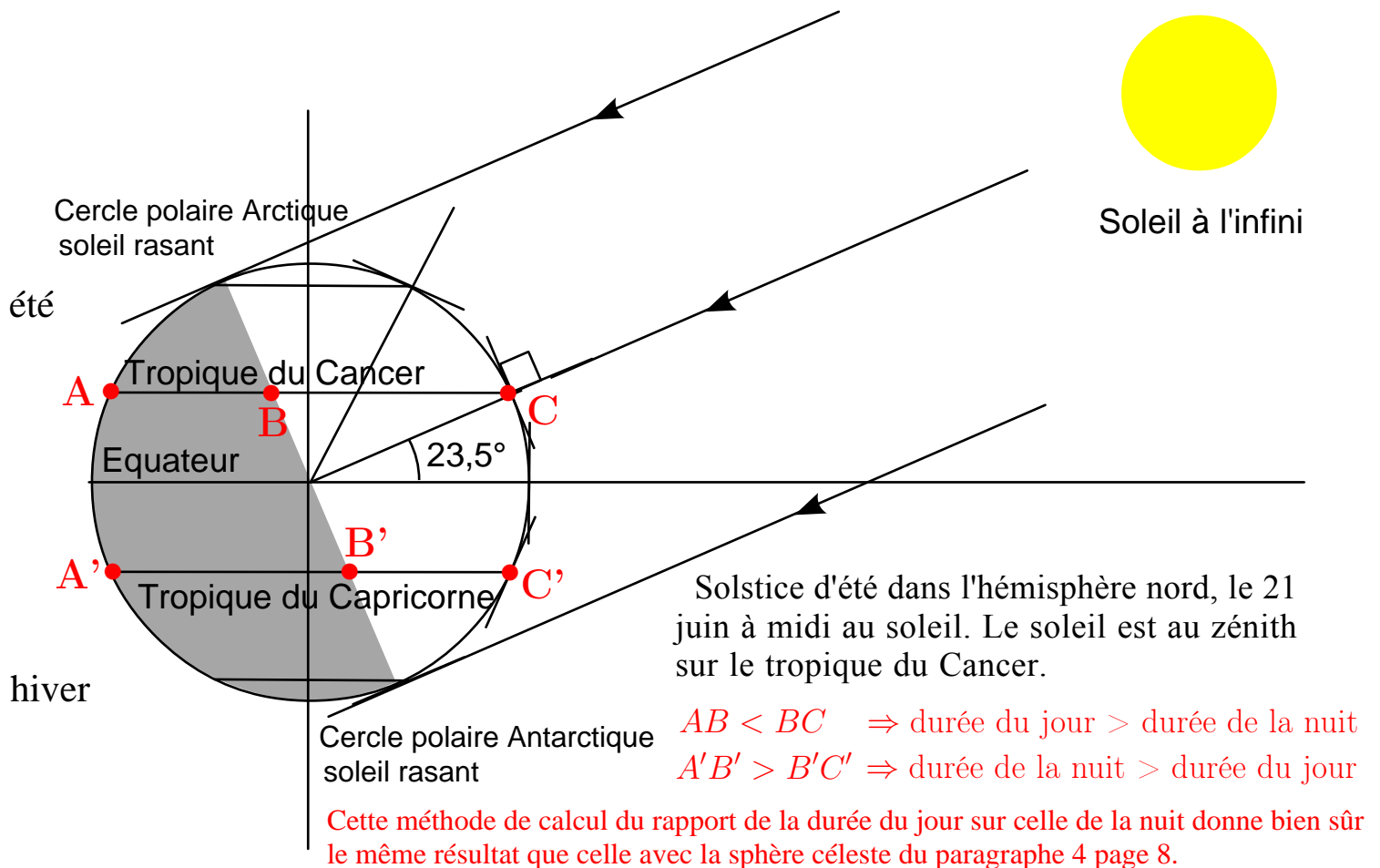


Présentement, au solstice d'été, le 21 juin, le Soleil est dans la constellation des Gémeaux. Ceci tout simplement parce que l'axe des pôles pointe par le nord, vers cette constellation de l'écliptique. Or l'axe des pôles tourne lentement en environ 26000 ans autour de la direction perpendiculaire au plan de l'écliptique à cause des perturbations gravitationnelles de la Lune et du Soleil (précession des équinoxes, due à l'action de redressement par effet de marée du bourrelet équatorial de la Terre vers le plan de l'écliptique). Une toupie posée de travers sur une table précesse aussi pour une raison identique (là c'est le poids agissant de travers qui est à l'origine du phénomène). Il y a 2000 ans, quand Hipparque a créé l'astrologie, le pôle nord pointait vers la constellation du Cancer; c'est pourquoi quelqu'un qui est né autour du 21 juin, est du point de vue de l'astrologie dans la constellation du Cancer, alors qu'en fait, quand cette personne est née, le Soleil était dans la constellation des Gémeaux.

L'astrologie n'a donc aucun sens. Mais c'est de là que viennent les noms de tropique du Cancer et tropique du Capricorne.

## 6- Cercles polaires, tropiques

Le cercle polaire arctique délimite l'ensemble des points où le soleil ne se lève pas au solstice d'hiver de l'hémisphère nord, et l'ensemble des points où le soleil ne se couche pas au solstice d'été. Idem, hémisphère sud, cercle polaire antarctique. Le tropique du Cancer est l'ensemble des points où à midi au soleil, le jour du solstice d'été, le soleil est au zénith. Idem, hémisphère sud, tropique du Capricorne. Les régions tropicales sont les régions entre les deux tropiques ; dans ces régions, il y a toujours un moment où le soleil peut être à la verticale (zénith). Les régions tempérées sont entre un tropique et le cercle polaire correspondant, et enfin les régions polaires, au-delà des cercles polaires.



## IV- Les cadrans solaires

### 1- Fabrication

Le style qui donne l'ombre doit être parallèle à l'axe des pôles, sinon l'ombre n'a pas la même position pour une heure donnée suivant le moment de l'année. Le style pointe donc vers l'étoile polaire. Si l'ombre se projette sur un plan perpendiculaire au style, on dit qu'on a un cadran solaire équatorial. Dans ce cas, l'angle entre deux heures successives est régulièrement de  $360/24 = 15^\circ$ . Si l'ombre se projette sur le plan horizontal, on a un cadran solaire horizontal, et réciproquement vertical en cas de projection sur

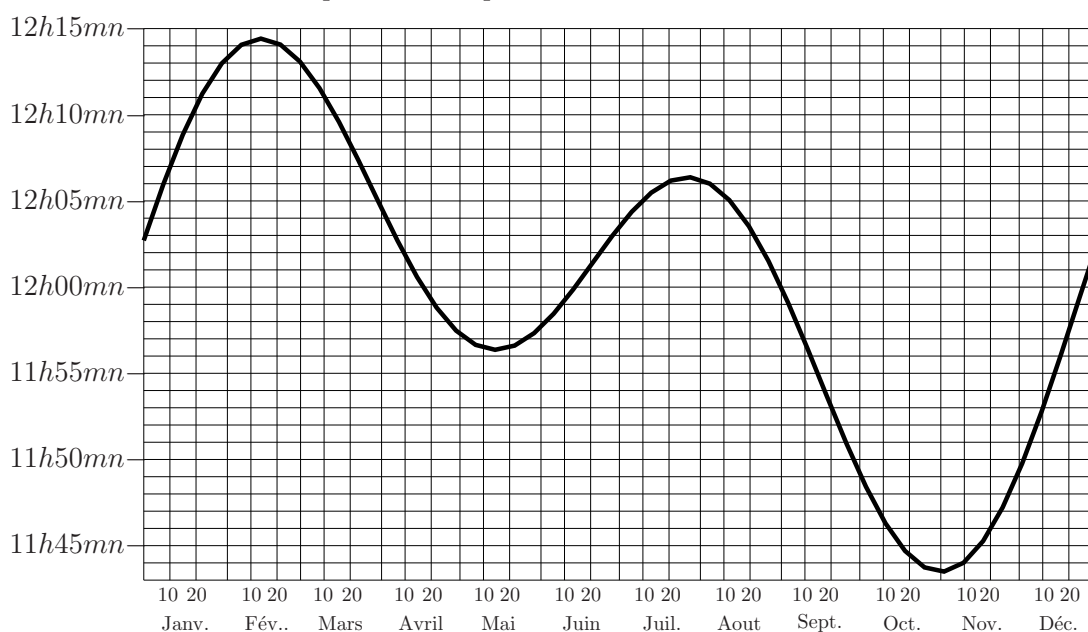
un plan vertical. Dans ces deux derniers cas, l'angle entre deux heures successives est compliqué et n'est pas régulier. Le style fait un angle égal à la latitude du lieu avec le plan horizontal et pointe vers le nord.

## 2- Lecture de l'heure

Quand le Soleil passe au sud, on dit qu'il est midi au soleil. Pour en déduire l'heure à la montre, il faut voir l'heure indiquée au même moment par un cadran solaire placé sur le méridien de Greenwich, méridien de référence. Il faut donc faire la correction de longitude à raison de 4 minutes par degré. Exemple à Cergy, 2° est par rapport au méridien de Greenwich, il faut retirer  $2 \times 4 = 8$  minutes.

Ensuite il faut faire une correction **d'équation du temps**, car le Soleil est une mauvaise horloge qui avance ou retarde sur le temps moyen de Greenwich : GMT suivant le moment de l'année.

Heure en temps universel quand il est midi à un cadran solaire à Greenwich



Exemple, le 1 novembre, il faut enlever 16 minutes.

Ensuite, il faut faire la correction de fuseau horaire, c'est-à-dire, en France, ajouter une heure l'hiver et deux heures l'été. Ainsi, quand le cadran solaire indique midi à Cergy, le soleil culminant au sud le 7 novembre, il est midi - 8 - 16 + 60 = 12h 36 mn.

## 3- Pourquoi le Soleil est une mauvaise horloge

Nous avons vu que le jour solaire est différent du jour sidéral par le fait que le Soleil dérive sur le fond des étoiles d'un jour à l'autre. Mais cette dérive est variable pour deux raisons : la vitesse de dérive est variable, car la distance de la Terre au Soleil varie (la Terre est au plus près du Soleil vers le 3 janvier) et la Terre va plus ou moins vite sur son orbite (troisième loi de Kepler). Elle va plus vite quand elle est plus près du Soleil. Ensuite, pour avoir le décalage horaire dû à cette dérive du Soleil, il faut projeter depuis la polaire sur l'équateur céleste, car c'est sur l'équateur céleste que les angles depuis la polaire sont proportionnels au temps qui passe. Le jour solaire n'est donc pas régulier, et le soleil prend de l'avance ou du retard sur les montres qui sont, elles, régulières.

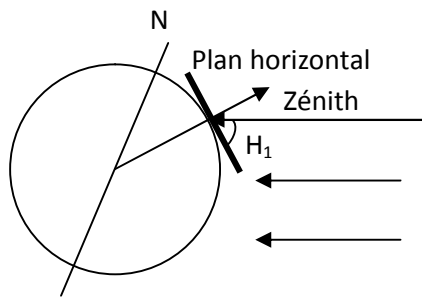
En résumé, du fait de l'inclinaison de l'axe des pôles par rapport à la perpendiculaire au plan de l'écliptique, le mécanisme des saisons apparaît, lors de la révolution de la Terre autour du Soleil.

L'été, le jour dure plus longtemps que la nuit. A Cergy, il y a 16 heures de jour et 8 heures de nuit le jour du solstice d'été. L'hiver, la nuit dure plus longtemps que le jour (16 h de nuit pour 8 h de jour au solstice d'hiver).

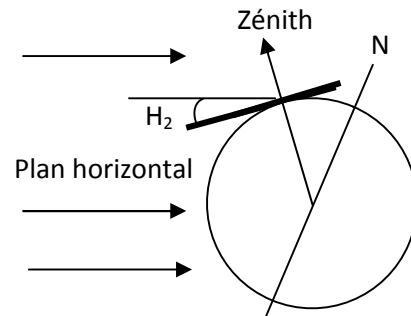
D'autre part, le Soleil culmine au sud plus haut l'été que l'hiver.

Ces deux effets contribuent tous les deux au fait qu'il fasse plus chaud l'été que l'hiver.

Les schémas ci-dessous faits aux solstices, expliquent cela.

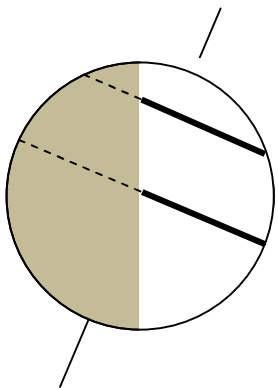


La Terre le 21 juin

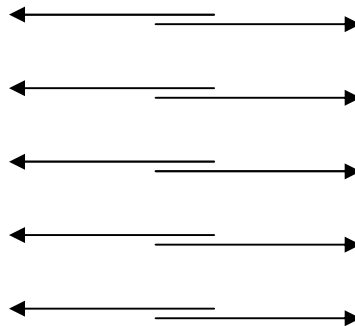


La Terre le 21 décembre

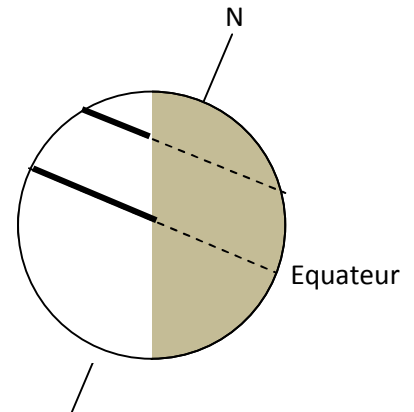
La Terre le 21 juin



**Solstice d'été** : la journée est longue dans l'hémisphère nord



La Terre le 21 décembre



**Solstice d'hiver** : la journée est courte dans l'hémisphère nord

Etymologie venant du latin : solstice = arrêt du Soleil, sa déclinaison reste constante quelques jours. sol = soleil ; stare = s'arrêter

équinoxe = les jours sont égaux aux nuits. aequus = égal ; nox, noctis = nuit



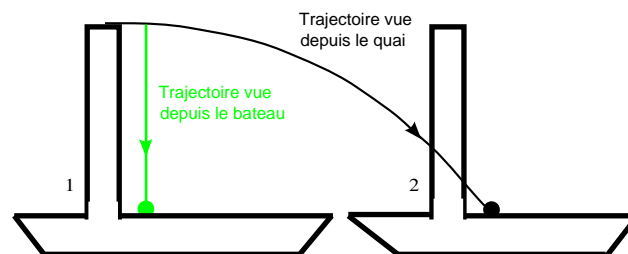
# LE SYSTÈME TERRE-LUNE

## I- LES MOUVEMENTS DE LA LUNE

### 1- Satellisation

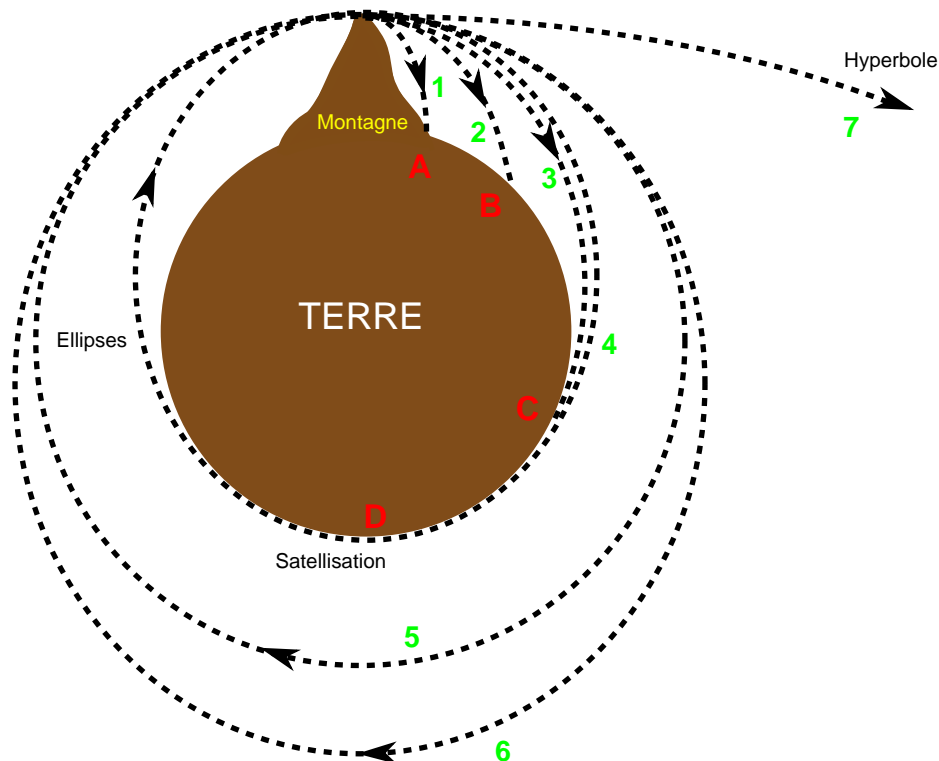
Supposons que l'on lâche au même moment du même endroit deux cailloux. L'un est laissé sans vitesse initiale en pure chute libre, l'autre est lancé horizontalement. On constate que les deux cailloux frappent le sol horizontal au même moment. Cela caractérise l'indépendance des mouvements de chute libre et de déplacement horizontal. Galilée qui a découvert cela et l'a vérifié expérimentalement au 15<sup>e</sup> siècle l'a également démontré.

Il utilise le principe de relativité du mouvement de translation dont il est à l'origine, et qui dit qu'il n'existe pas de mouvement absolu. Le mouvement est relatif. On peut accompagner le caillou lancé horizontalement avec un référentiel (bateau du temps de Galilée, train ou avion maintenant) qui avance à la même vitesse horizontale que celle qu'on lui a communiqué. Dans ce référentiel, le mouvement du caillou lancé devient un pur mouvement de chute libre, et le temps de chute doit être donc celui de la pure chute libre, donc le même que celui de l'autre caillou qui était laissé sans vitesse initiale. Tout ceci est parfaitement vrai uniquement dans le vide, car il ne faut pas qu'il y ait de frottement. Le schéma ci-dessous résume ce qui vient d'être dit.



Newton a montré que le mouvement de chute libre sous l'action de la gravitation universelle, sans frottement dans le vide, peut mener, suivant les conditions initiales, à la satellisation : l'objet ne retombe jamais, décrivant une ellipse s'il reste à distance finie, ou une hyperbole, si, lancé très fort, il part à l'infini.

Le point de départ est la découverte par Galilée de l'indépendance du mouvement vertical de chute et d'un mouvement horizontal éventuel dû à une lancée de l'objet. Pour montrer que cela mène à la satellisation, Newton raisonne sur le schéma ci-dessous :



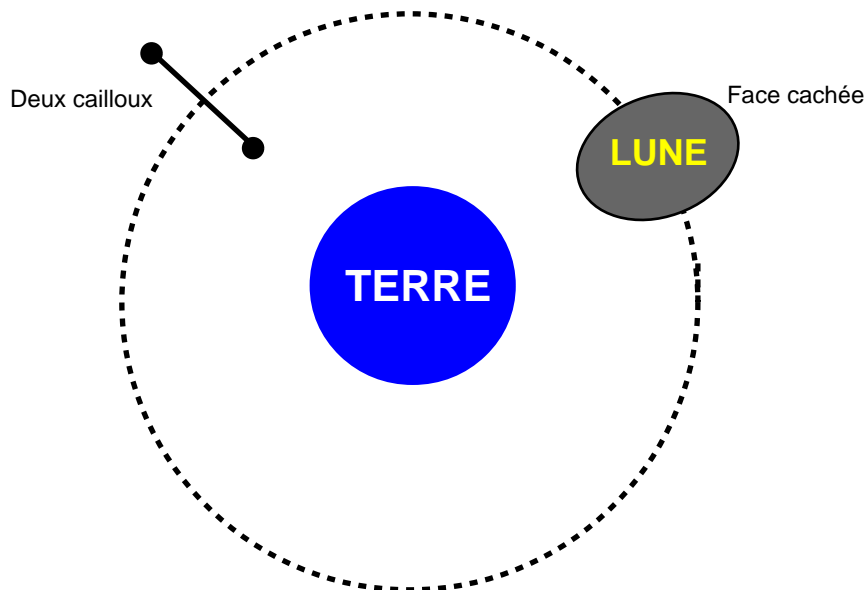
La trajectoire 1 qui se termine sur le sol en A correspond à la lancée d'un caillou du sommet de la montagne. Au mouvement de chute libre se superpose le petit mouvement horizontal que l'on a communiqué au caillou au moment de la lancée. Ces deux mouvements sont indépendants, comme vu au point précédent.

Si on lance de plus en plus fort horizontalement le caillou, on obtient successivement les trajectoires 2 puis 3 puis 4. À la trajectoire 4, la courbure de la trajectoire est telle, compte tenu de la courbure du sol lié au fait que la Terre est ronde, que le caillou manque le sol. Comme il n'y a pas de frottement dans le vide, il remonte jusqu'au point de départ, car il y a conservation de l'énergie. On obtient une ellipse. Comme il accélère en tombant en se rapprochant de la Terre par conversion d'énergie potentielle en énergie cinétique, il va plus vite quand il est plus près de la Terre. De la même manière, la Terre qui tourne autour du Soleil va plus vite quand elle est plus près du Soleil l'hiver. Elle est au plus près du Soleil vers le 3 janvier. L'hiver dans l'hémisphère nord est donc plus court que l'été.

Pour une vitesse suffisante bien précise, la trajectoire est un cercle (trajectoire 5). Si on lance le caillou encore plus fort, on obtient de nouveau une ellipse (trajectoire 6), mais cette fois-ci, c'est à l'opposé de la montagne que le caillou va le plus lentement et est le plus haut. Enfin pour une vitesse de lancée supérieure à la vitesse de libération (11,2 km/s), le caillou décrit une hyperbole et ne retombe jamais (trajectoire 7).

## 2- Face cachée de la Lune

Plus le caillou est lancé depuis une montagne basse, plus il est près de la Terre, et plus il tombe rapidement vers le sol. En effet, plus on est près du sol, plus on est attiré. Il faut donc le lancer horizontalement plus fort pour le satelliser. Considérons alors deux cailloux attachés par une ficelle et satellisés suivant une trajectoire circulaire par exemple, la ficelle étant verticale, un caillou étant en bas, l'autre en haut. Pour être satellisé, le caillou du bas devrait tourner plus vite et le caillou du haut moins vite. La ficelle est donc tendue, le caillou du bas voulant tomber et celui du haut ayant tendance à être éjecté. Le système est stabilisé et c'est toujours le même caillou qui est en bas.



La Lune est dissymétrique et se comporte comme les deux cailloux ; Elle présente toujours la même face à la Terre. Il y a donc une face cachée de la Lune. Finalement, si il y a une face cachée de la Lune, c'est parce que la Lune tourne sur elle-même à la même vitesse qu'elle tourne autour de la Terre (un tour par rapport aux étoiles en environ 27 jours, la révolution sidérale). On voit bien sur différentes photos de la Lune à différentes phases que c'est toujours le même paysage lunaire que l'on voit indépendamment de l'éclairage, preuve que la Lune présente toujours la même face vers nous. On peut vérifier cela avec le lien <http://tycho.usno.navy.mil/vphase.html>. Les phases de la Lune n'ont donc rien à voir avec la face cachée de la Lune.

### 3- Compléments sur les mouvements de la Lune

L'orbite de la Lune est inclinée de  $5^\circ$  sur le plan de l'écliptique (plan de l'orbite de la Terre autour du Soleil). Cela a une conséquence sur les éclipses. Il n'y a pas éclipse à chaque nouvelle lune ni à chaque pleine lune.

La Lune décrit une ellipse autour de la Terre. Cela a une conséquence en particulier sur l'intensité des marées. Les marées sont plus fortes quand la Lune est près de la Terre.

## II- LES PHASES DE LA LUNE

### 1- Origine des phases

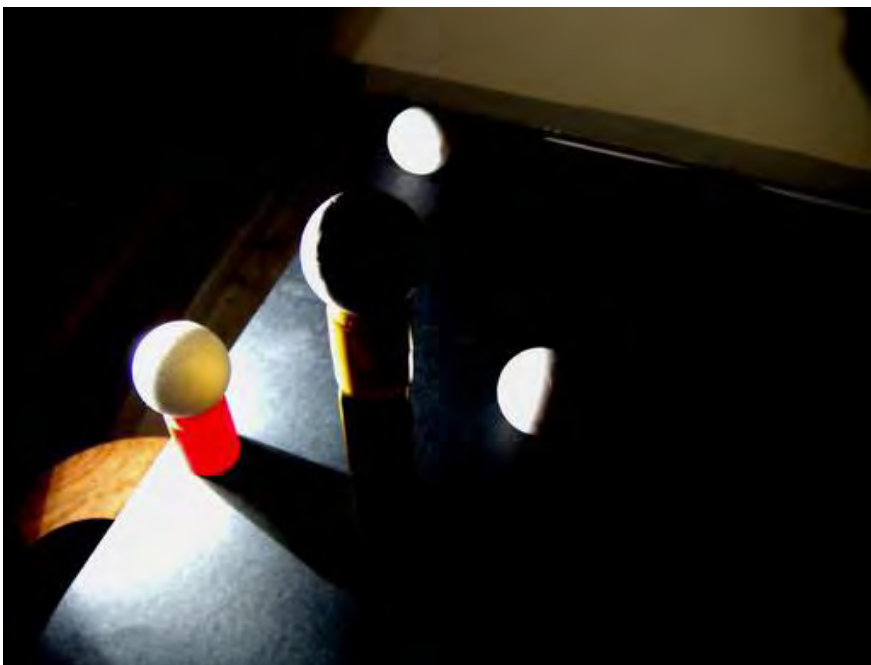
Les phases de la Lune sont les différentes formes que prend la Lune dans le ciel au cours de sa révolution autour de la Terre.

Sur la photographie ci-dessous, on voit en même temps la Lune, et une boule éclairée par le Soleil. On peut en effet voir la Lune en plein jour. La boule est vue dans la même direction que la Lune. On constate qu'elle est éclairée de la même manière : elle présente la même phase. C'est toujours le cas. Une telle coïncidence ayant toujours lieu entre ces deux phénomènes est une preuve que les phases sont causées par le fait que la partie de la Lune qui nous fait face (la partie visible de la Lune) se sépare en deux parties : une partie éclairée par le Soleil où il fait jour, et une partie non éclairée par le Soleil où il fait nuit. Les différentes formes de la Lune obtenues ont donc pour origine les positions

relatives du Soleil, de la Lune, et du point d'observation. La Lune était basse dans le ciel et voilée par des cirrus. Le contraste a été augmenté.

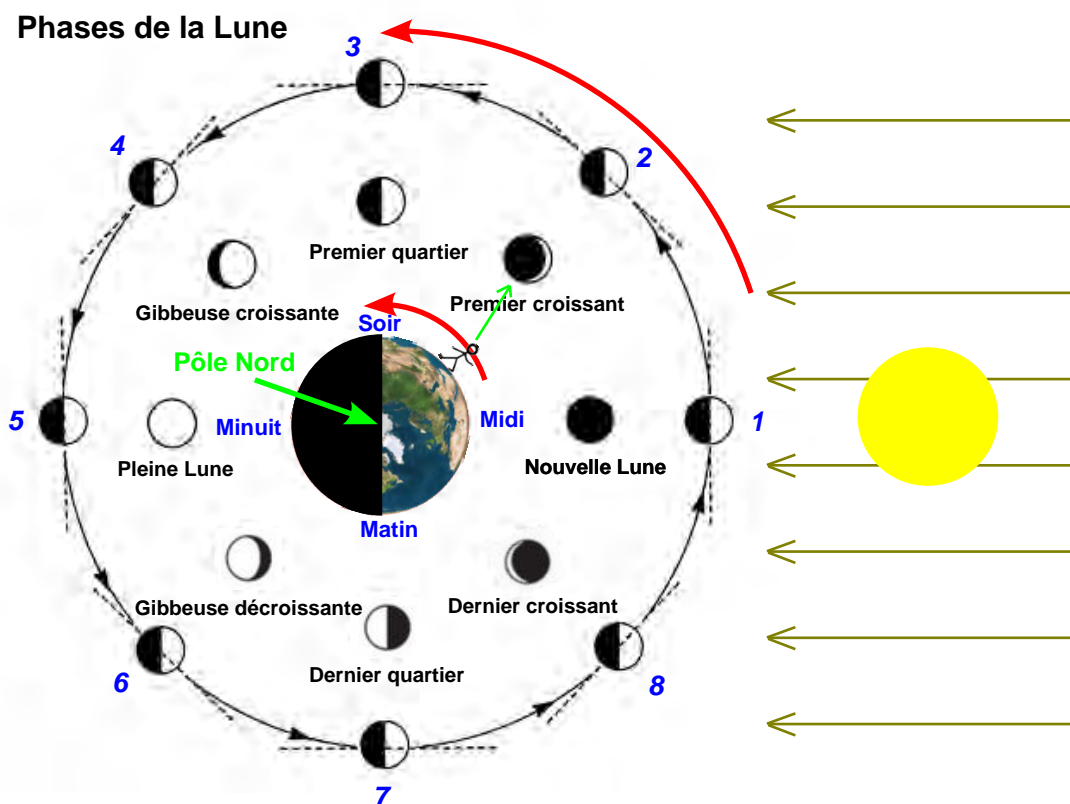


Sur la photo suivante, on voit qu'on peut bien représenter les différentes formes de la Lune avec une boule blanche de polystyrène, suivant l'angle de vision par rapport à la lampe et la boule.



Les phases de la Lune sont donc le jour et la nuit sur la Lune vus depuis la Terre.

## 2- Description des phases



Partons de la position 1 sur la figure. De la Terre, on voit la face de la Lune qui n'est pas éclairée par le Soleil. La Lune est donc invisible. On dit que le Soleil et la Lune sont en *conjonction*. C'est la nouvelle Lune, On pourrait penser en effet que la Lune disparaît durant cette période, et que c'est ensuite une *nouvelle Lune* qui réapparaît. La Lune tournant dans le sens inverse des aiguilles d'une montre autour de la Terre vue depuis l'hémisphère nord, on arrive ensuite à la position 2. On voit un fin croissant la partie bombée et éclairée étant à droite. On a le *premier croissant*. On arrive ensuite à la position 3. Le Soleil et la Lune sont en *quadrature*. On a le *premier quartier*. On voit en effet un quart de la Lune, la partie bombée étant à droite. Nous arrivons ensuite à la position 4. On a une Lune pas encore tout à fait ronde. C'est la Lune *gibbeuse croissante*. On arrive enfin à la *pleine lune*, position 5. Le Soleil et la Lune sont dits en *opposition*. La Lune est vue parfaitement ronde. Vient ensuite la position 6, *gibbeuse décroissante*. En position 7, on a de nouveau un quartier, la Lune et le Soleil sont en quadrature, mais cette fois la partie bombée et lumineuse est à gauche, c'est le *dernier quartier*. Puis vient la position 8 dite du *dernier croissant*, avec la partie bombée et éclairée à gauche. Enfin on retrouve la nouvelle Lune.

Les quatre phases principales de la Lune : nouvelle lune, pleine lune et les deux quartiers sont indiquées dans le calendrier. La succession des phases de la Lune qui se déroule sur environ un mois et qui s'appelle la *lunaison* est en effet à l'origine du mois dans le calendrier. La durée entre deux phases principales est à l'origine de la semaine. Cependant, comme il n'y a pas exactement 12 lunaisons en une année, les phases de la Lune se décalent lentement au cours des années. Lundi = Lune, Mardi = Mars, Mercredi = Mercure, Jeudi = Jupiter, Vendredi = Vénus, Samedi = Saturne, et Dimanche, Sunday en anglais = Soleil. Aux sept jours de la semaine correspond ainsi les sept astres visibles à l'œil nu.



### Remarque numéro 1 : la lumière cendrée

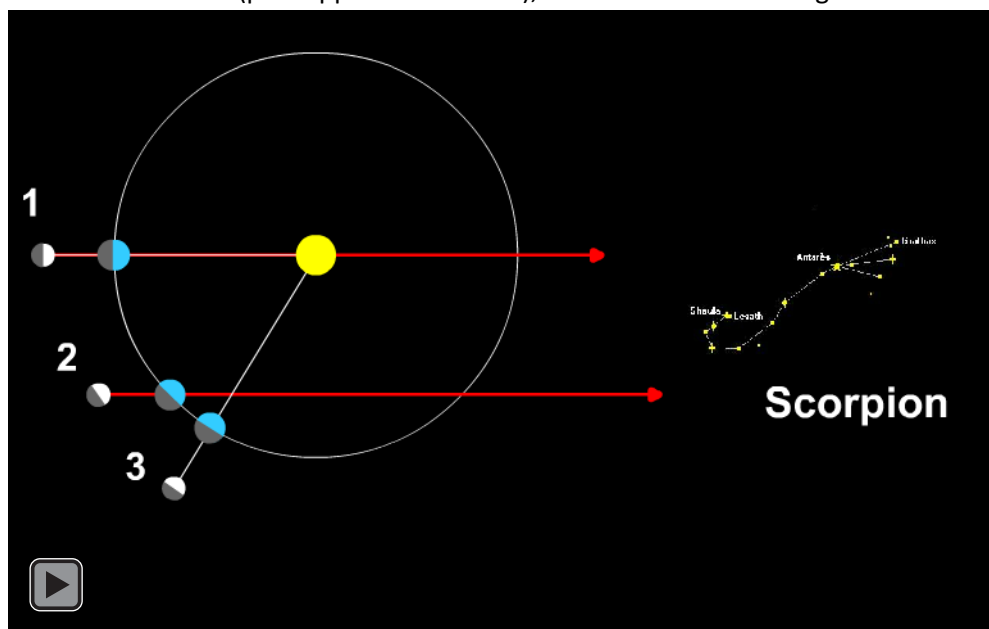
Aux alentours des positions 2 et 8, vue depuis la Lune, la Terre est gibbeuse et éclaire beaucoup la surface lunaire où il fait nuit. Les phases de la Lune et de la Terre vue depuis la Lune sont en effet en opposition de phase, comme on peut le vérifier sur le site : <http://www.fourmilab.ch> ; plus précisément : <http://www.fourmilab.ch/earthview/vplanet.html>. Cette partie de la Lune renvoie à son tour vers la Terre un peu de lumière, dite *lumière cendrée* ; elle s'avère donc visible, bien que peu lumineuse.

### Remarque numéro 2 : les éclipses

Si le plan de l'orbite lunaire était confondu avec l'écliptique, les 3 astres Terre, Lune et Soleil se trouveraient exactement alignés lors de chaque passage de la Lune en position 1 et 5. Il y aurait alors à chaque pleine lune une éclipse de Lune et à chaque nouvelle lune une éclipse de Soleil. Mais du fait de l'inclinaison d'environ  $5^\circ$  de ces deux plans, il n'y a généralement pas éclipse sauf si la Lune se trouve justement à un nœud de sa trajectoire. Cette situation particulière se présente deux fois chaque année à environ 6 mois d'intervalle.

## 3- Périodicité du phénomène

La succession des phases de la Lune est un phénomène périodique. L'intervalle de temps séparant deux passages de la Lune dans la même configuration est appelé *lunaison*. Du fait des déplacements simultanés de la Terre et de la Lune autour du Soleil, la lunaison n'est pas égale à la durée de la révolution sidérale de la Lune (par rapport aux étoiles), comme le montre la figure.



**Position 1 :** La Terre est vue depuis la Lune dans la constellation du Scorpion ; la Lune est en situation de pleine lune.

**Position 2 :** La Terre est de nouveau dans la constellation du Scorpion (nous aurions pu prendre une autre constellation comme exemple). Il s'est écoulé en moyenne 27 jours 7 h 43 min (27,3 jours), durée de la révolution sidérale de la Lune (par rapport aux étoiles). La Lune n'est pas en situation de pleine lune.

**Position 3 :** La Lune est de nouveau en situation de pleine lune. Il s'est écoulé en moyenne 29 jours 12 h 44 min (29.5 jours), durée de la révolution synodique de la Lune (lunaison), soit environ 2,2 jours de plus que la révolution sidérale. Le même phénomène est à l'origine de la différence entre le jour solaire et le jour sidéral.

## 4- Le mouvement apparent de la Lune dans le ciel

Comme nous l'avons déjà vu, le plan de rotation de la Lune autour de la Terre est faiblement incliné ( $5^\circ$ ) sur le plan de l'écliptique (plan de rotation de la terre autour du Soleil). Il en résulte que la Lune (comme les autres planètes du système solaire que la Terre) se déplacera dans le ciel parmi les étoiles sur l'écliptique qui est la ligne trace à l'infini du plan du système solaire (plus précisément, la trace du plan de rotation de la Terre autour du Soleil). Toute position de la Lune dans le ciel parmi les étoiles est donc voisine d'une position possible (à un autre moment) du Soleil.

La Lune décrit donc chaque jour dans le ciel une trajectoire d'est en ouest à cause de la rotation de la Terre sur elle-même. L'almanach des PTT fournit sur un tableau les heures de lever et de coucher de la Lune à Paris pour chaque jour de l'année. On peut constater que ces heures retardent systématiquement d'un jour à l'autre d'environ 45 minutes. Ce décalage journalier s'explique par le fait qu'en une journée, la Lune tourne d'un certain angle autour de la Terre dans le même sens que la Terre sur elle-même. Celle-ci effectue donc un peu plus d'un tour entre deux passages de la Lune dans la même direction.

- aux alentours du premier quartier, la Lune est déjà assez haute dans le ciel au moment du coucher du Soleil, et ne reste visible que durant la première partie de la nuit.
- aux alentours de la pleine lune, celle-ci se lève au moment où le Soleil se couche et se couche le matin.
- aux alentours du dernier quartier, la Lune ne se lève que vers le milieu de la nuit et est encore assez haut dans le ciel lorsque le Soleil se lève.

Les pleines lunes d'été sont à l'opposé du Soleil sur l'écliptique, donc sont sur une partie de l'écliptique basse sur l'horizon et se traînent donc bas sur l'horizon. Réciproquement, les pleines lunes d'hiver montent très haut dans le ciel.

La Lune ne peut nous influencer que par la force de gravitation qu'elle applique sur la Terre, et par la lumière qu'elle nous envoie. Pour la gravitation, elle se manifeste essentiellement par le soulèvement de l'eau des océans et des mers qui donne le phénomène des marées. Nous verrons plus en détail ce phénomène plus loin. La croûte terrestre se soulève également de quelques centimètres, mais ce phénomène intervient très peu. Il a quand même nécessité un réglage spécial pour l'accélérateur de particule du C.E.R.N. à Genève. Les marées atmosphériques ne sont pas prises en compte par les modèles de météorologie de prévision du temps.

En ce qui concerne l'influence de la lumière de la Lune, elle est négligeable en dehors d'un effet psychologique éventuel.

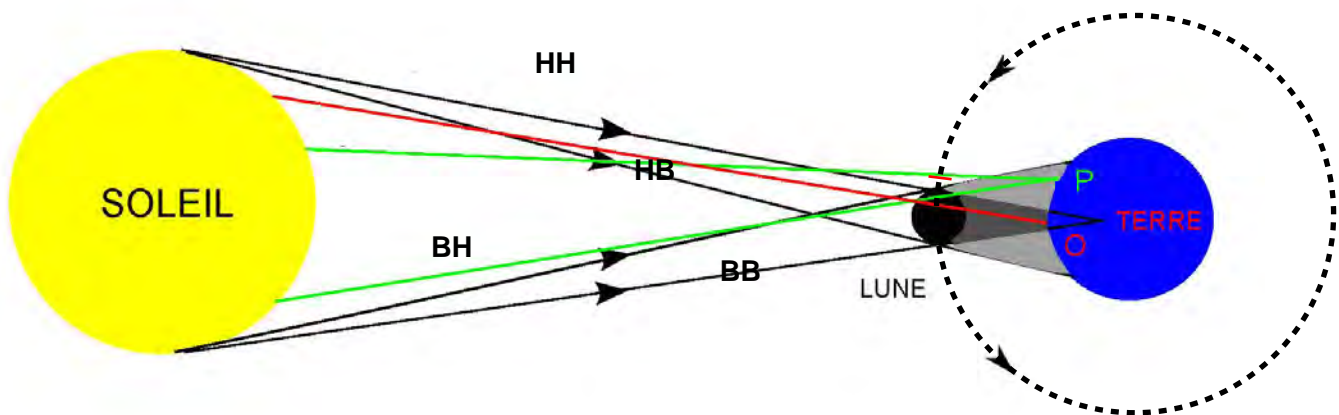
L'égalité entre la période des menstruations et des phases lunaire est-elle une coïncidence ou non, cela reste un problème ouvert. Les études statistiques montrent qu'il n'y a aucun lien par exemple entre les naissances et les phases de la Lune, comme le montre par exemple cette étude : <http://neovicstage12.free.fr/lune.php>.

### III- LES ECLIPSES

#### 1- Eclipse de Soleil

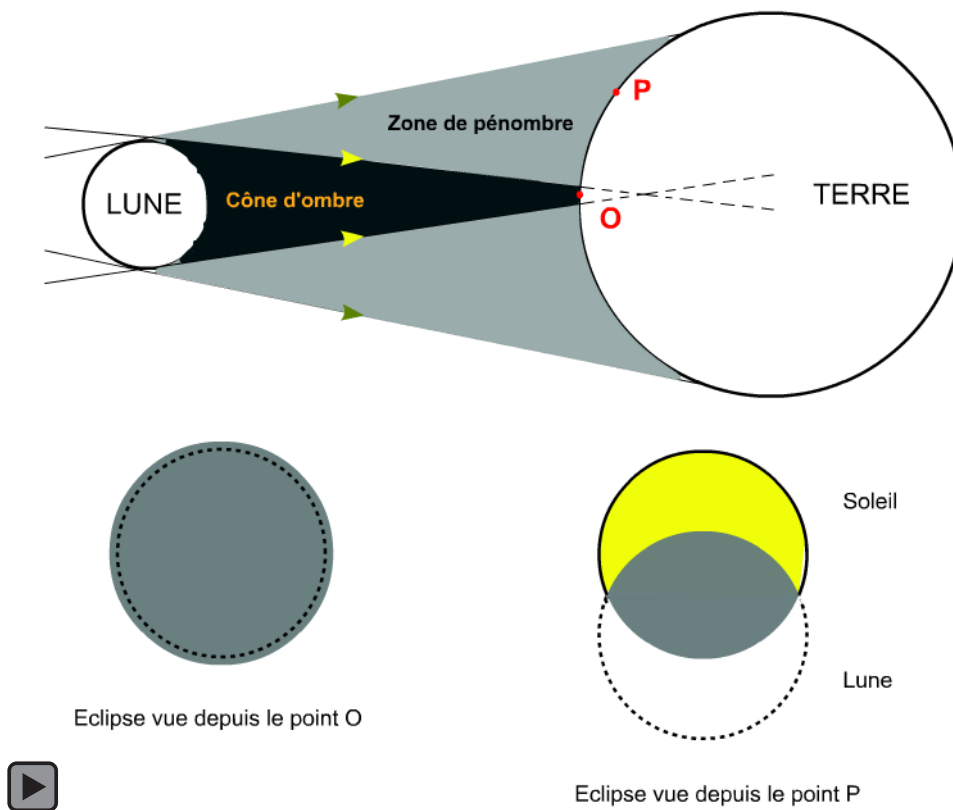
Les éclipses de soleil ont lieu quand la Lune se place devant le Soleil et le cache. L'obscurité s'installe alors au point d'observation. Les éclipses de soleil ont donc lieu quand le Soleil, la Lune et la Terre sont alignés, la Lune étant entre le Soleil et la Terre. Les éclipses de Soleil ont donc lieu au moment de la nouvelle lune.

Du fait de la taille du Soleil, et de la propagation rectiligne de la lumière, il se forme un cône d'ombre derrière la Lune qui va en se rétrécissant quand on s'éloigne de la Lune. Il est devenu très petit au voisinage de la Terre qui est voisine du sommet de ce cône, ce qui fait qu'à un instant donné, la zone d'ombre d'où on peut voir l'éclipse totale (Soleil totalement caché) a une largeur au maximum de 260 km. La durée maximale d'une éclipse totale est de 7 mn 30 s. Quand la Lune masque seulement une partie du Soleil, on a une éclipse partielle. Toute éclipse totale est précédée et suivie par une éclipse partielle. Mais en dehors de la trajectoire sur la Terre de la zone d'ombre, l'éclipse n'est que partielle.



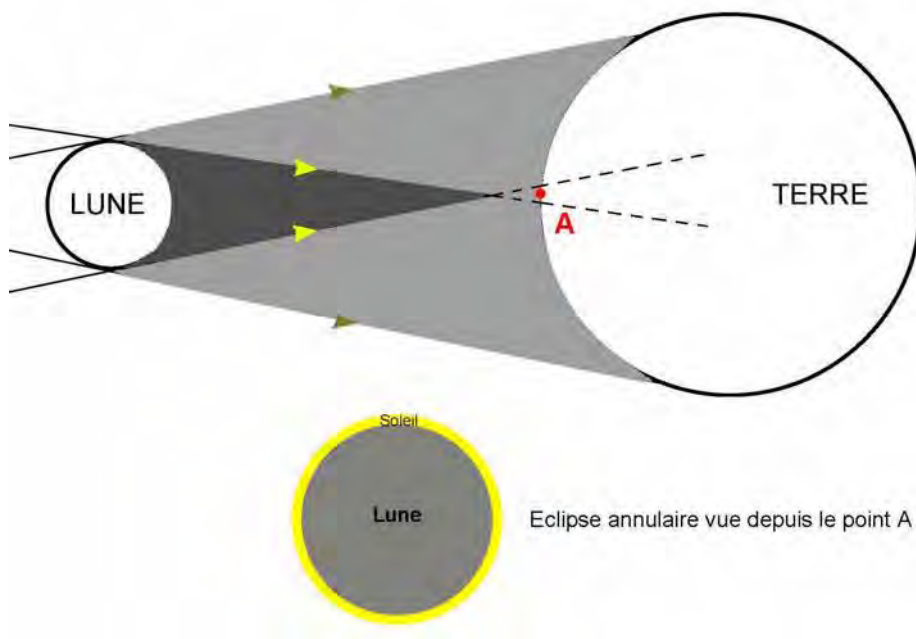
Sur l'image ci-dessus, on voit que l'analyse du phénomène dans un plan méridien nécessite de tracer les quatre tangentes aux deux cercles représentant le Soleil et la Lune : *BB* tangente au bas du Soleil et de la Lune, *BH* au bas de Soleil et au haut de la Lune (tangente croisée) etc. La zone d'ombre d'où l'éclipse est vue totale est comprise entre les tangentes *BB* et *HH*. Dans le plan méridien, on distingue deux zones de pénombres (qui dans la réalité, de par la symétrie de révolution n'en font qu'une), comprises entre *BH* et *HH* et pour l'autre entre *BB* et *HB*.

L'image suivante montre en détail comment est vue l'éclipse suivant les points d'observations.

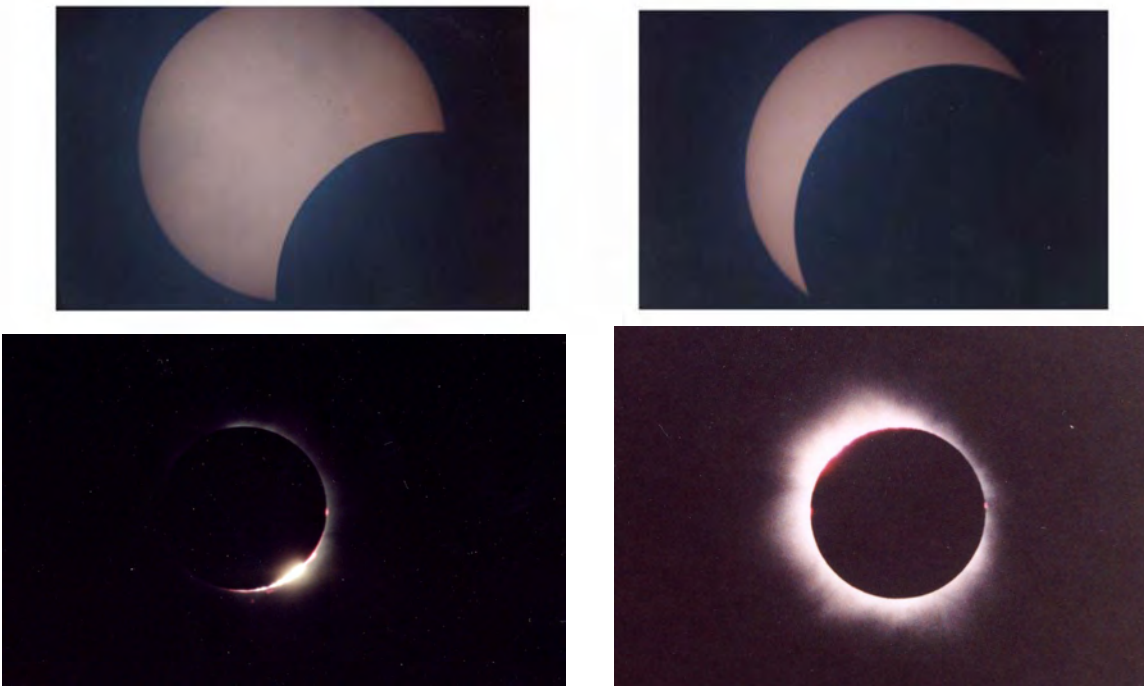


Du point  $P$ , on voit qu'on a une éclipse partielle, puisque dans la direction de la ligne verte du dessus, on peut voir cette partie du Soleil, tandis que dans la direction de la ligne verte du dessous, cette partie du Soleil est masqué par la Lune.

Pour le point d'observation  $O$  dans la zone d'ombre, on voit que quelle que soit la direction dans laquelle on porte son regard (ligne rouge), le Soleil n'est pas visible, la Lune interceptant la ligne rouge et faisant ainsi écran.



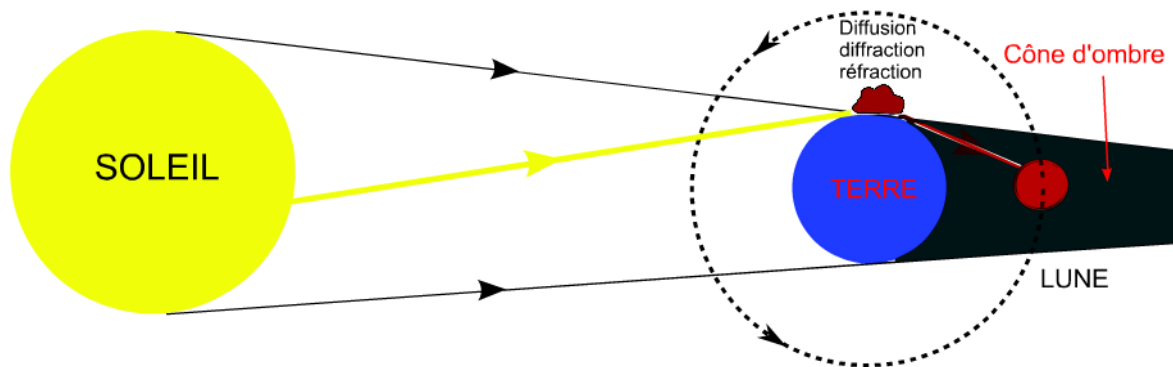
La Lune décrivant une ellipse autour de la Terre, elle est vue, depuis la Terre, plus ou moins grande dans le ciel. Si une éclipse de Soleil se produit quand la Lune est loin de la Terre, elle est vue trop petite pour cacher totalement le disque solaire. Le Soleil apparaît en anneau autour de la Lune. Il ne fait pas nuit, les protubérances et la couronne solaire sont invisibles, et il faut mettre des lunettes protectrices. Le schéma ci-dessus montre le principe d'une éclipse annulaire. Les photographies ci-dessous ont été prises par le club d'astronomie du site de Cergy de l'IUFM le 11 août 1999 à Saint-Pierre-en-Port au nord de Fécamp sur la côte normande. Le matériel était un Célestron 8.



Tant que l'éclipse est partielle, il faut des lunettes de protection pour regarder le Soleil. Le ciel s'assombrit, mais il fait encore jour. L'éclipse totale arrive brutalement. Le Soleil disparaît après un dernier éclat perlé. La nuit tombe instantanément et la température baisse rapidement. Autant, pour les personnes ne se situant pas dans la bande d'éclipse totale, le passage du maximum d'éclipse partielle se traduit par un silence religieux ; autant pour les personnes assistant à l'éclipse totale, l'arrivée brutale de la totalité se traduit par des applaudissements des embrassades et des hurlements de joie. On peut voir les étoiles et Mercure et Vénus. Sur la première photographie d'éclipse partielle prise avec un filtre, on voit une tache solaire. Lors de l'éclipse totale, on voit les flammes du Soleil (protubérances) et la couronne solaire (point de départ du vent solaire) filamenteuse car structurée par le champ magnétique du Soleil.



## 2- Eclipse de Lune

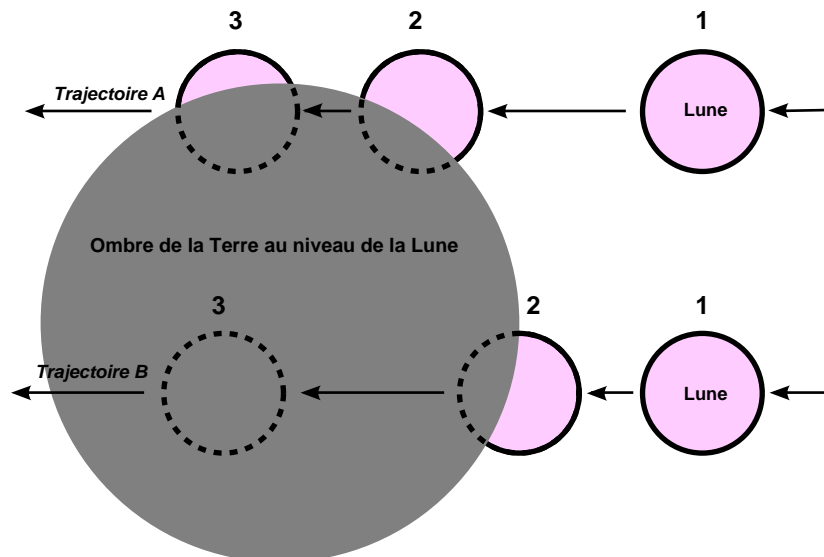


La Lune est éclairée en rougeâtre par les régions de soleil couchant

Cette fois-ci, la Lune disparaît car elle n'est plus éclairée par le Soleil lorsqu'elle passe dans le cône d'ombre de la Terre. En fait, elle reste visible et rougeâtre et sombre, étant éclairée par les zones de la Terre où le soleil est couchant. L'atmosphère et les nuages de cette zone, éclairés en rouge, diffusent, diffractent et réfractent de la lumière vers la Lune. L'éclipse de lune se produit quand le Soleil, la Terre et la Lune sont alignés, la Terre étant entre le Soleil et la Lune.

Si la Lune ne pénètre pas totalement dans le cône d'ombre de la Terre mais le frôle en s'immergeant seulement en partie dedans, on a une éclipse partielle de Lune.

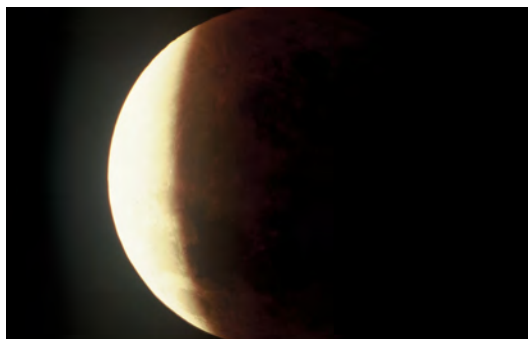
On ne distingue pas l'entrée de la Lune dans la pénombre. Dans le cas de l'éclipse de lune, seul nous intéresse donc le cône d'ombre de la Terre.



Sur l'image ci-dessus, on a représenté deux trajectoires de la Lune dans le ciel, pour une éclipse totale (B) et pour une éclipse partielle (A). La Terre étant environ quatre fois plus grande que la Lune, la durée maximale d'une éclipse lunaire est de 2 heures, mais le phénomène d'approche et de séparation peut s'étendre en tout sur 4 à 5 heures.

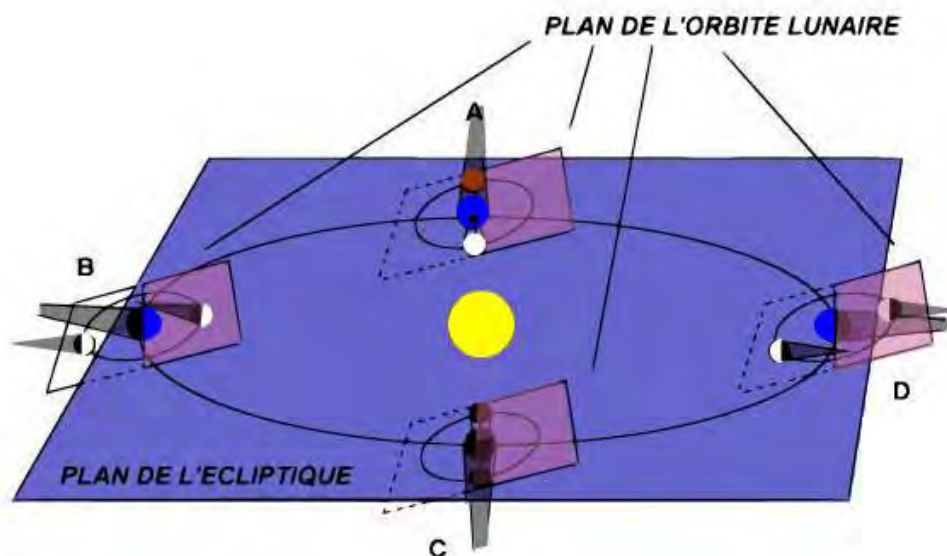
Une éclipse de Lune est vue par tout l'hémisphère de la Terre où il fait nuit. Ceci fait qu'en un point d'observation donné, les éclipses de Lune sont beaucoup plus fréquentes que les éclipses de Soleil.

Nous montrons ci-dessous quelques photographies prises par le club d'astronomie du site de Cergy. Le bord de l'ombre de la Terre est flou et orange, car c'est l'ombre de l'atmosphère de la Terre éclairée par un soleil se couchant ou se levant.



Le fait que l'ombre de la Terre soit toujours vue ronde avec la même courbure est une preuve de la sphéricité de la Terre.

Le schéma ci-dessous montre que du fait de l'inclinaison de  $5^\circ$  du plan de l'orbite de la Lune sur l'écliptique (plan de l'orbite de la Terre), il n'y a pas d'éclipses à chaque nouvelle lune ni à chaque pleine lune. Il y a une éclipse quand le Soleil, la Terre et la Lune sont alignés suivant la droite intersection des deux plans. Ceci se produit tous les 6 mois. Il y a donc des éclipses deux fois par an. Mais une éclipse de Lune par exemple, peut être précédée 15 jours avant, ou suivie quinze jours après par une éclipse de Soleil, et réciproquement.



En A et C il y aura des éclipses. En D, à la nouvelle lune, l'ombre de la Lune passe sous la Terre et il n'y a pas d'éclipse, tandis qu'à la pleine lune, la Lune passe au-dessus de l'ombre de la Terre.

En B, à la nouvelle lune, l'ombre de la Lune passe au-dessus de la Terre, tandis que, à la pleine lune, la Lune passe en dessous de l'ombre de la Terre.

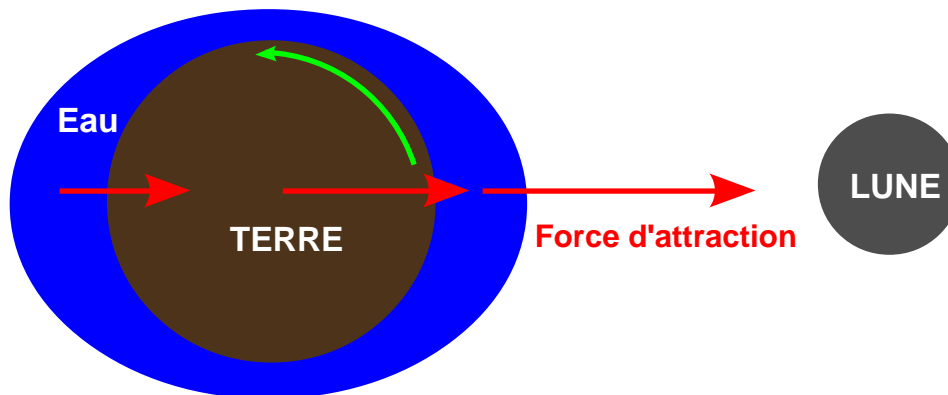
À cause de l'influence gravitationnelle du Soleil, le plan de l'orbite de la Lune tourne sur lui-même en sens rétrograde en environ 18 ans. De ce fait, au fil des ans, les dates des éclipses se décalent dans l'année (rétrogradent). Au bout de 18 ans 10 ou 11 jours suivant le nombre d'années bissextiles, durée qu'on appelle le *Saros*, les éclipses se reproduisent les mêmes jours de l'année que 18 ans auparavant.

## IV- LES MAREES

### 1- Principe des marées

De la même manière que nous avons vu que la Lune est en orbite autour de la Terre en étant en fait en chute libre permanente vers la Terre, la Terre est également attirée et en chute libre vers la Lune. En fait, la Terre et la Lune sont en orbite autour du centre de gravité commun. Ce centre de gravité est voisin de la surface terrestre.

Considérons donc sur la figure ci-dessous la Terre et l'eau qui l'entoure en chute libre vers la Lune.



L'eau à droite, du côté de la Lune, est plus proche de la Lune que la Terre. Elle est donc plus attirée que la Terre et se soulève. Mais l'eau de l'autre côté est moins attirée par la Lune que la Terre et a tendance à moins accélérer vers la Lune que la Terre, donc à rester en arrière. Il se forme donc deux bourrelets d'eau, l'un en face de la Lune, l'autre à l'opposé.

La Terre tournant sur elle-même en environ 24 heures, un point donné du sol voit défilé deux bourrelets d'eau par jour. La plupart du temps, en particulier sur les côtes de France bordant la manche et l'atlantique, il y a donc deux marées hautes par jours à 12 h d'intervalle, et également deux marées basses par jour à 12 h d'intervalle. Le temps qui s'écoule entre une marée basse par exemple et la marée haute suivante est de 6 h.

La Lune tournant autour de la Terre, les heures de hautes mer par exemple, se décalent tous les jours à peu près de la même valeur que les heures de lever et de coucher de la Lune. Si la mer est haute à 13 h le lundi par exemple, elle sera haute à environ 14 h le mardi, 15 h le mercredi, etc.

### 2- Marées de vives eaux (grandes marées) et de mortes eaux (petites marées)

Bien que la Lune soit prépondérante, il y a aussi des marées dues au Soleil. Lorsque les marées hautes du Soleil et de la Lune sont en phases, au moment des pleines et nouvelles lunes, on a des grandes marées. Lorsque le Soleil et la Lune sont en quadrature aux moments des quartiers, on a des marées de mortes eaux.

En grande marée, le Soleil et la Lune sont en phases (à 12 h près). Il en résulte que les grandes marées en un lieu donné sont toujours à la même heure. Par exemple au Havre sur la côte normande, en grande marée, la mer est toujours haute à midi et à minuit. Les marées sont en opposition de phases entre la côte atlantique et le Havre par le temps que met la marée haute de l'océan à remonter

progressivement la Manche. Il en résulte que la mer est haute dans l'océan atlantique en grande marée quand le Soleil se lève ou se couche.

L'opposition de phase entre la marée et l'astre en cause, sur les côtes bordant l'atlantique, vient du fait que les océans étant clos, on a un système auto-oscillant dont la période propre est légèrement supérieure à la période excitatrice. Si la période propre était inférieure à la période excitatrice, les marées seraient cette fois-ci en phase avec l'excitation.

### 3- Quelques compléments

Indépendamment de toute autre chose, les marées sont plus fortes aux moments des équinoxes. En effet, les bourrelets d'eau sont alors bien symétriques et centrés sur l'équateur ce qui facilite la mise en oscillation de l'eau dans l'atlantique nord sur une période de 12 h.

Mais, la Lune décrivant une ellipse autour de la Terre, si elle est proche de la Terre à la pleine lune, elle en sera loin à la nouvelle lune. Une grande marée sur deux est alors importante. Dans le cas cité, les très grandes marées auront lieu à l'équinoxe au moment de la pleine lune.

Dans le cas cité ci-dessus, on aura des grandes marées assez faibles au moment de la nouvelle lune par le fait que la Lune est loin de la Terre. Si à ce moment on a une éclipse de Soleil, on peut vérifier, en confirmation de la théorie, que cette éclipse sera annulaire.

Il y aura de très grandes marées si la direction Terre-Lune-Soleil au moment d'une grande marée à l'équinoxe coïncide avec le grand axe de l'ellipse parcourue par la Lune autour de la Terre. Comme ce grand axe tourne dans le sens positif en environ 9 ans par l'influence gravitationnelle perturbatrice du Soleil, les très grandes marées ont lieu environ tous les quatre ans (4,5 ans).

### 4- Prochaine marée du siècle

L'amplitude de la marée se mesure par un **coefficient de marée** qui peut aller de 20 à 120. Le 21 mars 2015, le coefficient de marée doit atteindre 120, valeur théorique maximum. Il faut noter que cela correspond à l'équinoxe de printemps de cette année 2015.

À noter que le 20 mars 2015, il y a une éclipse totale de soleil visible dans les îles Féroé, situées 400 km au nord des côtes de l'Ecosse : dans la ville de Torshavn, la totalité atteint tout de même les 2 minutes. À 3 h 30 d'avion de Paris, voilà une destination à tenter !

