Le système Terre-Lune-Soleil: Les phases de la lune et les éclipses

Rosa M. Ros
Union Astronomique Internationale, Université Polytechnique de Catalogne
(Barcelone, Espagne)

Résumé

Ce travail consiste à étudier les phases de la lune, les éclipses solaires et les éclipses lunaires. On peut se servir des éclipses pour trouver les distances et des diamètres dans le système Terre-Lune-Soleil. Enfin, on explique l'origine des effets de marées.

Objectifs

- Comprendre pourquoi la lune possède des phases

- Comprendre l'origine des éclipses lunaires

- Comprendre pourquoi les éclipses solaires se produisent

- Déterminer les distances et les diamètres dans le système Terre-Lune-Soleil

- Comprendre l'origine des effets de marée.

Les positions relatives

Le mot "éclipse" est employé pour des phénomènes très différents, mais en général une éclipse aura lieu quand un objet s'interpose devant un autre objet; dans ce cours, on évoquera les positions relatives de la Terre et de la Lune qui permettent l'occultation partielle ou totale de la lumière du soleil.

L'éclipse solaire se produit quand la lune s'intercale entre la terre et le soleil, dans ce cas la lune occulte le soleil. Ce type d'éclipse se produit au moment de la nouvelle lune (figure 1). Les éclipses lunaires auront lieu lorsque la Lune traverse l'ombre de la Terre. Dans ce cas la Lune est du côté opposé du Soleil, de sorte que les éclipses lunaires se produisent toujours à la pleine lune (figure 1).

La Terre et la Lune se déplacent dans des orbites elliptiques qui ne sont pas coplanaires. L'orbite de la Lune est inclinée de 5 degrés par rapport à l'écliptique (plan de l'orbite de la Terre autour du Soleil). Les deux plans se croisent sur une ligne appelée la Ligne des Nœuds. Les éclipses auront lieu lorsque la Lune est au voisinage de la Ligne des Nœuds. Si les deux plans coïncidaient, les éclipses seraient beaucoup plus fréquentes entre 4 et 7 fois par an.

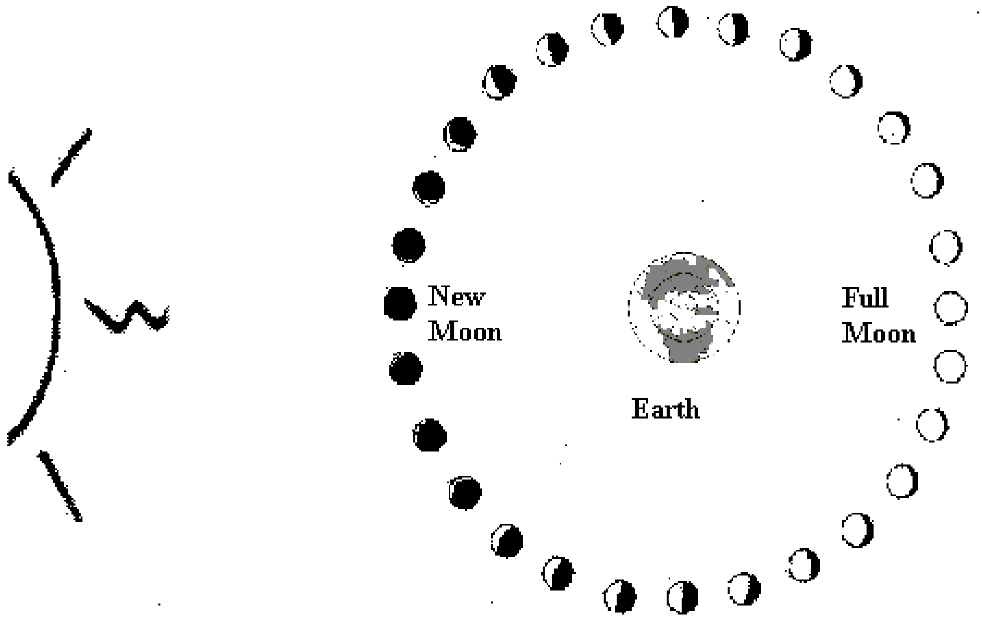


Fig.1: Les éclipses solaires auront lieu lorsque la Lune se situe entre le Soleil et la Terre (pendant nouvelle Lune). Les éclipses lunaires se produisent lorsque la Lune croise le cône d'ombre de la Terre (c'est-à-dire que la Terre se situe entre le Soleil et la Pleine Lune).

Modèles des masques

Modèle des visages cachés

La Lune a deux mouvements: un mouvement de rotation et un mouvement de translation qui ont approximativement la même durée, soit environ quatre semaines. C'est la raison pour laquelle, à partir de la terre, on ne peut voir que la même moitié de la surface de la Lune.

On peut simuler cette situation avec un modèle simple. Nous commençons par placer le volontaire qui joue le rôle de la Terre et le volontaire qui joue le rôle de la Lune (avec un masque blanc). Nous plaçons le volontaire "Lune" devant la Terre, face à face, avant de commencer à bouger. Donc, si la Lune se déplace de 90 degrés dans son orbite autour de la Terre, elle doit également tourner de 90 degrés sur elle-même et donc continuer à regarder en face de la Terre, et ainsi de suite. Nous demanderons au volontaire “Terre” s'il peut voir la même face de la Lune ou voir une partie différente. Nous répétons la même situation quatre fois, tout au long de l’orbite lunaire. Il est évident que à chaque rotation de 90º, c'est-à-dire chaque semaine, depuis la Terre on peut voir toujours la même partie de la lune, le dos et la tête du volontaire n'est jamais visible.

Modèle des phases de la Lune

Pour expliquer les phases de la Lune, il est préférable d'utiliser un modèle avec une lampe de poche ou avec un projecteur (qui représentera le Soleil) et au minimum cinq volontaires. L'un d'eux se placera au centre représentant la Terre, les autres se placeront autour de "la Terre" à distance égale pour simuler les différentes phases de la Lune. Pour le rendre plus attrayant, chaque volontaire qui joue la lune met un masque blanc qui imite la couleur de la lune. Ils devraient tous faire face à la «Terre» parce que nous savons que la Lune montre toujours le même côté à la Terre (figure 2). Nous allons placer la lampe de poche au-dessus et derrière l'un de ces volontaires, et commençons à observer les phases depuis la Terre (au centre). Il est très facile de découvrir que parfois le masque est complètement éclairée, parfois seulement un quart est éclairé et parfois non éclairé. Plus le nombre de bénévoles est grand, plus le nombre des phases qui peuvent être vus n'est grand.

Fig. 2: les volontaires simulent le modèle Terre-Lune pour expliquer les phases et la face visible de la Lune.

Le modèle Terre-Lune

Ce n'est pas évident de comprendre facilement la géométrie des phases la de lune et des éclipses. Pour cette raison, on propose un modèle simple pour faciliter la compréhension des phénomènes.

Sur une planche en bois placer deux boules distantes de 120 cm (les deux boules de diamètre respectivement de 1 cm et 4 cm).

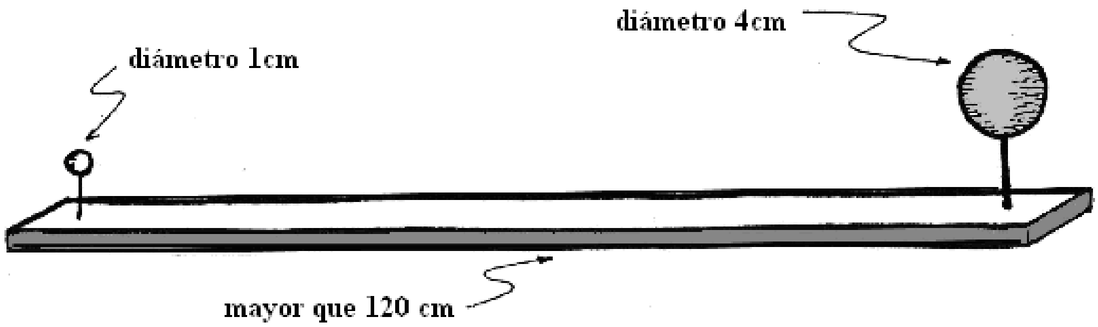


Fig. 3: Le modèle Terre-Lune

Il est important de maintenir ces dimensions relatives, car ils représentent un modèle à l'échelle du système Terre-Lune.

Diamètre de la Terre	12800 km.	→	4 cm.
Diamètre de la lune	3500 km.	→	1 cm.
Distance Terre-Lune	384000 km.	→	120 cm.
Diamètre du soleil	1400000 km.	→	440 cm. = 4.4 m.
Distance Terre-Soleil	150000000 km.	→	4700 cm. = 0.47 Km.

Tableau 1: les distances et les diamètres dans le système Terre-Lune-Soleil

Reproduction des phases de la Lune.

Dans un endroit ensoleillé, lorsque la Lune est visible pendant la journée, pointez le modèle vers la Lune (la petite balle vers la Lune figure 4). L'observateur doit rester derrière la balle représentant la Terre. La balle qui représente la Lune semble être aussi grande que la vraie Lune et la phase est également la même. En modifiant l'orientation du modèle, les différentes phases de la Lune peuvent être reproduites en fonction de l'éclairage reçu du Soleil.

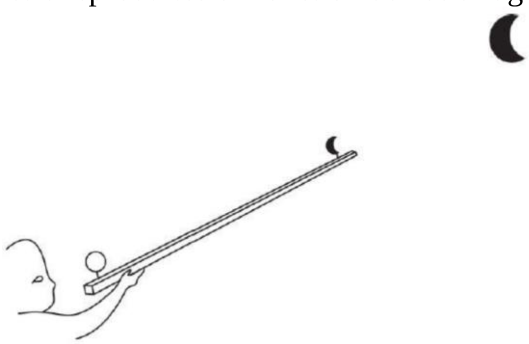


Fig.4: Utilisation du modèle dans la cour de l'école

Il est préférable de réaliser cette activité à l'extérieur, mais, si le ciel est couvert, elle peut également être réalisée à l'intérieur à l'aide d'un projecteur comme une source lumineuse.

Reproducción de los eclipses de Luna

Le modèle est tenu pour que la petite balle représentant la Terre soit face au Soleil (il vaut mieux utiliser un projecteur ou une lampe de poche pour éviter de regarder directement au Soleil) (figures 5a et 5b). C'est un moyen simple de reproduire une éclipse lunaire.

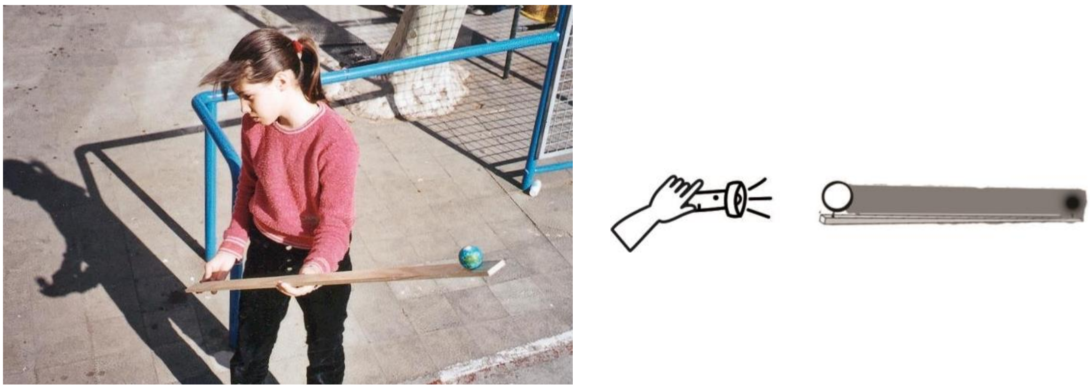


Fig.5a et 5b: simulation d’une éclipse lunaire

Fig.6: Succession de photos d'une éclipse lunaire. Notre satellite traverse le cône d'ombre produit par la Terre.

Reproduction des éclipses solaires

Le modèle est placé de sorte que la balle représentant la Lune soit face au Soleil (il vaut mieux utiliser un projecteur ou une lampe de poche à la place du soleil), l'ombre de la Lune va être projetée sur la petite boule Terre. En faisant cela, une éclipse solaire sera reproduite et un petit point noir apparaîtra sur une région de la Terre (figures 7a, 7b et 8).

Fig. 7a et 7b: simulation d’une éclipse lunaire

Il n'est pas facile de reproduire cette situation parce que l'inclinaison du modèle doit être finement ajustée (c'est la raison pour laquelle il y a moins d'éclipses solaires que lunaires).

Fig.8: détail de la situation précédente 7a**.**

Fig.9: Photo prise au bord de la MIR de l'éclipse totale du soleil en 1999 sur une région de la Terre

Observations

- Une éclipse lunaire ne peut avoir lieu que lorsque la lune est pleine et l'éclipse solaire ne peut se produire que lorsque la lune est nouvelle.
- Une éclipse solaire totale ne peut être observable que depuis une petite région de la surface de la Terre
- Il est rare que la Terre et la Lune soient parfaitement alignées pour produire une éclipse, et donc on ne peut pas avoir une éclipse à chaque nouvelle ou pleine Lune.

Le modèle Soleil-Lune

Afin de visualiser le système Soleil-Terre-Lune en respectant les distances entre eux, nous allons réaliser un nouveau modèle en prenant compte du point de vue qui est la terre. Dans ce cas, nous invitons les élèves à dessiner et à peindre un grand Soleil de 220 cm de diamètre (plus de 2 mètres de diamètre) sur une bâche et nous leur montrerons qu'ils peuvent le couvrir avec une petite Lune de 0,6 cm de diamètre (moins de 1 cm de diamètre). Il est utile de remplacer la boule lune par un trou dans une planche de bois afin d'être sûr de la position de la Lune et de l'observateur.

Dans ce modèle, le Soleil sera placé à 235 mètres de la Lune et l'observateur sera à 60 cm de la Lune. Les étudiants seront très surpris qu'ils puissent masquer le grand Soleil avec cette petite Lune. Cette relation de 400 fois la taille et les distances n'est pas facile à imaginer, donc il est bon de leur montrer un exemple afin de comprendre l'échelle des distances et les dimensions réelles dans l'univers. Tous ces exercices et activités les aident (et peut-être nous aussi les enseignants) à comprendre les relations spatiales entre les corps célestes au cours d'une éclipse solaire.

Diamètre de la Terre	12 800 km	2.1 cm
Diamètre de la Lune	3 500 km	0.6 cm
Distance Terre-Lune	384 000 km	60 cm
Diamètre du Soleil	1400 000 km	220 cm
Distance Terre-Soleil	150 000 000 km	235 m

Table 2: les distances et les diamètres dans le système Terre-Lune-Soleil

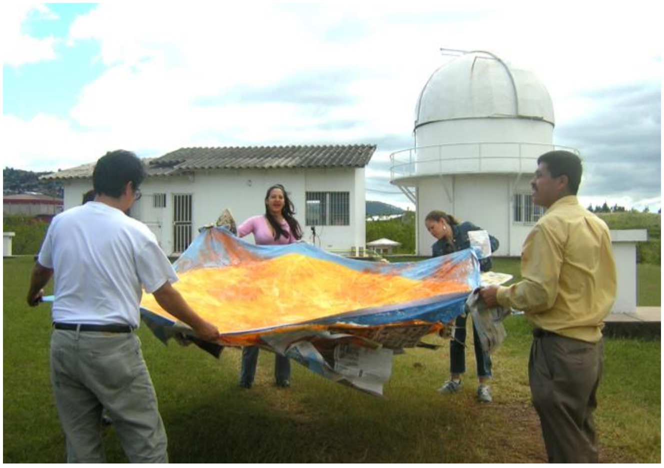


Fig. 10: modèle du soleil

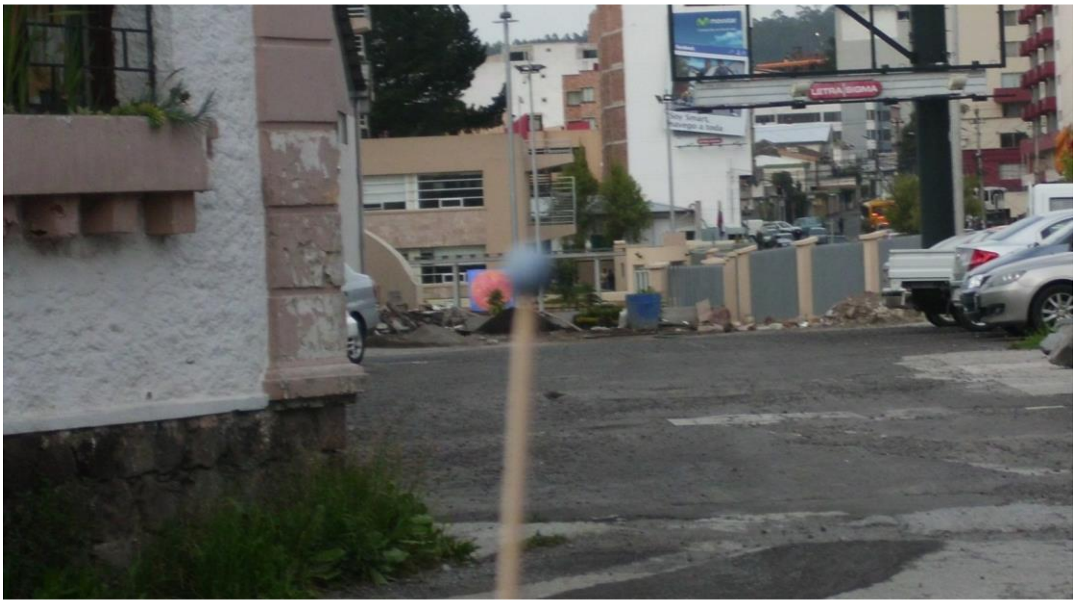


Fig.11: Observation du Soleil et de la Lune dans le modèle

Mesurer le diamètre du Soleil

Nous pouvons mesurer le diamètre du Soleil de différentes façons. Nous présentons ici une méthode simple il s'agit de recouvrir les deux extrémités d'un tube en carton par une feuille d'aluminium ou avec du papier calque.

1. On couvre l'extrémité d'un tube en carton par une feuille de papier calque. On couvre l'autre extrémité du tube par une feuille du papier noir ou du papier calque. On perce au centre de cette feuille un petit trou avec l'épingle (figures 12 et 13)
2. On doit pointer le trou vers le soleil et regarder vers l'autre extrémité qui est recouvert par le papier calque. Par la suite on mesure le diamètre (d) de l'image du soleil sur le papier calque.

Fig.12 et 13: Modèle d'un tube en carton percé

Pour calculer le diamètre du soleil, il suffit de prendre en considération la figure 14, où on montre deux triangles semblables.

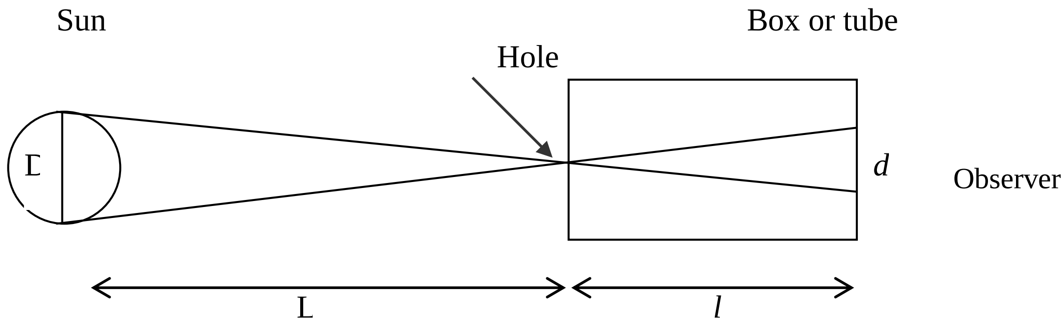


Fig. 14: schema

On peut établir la relation

$$\frac{D}{L} = \frac{d}{l}$$

et résoudre le diamètre du soleil D

$$D = \frac{d \cdot L}{l}$$

Connaissant la distance Terre-Soleil L = 150 000 000 Km, la longueur du tube en carton l et diamètre de l'image du soleil sur le papier calque, on peut calculer le diamètre du Soleil. (à savoir que le diamètre D du soleil est 1392000 km). On peut répéter le même exercice avec la pleine lune sachant que la distance terre-lune est 400000 km).

Tailles et distances dans le système Terre-Lune-Soleil

Aristarque de Samos (310 à 230 av. J.-C.) a déduit la proportion entre les distances et les rayons dans le système Terre-Lune-Soleil. Il a calculé le rayon du Soleil et de la Lune, la distance de la Terre au Soleil et la distance de la Terre à la Lune en fonction du rayon de la Terre. Quelques années après, Eratosthène (280-192 av. J.-C.) a déterminé le rayon de notre planète et il était possible de calculer toutes les distances et les rayons dans le système Terre-Lune-Soleil.

Le but de cette activité est de répéter les deux expériences en tant qu'activité pour les étudiants. L'idée est de répéter le processus mathématique autant que possible ainsi que les observations conçues par Aristarque de Samos et Eratosthène.

L'expérience d'Eratosthène: la relation entre les distances Terre-Lune et Terre-Soleil.

L'expérience d'Aristarque, encore une fois

Aristarque de Samos a déterminé l'angle entre la ligne Lune-Terre et la ligne Terre-Soleil lorsque la lune, au moment du premier quartier est $\alpha = 87$ º.

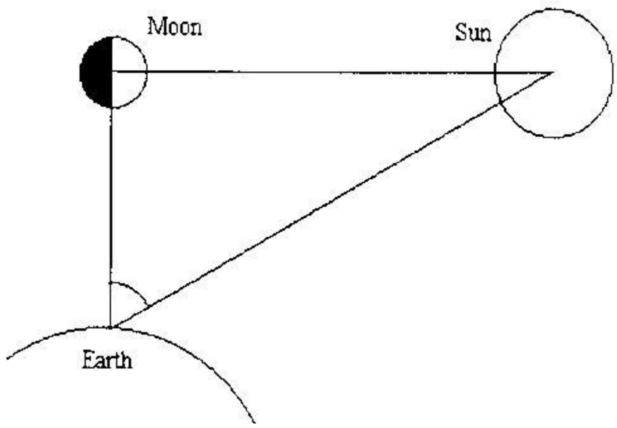


Fig.15: Position relative de la lune en premier quartier

Nous savons aujourd'hui que la valeur qui a été déterminée par Aristarque de Samos n'est pas très précise, parce qu'il était très difficile de déterminer le moment exacte du premier quartier de la lune. En réalité cette valeur est 89°51'

$$\cos\alpha = \frac{EM}{ES}$$

ES: distance Terre-soleil, EM distance Terre-Lune´Par la suite,

$$ES = 400\ EM$$

Bien que Aristarque ait déduit que ES = 19 EM

Relation entre le rayon de la Lune et le rayon du Soleil

La relation entre le diamètre de la lune et le diamètre du soleil devrait être similaire à la formule précédemment, car à partir de la Terre, nous observons le diamètre apparent du soleil et de la lune qui vaut 0,5 º. Donc, les deux rapports vérifient

$$R_S = 400\ R_M$$

La relation entre la distance Terre-Lune et le rayon de la lune et la relation entre la distance Terre-soleil et le rayon du soleil.

Aristarque de Samos suppose que l'orbite de la lune autour de la terre est un cercle. Comme le diamètre apparent de la lune est 0.5°, l'orbite de la lune autour de la Terre (360°) est 720 fois le rayon de la lune. L'orbite vaut aussi 2π fois la distance Terre-Lune, $2\ R_M\ 720 = 2\ \pi$ EM,

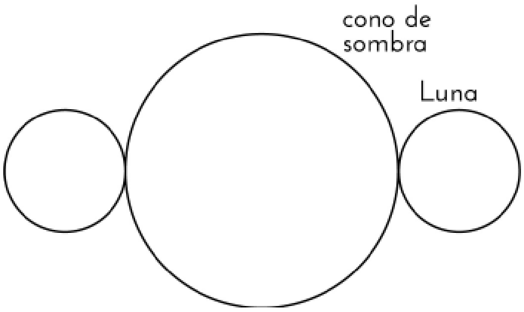
$$EM = \frac{720R_M}{\pi}$$

Par le même raisonnement

$$ES = \frac{720R_S}{\pi}$$

Relation entre les distances à la Terre du Soleil et de la Lune, le rayon lunaire, le rayon solaire et le rayon terrestre.

Au cours d'une éclipse lunaire, Aristarque de Samos a remarqué que le temps nécessaire à la Lune pour traverser le cône d'ombre de la Terre était deux fois le temps nécessaire pour que la surface de la Lune pénètre dans le cône d'ombre c'est-à-dire 2:1 en réalité c'est 2.6 :1



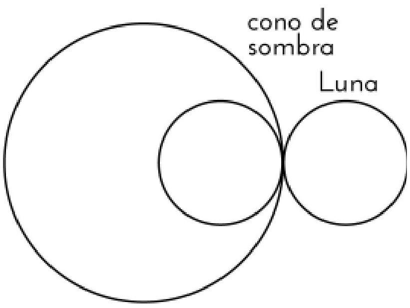


Fig.16a: Mesurer le cône d'ombre. Fig.16b: Mesurer le diamètre de la lune

Résumé

En tenant compte des derniers résultats (figure 17)

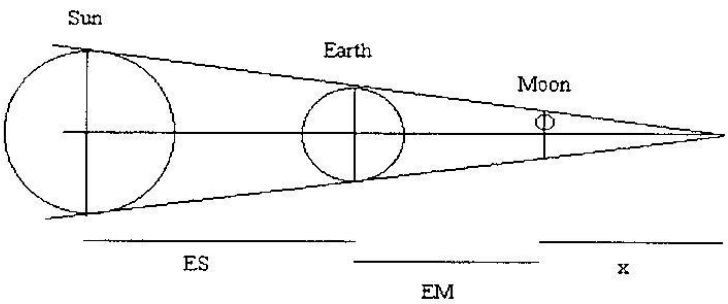


Fig.17: le cône d'ombre de la Terre et les positions relatives du système Terre-Lune-Soleil

On déduit les relations suivantes.

$$\frac{x}{2.6R_M} = \frac{x+EM}{R_E} = \frac{x+EM+ES}{R_S}$$

Où x est une variable supplémentaire. En introduisant dans cette expression les relations
ES = 400 EM et RS = 400 RM, nous pouvons supprimer x et après simplification, nous obtenons,

$$R_M = \frac{401}{1440} \cdot R_E$$

Cela nous permet d'exprimer toutes les tailles mentionnées précédemment en fonction du rayon de la Terre, donc

$$R_S = \frac{2005}{18} R_E \qquad ES = \frac{80200}{\pi} R_E \qquad EM = \frac{401}{2\pi} R_E$$

Où nous devons seulement substituer le rayon de notre planète pour obtenir toutes les distances et les rayons dans le système Terre-Lune-Soleil.

Prendre les mesures avec les élèves

C'est une bonne idée de répéter les mesures faites par Aristarque de Samos avec les élèves. En particulier, il faut d'abord calculer l'angle entre le Soleil et la lune lors du premier quartier. Pour effectuer cette mesure, il suffit d'avoir un théodolite et de connaître le moment exact du premier quartier.

Nous essaierons donc de vérifier si cet angle mesure α = 87º ou α = 89º 51 '(bien que cette précision soit très difficile à obtenir).

Deuxièmement, lors d'une éclipse lunaire, à l'aide d'un chronomètre, il est possible de calculer la relation entre les temps suivants: «le premier et le dernier contact de la Lune avec le cône d'ombre de la Terre», c'est-à-dire mesurer le diamètre du cône d'ombre de la Terre Figure 17a) et "le temps nécessaire pour couvrir la surface lunaire", c'est une mesure du diamètre de la lune (figure 20b). Enfin, il est possible de vérifier si le rapport entre les deux est de 2: 1 ou de 2.6: 1 ou il est différent.

L'objectif le plus important de cette activité n'est pas le résultat obtenu pour chaque rayon ou distance. Le plus important est de souligner aux étudiants que s'ils utilisent leurs connaissances et leur intelligence, ils peuvent obtenir des résultats intéressants avec peu de ressources. Dans ce cas, l'ingéniosité d'Aristarque de Samos était très importante pour avoir une idée sur la taille du système Terre-Lune-Soleil.

Il est également judicieux de mesurer avec les élèves le rayon de la terre suivant le processus utilisé par Eratosthène. Bien que l'expérience d'Eratosthène soit bien connue, nous présentons ici une brève version de celle-ci afin de compléter l'expérience précédente.

L'expérience d'Eratosthène, encore une fois

Eratosthène était le directeur de la bibliothèque d'Alexandrie. Dans l'un des textes de la bibliothèque, il a lu que dans la ville de Syène (maintenant Assouan) le jour du solstice d'été, à midi solaire, le Soleil se reflète au fond d'un puits, de même, un bâton ne produit pas d'ombre le même jour et à la même heure. Il a noté que ce n'est pas le cas à Alexandrie. C'est -à- dire qu'un bâton produisait un ombre à Alexandrie le jour du solstice de l'été et à midi solaire. De là, il a déduit que la surface de la Terre ne pouvait pas être plate, mais elle devrait être une sphère (figures 18a et 18b).

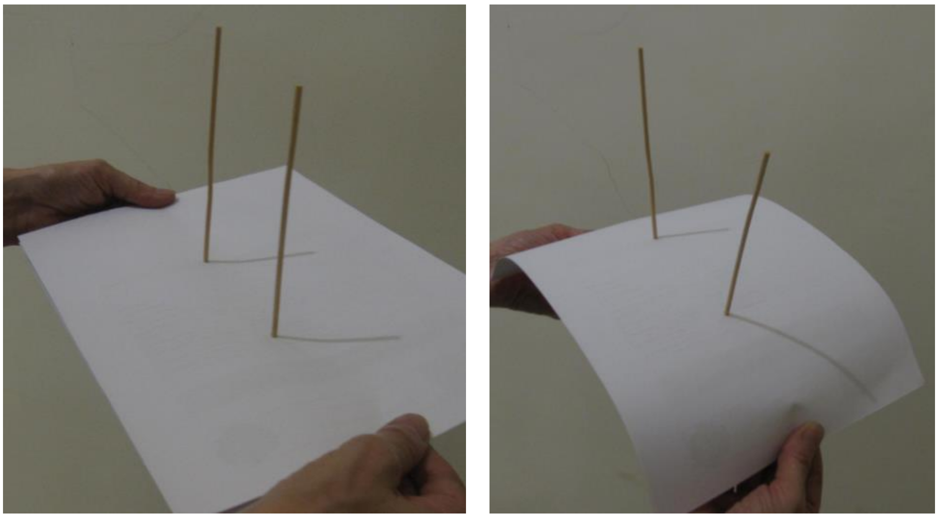


Fig.18a et 18b: sur une surface plane, les deux bâtons produisent la même ombre, mais lorsque la surface est courbée, les ombres sont différentes.

Considérons deux bâtons placés perpendiculairement au sol, dans deux endroits sur la surface de la Terre sur le même méridien. Les bâtons devraient être pointés vers le centre de la Terre. Nous devrions mesurer la longueur du bâton, et la longueur de son ombre.

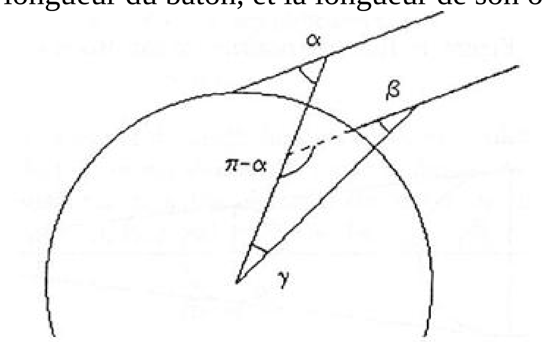


Fig.19: expérience d'Eratosthène

Nous supposons que les rayons solaires sont parallèles. Les rayons solaires produisent deux ombres, une pour chaque bâton. Nous mesurons les longueurs des bâtons et des ombres et en utilisant la définition de la tangente, on obtient les angles α et β (figure 19). L'angle central γ peut être calculé imposant que la somme des trois angles du triangle est égale à π radians. Ensuite, $\pi = \pi - \alpha + \beta + \gamma$ et simplifiant

$$\gamma = \alpha - \beta$$

Où α et β ont été obtenus par le bâton et son ombre.

Enfin, établissant une proportionnalité entre l'angleγ, la longueur de son arc d (déterminée par la distance au-dessus du méridien entre les deux villes), 2π radians du cercle méridien et sa longueur $2\pi R_E$, on trouve:,

$$\frac{2\pi R_E}{2\pi} = \frac{d}{\gamma}$$

entonces se deduce que:

$$R_E = \frac{d}{\gamma}$$

donde γ se ha obtenido a partir de la observación, en radianes, y d es la distancia en km entre ambas ciudades. Se puede hallar d a partir de un buen mapa.

Où γ a été obtenu par l'observation et d est la distance en km entre les deux villes. Nous pouvons trouver d à partir d'une bonne carte géographique.

Dans la situation d'Eratosthène, l'angle β était nul et $\gamma = \alpha$, et d qui est la distance entre Alexandrie et Syène, de cette façon, on peut avoir un bon résultat du rayon terrestre. Il convient également de mentionner que le but de cette activité n'est pas l'exactitude des résultats, mais plutôt, nous voulons que les élèves découvrent que penser et utiliser toutes les possibilités qu'on peut imaginer pourraient produire des résultats surprenants.

Les effets des marées

Les marées sont la montée et la chute du niveau de la mer causées par les effets combinés de la rotation de la Terre et les forces gravitationnelles exercées par la Lune et le Soleil. La forme du fond de la mer et du rivage dans la zone côtière influence également les marées, mais dans une moindre mesure. Les marées sont produites avec une période d'environ 12 heures et demie.

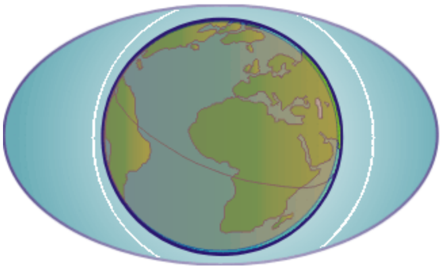


Fig. 20: effet de marée.

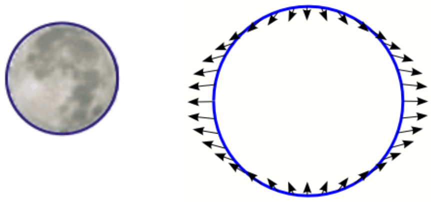


Fig. 21: Effet sur l'eau de l'accélération différentielle de la Terre dans différentes zones de l'océan.

Les marées s'expliquent principalement par l'attraction entre la Lune et la Terre. Des marées hautes se produisent sur les côtés de la Terre face à la lune et en face de la lune (figure 20). Les marées basses se produisent dans les points intermédiaires.

Les phénomènes de marée étaient déjà connus dans l'antiquité, mais leur explication n'était possible qu'après la découverte de la loi de Newton sur la gravitation universelle (1687).

$$F_g = \frac{m_T \cdot m_L}{d^2}$$

La lune exerce une force gravitationnelle sur Terre. Quand il y a une force gravitationnelle, il y a une accélération gravitationnelle selon la deuxième loi de Newton (F = m a). Ainsi, l'accélération provoquée par la lune sur Terre est donnée par

$$a_g = G\frac{m_L}{d^2}$$

Où m_L est la masse de lune et d est la distance de la lune à un point sur la Terre.

La partie solide de la Terre est un corps rigide, par conséquent, on peut considérer toute l'accélération sur cette partie solide appliquée au centre de la Terre. Cependant, l'eau est liquide et subit une accélération distincte qui dépend de la distance à la lune. Ainsi, l'accélération du côté le plus proche de la lune est supérieure que celle du côté opposé. Par conséquent, la surface de l'océan génère un ellipsoïde (figure 21).

Cet ellipsoïde est toujours allongé vers la Lune (figure 20) alors que la Terre est en rotation au centre. Ainsi, chaque point sur Terre aura une marée haute suivie d'une marée basse deux fois par jour. En effet, la période entre les marées est un peu plus de 12 heures et la raison est que la lune tourne autour de la Terre avec une période synodique d'environ 29,5 jours. Cela signifie qu'il court 360º en 29,5 jours, de sorte que la lune se déplace dans le ciel près de 12,2º tous les jours ou 6,6 º toutes les 12 heures.

Comme chaque heure, la Terre elle-même tourne autour d'environ 15 °/h, donc 6,6 ° est équivalente à environ 24 minutes, ce qui fait que chaque cycle de marée dure 12 heures et 24 minutes. Comme l'intervalle de temps entre la marée haute et la marée basse est d'environ la moitié, le temps qu'il faut pour que les marées hautes deviennent des marées basses, et vice versa, seront environ 6 heures 12 min.

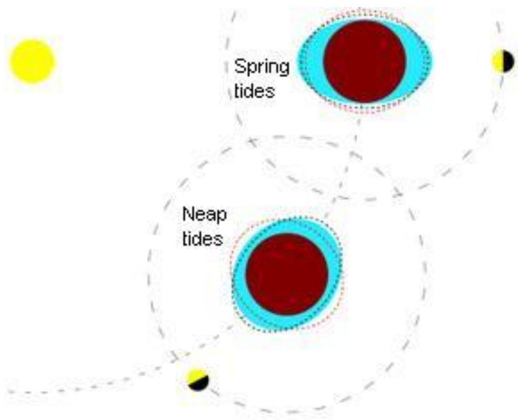


Fig.22: grande marée et faible marée

En raison de sa proximité, la Lune a une forte influence sur les marées. Mais le Soleil a également une influence sur les marées. Lorsque la Lune et le Soleil sont en conjonction (Nouvelle Lune) ou en opposition (Pleine Lune), c'est là que les grandes marées se produisent. Par contre quand la Lune et le Soleil exercent une attraction gravitationnelle perpendiculaire (Premier quartier ou dernier quartier), la Terre connaît alors des faibles marées (figure 22).

Bibliographies

- Broman, L., Estalella, R., Ros, R.M., "*Experimentos de Astronomía. 27 pasos hacia el Universo"*, Editorial Alambra, Madrid, 1988.
- Broman, L., Estalella, R., Ros, R.M., "*Experimentos de Astronomía"*, Editorial Alambra, México, 1997.
- Fucili, L., García, B., Casali, G., "A scale model to study solar eclipses", Proceedings of 3rd EAAE Summer School, 107, 109, Barcelona, 1999
- Lanciano, N., Strumenti per i giardino del cielo, Edizioni junior, Spaggiari Eds, Roma, 2016
- Reddy, M. P. M., Affholder, M, "*Descriptive physical oceanography: State of the Art*", Taylor and Francis, 249, 2001.
- Ros, R.M., *"Lunar eclipses: Viewing and Calculating Activities"*, Proceedings of 9th EAAE International Summer School, 135, 149, Barcelona, 2005.
- Ros, R.M., Viñuales, E., Aristarchos' Proportions, *Proceedings of 3rd EAAE International Summer School*, 55, 64, Barcelona, 1999.
- Ros, R.M., Viñuales, E., El mundo a través de los astrónomos alejandrinos, *Astronomía, Astrofotografía y Astronáutica*, 63, 21. Lérida, 1993.