

LES CAHIERS CLAIRAUT

N° 139 - Septembre 2012 7 €

Bulletin du Comité de Liaison Enseignants et Astronomes



Numéro 139 - automne 2012



ISSN 0758-234X

Comité de Liaison Enseignants et Astronomes

Le **CLEA**, Comité de Liaison Enseignants et Astronomes, est une association déclarée à but non lucratif (loi de 1901), fondée en 1977. Elle réunit des enseignants et des astronomes professionnels qui veulent ensemble promouvoir l'enseignement de l'astronomie à tous les niveaux de l'enseignement et dans les organismes de culture populaire.

Le **CLEA** organise des stages nationaux (Écoles d'Été) et régionaux. Ces stages sont ouverts aux enseignants de l'école, du collège et du lycée et, de manière générale, à tous les formateurs. On s'efforce d'y conjuguer information théorique et travaux pratiques (observations, travaux sur documents, mise au point de matériels didactiques et recherche du meilleur usage de ces matériels, etc.). Le **CLEA** favorise les échanges directs entre enseignants et astronomes, hors de toute contrainte hiérarchique.

L'organe de liaison du **CLEA**, les **CAHIERS CLAIRAUT**, est une revue trimestrielle. On y trouve des articles de fond (astrophysique, histoire, philosophie, enseignement...), des comptes rendus d'expériences pédagogiques, des notes critiques de livres récents, des innovations en matière d'activités pratiques.

Le **CLEA** a mis en place une liste de diffusion afin de permettre des échanges rapides entre les abonnés.

Présidents d'honneur :

Jean-Claude Pecker
Lucienne Gouguenheim,
Georges Paturel

Bureau du CLEA pour 2011

Présidente : Cécile Ferrari
Trésorière: Roseline Jamet
Trésorier Adjoint : Jean Ripert
Secrétaire : Jean-Luc Fouquet
Secrétaire Adjoint : Christian Larcher

Responsables des groupes

Vie associative : Jean-Michel Vienney

Cahiers Clairaut : Christian Larcher

Productions Pédagogiques : Pierre Causeret

Communication : Charles-Henri Eyraud

École d'Été d'Astronomie: Danièle Imbault

Responsables du site :

Francis Berthomieu et Charles-Henri Eyraud



Merci à tous celles et ceux qui ont permis la réalisation de ce numéro des Cahiers Clairaut, nous citerons :

Francis Berthomieu, Pierre Causeret, Daniel Collongues, Robert Domain, Olivier Gaymard, Gilbert Grétilat, Jean-Jacques Hillairet, Christian Larcher, Chantal Lecoutre, Georges Lecoutre, Pierre Le Fur, Pierre Magnien, Lionel Muller, Georges Paturel, Gilles Rémy, Jean Ripert, Béatrice Sandré, Blaise Simon, Pierre Thomas.

Les auteurs recevront plusieurs numéros 139, afin de faire connaître la revue autour d'eux.

Image de couverture, :

mosaïque de la Lune gibbeuse, photographiée peu après le premier quartier réalisée par Samuel Challéat (SAB Dijon). Les principales formations traversées par le terminateur sont, de haut en bas, le cratère Platon (on aperçoit à droite la vallée des Alpes), la mer des Pluies, Copernic, la mer des Nuées, et, tout en bas, Clavius.

Les Cahiers Clairaut

Automne 2012 n° 139

Éditorial

Dans le dernier numéro des Cahiers Clairaut nous vous avons conviés à une approche de la Relativité Restreinte d'une part sous un aspect historique et d'autre part sous un aspect plus expérimental comme le recommandent les programmes de physique de la classe terminale, à partir du temps mis par les muons pour se désintégrer. Dans ce nouveau numéro vous trouverez la fin de l'article sur la désintégration des muons. Nous espérons que cette présentation favorisera la compréhension de la question délicate de « durée propre » par rapport au concept habituel de durée selon la mécanique classique. Une telle démarche est sûrement plus convaincante que la traditionnelle présentation des « jumeaux de Langevin » qui, la plupart du temps, introduit des idées erronées.

Tous les lecteurs des Cahiers Clairaut ne s'intéressent pas à la théorie de la Relativité Restreinte !

De façon plus terre à terre, le thème de ce numéro porte sur l'étude de la Lune, au moment où Neil Armstrong, le premier homme à poser le pied sur la surface de notre satellite naturel, vient de nous quitter.

Vous pourrez essayer de retrouver le cratère qui porte son nom : il est situé non loin de la zone d'alunissage du module lunaire le 20 juillet 1969.

Quelle est l'origine de la Lune ? Trois hypothèses sont étudiées pour expliquer sa formation.

Avec vos élèves, simulez des cratères d'origine météoritique en utilisant de la poudre de cacao, de la farine ou de la semoule... partez à la découverte de la topographie du sol lunaire, calculez la hauteur des bords des cratères ou du pic central que certains possèdent, enfin déterminez la masse de notre satellite naturel. Mais le thème de la Lune est loin d'être épuisé, vous trouverez encore des articles sur la Lune dans le prochain numéro.

Avec des étudiants on peut aller plus loin de la Terre, par exemple jusqu'à Mars, et chercher à déterminer simplement quelques éléments de son orbite.

Pour finir, une remarque d'ordre matériel. Le nombre d'abonnés aux Cahiers Clairaut tourne autour de 500 ; c'est un nombre un peu charnière ...pour les tarifs postaux : nous sommes juste à la limite pour obtenir des réductions sur l'affranchissement postal !

Si vous appréciez notre revue, faites le savoir autour de vous pour transmettre le mieux possible aux élèves notre passion pour l'astronomie. Ce faisant, vous continuerez à bénéficier de conditions favorables de tarification postale !

Christian Larcher, pour l'équipe.

Article de fond

Désintégration du muon (partie 2)

Pierre Magnien

p 2

Thème : LA LUNE

p 6

Notions de base

Pierre Causeret

p 7

Article de fond

L'origine de la Lune

Pierre Thomas

p 9

Fin du monde et alignement planétaire ?

p 13

Avec nos élèves

Simulation de cratères

Olivier Gayraud,

p 14

Jeux

Mots croisés

Pierre Causeret

p 16

Avec nos élèves

La Lune, ombre et lumière

Pierre Le Fur

p 17

Article de fond

Masse de la Lune

Béatrice Sandré

p 21

Article de fond

Détermination rapide de quelques éléments de l'orbite de Mars connaissant trois longitudes et la période (méthode de l'excentrique)

Blaise Simon

p 25

Ciel d'automne

Pierre Causeret

p 28

Point de vue

Des épicycles à la matière noire

Georges Paturel

p 30

Lecture pour la Marquise

Les mots du ciel

Histoire de l'inertie d'Aristote à Einstein

Christian Larcher

p 34

Le Hors-série n° 10

p 36

Solutions mots croisés

p 36

Vie de l'association

Stage dans l'académie de Nice

Pierre Le Fur

p 37

EEA Gap

Lionel Muller

p 39

Jeu : phases et éclipses

p 40

Assemblée Générale Elle aura lieu à la Cité de l'Espace de Toulouse le 10 février 2013

ARTICLE DE FOND

DÉSINTÉGRATION DU MUON: UNE HORLOGE RELATIVISTE

Pierre Magnien

Suite de l'article du CC n°138

Résultats

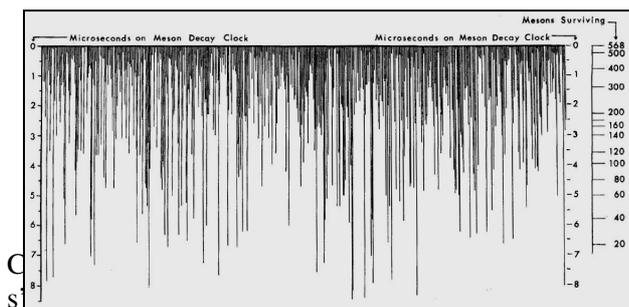
Les enregistrements étant réalisés, ils vont être dépouillés et exploités par les deux expérimentateurs : J. Smith fait la lecture des durées de vie sur les clichés et D. Frisch les reporte sur un graphique.



Plusieurs séries de mesures ont été faites et reportées dans un tableau:

Série de mesures	Sur le Mt Washington	À Cambridge
1	568	412
2	554	403
3	582	436
4	527	395
5	588	393
6	559	...
Taux horaire moyen	563 ± 10	408 ± 9

Pour le film, la représentation graphique au Mont Washington est réalisée en utilisant la première série avec $N_w = 568$. Le résultat, montré ci-dessous, est extrait de l'article dans l'AJP :



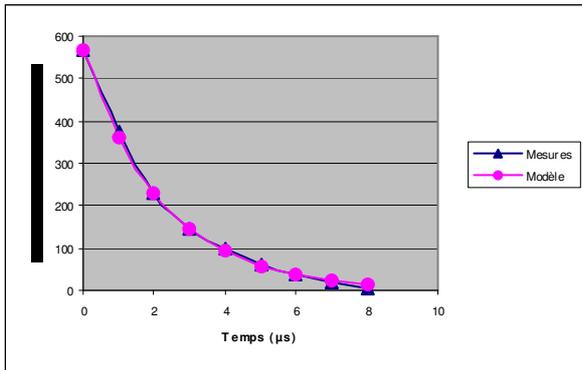
représente la durée de vie propre de la particule. Sur la droite est disposée une échelle donnant la correspondance entre le nombre de muons survivants et le temps écoulé depuis l'arrêt du muon. On constate que cette durée de vie varie dans de larges proportions. On peut rechercher la forme de la distribution en regroupant le nombre de survivants pour chaque tranche de $1 \mu s$.

Temps écoulé (μs)	Nombre de muons survivants	Loi exponentielle
0	568	568
1	373	360
2	229	228
3	145	144
4	99	91
5	62	58
6	36	37
7	17	23
8	6	15

La colonne supplémentaire est celle d'une loi exponentielle pour la distribution dans le temps du nombre de muons survivants. Elle est de la forme :

$$N(t) = 568.e^{-t/\tau} \text{ avec } t = 2,2\mu s$$

On peut constater que les mesures et le modèle exponentiel correspondent l'un avec l'autre avec une excellente précision comme le confirme le diagramme ci-dessous.



Cependant, comme on le verra plus loin, il n'est pas nécessaire d'avoir une forme de distribution connue pour obtenir des résultats valables ; il suffit que la loi décrivant le phénomène soit la même au sommet du Mont Washington et au niveau de la mer, ce qui n'est que la conséquence d'une propriété maintes fois vérifiée de la radioactivité : le taux de désintégration d'une particule instable ne dépend que de la nature de cette dernière.

À partir de ces résultats Frisch et Smith vont déterminer combien de muons, sur les 568 recueillis au sommet du Mont Washington, survivront dans le laboratoire du MIT, après 1907 m de descente. Bien sûr ce ne sont pas les mêmes muons puisque, d'une part, ces derniers se sont déjà désintégrés et, d'autre part, on se trouve en un autre lieu et à une autre date. Cependant la méthode est pertinente car :

- Tous les muons sont indiscernables et se désintègrent de la même façon.
- Les variations géographiques du flux de muons sont insignifiantes entre deux lieux aussi proches l'un de l'autre (environ 200 km)
- Les variations temporelles du flux de muons sont négligeables entre deux moments de mesure aussi proches l'un de l'autre (quelques jours)

Les muons sélectionnés ayant, à mieux qu'un pour cent près, la vitesse de la lumière, on peut calculer facilement le temps t_{wc} qu'ils mettent pour passer d'une altitude de 1910 m à une altitude de 3 m.

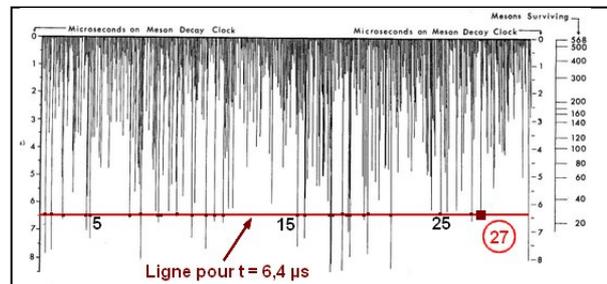
On a, dans le référentiel terrestre :

$$t_{wc} \approx \frac{(1910 - 3)}{3 \cdot 10^8} = 6,4 \mu s$$

Donc, sur le graphique de la distribution montré plus haut, on repère la ligne horizontale correspondant à un temps de 6,4 μs et on compte, dans la fenêtre de vitesses sélectionnée, combien de

lignes verticales sont coupées pour obtenir le nombre de muons survivants au niveau de la mer. Cette méthode est valable quelle que soit la forme de la distribution statistique des durées de vie des muons.

Sur le graphique suivant on peut compter le nombre de survivants au bout de 6,4 μs .

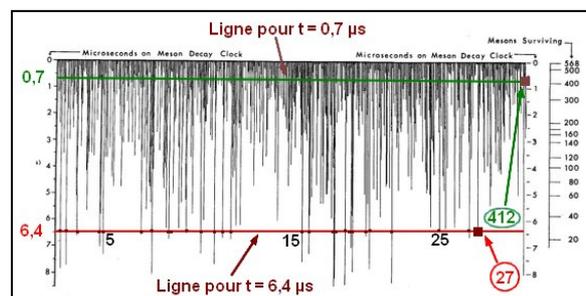


On constate qu'il devrait rester au niveau de la mer et sur les 568 parvenant à 1910 m avec une vitesse convenable, 27 muons ayant survécu à cette descente supplémentaire. On peut vérifier, sachant que la forme de la distribution est exponentielle, que cette valeur est satisfaisante. En effet on a :

$$N_c = 568 \cdot e^{-6,4/2,2} = 31$$

Ceci est tout à fait compatible avec ce que donne le graphique.

Les deux expérimentateurs, refaisant au niveau de la mer¹, le comptage des muons se désintégrant, vont obtenir plusieurs séries de mesures, comme on peut le voir dans le tableau précédent. Les résultats utilisés dans le film retiennent une valeur de 412 survivants, ce qui est très supérieur au 27 attendus. Si on regarde le diagramme précédent on constate qu'un nombre de 412 survivants correspond à une ligne passant par 0,7 μs .



En résumé, Smith et Frisch ont donc déterminé :

- La distribution statistique de la durée de vie des muons dans un référentiel où ils sont au repos. C'est donc une durée propre.

¹ Pour cela, rappelons le, ils réduisirent la hauteur de la pile de fer pour tenir compte de l'épaisseur supplémentaire d'air traversée tout en conservant à peu près le même domaine de vitesses.

- Le nombre théorique N_T (en mécanique classique où le temps est une grandeur absolue) de muons survivants jusqu'au niveau de la mer après être passés au sommet du Mont Washington ; $N_T = 27$
- Le nombre expérimental N_E de muons survivants au niveau de la mer (Cambridge) après être passés au sommet du Mont Washington dans un intervalle de temps du laboratoire de $\Delta t_L = 6,4 \mu s$. $N_E = 412$
- La durée au bout de laquelle il reste, dans le référentiel de repos du muon (graphique de la première série de mesures), un nombre de 412 de survivants. Ils trouvent $\Delta t_M = 0,7 \mu s$.

Autrement dit, on peut affirmer qu'une durée de $6,4 \mu s$ dans le repère du laboratoire ne correspond plus qu'à une durée de $0,7 \mu s$ dans celui du muon. C'est le phénomène relativiste de dilatation du temps. On peut alors calculer le facteur γ puisque nous avons la relation $\Delta t_L = \gamma \cdot \Delta t_M$.

$$\gamma = \frac{\Delta t_L}{\Delta t_M} = \frac{6,4}{0,7} \approx 9$$

Dans le film, la détermination du facteur γ est faite de cette façon, sans développer la manière suivante qui ne l'est que dans l'article de l'AJP.

En effet pour vérifier ce que prévoit la relativité restreinte, on peut également faire le calcul en s'appuyant sur l'expression de γ en fonction de \mathbf{V} . Pour cela il faut connaître \mathbf{V} . Les mésons qui parviennent au-dessus des 76 cm de fer sur le Mont Washington, sont ralentis et stoppés dans le plastique et ont une vitesse incidente comprise entre $0,9950c$ et $0,9954c$. On pourrait prendre la valeur médiane du sélecteur de vitesses, c'est-à-dire : $\beta_w = V/c = 0,9952$ mais, au niveau de la mer, le spectre des vitesses incidentes des mésons arrivant au-dessus de 46 cm de fer ne s'étend² que de $0,9881c$ à $0,9897c$ avec une valeur moyenne de $0,9889c$. On peut alors calculer deux valeurs de γ :

$$\gamma_w = \frac{1}{\sqrt{(1 - \beta_w^2)}} = \frac{1}{\sqrt{(1 - 0,9952^2)}} = 10,2$$

$$\gamma_L = \frac{1}{\sqrt{(1 - \beta_L^2)}} = \frac{1}{\sqrt{(1 - 0,9889^2)}} = 6,8$$

² Cette différence provient d'une mauvaise évaluation de la hauteur de barre de fer à enlever en revenant au niveau de la mer.

On peut faire un calcul simplifié en prenant la moyenne de ces deux valeurs. On a alors :

$$\gamma = 8,5$$

Ce résultat est tout à fait compatible avec le précédent, sachant qu'il y a plusieurs causes d'imprécisions. Ces dernières sont étudiées dans l'article qui va plus loin dans les calculs et fait également une analyse complète des causes d'erreurs et d'incertitudes. Il contient également une évaluation de l'encadrement $\Delta\gamma$ pour les deux méthodes.

Analyse de l'expérience et des résultats

Dans l'article paru dans l'AJP Frisch et Smith font un bilan détaillé³ de toutes les causes perturbatrices de leur expérience :

- Formation des muons ;
- Interaction des muons durant leur vol ;
- Évaluation de la vitesse des muons ;
- Influence de la forme de la loi de distribution sur l'expérience ;
- Interaction entre les muons au repos ;
- La perte de comptage après $8,5 \mu s$;
- Coïncidences temporelles accidentelles liées au bruit de fond ;
- Effets sur la dilatation du temps de la décélération des mésons en vol ;
- Effet des mésons non verticaux.

On ne détaillera pas ici chacun de ces points mais on pourra les retrouver dans l'article original et, pour ceux qui ont des difficultés avec l'anglais, dans sa traduction qui est disponible sur demande.

Utilisation pédagogique du film et de l'article

Disponibilité des documents

Comme indiqué plus haut, cette expérience a donné lieu à un film pédagogique de 36 min réalisé avec les deux physiciens. Il est visible sur plusieurs sites Internet. On peut citer, par exemple, les URL suivantes :

<http://www.scivee.tv/node/2415>

<http://bestphysicsvideos.blogspot.com/2011/02/time-dilation-experiment-with-mu-mesons.html>

Ces liens sont directement accessibles sur le site du CLEA aux pages sommaire du CC 139

<http://www.ac-nice.fr/clea/SommCC139.html>

³ Ce point est abordé d'une manière rapide dans le film

Le script des dialogues n'étant pas disponible, j'en ai réalisé la traduction pour créer un fichier srt de sous-titrage (disponible sur demande) permettant d'exploiter le document avec des élèves à l'aide de n'importe quel logiciel de lecture vidéo.

L'article de l'AJP est également consultable sur Internet. On peut le trouver sur :

<http://www.physics.umd.edu/physics141/frisch-smith.pdf>

Comme déjà indiqué, je l'ai également traduit et mettrai ce travail en ligne pour ceux qui sont intéressés. (voir en fin d'article).

Quelques exemples d'utilisation pédagogique

Dans le cadre des nouveaux programmes de physique de TS, il est possible de construire plusieurs activités avec des élèves à partir de cette expérience particulièrement riche. On peut envisager :

Interprétations classique et relativiste des résultats

Un calcul simple montre qu'en renonçant à appliquer la relativité restreinte, il n'est pas possible d'expliquer que les muons atteignent en nombre aussi élevé le niveau de la mer. En effet, les muons mettraient 6,4 μ s pour parcourir les 1907 m de dénivellation et le nombre de muons qui atteindraient le niveau de la mer serait seulement de quelques dizaines (27 mesuré et 31 calculé). Seule la dilatation relativiste du temps – ainsi que la contraction des longueurs mais elle n'est pas au programme - nous donne une explication satisfaisante.

L'intervalle de temps entre les événements « le muon passe au sommet du Mont Washington » et « le muon passe à Cambridge » est un intervalle de temps propre Δt_0 pour le muon et un intervalle de temps impropre $\Delta t'$, beaucoup plus grand, pour l'expérimentateur dans son laboratoire terrestre.

Comme $\Delta t' = 6,4 \mu$ s et $V = 0,9952c$ on obtient pour la durée du parcours dans le référentiel du muon :

Numériquement nous obtenons $\Delta t_0 = 0,63 \mu$ s.

$$\Delta t' = \gamma \cdot \Delta t_0 = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{(1 - \beta^2)}} \quad \text{donc} \quad \Delta t_0 = \sqrt{(1 - \beta^2)} \cdot \Delta t'$$

De même, la durée de vie de 2,2 μ s est un intervalle de temps propre τ_0 pour le muon et un intervalle de temps impropre τ' , considérablement allongé, pour les expérimentateurs terrestres.

$$\tau' = \gamma \cdot \tau_0 = \frac{\tau_0}{\sqrt{(1 - \beta^2)}}$$

Le calcul nous donne $\tau' = 22,5 \mu$ s.

Dans le référentiel du muon, la durée de vie vaut 2,2 μ s et la durée du parcours 0,63 μ s. Le calcul du nombre de muons atteignant le niveau de la mer donne donc :

$$N_c = N_w \cdot e^{-0,63/2,2} \quad \text{avec} \quad N_w = 563$$

Donc $N_c = 563 \times 0,751 = 423$

Dans le référentiel terrestre, la durée de vie vaut 22,5 μ s et la durée du parcours 6,4 μ s. En refaisant le même calcul nous obtenons :

$$N_c = N_w \cdot e^{-6,4/22,5} \quad \text{avec} \quad N_w = 563$$

Donc $N_c = 563 \times 0,752 = 424$

On trouve, aux arrondis de calcul près, la même valeur. La réciprocité des effets est bien vérifiée.

On peut également interpréter les résultats à partir du point de vue du muon sur la distance parcourue. Celui-ci voit arriver vers lui, à une vitesse de 0,9952.c, le sommet du Mont Washington puis le laboratoire de Cambridge. Dans le référentiel du muon, la distance D' à parcourir est la longueur d'un « objet en mouvement », qui est beaucoup plus courte que la distance (longueur propre) $D_0 = 1907$ m mesurée dans le référentiel terrestre. On a :

$$D' = (1 - \beta^2)^{1/2} \cdot D_0$$

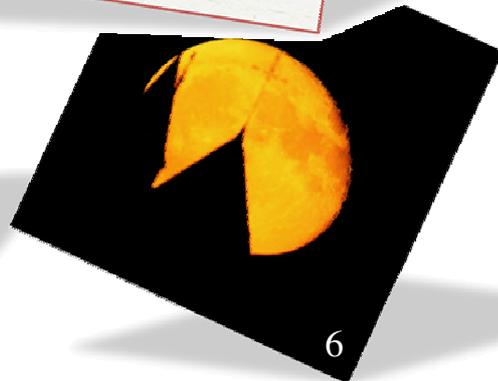
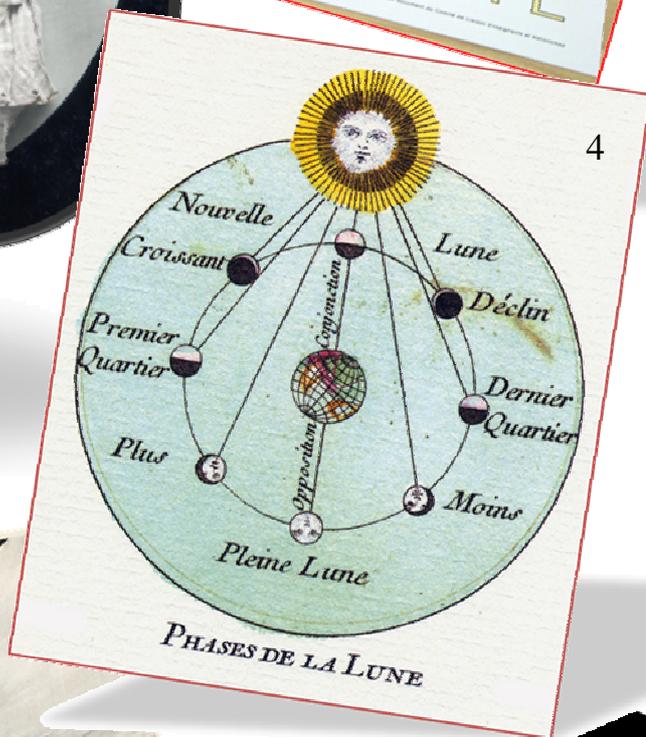
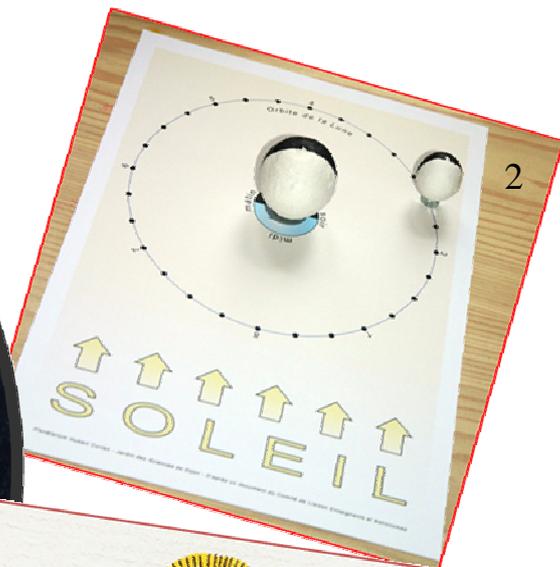
donc : $D' = 0,0979 \times 1907 = 187$ m

Pour le muon, cette courte distance sera parcourue par la Terre qui vient à sa rencontre, en 0,63 μ s. ■

NDLR : Vous pouvez retrouver les différents fichiers déposés par Pierre Magnien Dans l'espace "LUNAP" réalisé par le CLEA à l'adresse suivante :

<http://accés.ens-lyon.fr/clea/lunap/Relativite/relativite-restreinte-principes-et-applications>

THÈME : LA LUNE



1. Carte postale du début du xx^e siècle ; 2. Maquette pour comprendre les phases de la Lune (TP du CLEA) ; 3. Empreinte du premier pas sur la Lune (crédit Nasa) ; 4. Les phases de la Lune expliquées dans "la cosmographie de l'académie des enfants" de 1774 ; 5. Intensité de la pesanteur sur la Lune (illustration de Lucien Rudaux dans le livre "sur les autres mondes" 1937) ; 6. Lever de Lune derrière le clocher de l'église de St Jean de Losne 21 (photo Pierre Causeret).

La Lune, notions de base

Pierre Causeret, pierre.causeret@wanadoo.fr

Ces notions de base sont évidemment très incomplètes, ces deux pages ne suffisant pas à survoler ce que l'on sait de la Lune.

Observation et phases

Les phases de la Lune se succèdent avec une période moyenne de 29,53059 jours soit 29 j 12 h 44 min et 3 s. Il s'agit d'une moyenne, cette durée pouvant varier de plusieurs heures suivant la lunaison. Une activité classique avec des élèves consiste à leur demander de dessiner ou de photographier la Lune sur une période d'une lunaison ou plus. Quelle forme doit-on obtenir ? La limite jour nuit sur la Lune s'appelle le terminateur. Il s'agit d'un cercle sur la sphère lunaire mais, vu en perspective, ce cercle est vu comme une ellipse depuis la Terre ou plutôt une demi-ellipse. Une image de la partie éclairée de la Lune doit donc être limitée par un demi-cercle et une demi-ellipse (figure 1).

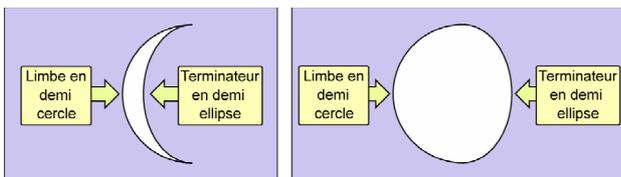


Fig.1. La partie éclairée de la Lune est limitée d'un côté par le limbe lunaire en forme de demi-cercle et de l'autre côté par le terminateur en forme de demi-ellipse.

Une expérience simple pour comprendre ces phases consiste à se placer dans une pièce noire avec un projecteur et une boule en polystyrène (figure 2).

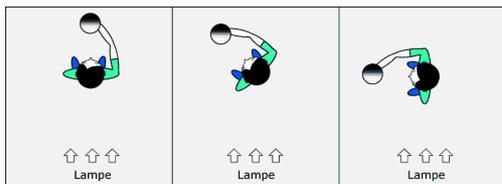


Fig.2. Simulation des phases de la Lune.

C'est aux alentours du terminateur que le relief est le plus marqué car l'éclairage y est rasant et les montagnes portent une ombre. Il faut donc observer la Lune autour d'un quartier pour admirer son relief (premier quartier le soir ou dernier quartier le matin).

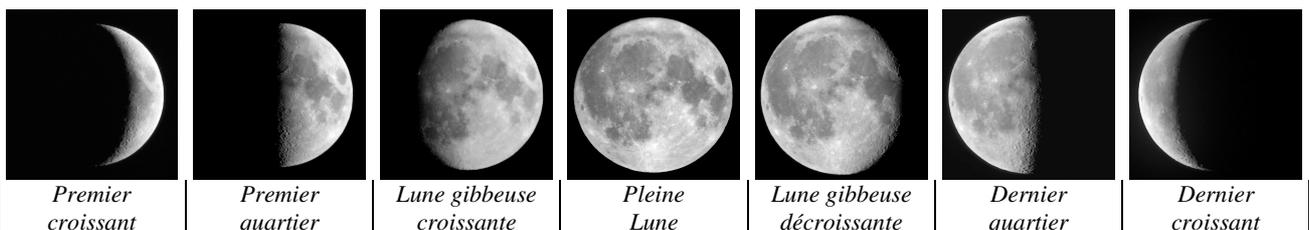


Fig.4. Succession des phases de la Lune.

Sélénographie

À l'œil nu, on distingue des taches sombres à la surface de la Lune que l'on a appelées mers ou océans au XVII^e siècle. Il s'agit en fait de grandes plaines de basaltes. On a su bien avant d'envoyer des sondes spatiales qu'il n'y avait pas d'eau liquide à la surface de la Lune. En effet, lorsqu'une étoile est occultée par la Lune, sa disparition est instantanée. La Lune n'a donc pas d'atmosphère, et sans atmosphère, il ne peut pas se maintenir de l'eau liquide à sa surface.

Les cratères ont été formés par l'impact de météorites. On leur a donné des noms de personnages ayant un rapport avec l'astronomie (Ptolémée, Copernic, Clairaut...). Quant aux montagnes, elles ont reçu des noms terrestres : Alpes, Pyrénées, Apennins...

Caractéristiques physiques

Dans l'ordre de taille des satellites du système solaire, la Lune est classée 5^e après Titan, Ganymède, Callisto et Io qui tournent autour de planètes géantes. Elle n'est que 3 à 4 fois plus petite que la Terre ce qui fait que l'on parle parfois de planète double pour le système Terre Lune. Sa masse vaut 1/81 de la masse de la Terre.



Fig.3. Terre et Lune à l'échelle pour leur rayon mais pas pour leur distance qu'il faudrait multiplier par 10 ici !

Le poids d'un objet ou d'une personne sur la Lune ne vaut que 1/6 de son poids sur Terre. C'est le résultat de la plus petite masse de la Lune mais aussi du fait que son rayon est 3,7 fois plus petit que celui de la Terre (et $81/3,7^2 \approx 6$).

Orbite

Dans un repère géocentrique, la Lune tourne autour de la Terre en suivant une orbite approximativement elliptique, dans un plan incliné de 5° sur le plan de l'écliptique. Cette ellipse se déforme constamment sous l'effet de l'attraction du Soleil.

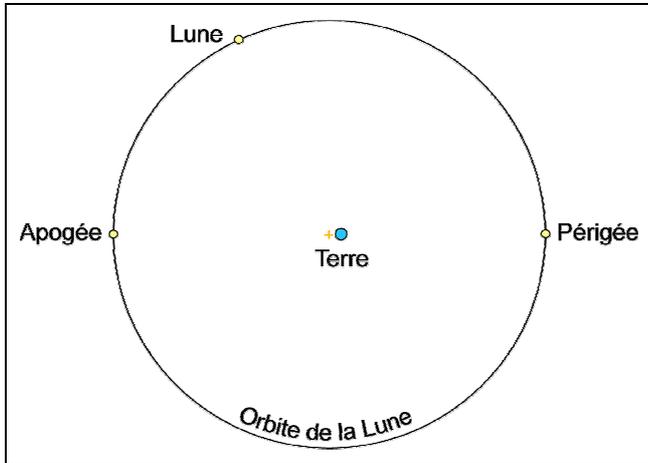


Fig.5. Dessin à l'échelle de l'orbite lunaire. Le périgée moyen (point de l'orbite le plus proche de la Terre) est à 363 300 km et l'apogée (point le plus éloigné) à 405 500 km, la distance moyenne étant de 384 400 km. Mais il arrive que la Lune s'approche à 356 400 km lorsque l'excentricité de l'ellipse est plus importante. La croix orange indique le centre de l'orbite.

En termes de mécanique céleste, il serait plus juste de dire que la Terre et la Lune tournent autour de leur centre de masse commun, situé à 4700 km du centre de la Terre (donc sous la surface terrestre) et que le système Terre Lune tourne autour du Soleil (figure 7). La Lune est d'ailleurs deux fois plus attirée par le Soleil que par la Terre.

Périodes de révolution

On peut définir plusieurs périodes de révolution :

- la période synodique ou lunaison de 29,53 jours par rapport à l'axe Soleil Terre ;
- la période sidérale de 27,32 jours par rapport aux étoiles ;
- la période anomalistique de 27,55 jours, intervalle de temps entre deux passages au périgée ;
- la période draconitique de 27,21 jours, intervalle de temps entre deux passages au nœud ascendant (les nœuds sont les intersections de l'orbite de la Lune avec le plan de l'écliptique).



Fig.7. Le système Terre Lune à l'échelle dans son mouvement autour du Soleil. Celui-ci devrait être situé tout en haut de la page. La trajectoire de la Terre est en bleu, celle de la Lune en orange. On peut remarquer que la concavité de l'orbite lunaire est toujours dirigée du côté du Soleil (cela provient du fait que la Lune est davantage attirée par le Soleil que par la Terre). ■

Face visible et rotation

L'observation montre que l'on voit toujours la même face de la Lune avec la mer des Crises à droite et l'océan des Tempêtes à gauche. Certains ont du mal à comprendre que pourtant la Lune tourne sur elle-même. Une expérience simple permet de le montrer. Placez une orange sur une table qui représentera la Terre. Demandez à une personne de faire tourner un objet, une bouteille, un pot de confiture... pour que, depuis l'orange, on voie toujours le même côté de l'objet, l'étiquette par exemple. Elle sera obligée de faire tourner cet objet sur lui-même dans le même temps qu'il tourne autour de l'orange (figure 6).

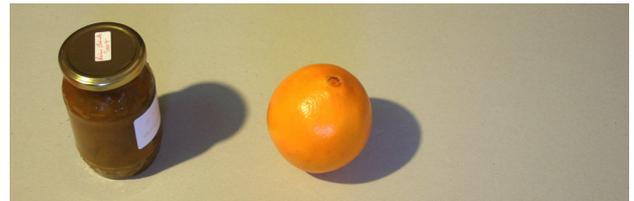


Fig.6. Modélisation de la révolution de la Lune autour de la Terre et de sa rotation sur elle-même avec orange et pot de confiture.

Le phénomène est le même pour la Lune qui tourne sur elle-même en 27,3 jours, la période sidérale. Ce n'est pas une coïncidence mais les forces de marée de la Terre sur la Lune qui ont ralenti la rotation de la Lune jusqu'à cette stabilisation.

Influences de la Lune

Quand on parle de la Lune, on est souvent questionné sur ses influences.

La Lune est la principale responsable des marées. Elle est à l'origine du ralentissement de la rotation de la Terre. J. Laskar a montré qu'elle avait aussi joué un rôle primordial dans la stabilité de l'axe de la Terre. Certains animaux marins (coraux, vers...) ont un cycle de reproduction synchronisé avec les phases de la Lune. Ce sont à peu près toutes les influences vérifiées de la Lune sur la Terre.

Les études ont montré qu'il n'y a pas d'influence notable sur le nombre de naissances (que ce soit d'enfants ou de veaux) ni sur le nombre de suicides. Quant aux plantes et au jardinage, il n'y a pas d'étude scientifique montrant une quelconque influence de la Lune...

L'origine de la Lune

Pierre Thomas, Laboratoire de géologie de Lyon, Terre, Planète, Environnement - UMR 5276
École normale supérieure de Lyon

Pierre Thomas revient ici sur les différents scénarii de formation de la Lune et détaille les arguments en faveur de l'hypothèse de l'impact

La Lune tient une place particulière pour l'humanité. Chantée par les poètes, parfois divinisée, souvent à la base de calendriers, elle a été le premier objet céleste observé à la lunette par Galilée et elle a de ce fait participé à l'effondrement du système du monde mis en place dans l'Antiquité grecque. Du XVII^e siècle jusqu'en 1969, les astronomes l'ont étudiée sous toutes les coutures et ont montré que la Lune, seul satellite naturel de la Terre, avait des caractéristiques uniques dans le système solaire. Citons en trois :

(1) Tous les satellites majeurs des planètes orbitent dans le plan équatorial de leur planète, sauf Triton (satellite de Neptune), et la Lune. L'orbite de la Lune est presque située dans le plan de l'écliptique (inclinaison de 5,145°), c'est-à-dire qu'elle fait un angle variant de 18° à 28° par rapport à l'équateur terrestre.

(2) Les satellites majeurs des planètes sont extrêmement petits par rapport à leur planète. Par exemple, le rapport des diamètres entre Jupiter et Ganymède (son plus gros satellite) est de 26. Celui des diamètres Terre/Lune n'est que de 3,66. Le rapport des masses Jupiter/Ganymède est voisin de 12 000. Le rapport des masses Terre/Lune n'est que de 81. À l'opposé, le moment cinétique de la Lune est important par rapport à celui de rotation de la Terre.



Fig.1. : la Lune et la Terre photographiées par la sonde Galileo (alors en route pour Jupiter) le 16 décembre 1992. Cette image, prise depuis 6 200 000 km du système Terre-Lune met particulièrement en évidence les tailles relativement voisines de la Terre et de la Lune, un cas unique dans le système solaire si l'on excepte le couple Pluton-Charon

Source : <http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/pia00134>

(3) Les corps telluriques du système solaire interne ont une masse volumique $\rho > 3900 \text{ kg/m}^3$, preuve qu'ils sont constitués d'un mélange de silicates ($2700 < \rho < 3300$ à pression et température standards) et d'un métal plus dense comme le fer ($\rho = 7800 \text{ kg/m}^3$ à P et T standards). La masse volumique de la Lune n'est que de $3346,4 \text{ kg/m}^3$, preuve qu'elle ne contient que très peu de fer, moins que les autres corps telluriques.

La Lune était donc un cas « à part » dans le système solaire, ce qui posait de fait la question de son origine.

Trois familles d'hypothèses ont alors été émises durant le XIX^e et la première moitié du XX^e siècle pour expliquer notre Lune, unique dans le système solaire.

Première famille d'hypothèses

Appelée « origine par fusion », elle est basée sur deux observations indépendantes.

(1) On sait depuis Newton que la Lune est à l'origine des marées sur Terre. Ces marées, sources de frictions (et d'un couple de rappel), doivent ralentir la rotation de la Terre sur elle-même. Le moment cinétique du système Terre/Lune devant rester constant, ce ralentissement de la rotation terrestre doit s'accompagner d'un éloignement de la Lune (éloignement bien réel que l'on a mesuré voisin de 3 cm/an à la fin du XX^e siècle). Si l'on remonte le temps, la Lune devait donc tourner très près de la Terre. Tout cela était connu de manière qualitative (mais non quantitative) au XIX^e siècle.

(2) La masse volumique de la Lune, faible, est voisine de celle des roches silicatées qu'on trouve à la surface de la Terre ($2700 < \rho < 3300$), et bien inférieure à celle du noyau dense que l'on savait exister au centre de la Terre.

Avec d'autres astronomes, George Darwin (1845 - 1912), un des fils du célèbre Charles Darwin, proposa donc que la Lune soit un morceau de la Terre. En rotation très rapide en ces temps anciens, la force centrifuge aurait arraché un morceau de la surface terrestre, morceau qui se mit en orbite autour de la Terre. George Darwin proposa même que

l'océan Pacifique (dont on ignorait tout de l'âge et de la nature) soit la « cicatrice » de cet arrachement.

Si elle explique bien la faible masse volumique de la Lune, cette hypothèse n'explique pas que l'orbite de la Lune ne soit pas dans le plan de l'équateur terrestre, ni le très fort moment cinétique de la Lune par rapport à celui de la Terre.

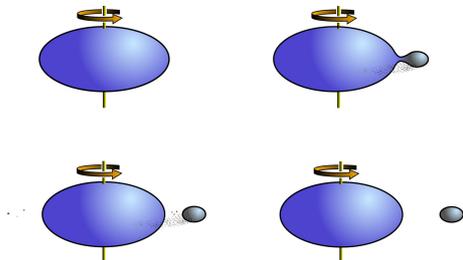


Fig.2. L'origine de la Lune selon la théorie de la fission.

Deuxième famille d'hypothèses

C'est celle de la formation simultanée. Lors de l'accrétion à l'origine des planètes telluriques, une grosse masse de poussières s'aggloméra pour former la Terre alors qu'une plus petite s'accréta dans son voisinage, les deux masses orbitant autour de leur centre de gravité commun. Cette hypothèse ne pose pas de problème quant au rapport des masses et des moments cinétiques. Elle explique moins bien la révolution de la Lune hors du plan équatorial de la Terre. Mais elle n'explique pas du tout la différence de masses volumiques. En effet, formées dans le même secteur du système solaire à partir des mêmes poussières, Terre et Lune auraient dû avoir la même masse volumique, et la Lune aurait dû avoir une notable proportion de fer, ce qui n'est pas le cas.

Troisième hypothèse

Puisque la Lune n'est pas un fragment arraché de la Terre ni un corps né en même temps en son voisinage, on proposa alors une autre hypothèse : celle de la capture. Un corps formé dans une autre région du système solaire (ce qui expliquerait la différence de composition chimique et la rareté du fer) serait passé par là et, capturé par la gravité terrestre, il se serait mis en orbite autour d'elle. Des calculs de mécanique céleste montrent que, pour que cette capture soit possible, il faudrait que les deux orbites soient très voisines (rayons orbitaux et excentricités voisins). Orbites voisines, cela signifie que le corps capturé se serait accru à la même distance du Soleil que la Terre. Une même distance du Soleil implique que les poussières à l'origine de la Terre et de la Lune devaient s'être condensées à la même température, donc avoir la même

composition chimique, et en particulier la même teneur en fer, ce qui n'est pas le cas.

Juste avant le retour des premiers échantillons par les missions Apollo entre 1969 et 1972, aucune théorie n'expliquait donc correctement la formation de la Lune.

Quelles données nouvelles ont apporté les missions Apollo ?

- La sismique a confirmé la très petite taille du noyau lunaire

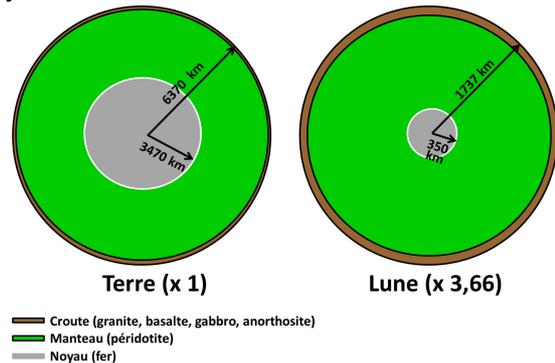


Fig.3. Structures internes comparées de la Terre et de la Lune. Les deux corps ont été représentés avec la même taille pour faciliter les comparaisons (la taille de la Lune a été multipliée par 3,66). Seules ont été représentées les limites chimiques et minéralogiques, sans figurer les limites physiques (température, viscosité...). Ces deux corps possèdent une croûte constituée principalement de silicates légers, surtout des feldspaths. La croûte lunaire est plus épaisse (60 à 100 km) que la croûte terrestre (6 à 35 km). Les croûtes surmontent un manteau riche en minéraux ferro-magnésiens (olivine et pyroxène). Au centre, il y a le noyau, principalement composé de fer. Densité globale, moment d'inertie, sismique..., tout montre que le noyau de la Lune est relativement beaucoup plus petit (20 % du rayon, 0,8 % du volume) que celui de la Terre (54 % du rayon, 15 % du volume). Par rapport à la Terre, la Lune est très appauvrie en fer (Schéma Pierre Thomas).

- La datation radiochronologique des échantillons lunaires les plus âgés et l'extrapolation de leur âge suggèrent que la Lune est plus jeune que la Terre de quelques dizaines de millions d'années.

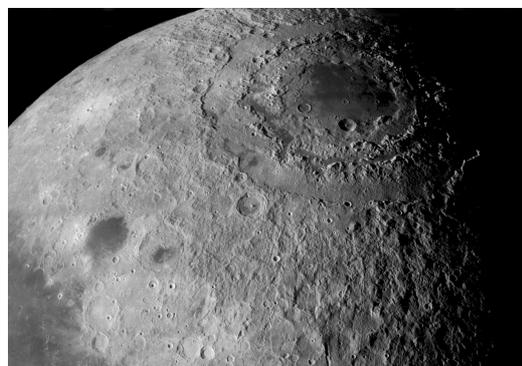


Fig.4. Le bassin Orientale sur la Lune (diamètre de 950 km), un des plus récents témoins des 600 millions d'années du gymkhana cosmique qui a accompagné la formation du système solaire. Crédit : NASA / Lunar Orbiter 4.

- La datation d'autres échantillons montre que les très nombreux cratères d'impact, cratères connus depuis Galilée, sont très anciens (âge $\geq 3,9$ Ga). Le système solaire précoce a été parcouru de très nombreux corps de plusieurs dizaines voire centaines de km de diamètre. Terre et Lune sont nées au sein d'un véritable gymkhana cosmique.

- L'analyse isotopique des échantillons lunaires, en particulier des isotopes de l'oxygène et du titane, montre que la Lune et la Terre sont étrangement similaires, alors que d'autres corps (Mars, la majorité des météorites...) sont isotopiquement différents.

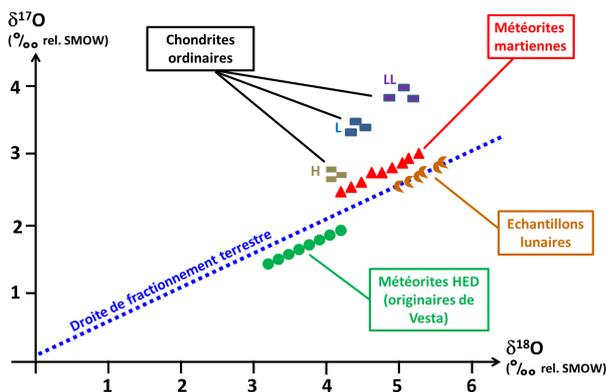


Fig.5. Diagramme comparant les compositions isotopiques de l'oxygène entre la Terre, la Lune, Mars, et divers météorites. La composition isotopique se mesure en unité δ qui représente le rapport isotope lourd/isotope léger normé à un standard. Les processus physiques et chimiques fractionnent les isotopes proportionnellement à leur différence de masse, deux fois plus le ^{18}O que le ^{17}O par rapport au ^{16}O . Dans un tel diagramme, tous les échantillons issus d'un même « réservoir » se situent sur une droite de pente 1/2. La droite bleue représente la totalité des échantillons naturels terrestres. Sur ce même diagramme, on a reporté les analyses des météorites martiennes, des météorites issues de Vesta (HED) et de certaines chondrites « ordinaires ». Ces échantillons ne se placent pas sur la droite de fractionnement terrestre, car ils proviennent d'un autre réservoir (autre secteur de la nébuleuse pré-solaire). Par contre, tous les échantillons lunaires sont situés sur la droite de fractionnement terrestre, ce qui suggère qu'ils proviennent soit d'un réservoir isotopiquement semblable à la Terre, soit plus probablement de la Terre elle-même (compilation bibliographique dessinée par Pierre Thomas).

- Les analyses chimiques élémentaires des roches magmatiques lunaires montrent que les silicates de la Lune ont une composition chimique voisine de celle du manteau terrestre, à une différence notable près : par rapport au manteau terrestre, la Lune est considérablement appauvrie en éléments ou composés volatils (à basse température de vaporisation), en particulier en H_2O et en potassium. À l'opposé, la Lune est enrichie en éléments réfractaires (à haute température de vaporisation), en particulier l'uranium et le thorium.

- Les analyses des terres rares (en particulier l'euporium) dans les échantillons de la croûte anorthositique et dans les basaltes (issus du manteau) montrent que la quasi-totalité de la Lune fut fondue (théorie de l'océan magmatique). La croûte anorthositique provient de la ségrégation (par flottaison) des plus légers des silicates, les feldspaths, qui cristallisaient lors du refroidissement de cet océan ; le manteau tire son origine de l'accumulation par gravité des minéraux ferro-magnésiens plus denses.

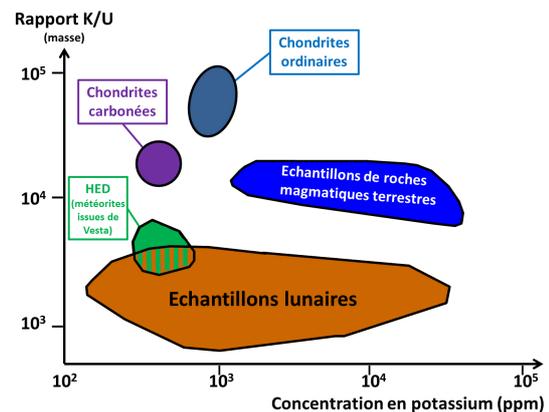


Fig.6. Les rapports potassium/uranium dans différentes roches du système solaire. Dans les processus magmatiques (fusion, cristallisation...), le potassium et l'uranium ont le même comportement ; ils sont enrichis ou appauvris de la même façon. Les processus magmatiques qui enrichissent (ou appauvrissent) en potassium font la même chose pour l'uranium, et le rapport K/U reste constant (environ $1,5 \cdot 10^4$ pour la Terre).

Sur la Lune, les roches magmatiques présentent aussi une grande variété de teneur en potassium, et leur rapport K/U reste constant. Mais les roches lunaires ont un rapport K/U plus faible ($2 \cdot 10^3$) que la Terre. Comme ce ne sont pas des processus magmatiques qui ont « trié » le potassium par rapport à l'uranium, c'est que la Lune a un rapport K/U 10 fois supérieur à celui du manteau terrestre. Quelle que soit l'origine de la Lune, elle devra expliquer cette déficience en potassium. Ce résultat fut confirmé grâce aux mesures des rayons γ issus de la surface effectuées par la sonde en orbite Lunar Prospector (compilation bibliographique dessinée par Pierre Thomas).

L'hypothèse de l'impact

Face aux impossibilités des trois hypothèses classiques et aux données nouvelles venues des missions Apollo, deux équipes (William K. Hartmann et Donald R. Davis d'une part, et Alistair G. W. Cameron et William R. Ward d'autre part) proposèrent à la fin des années 1970 que la Lune soit le résultat d'un choc tangentiel entre deux planètes déjà différenciées (fer concentré dans le noyau, surmonté d'un manteau silicaté) : la Terre et Théia (du nom de la Titanide qui aurait engendré la Lune selon la mythologie grecque), gros corps qui orbitait aussi dans le plan de l'écliptique.



Fig.7. Dessin d'artiste montrant le début de la collision tangentielle entre la Terre (à gauche) et Théia (à droite)

Crédit : <http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA14850>

Ce choc aurait presque complètement fragmenté Théia et aurait arraché de gros fragments de manteau terrestre. Le noyau de Théia serait « parti » (au loin dans le système solaire ou aurait chuté sur la Terre et s'y serait incorporé). Des fragments des manteaux de Théia et de la Terre, portés à très haute température par le choc, auraient perdu leurs éléments volatils et se seraient enrichis en éléments réfractaires.

Ils se seraient mis en orbite autour de la Terre (dans le plan de l'écliptique), se seraient accrétés et auraient formé la Lune.

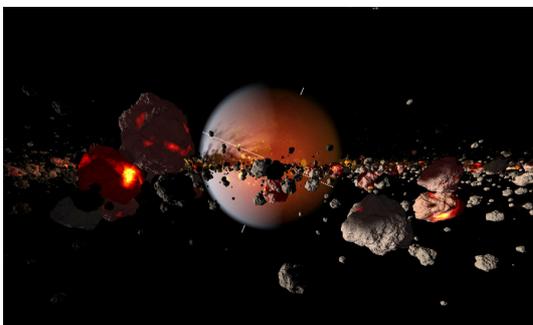


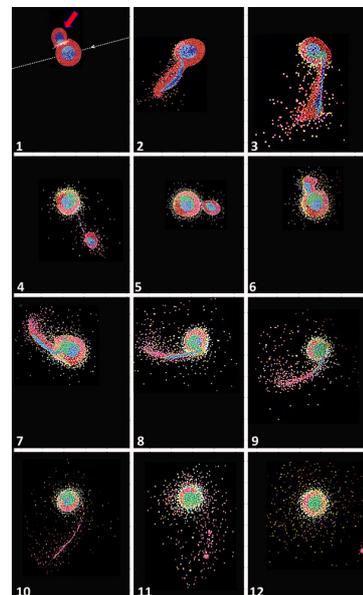
Fig.8. Image d'artiste montrant les fragments de Théia et du manteau terrestre en orbite autour de la Terre en train de se ré-accréter pour former la Lune. L'artiste a figuré des nuages sur la face de la Terre éclairée par le soleil (à gauche). Il a voulu figurer par-là que l'impact de Théia a complètement vaporisé les éventuels océans qui, peut-être, recouvraient déjà la Terre. Il a figuré la face nocturne (à droite) en rouge, indiquant par la même que les nuages sont éclairés par en dessous par la surface terrestre rendue incandescente par l'énergie apportée par l'impact. L'artiste a également figuré l'incandescence des fragments qui vont se rassembler dans l'année qui vient pour constituer la Lune. Par rapport au dessin original, j'ai rajouté l'axe des pôles et l'équateur de la Terre, indiquant par-là que les fragments à l'origine de la Lune sont situés dans le plan de l'écliptique, et non dans celui de l'équateur de la Terre

Crédit : <http://airandspace.si.edu/imageDetail.cfm?imageID=1064> modifié

Ce scénario qualitatif fut testé par des simulations informatiques qui en montrèrent la possibilité et la réalité potentielle.

Ces simulations détaillèrent les caractéristiques (masse, vitesse, orbite...) à donner à Théia pour former le système Terre-Lune tel qu'il est. Elles précisèrent les « destins » relatifs des fragments de manteau de Théia et de la Terre et du noyau de Théia.

Par exemple, les premières simulations indiquaient que la masse de Théia devait être comprise entre 0,12 et 0,17 masse terrestre. Sa vitesse relative avec la Terre devait être inférieure à 4 km/s, et l'angle entre les deux orbites devait être voisin de 45°. Ces premières simulations, ainsi que celles plus élaborées qui suivirent montrent toutes que le noyau de Théia retomba sur Terre et s'y incorpora. Toutes montrent que la Lune est constituée d'une part significative du manteau de Théia. Toutes montrent que la ré-accrétion fut un phénomène très rapide, qui se chiffre en années et non en milliers ou millions d'années et que cette ré-accrétion engendra une Lune très majoritairement fondue. Bref, on arrivait à coup de simulations informatiques à « refaire » un système Terre-Lune compatible avec tous les observables actuellement à notre disposition.



La 1^{ère} image montre l'instant 0 de l'impact, la taille relative des deux corps et l'angle entre le mouvement de Théia et l'orbite de la Terre.

Sur la dernière figure, la Lune est déjà presque constituée.

Une année à peine s'est écoulée entre la première et la dernière images.

Fig.9. Exemple d'une simulation informatique (celle d'Alastair Cameron, de l'Université d'Harvard, Astronomy Septembre 1998, modifiée et redessinée) montrant les différents stades de l'impact, de la fragmentation de Théia, de l'éjection des fragments du manteau terrestre, de la chute d'un Théia amputé d'une bonne partie de son manteau sur la Terre, de la nouvelle éjection de fragments terrestres, de l'accrétion de ces fragments...

Les inconnues qu'il reste à résoudre

La Lune montre de grandes similitudes chimiques et isotopiques avec le manteau terrestre. Or, toutes les simulations incorporent une part notable du manteau de Théia dans la Lune, ce qui oblige à supposer que Terre et Théia étaient chimiquement et isotopiquement très voisines, ce qui est pour le moins « étrange ». Pour expliquer cette similitude, certains n'hésitent pas à proposer que Terre et Théia étaient initialement des planètes co-orbitales. Théia aurait été située sur un des points de Lagrange L4 ou L5 de la Terre et en aurait été « délogée » par des perturbations dues aux autres corps du système solaire. Par ailleurs, cette similarité isotopique n'est pas totale, par exemple en ce qui concerne les isotopes du tungstène. Alors ?

Autre inconnue : l'âge de ce choc. Les premières datations des échantillons des anorthosites lunaires donnaient un âge très proche de 4,568 Ga (âge des météorites les plus anciennes, pris conventionnellement comme âge du système solaire). Des simulations de la durée de cristallisation d'un océan magmatique montre qu'il s'agit d'un phénomène géologiquement très bref (≈ 1 Ma). L'âge des anorthosites donnerait donc l'âge de la Lune à un million d'années près. D'autres datations très récentes (2011) donnent un âge de cristallisation des anorthosites (ou du moins de certaines d'entre elles) de 4,4 Ga, donc 150 Ma après la formation du système solaire. Le problème reste entier.

L'hypothèse de l'impact est donc la seule qui, en 2012, explique la majorité des données à notre disposition. Mais il reste des questions. Ces questions posent le problème de l'échantillonnage. Les échantillons Apollo ont été prélevés en surface, et leur composition isotopique a pu être perturbée par le bombardement des micro-météorites et par le

rayonnement cosmique. D'autre part, tous ces échantillons ont été prélevés dans un secteur assez limité de la Lune (relativement près du centre de la face visible), et ne sont peut-être pas parfaitement représentatifs.

La conclusion est évidente : il faut organiser de nouvelles campagnes de prélèvements d'échantillons lunaires, avec des prélèvements et sous la surface, et sur la face cachée. Affaire à suivre !

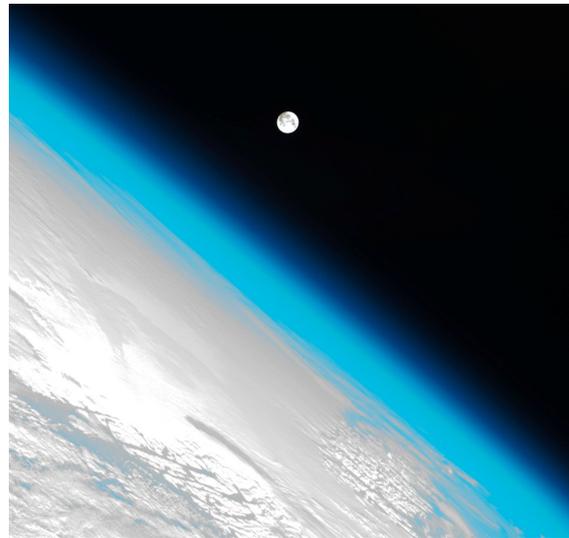


Fig.10. La Lune au-dessus de l'atmosphère terrestre photographiée depuis l'ISS le 8 janvier 2012. Outre son côté esthétique certain, cette photo pose le problème de l'atmosphère de la Terre. Traditionnellement, on proposait que l'atmosphère terrestre soit issue d'un dégazage de la Terre lors de sa différenciation. Selon cette hypothèse, l'atmosphère de la Terre existait donc déjà lors du choc avec Théia. Or, un tel choc a dû éjecter dans l'espace la quasi-totalité de l'atmosphère (et des océans) terrestres de l'époque. La résolution de la question de l'origine de la Lune pose donc une autre question : l'origine de l'atmosphère et de l'eau terrestre. Ce sera peut-être l'occasion d'un nouvel article dans les CC.

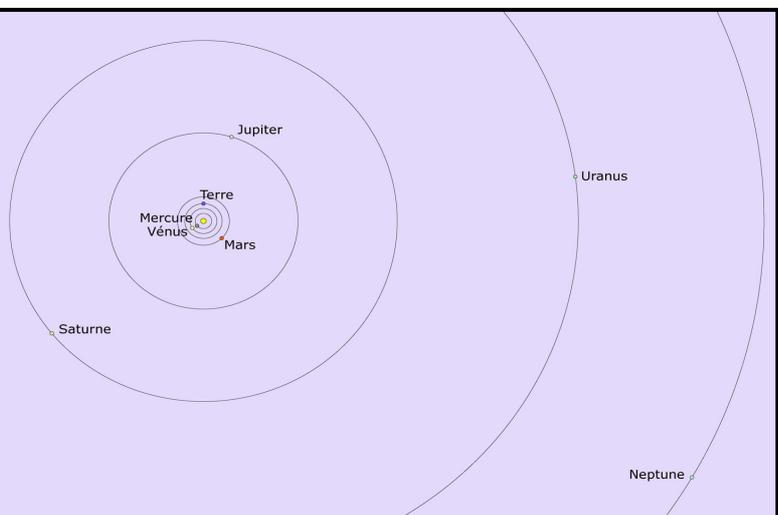
Crédit : <http://spaceflight1.nasa.gov/gallery/images/station/crew-30/inflight/ndxpage17.html>

Fin du monde et alignement planétaire ?

Dans le film 2012, un animateur de radio parle d'un alignement de planètes qui ne se produit que tous les 640 000 ans. Cet argument d'alignement planétaire est repris sur de nombreux sites Internet.

D'une part, un alignement planétaire n'a jamais posé le moindre problème et d'autre part, il n'y a pas d'alignement exceptionnel, loin de là, comme le montre ce schéma de positions des planètes pour le 21 décembre 2012.

Quant à un alignement Terre Soleil Centre galactique, cela se produit tous les ans en décembre et à plus de 5° près.



AVEC NOS ÉLÈVES

Simulation d'un cratère de météorite

Olivier Gayrard,

Celui qui observe pour la première fois la Lune à travers un instrument d'optique, contemple, bien souvent émerveillé, la multitude des creux, reliefs et cavités qui recouvrent la surface sélène. Nous admettrons l'origine météoritique de la plupart de ces cratères. Par des expériences simples, nous chercherons à les simuler, puis étudierons qualitativement et quantitativement leur taille en fonction de l'énergie qui les a produits. Nous finirons par estimer l'ordre de grandeur des astéroïdes qui les ont engendrés.

Une vidéo de ces expériences, réalisée par l'auteur, est disponible sur le site du CLEA pour les abonnés numérique :

(<http://acces.ens-lyon.fr/clea/vieclea/nouvelles-productions/cc/cc139/cahier-clairaut-nb0139-automne-2012/>)

Critères de similitudes

Examinons la figure 1. La présence des pics centraux, les bords relevés, les dépôts de projectiles témoignent que de la matière a été expulsée lors de la formation du cratère. Ce dernier est donc de nature explosive. Pour en reproduire un simulacre en classe, nous utiliserons un matériau finement divisé : poudre de cacao, farine, sable ou semoule... (l'usage d'un matériau tel la glaise, produirait un simple trou de pénétration).

Matériel utilisé

Récipients, billes d'acier et de verre, balance, tige magnétique, fil à plomb, passoire, mètre, et lampe de poche.



*Fig.1. Cratères lunaires dans la région du golfe torride...
À gauche, Copernic, un cratère de 93 km de diamètre.*

L'expérience

Remplissons suffisamment le récipient de farine, puis saupoudrons la surface de cacao. Laissons tomber une bille loin des bords pour éviter tout effet indésirable. Utilisons pour cela le fil à plomb. Éclairons de biais puis de face. Comparons les

figures 2 et 3 avec celle du véritable cratère de référence. La forme attendue est bien circulaire. La taille du cratère est supérieure à celle de l'impacteur, signe qu'il ne s'agit pas d'un simple trou de chute. En lumière rasante, nous distinguons les bords relevés du cratère (figure 2). Pour finir, la présence d'une structure blanche en étoile de farine sous-jacente (figure 3) prouve que la matière a bien été expulsée hors du cratère. Par contre, les pics centraux, résultat de la fusion de la matière et du rebond sont impossibles à reproduire avec les vitesses mises en jeu ici. Nous nous appuierons donc sur ce protocole.



Fig.2. Cratère d'impact dans de la poudre de cacao sur farine.

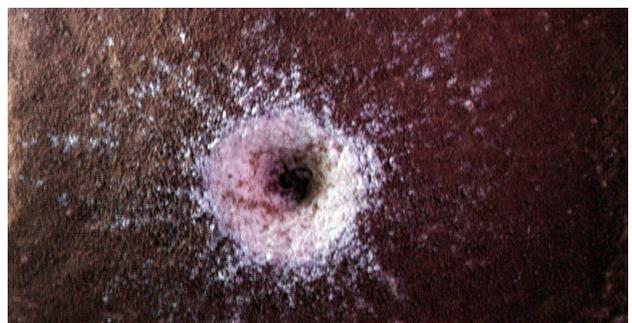


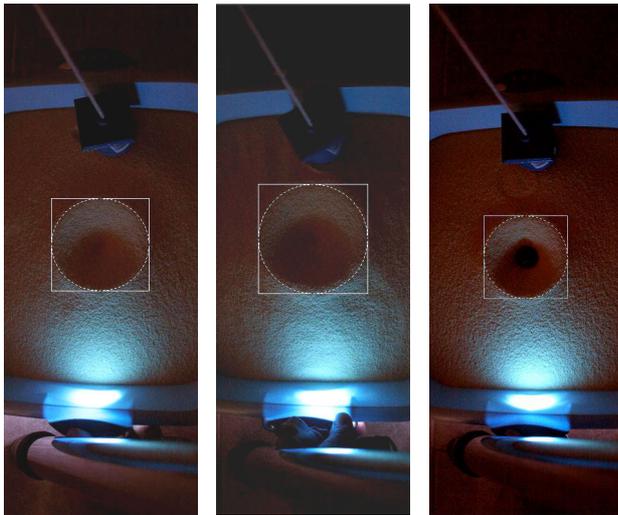
Fig.3. Ici, la farine sous-jacente est davantage visible.

Étude qualitative

Avec les plus jeunes, et tout particulièrement les élèves de la classe de troisième⁴, recherchons les facteurs influençant la taille des cratères.

Pour cela abandonnons à différentes hauteurs une même bille, puis pour une hauteur fixée, laissons chuter des billes de masses différentes.

L'expérience indique que le diamètre **D** des cratères augmente avec la hauteur **h** de l'« astéroïde », ainsi qu'avec sa masse **m** (figures 4abc).



a. Bille d'acier
 $m = 80 \text{ g}$
 $h = 1 \text{ m}$
 $D = 596 \text{ pixels}$

b. Bille d'acier
 $m = 80 \text{ g}$
 $h = 2 \text{ m}$
 $D = 723 \text{ pixels}$

c. Bille de verre
 $m = 21 \text{ g}$
 $h = 2 \text{ m}$
 $D = 557 \text{ pixels}$

Fig.4. Cratères de diamètre D formés par la chute d'une bille de masse m lâchée d'une hauteur h .

Étude quantitative

Avec les plus grands, je pense ici aux élèves de 1^{ère} S⁵, menons une réflexion sur les grandeurs. Hauteur de chute h , masse m et vitesse v sont-elles les mieux adaptées pour décrire le phénomène de formation du cratère de diamètre D et de profondeur H ?

Indépendamment, non, mais toutes interviennent via les expressions des énergies transférées. L'énergie potentielle E_p est convertie en énergie cinétique E_c . Lors de l'impact la matière absorbe l'énergie cinétique ; celle-ci est convertie en énergie potentielle gravitationnelle E_i (éjection de la matière) nécessaire pour soulever un volume V à une hauteur

⁴ Extrait des programmes de 3^{ème} : « La somme de ses énergies de position et cinétique constitue l'énergie mécanique. Conversion d'énergie au cours d'une chute ».

⁵ Extrait des programmes de 1^{er} S : « Énergie d'un point matériel en mouvement dans le champ de pesanteur uniforme : énergie cinétique, énergie potentielle de pesanteur, conservation ou non conservation de l'énergie mécanique ».

approximativement égale à la profondeur H du cratère.

Si l'on suppose que tous les cratères ont des formes semblables, cette profondeur est proportionnelle au diamètre D et le volume de matière éjectée à D^3 .

$E_i = mgH = \rho VgH$. E_i est donc proportionnelle à D^4 . Autrement dit **D est proportionnel à $E_i^{1/4}$** (1). Si on cherche une formule de la forme $a \times E_i^b$ pour calculer D , on s'attend à trouver 1/4 comme exposant (on peut aussi passer par les logarithmes)⁶.

Retour sur la mise en œuvre des mesures

La relation (1) indique que pour une énergie libérée double, soit une hauteur de chute double à masse égale, le diamètre du cratère n'augmente que d'un facteur $2^{1/4} \approx 1,2$. Il s'agit alors de prendre certaines précautions lors de la réalisation des jets afin d'être précis. D'une part, on prendra la moyenne d'au moins 5 chutes. D'autre part, on fera en sorte que les conditions expérimentales restent les mêmes en tassant le matériau de façon identique, et en le lissant avec une règle. Ces biais étant évités autant que possible, les mesures des cratères seront faites sous lumière rasante ou en saupoudrant d'une poudre de couleur différente. Des photographies peuvent être envisagées à condition de garder une distance fixe au sujet. Ici les mesures des cratères sont faites en pixels avec l'aide d'un logiciel (fig. 5).

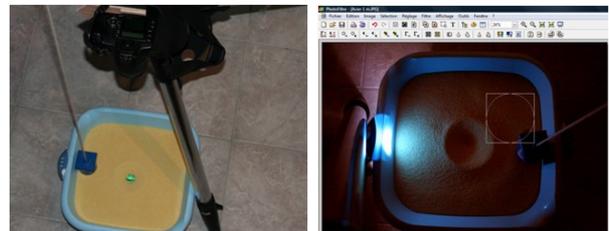


Fig.5. Les photos sont prises à l'aide d'un appareil sur pied et les diamètres sont mesurés avec le logiciel PhotoFiltre.

h (cm)	E_i (mJ)	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_{mov}
50	391	625	621	629	608	633	623
100	782	707	670	691	658	699	685
150	1173	755	753	782	782	761	767
200	1564	860	827	823	815	840	833
250	1955	873	877	877	848	885	872
300	2346	885	944	898	922	914	913
350	2737	952	919	923	935	939	934

Fig.6. Tableau des diamètres des cratères (en pixels) lors d'une série d'expériences dans de la semoule de blé moyenne avec une bille d'acier de 79,72 g.

⁶ http://ufe.obspm.fr/IMG/pdf_TP_crateres_complet.pdf

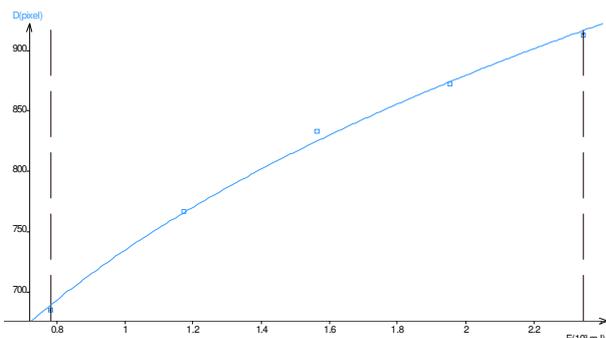


Fig.7. On a placé les points de coordonnées (E_i, D_{moy}) du tableau 6. Si on demande au logiciel Regressi une courbe de la forme $a \times E_i^b$ au plus proche des points, on obtient $a \approx 122$ et $b \approx 0,259$ proche de $1/4$. Regressi donne un écart relatif de 0,55 % pour $D(E)$. On peut aussi utiliser les logarithmes de D et de E et chercher une droite de régression.

Sur la figure 7, le diamètre en fonction de l'énergie est bien modélisé par une fonction de la forme $D = a \times E_i^b$ avec $b \approx 1/4$, à condition de retirer la première valeur. Pour des hauteurs trop faibles, la semoule n'est pas éjectée et nous ne sommes pas dans le même type de cratère.

Conclusion

L'exposant 0,259 est voisin de la valeur $1/4$ prévue par la relation (1). La simulation de la formation d'un cratère d'impact par la chute d'un astéroïde à

l'aide d'une bille d'acier dans de la semoule moyenne donne satisfaction.

Allons plus loin. Puisque D est proportionnel à $E^{1/4}$, alors $E_{réel} = (D_{réel}/D_{simulation})^4 \times E_{simulation}$.

Par exemple, pour une hauteur h de 3 m et une bille de 79,72 g, on a $E_i = 2,346$ J. Nous avons mesuré un diamètre de 110 mm à l'échelle de la photographie (0,12 mm/pixel). L'astéroïde de Rochechouart est estimé quant à lui avoir un diamètre de 20 km.

$E_{Rochechouart} = (20 \times 10^3) / (110 \times 10^{-3})^4 \times 2,346$ soit environ $2,6 \times 10^{21}$ J, ce qui correspond bien à l'ordre de grandeur donné par la littérature ⁽¹⁾ : $1,2 \times 10^{21}$ J.

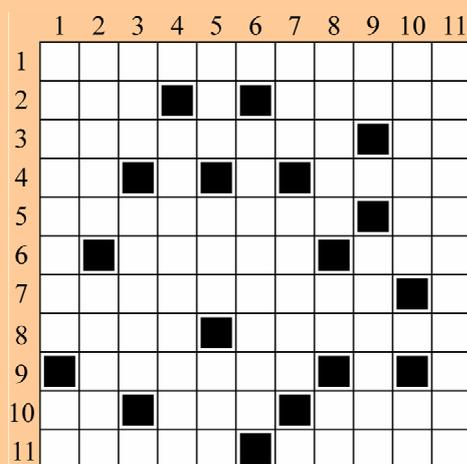
Après ce résultat encourageant, testons cette méthode avec le cratère Aristote de 88 km de diamètre. Un calcul identique nous amène à :

$$E_{Aristote} = 9,6 \cdot 10^{23} \text{ J.}$$

Dans le cas d'une vitesse v au moment de l'impact de 20 km/s (les météorites ont habituellement des vitesses de quelques dizaines de km/s), pour une météorite de masse volumique $\rho = 3,4 \text{ g/cm}^3$ et en écrivant que $E_{Aristote} = \frac{1}{2} \rho V v^2$, (où V est le volume de l'astéroïde) nous trouvons que l'astéroïde qui a donné naissance à ce cratère avait un rayon de l'ordre de 7 km.

(1) CC n°66, été 1994 pages 8 et 9

Mots croisés « Lune »



Verticalement

- Mer lunaire. Norme.
- Comme l'orbiteur lunaire pour les astronautes. Mis dehors.
- Celui des Songes est sur la Lune. Abîmer.
- Comme le sol lunaire.
- Embêté. Angle de phase pour la Lune. Connue.
- Pour voyager, peut-être jusqu'à la Lune ?
- Heureux. Risquons.
- La Lune s'y trouve le 7 octobre 2012. Rapport. Pronom.
- Presque cinq pour l'âge de la Lune. Casque.
- Cinquième mois du calendrier romain. Avalé.
- Comme l'orbite de la Lune.

Horizontalement

- Science de la Lune.
- La Lune tourne aussi autour du sien mais à l'envers. Peuvent s'envoler.
- Il a nommé les mers lunaires. Romains.
- Mer phonétique pas du tout lunaire. Sens.
- Découverte par Bradley, la Lune en est en partie responsable. Nombre de satellites naturels de la Terre.
- Il y en a pour la Lune comme pour la Terre. Il peut voir des détails de quelques mètres à la surface de la Lune.
- Pour voir la Lune.
- Au début de tout exercice. Comme le sol de la Lune par les Terriens dans quelques décennies ?
- Mer lunaire.
- Phase lunaire. Plus. Fat.
- Difficile de s'en passer pour aller dans la Lune. Comme la deuxième pleine Lune d'un mois.

Solution p. 36

AVEC NOS ÉLÈVES

La Lune, ombre et lumière

Pierre Le Fur

Nous partons à la découverte de la topographie du sol lunaire à partir d'observations photographiques. L'étude des ombres portées par le relief permet de calculer l'ordre de grandeur des élévations des remparts d'un cratère, d'un pic central ou de la profondeur du fond de ce cirque lunaire. Enfin, nous terminons par la topographie des failles, vallées et autres lignes de crêtes qui parcourent le sol des « mers » de notre satellite naturel.

À la découverte du relief lunaire



Fig.1. Le pôle Nord de la Lune le matin, peu avant le dernier quartier. Télescope Meade LX 90 300 mm, avec camera couleur DFK 311S. Clichés de l'auteur. Technique : notes [5] à [7]

Si le Soleil est facilement observable avec des élèves au sein de l'établissement scolaire sous certaines conditions, la Lune peut également être intéressante : en période de dernier quartier, le spectacle du globe lunaire est accessible aux élèves entre 8 h et 8 h 30 les matinées de cours en décembre et janvier. Il suffit de planter les télescopes dans la cour et de viser la Lune qui a rendez-vous avec le Soleil levant. On peut alors découvrir les innombrables cratères, les montagnes tortueuses, les « mers » lisses et autres failles zébrant le sol. Muni d'une carte, on pourra même repérer les lieux d'alunissage des opérations Apollo. La lumière du jour montant n'est pas encore suffisamment intense pour gêner la vision télescopique.

De même, en ces mois d'hiver, la Lune du premier quartier est observable dès 17 h 30. Pour les plus jeunes comme pour les plus âgés, ce contact visuel avec notre voisine impressionne.

Pour réaliser des clichés, il faut préférer une nuit franche, où les contrastes ne seront pas adoucis par

la lumière bleue diffusée par l'atmosphère. Réaliser un ou plusieurs instantanés lunaires se révèle être une opération relativement simple avec une webcam, un appareil photo numérique ou une caméra astronomique spécialisée.

Que l'on photographie ou que l'on visualise le relief lunaire, l'exploration est donc à notre portée.

Jeux dans le bac à sable

Retour sur Terre. Quand on demande aux élèves du primaire ou de la maternelle « que sont ces cratères qui boursoufflent la Lune ? », la réponse la plus commune reste « ce sont des volcans ».

Les convaincre d'une autre hypothèse n'est pas difficile si l'on se munit d'un bac avec un peu de sable et d'un boulon (figure 2).



Fig.2. Impact vertical d'un boulon dans du sable fin. En faisant l'expérience, on s'aperçoit que l'angle d'incidence a peu d'influence sur la forme du cratère.

Évidemment, l'aspect visuel du cratère sableux dépendra de l'éclairage. Et l'on pourra montrer les changements d'aspect en éclairant le bac avec une lampe mobile figurant le Soleil qui suit sa course dans le ciel lunaire, du lever au coucher.

Les cratères sont donc d'autant plus visibles que le Soleil est bas sur l'horizon, au coucher ou au lever. On en déduit que c'est dans la zone de limite jour/nuit que le relief sera bien mis en évidence donc dans la région du **terminateur**.

Autre intérêt de ces moments particuliers où la lumière solaire est sous grande incidence, des ombres longues marquent le sol et l'on montre que, pour un lieu donné à un moment donné, leur longueur est **proportionnelle à la hauteur de la montagne** qui porte ombre si le sol est plan et en considérant les rayons du Soleil parallèles (figure 3). Ces quelques remarques simples vont nous permettre d'interpréter les observations lunaires qui suivent.

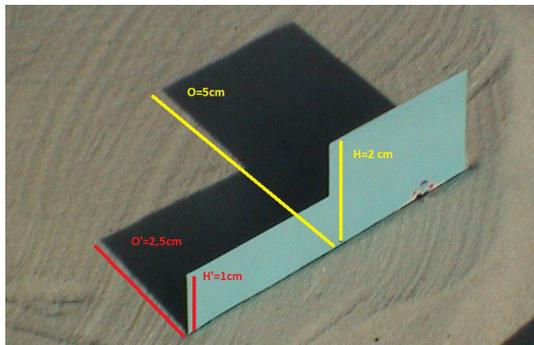


Fig.3. Un carton bleu planté verticalement dans le sable figure une montagne à deux plateaux de hauteurs 2 cm et 1 cm. Les ombres portées sont de longueurs proportionnelles 5 cm et 2,5 cm.

Exploration d'un grand cratère, Copernic

Aspects du cratère au cours de la lunaison

La série de clichés de la figure 4 montre l'évolution de l'aspect du grand cratère Copernic en fonction de l'éclairage solaire au cours de la lunaison. La carte 31 du célèbre atlas d'Antonin Rükl (Gründ 1993) nous donne l'échelle : le diamètre moyen du cratère est de 93 km. Cette donnée est confirmée par l'atlas virtuel de la Lune (AVL) [1].

Le Soleil illumine tout d'abord la crête ouest de l'arène, alors que le fond du cratère reste dans la nuit (4a). Puis les images 4b et 4c révèlent le lever de Soleil sur les montagnes centrales, comportant trois pics principaux qui se détachent sur un substrat relativement plat. Ce fond de cratère est plus lisse au nord qu'au sud. Sur le pourtour, on distingue les gradins conduisant du fond à l'arête sommitale du rempart.

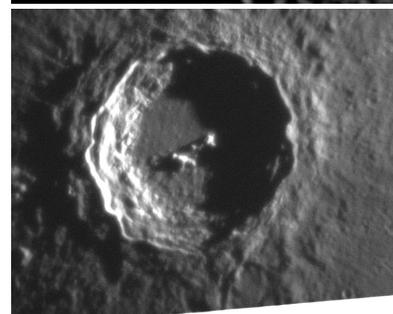
C'est une après-midi lunaire bien avancée qu'illustre la photo 3d, le relief semble aplati, écrasé de soleil. Quelques auréoles blanchâtres se laissent apercevoir découvrant ainsi la diversité géologique des sols. Enfin le soir tombe sur Copernic et les détails révélés sur le cliché 3e montrent les terrasses est éclairées, ainsi que le craterlet Copernic A visible à mi-hauteur sous un promontoire. Son diamètre est de 3 km. On le retrouve sur les images agrandies (figure 8a), montrant ainsi que la résolution photographique approche le kilomètre.

La finesse des images varie d'un cliché à l'autre, en fonction des conditions de turbulence qui dépendent de la météo et de la hauteur H de la Lune au-dessus de l'horizon de l'observateur, mais aussi du diamètre et de la focale de l'instrument.



3a.

Âge : 9,46 j
Phase : 71,3°
H = 32°
h = 2°
27/10/09
18 h 39 TL



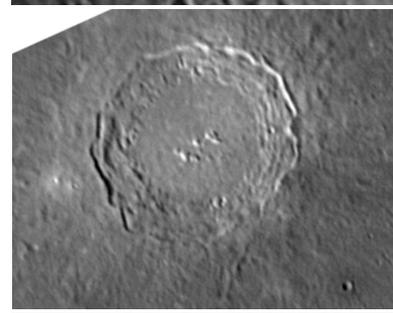
3b.

Âge : 9,66 j
Phase : 73,1°
H = 69°
h = 4°
12/02/2011
19 h 15 TL



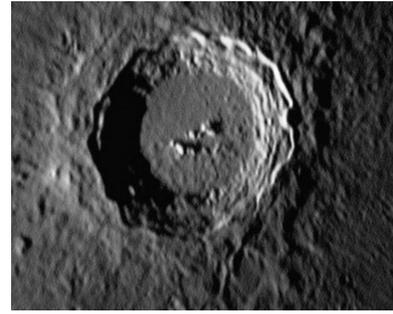
3c.

Âge : 9,93 j
Phase : 69,5°
H = 45°
h = 7°
26/11/2009
18 h 35 TL



3d.

Âge : 20,29 j
Phase : 294°
H = 53°
h = 45°
01/08/2010
4 h 34 TL



3e.

Âge : 22,66 j
Phase : 264,5°
H = 42°
h = 19°
05/07/2010
05 h 03 TL

Fig.4. Le cratère Copernic à différentes époques de la lunaison. On remarque les variations d'éclairage.

Âge = nombre de jours écoulés depuis la dernière nouvelle Lune.

Phase = angle de phase (angle Soleil Lune Terre).

H = hauteur de la Lune au-dessus de l'horizon terrestre.

h = hauteur du Soleil au-dessus de l'horizon lunaire.

Images a, c, d, e réalisées avec une ToUcam noir et blanc, b avec une caméra DBK31 Imaging Source.

Hauteur des remparts par la méthode de Galilée

Le cratère Copernic s'est laissé découvrir, mais les hauteurs des reliefs restent inconnues. Pourtant le « grand » Galilée nous a laissé une méthode simple pour déterminer un ordre de grandeur de la hauteur AD d'une montagne lunaire de hauteur D , connaissant le rayon $R = CE$ de la Lune, 1740 km (figure 5a). La mesure se fait par rapport au niveau « moyen » du globe, puisqu'il n'y a pas d'océans liquides pour donner une référence 0.

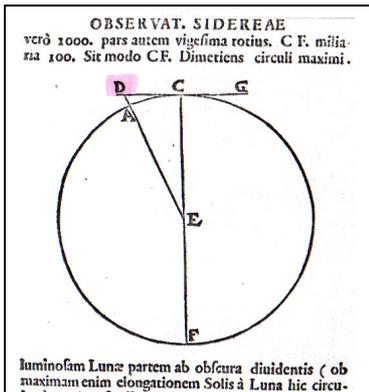


Fig.5a. Mesure de la hauteur d'une montagne d'après Galilée.

Alors que la Lune est au premier quartier, la moitié droite de la Lune est éclairée par le Soleil, la moitié gauche est dans la nuit mais le sommet de la montagne D est encore éclairé. On peut calculer son altitude AD en mesurant CD (dessin extrait du *Sidereus Nuncius*).

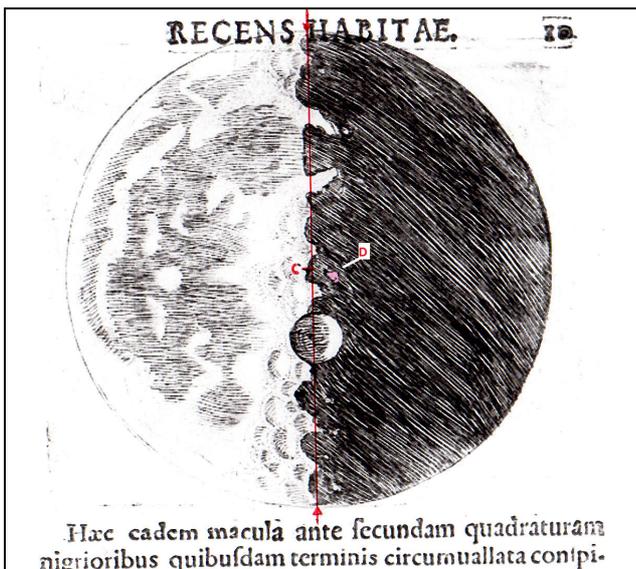


Fig.5b. Observation de la Lune gravée par Galilée extraite du « *Sidereus Nuncius* » (1610), document BNF numérique. C est le centre apparent de la Lune. La direction des rayons solaires est confondue avec l'horizon CD . On mesure CD/R sur le croquis (ici $7,6 \cdot 10^{-2}$).

Lorsqu'on ignore tout de la géométrie, on peut trouver la hauteur AD en réalisant le schéma géométrique à l'échelle de 1 km pour 1 mm. L'arc lunaire de 1740 mm de rayon est tracé à l'aide d'un ruban plastique, puis on complète avec la tangente (CD) représentant la direction des rayons solaires, on pointe D , puis on mesure DA avec la règle graduée, cela donne directement en mm la hauteur en km (figure 6).

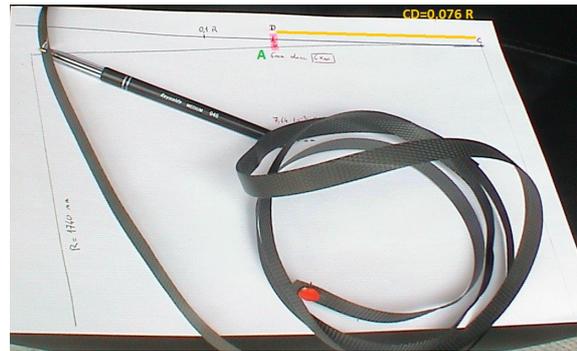


Fig.6. Méthode graphique de détermination de la hauteur. Le ruban (pour emballage), la punaise et le stylo permettent de tracer l'arc de cercle du sol lunaire (rayon $R = 1740$ mm, échelle 1 mm pour 1 km). On trace la tangente en C pour matérialiser l'horizon CD . On place D à l'aide de la valeur expérimentale CD/R . On mesure directement $AD = 6$ mm sur le dessin donc 6 km en réalité ! Cette méthode graphique intuitive ne fonctionne avec une certaine précision que pour des reliefs d'au moins 1 mm (précision de la règle graduée).

On trouve une situation analogue au dessin de Galilée le 27 octobre 2009 à 18 h 39 min : la limite jour/nuit, appelée terminateur, traverse le grand cratère Copernic en passant approximativement par son centre (figures 4a page précédente et figure 7 ci-après). En fait, le logiciel AVL confirme cette situation géométrique comme exactement atteinte une heure auparavant.

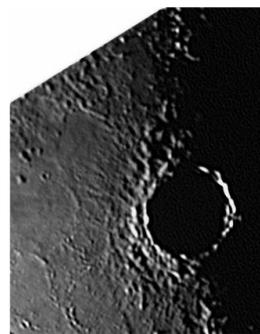


Fig.7. Le cratère Copernic est traversé par le terminateur à peu près en son centre. Le haut du rempart de droite est encore éclairé par le Soleil. On va essayer d'en déduire son altitude par le calcul.

Ici, la distance qui sépare le rempart est du terminateur (qui traverse le cratère diamétralement) est de $0,5 \times 93$ km (demi-diamètre). La méthode de Galilée version graphique est inutilisable car CD/R se révèle trop faible :

$$CD/R = 0,5 \times 93 \text{ km} / (1740 \text{ km}) \approx 0,027.$$

Il nous faut recourir à une autre approche.

Application aux remparts est de Copernic

La méthode graphique précédente doit donc être remplacée par un calcul utilisant le théorème de Pythagore : $DE^2 = CD^2 + CE^2$.

L'exploitation du cliché 3a du 27/10/09 donne :

$$AD = DE - AE \approx 0,68 \text{ km.}$$

(avec $CD = 48,5$ km et $CE = 1740$ km)

La hauteur moyenne du rempart est d'environ 700 m au-dessus du niveau moyen.

Ombres et topographie approchée du cratère

Pour en savoir plus sur les dimensions verticales du cratère, nous pouvons utiliser les longueurs des ombres dont on sait qu'elles sont proportionnelles aux hauteurs des reliefs dans le cas idéal d'une plaine environnante plate.

Remarque : notre choix s'est porté sur le cratère Copernic car il fait partie des rares grands cirques situés non loin du centre apparent de la Lune, et placé hors des « continents » lunaires : la plaine environnante est modérément accidentée.

Nous allons maintenant comparer l'ombre du rempart sur le fond du cratère avec l'ombre du piton central en utilisant la photo 3e puis avec l'ombre du rempart sur la plaine environnante en utilisant la photo 3b (figures 8).

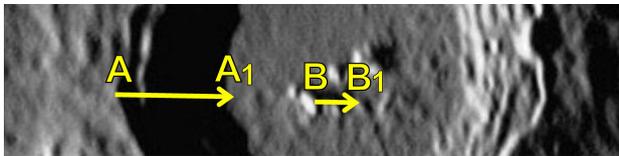


Fig. 8a (agrandissement du cliché 3e). $AA_1/BB_1 \approx 2,8$: la hauteur du rempart au dessus du fond du cratère vaut 2,8 fois la hauteur du piton central.

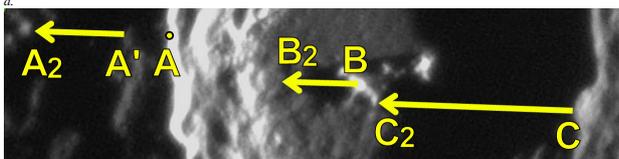


Fig. 8b (agrandissement du cliché 3b). $CC_2/BB_2 \approx 2,8$: on retrouve le même rapport qu'avec la photo précédente. Les différentes photos de la figure 3 semblent montrer que le haut des remparts entre A et A' est à peu près plat. On considère que A₂ est l'ombre de A'. $A'A_2/CC_2 \approx 2,1$: la profondeur du cratère est deux fois plus grande que la hauteur du rempart au dessus de la plaine environnante.

En résumé, le cratère est beaucoup plus profond qu'il n'est « haut ». En partant de la mesure précédente de 700 m pour la hauteur du rempart, on trouve que la profondeur du cratère est de 1500 m ($2,1 \times 700$) et que le piton central culmine à 500 m au-dessus du fond de cratère ($1500/2,8$).

Profil en coupe et sondes lunaires

Bien sûr ces valeurs dépendent de la calibration initiale utilisant la méthode de Galilée. Pour contrôler ces résultats, allons chercher les données altimétriques récentes de la sonde japonaise Kaguya [2] lancée par la JAXA et de LRO, envoyé par la NASA [3]. Par exemple, Lunar Reconnaissance Orbiter (parti de la Terre le 18 juin 2009 avec LCROSS) orbite à 50 km au-dessus du sol lunaire. Équipé du laser altimétrique LOLA et de la caméra grand angle WAC, il obtient au total une précision

altimétrique de 20 m, pour une résolution horizontale de 300 m.

À l'aide de la carte altimétrique de la figure 8 et de logiciels [4], on relève les couples (abscisse, élévation) sur un chemin traversant le cratère de part en part. On détermine ainsi une coupe du cratère, tracée avec « Excel » (figure 9).

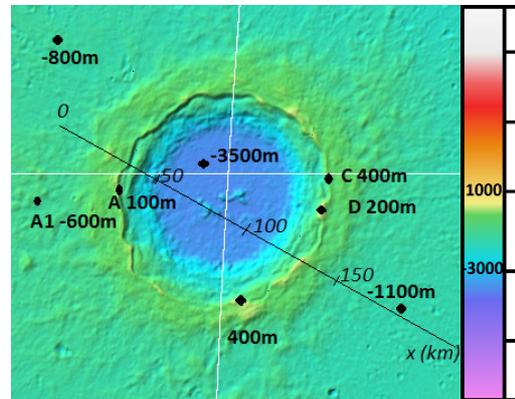


Fig. 9. Cartographie en fausses couleurs LRO (NASA) [3], Élévation indiquée par « Google earth/moon » D'après la sonde japonaise Kaguya (mission spatiale de la JAXA, voir logiciel « 3DGis » sur le site de la JAXA [4])

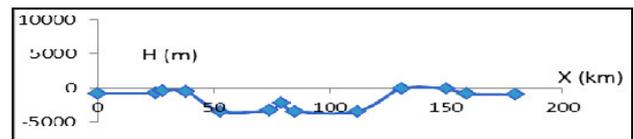


Fig. 10a. Coupe suivant Ox avec les valeurs d'altitudes données par la sonde Sélène de JAXA sauf pour le pic central (donnée par l'Atlas Virtuel de la Lune).

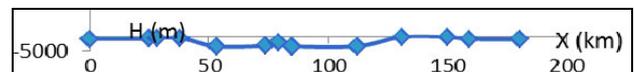


Fig. 10b. On a représenté ici la « réalité » (échelles verticales et horizontales identiques), l'ensemble paraît extrêmement aplati.

En comparant aux résultats précédents, on constate que l'élévation moyenne des remparts par rapport aux environs vaut $(1500 + 700) / 2 = 1100$ m. Notre étalonnage par la méthode de Galilée donne 700 m qui représente seulement un ordre de grandeur, il doit être rectifié. En effet un cratère n'a pas la géométrie simple d'une montagne isolée posée sur un sol régulier de niveau 0. Dans le cliché n° 3a, le rempart est projeté son ombre sur le rempart ouest.

Toutes les valeurs précédentes sont donc multipliées par $1100/700 \approx 1,6$. Le cratère est bien sûr plus profond qu'il n'est « haut » : 2,4 km pour 1,1 km. Le piton central culmine alors à 0,8 km. Les valeurs obtenues sont donc cohérentes avec la carte altimétrique. Compte tenu de la précision des images et des mesures, il ne faut pas attendre des résultats précis de la méthode « des ombres », elle ne constitue évidemment qu'une approche.

En utilisant la même échelle pour l'altitude et les distances, la figure 10b permet de montrer qu'en réalité les dénivelés sont faibles relativement au diamètre du cratère. Le relief est plus émoissé qu'il n'y paraît lors de l'observation.

Exploration de plaines lunaires

Poursuivons notre exploration, en visitant ces surfaces, très peu accidentées et cratérisées, qui constituent les « mers » lunaires.

L'image 11 montre les petits cratères coniques caractéristiques de ces régions. Cette zone est zébrée par de nombreuses rainures dont celle passant par Hyginus, sorte de longue vallée étroite à pentes douces d'origine magmatique. Une pente est plongée dans l'ombre lorsque l'autre versant est éclairé par le Soleil.

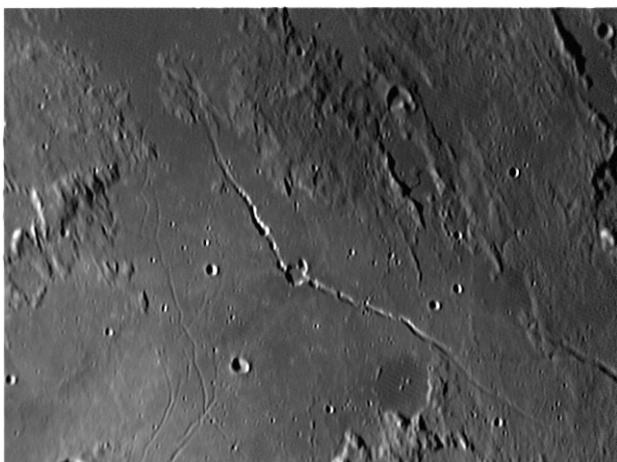


Fig.11. La rainure Hyginus traversant le cratère Hyginus. Sa concavité est dirigée vers le nord-est. Longueur 220 km. Largeur : 2 à 3 km. Profondeur : quelques centaines de mètres.

Les clichés 12a et 12b révèlent le jeu d'ombres et de lumières sur le « mur droit », dans la mer des Nuées, au cours de la lunaison. Cette fois, c'est une vraie faille à l'origine d'un dénivelé entre deux régions de cette mer. La pente douce reliant ces deux zones peut être éclairée par le Soleil proche du dernier quartier, ou plongée dans l'ombre au premier quartier.

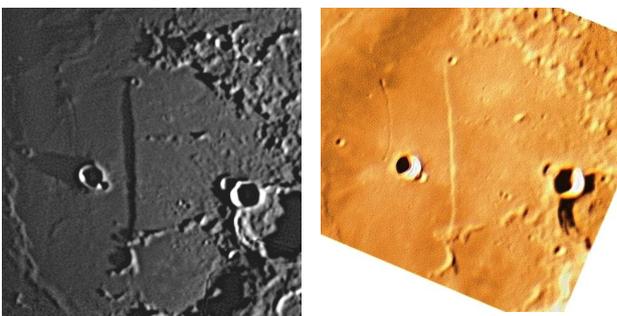


Fig.12. Le mur droit dans la mer des Nuées, aux alentours du premier quartier à gauche et du dernier quartier à droite.

Visitons ce couple énigmatique que constitue le double cirque Messier dont les diamètres valent 10 km environ (figure 13). Il ponctue la surface de la mer de la Fécondité et y dessine une double queue digne d'une comète, plus claire que le sol environnant. Cette trace ne porte d'ombre à aucun moment de la lunaison. Elle ne correspond à aucun relief détectable.

Terminons ce survol lunaire par l'observation de ces lignes de crêtes qui serpentent sur le sol des mers, signes de fortes contraintes géologiques. Les ombres courtes portées par ces dorsales témoignent d'une faible élévation de quelques dizaines à quelques centaines de mètres au maximum.

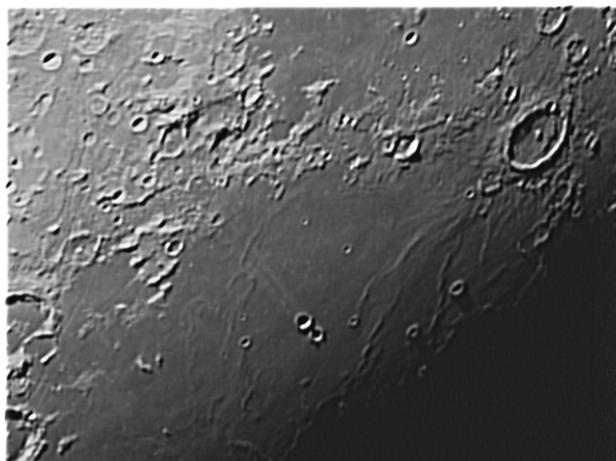


Fig.13. Cratères Messier (diamètres 13 et 9 km), d'où partent deux traînées claires vers l'est (en haut à gauche). On aperçoit les lignes de crêtes (Dorsa Geikie et Dorsa Catio) qui rident la mer de la fécondité.

Ainsi ce termine notre voyage sélène, par ces mers très anciennes, dont le relief n'a pas été sensiblement remodelé depuis 3,8 milliards d'années, date à laquelle les épanchements basaltiques ont cessé. La comparaison avec le « très récent » cratère Copernic, dont l'impact originel remonte à 800 millions d'années, nous montre l'extrême variété des formations lunaires dont nous n'avons fait qu'effleurer la riche diversité. Alors, à vos lunettes et télescopes, l'exploration continue !

Netographie :

- [1] www.ap-i.net/avl/, Atlas Virtuel de la Lune (AVL) logiciel gratuit de Legrand et Chevalley, téléchargeable.
- [2] www.jaxa.jp/press/2008/04/img/20080409_kaguya_02_e.tif
- [3] <http://lroc.sese.asu.edu/news/?archives/484-Lunar-Topography--As-Never-Seen-Before!.html>
- [4] http://wms.selene.darts.isas.jaxa.jp/3dmoon_e/index_e.html, site de la JAXA, logiciel téléchargeable, 3D GIS.
- [5] <http://www.regnier-schmit.net/faqastrocam/>
- [6] <http://www.damianpeach.com/lunarindex.htm>
- [7] <http://legault.perso.sfr.fr/sampling.html> ■

La masse de la Lune

Béatrice Sandré

Comment déterminer la masse de la Lune ?

À partir des données de l'IMCCE, l'auteur met en évidence la perturbation de la Lune sur le mouvement de la Terre autour du Soleil et détaille une méthode pour déterminer la masse de la Lune avec une bonne précision.

En 1798, Cavendish mesure pour la première fois la masse de la Terre en comparant la force exercée par une masse connue sur une masse m à l'attraction exercée par la Terre sur cette même masse m .

La somme des masses de la Terre et de la Lune se déduit de la troisième loi de Kepler appliquée au mouvement relatif de la Lune autour de la Terre.

Mais ces déterminations sont assez imprécises à cause des modélisations qui sont faites (Terre sphérique à symétrie sphérique pour la première, problème à 2 corps pour la seconde alors que la présence du Soleil n'est pas négligeable). Il semble donc hasardeux de vouloir déterminer la masse de la Lune par différence entre ces deux résultats.

Les éphémérides de l'IMCCE montrent que le mouvement de la Terre autour du Soleil vérifie mal la loi des aires et que ces "anomalies" sont liées à la présence de la Lune qui semble perturber le mouvement de la Terre. L'étude de ces perturbations permet de déterminer le rapport entre les masses m de la Lune et M de la Terre.

La constante des aires de la Terre

La longitude écliptique héliocentrique de la Terre λ , et la distance $ST = r$ de la Terre au Soleil sont des grandeurs mesurables.

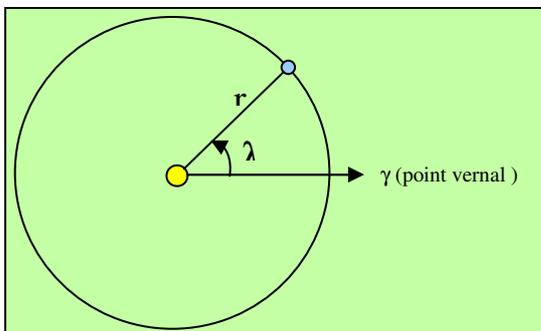


Fig.1. Coordonnées polaires dans le plan de l'écliptique : longitude écliptique héliocentrique λ et distance Soleil Terre r .

Si la Terre tournait seule autour du Soleil, sans la présence de la Lune ni des autres planètes, ces deux

grandeurs devraient vérifier la loi des aires (deuxième loi de Kepler) :

$$r^2 \dot{\lambda} = \text{constante}$$

où $\dot{\lambda}$ est la vitesse angulaire de la Terre autour du Soleil⁷.

Pour plus de facilité, les valeurs de r et de λ n'ont pas été mesurées mais tirées des éphémérides de l'IMCCE⁸.

Au cours du mois de janvier 2010, on a relevé chaque jour à midi la distance r exprimée en unités astronomiques ou ua (colonne 3 du tableau page suivante) et à 0 heure, la longitude écliptique géocentrique du Soleil, soit $\lambda + 180^\circ$ (colonne 2),

exprimée en degrés sexagésimaux. $\dot{\lambda}$, la vitesse angulaire instantanée à 12 h le jour j est confondue avec la vitesse moyenne entre le jour j à 0 h et le jour $(j + 1)$ à 0 h. Elle est exprimée en seconde d'angle par jour (colonne 4).

On peut ainsi calculer $r^2 \dot{\lambda}$ chaque jour de ce mois de janvier en $ua^2 \times '' / \text{jour}$ (colonne 5).

On constate que $r^2 \dot{\lambda}$ n'est pas rigoureusement constant. Cette grandeur passe par un minimum le 31 décembre 2009 et le 30 janvier 2010 qui sont des jours de pleine Lune et par un maximum le 15 janvier qui est un jour de nouvelle Lune.

Si on recommence ce travail un autre mois d'une autre année, on constate toujours que $r^2 \dot{\lambda}$ est minimum à la pleine Lune et maximum à de la nouvelle Lune.

La Lune perturbe le mouvement de la Terre autour du Soleil.

⁷ Les physiciens ont l'habitude de noter avec un point la dérivée par rapport au temps.

⁸ Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Ephémérides (www.imcce.fr)

Date	λ en ° ' "	r ua	$\Delta \lambda$ en "	$r \times r \times \Delta \lambda$	
30/12/09	278° 16' 30,872"	0,98333039	3667,3446	3546,0973	
31/12/09	279° 17' 38,2166"	0,9833104	3667,4195	3546,0255	PL
01/01/10	280° 18' 45,6361"	0,9832971	3667,5388	3546,0449	
02/01/10	281° 19' 53,1749"	0,98329048	3667,7037	3546,1566	
03/01/10	282° 21' 0,8786"	0,98329043	3667,9064	3546,3522	
04/01/10	283° 22' 8,785"	0,98329673	3668,1325	3546,6163	
05/01/10	284° 23' 16,9175"	0,98330909	3668,363	3546,9284	
06/01/10	285° 24' 25,2805"	0,98332719	3668,5785	3547,2673	
07/01/10	286° 25' 33,859"	0,98335068	3668,7607	3547,6129	
08/01/10	287° 26' 42,6197"	0,98337923	3668,895	3547,9488	
09/01/10	288° 27' 51,5147"	0,98341255	3668,9689	3548,2607	
10/01/10	289° 29' 0,4836"	0,98345036	3668,9734	3548,5379	
11/01/10	290° 30' 9,457"	0,98349245	3668,9015	3548,7721	
12/01/10	291° 31' 18,3585"	0,98353863	3668,7481	3548,957	
13/01/10	292° 32' 27,1066"	0,98358875	3668,5099	3549,0883	
14/01/10	293° 33' 35,6165"	0,98364272	3668,1848	3549,1632	
15/01/10	294° 34' 43,8013"	0,98370048	3667,7725	3549,181	NL
16/01/10	295° 35' 51,5738"	0,98376199	3667,2735	3549,142	
17/01/10	296° 36' 58,8473"	0,98382728	3666,6899	3549,0482	
18/01/10	297° 38' 5,5372"	0,98389639	3666,0246	3548,9029	
19/01/10	298° 39' 11,5618"	0,98396942	3665,281	3548,7097	
20/01/10	299° 40' 16,8428"	0,98404647	3664,464	3548,4744	
21/01/10	300° 41' 21,3068"	0,9841277	3663,5786	3548,2027	
22/01/10	301° 42' 24,8854"	0,98421327	3662,6312	3547,902	
23/01/10	302° 43' 27,5166"	0,98430339	3661,6295	3547,5813	
24/01/10	303° 44' 29,1461"	0,9843983	3660,5836	3547,252	
25/01/10	304° 45' 29,7297"	0,98449825	3659,5058	3546,9277	
26/01/10	305° 46' 29,2355"	0,98460352	3658,4117	3546,6256	
27/01/10	306° 47' 27,6472"	0,98471439	3657,3195	3546,3653	
28/01/10	307° 48' 24,9667"	0,98483112	3656,2485	3546,1674	
29/01/10	308° 49' 21,2152"	0,98495389	3655,216	3546,05	
30/01/10	309° 50' 16,4312"	0,98508283	3654,2336	3546,0251	PL
31/01/10	310° 51' 10,6648"	0,98521792	3653,3047	3546,0961	
01/02/10	311° 52' 3,9695"	0,98535903			

Fig.2. Coordonnées de la Terre au mois de janvier 2010.
 $\Delta \lambda$ est la variation de la longitude écliptique entre le jour j à 0h et le jour j + 1 à 0 h.

Interprétation qualitative

La distance Terre - Lune étant très petite devant la distance Terre - Soleil, pour résoudre le problème de ces 3 corps, on peut assimiler le système Terre-Lune à un point matériel G de masse (m + M) confondu avec son centre d'inertie et gravitant autour du Soleil en vérifiant les lois de Kepler et en particulier la loi des aires :

$$SG^2 \times \dot{\lambda}_G = C \text{ (constante)}$$

La Terre et la Lune décrivent dans le référentiel barycentrique des ellipses de foyer G. Nous négligerons l'angle entre le plan de l'orbite lunaire et celui de l'écliptique. Autrement dit, nous supposons que les figures ci-dessous sont planes.

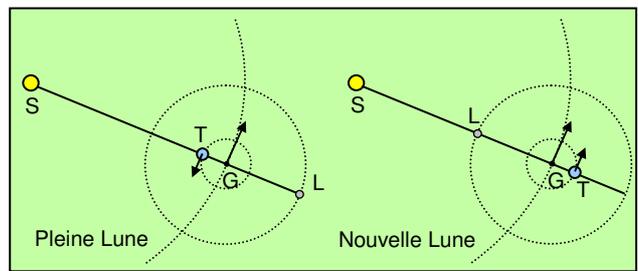


Fig.3. Positions et vitesses de la Terre T et du centre de masse G en pleine Lune et en nouvelle Lune.

À la pleine Lune, les vitesses de G dans le référentiel héliocentrique et de T dans le référentiel barycentrique sont de sens opposés donc $\dot{\lambda} < \dot{\lambda}_G$.

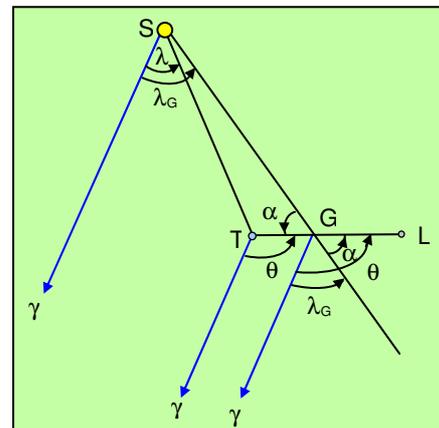
De plus, $r = SG - TG < SG$. C'est pourquoi $r^2 \dot{\lambda}$ passe par un minimum à la pleine Lune.

À la nouvelle Lune, les vitesses de G dans le référentiel héliocentrique et de T dans le référentiel barycentrique sont de même sens donc $\dot{\lambda} > \dot{\lambda}_G$.

De plus, $r = SG + TG > SG$. C'est pourquoi $r^2 \dot{\lambda}$ passe par un maximum à la nouvelle Lune.

L'écart entre les valeurs de $r^2 \dot{\lambda}$ à la nouvelle Lune et à la pleine Lune est directement lié à la distance GT que nous allons donc pouvoir calculer.

Détermination du centre d'inertie du système Terre - Lune



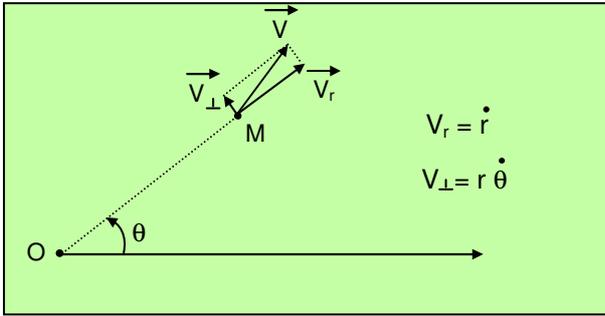
$\lambda = \left(\vec{S}\gamma, \vec{S}T \right)$ est la longitude écliptique héliocentrique de la Terre.

$\lambda_G = \left(\vec{S}\gamma, \vec{S}G \right)$ est la longitude écliptique héliocentrique de G, centre d'inertie du système Terre-Lune.

$\alpha = \left(\vec{G}S, \vec{G}T \right)$. À la pleine Lune, $\alpha = 0$.

À la nouvelle Lune, $\alpha = 180^\circ$.

$\theta = (\vec{T\gamma}, \vec{TL}) = (\vec{G\gamma}, \vec{GL})$ est la longitude éclipique géocentrique de la Lune ; c'est une grandeur mesurable qui sera relevée dans les éphémérides.



La vitesse orthoradiale de T dans le référentiel héliocentrique R_H est $ST \dot{\lambda}$.

La vitesse orthoradiale de la Terre dans le référentiel barycentrique est $GT \dot{\theta}$

Le référentiel barycentrique étant en translation par rapport au référentiel héliocentrique, tous ses points ont même vitesse dans R_H . Cette vitesse est celle de G par exemple ; la vitesse orthoradiale de G dans le référentiel héliocentrique est $SG \dot{\lambda}_G$.

À la **pleine Lune**, ces trois vitesses orthoradiales ont la même direction (les points S,T,G sont alignés) mais la deuxième est de sens opposé aux deux autres, la loi de composition des vitesses permet alors d'écrire :

$$\begin{aligned} ST \dot{\lambda} &= SG \dot{\lambda}_G - TG \dot{\theta} \\ ST \dot{\lambda} &= (ST + GT) \dot{\lambda}_G - TG \dot{\theta} \\ \dot{\lambda} &= \left(1 + \frac{GT}{ST}\right) \dot{\lambda}_G - \frac{GT}{ST} \dot{\theta} \end{aligned}$$

C étant la constante des aires du mouvement de G,

$$\dot{\lambda}_G = \frac{C}{SG^2} = \frac{C}{(ST + TG)^2} = \frac{C/ST^2}{\left(1 + \frac{GT}{ST}\right)^2}$$

$$\text{d'où } \frac{C/ST^2}{\left(1 + \frac{GT}{ST}\right)} = \dot{\lambda} + \dot{\theta} \frac{GT}{ST}$$

On pose $k = \frac{GT}{TL}$ et on obtient :

$$\frac{C/ST^2}{\left(1 + k \frac{TL}{ST}\right)} = \dot{\lambda} + \dot{\theta} k \frac{TL}{ST} \quad (\text{équation 1})$$

À la **nouvelle Lune**, les trois vitesses orthoradiales sont parallèles et de même sens.

De la même façon, la loi de composition des vitesses permet d'écrire :

$$ST \dot{\lambda} = SG \dot{\lambda}_G + TG \dot{\theta}$$

$$ST \dot{\lambda} = (ST - GT) \dot{\lambda}_G + TG \dot{\theta}$$

$$\dot{\lambda} = \left(1 - \frac{GT}{ST}\right) \dot{\lambda}_G + \frac{GT}{ST} \dot{\theta}$$

$$\text{et } \dot{\lambda}_G = \frac{C}{SG^2} = \frac{C}{(ST - TG)^2} = \frac{C/ST^2}{\left(1 - \frac{GT}{ST}\right)^2}$$

$$\text{d'où } \frac{C/ST^2}{\left(1 - \frac{GT}{ST}\right)} = \dot{\lambda} - \dot{\theta} \frac{GT}{ST} \text{ soit}$$

$$\frac{C/ST^2}{\left(1 - k \frac{TL}{ST}\right)} = \dot{\lambda} - \dot{\theta} k \frac{TL}{ST} \quad (\text{équation 2})$$

Pour la suite du calcul, nous mettrons un indice 1 aux grandeurs concernant la pleine Lune et un indice 2 aux grandeurs concernant la nouvelle Lune. Seule la constante des aires C du mouvement de G et le rapport k ont les mêmes valeurs dans les équations 1 et 2. Toutes les autres grandeurs sont mesurables. En éliminant C entre les deux équations, on obtiendra une nouvelle équation avec comme seule inconnue k. Sa résolution va nous permettre de connaître le rapport GT/GL et d'en déduire la masse de la Lune en fonction de celle de la Terre.

Suite des calculs de la colonne 2

On reprendra $ST = r$ et on posera $TL = d$. TL, (la distance Terre-Lune est une grandeur mesurable).

$$\begin{aligned} C &= \left(\dot{\lambda}_1 + \dot{\theta}_1 k \frac{d_1}{r_1}\right) \left(1 + k \frac{d_1}{r_1}\right) r_1^2 = \left(\dot{\lambda}_2 - \dot{\theta}_2 k \frac{d_2}{r_2}\right) \left(1 - k \frac{d_2}{r_2}\right) r_2^2 \\ \left(\dot{\lambda}_2 r_2^2 - \dot{\lambda}_1 r_1^2\right) - k \left[d_1 r_1 \left(\dot{\lambda}_1 + \dot{\theta}_1\right) + d_2 r_2 \left(\dot{\lambda}_2 + \dot{\theta}_2\right)\right] + k^2 \left(\dot{\theta}_2 d_2^2 - \dot{\theta}_1 d_1^2\right) &= 0 \end{aligned}$$

On peut remarquer que le rapport d/r entre les distances Terre-Lune et Terre-Soleil est très petit devant 1. Le coefficient k étant compris entre 0 et 1, on peut négliger le terme en k^2 de l'équation (à moins que l'on aime résoudre les équations du second degré).

On obtient donc :

$$k = \frac{\dot{\lambda}_2 r_2^2 - \dot{\lambda}_1 r_1^2}{d_1 r_1 (\dot{\lambda}_1 + \dot{\theta}_1) + d_2 r_2 (\dot{\lambda}_2 + \dot{\theta}_2)}$$

C'est bien l'écart entre les "constantes des aires" de la Terre à la pleine Lune et à la nouvelle Lune qui indique que G n'est pas confondu avec T .

Valeurs numériques

Les valeurs de r sont données dans les éphémérides en unité astronomique. On les convertira en km sachant que 1 ua = 149 597 870 km.

Les valeurs de d sont données dans les éphémérides en unité de rayon équatorial terrestre. On les convertira en km sachant que $R_T = 6\,378$ km.

Dans les éphémérides, on lit λ et θ et non $\dot{\lambda}$ et $\dot{\theta}$.

Pour connaître $\dot{\lambda}$ et $\dot{\theta}$ à la date t , on relèvera les valeurs de λ et θ aux dates $(t - 10 \text{ min})$ et $(t + 10 \text{ min})$ et on confondra la vitesse instantanée à la date t avec la vitesse moyenne entre les dates $(t - 10 \text{ min})$ et $(t + 10 \text{ min})$. Ces vitesses angulaires seront exprimées en " / jour.

La pleine Lune du 30 janvier a eu lieu à 6 h 19 min. À cette date, $r_1 = 0,985\,051\,740$ ua et $d_1 = 55,911\,550\,029 R_T$

À 6 h 09 min de ce même jour, $\lambda_{11} = 310^\circ 05' 52,9200''$ et $\theta_{11} = 130^\circ 00' 4,9159''$

À 6 h 29 min de ce même jour, $\lambda_{12} = 310^\circ 06' 43,6764''$ et $\theta_{11} = 130^\circ 12' 48,5576''$

On obtient alors :

$$\lambda_{12} - \lambda_{11} = (6 \times 60 + 43,6764) - (5 \times 60 + 52,9200) = 50,7564'' \text{ en } 20 \text{ min}$$

$$\text{puis } \dot{\lambda}_1 := 50,7564 \times 3 \times 24 = 3\,654,4608'' / \text{jour}$$

et de la même façon $\dot{\theta}_1 = 54\,982,2024'' / \text{jour}$.

La nouvelle Lune du 15 janvier a eu lieu à 7 h 13 min. À cette date, $r_2 = 0,983\,688\,665$ ua et $d_2 = 63,560\,466\,490 R_T$

À 7 h 03 min de ce même jour, $\lambda_{21} = 294^\circ 52' 41,2561''$ et $\theta_{21} = 294^\circ 48' 54,1693''$

À 7 h 23 min de ce même jour, $\lambda_{22} = 294^\circ 52' 41,2561''$ et $\theta_{22} = 294^\circ 58' 46,6702''$

On obtient alors $\dot{\lambda}_2 = 3\,667,8672'' / \text{jour}$

$\dot{\theta}_2 = 42\,660,0648'' / \text{jour}$.

Ces valeurs numériques conduisent à : $k = 0,0121$

Conclusion

G étant le centre d'inertie du système Terre-Lune,

$$\frac{m}{GT} = \frac{M}{GL} = \frac{m+M}{TL} \quad \text{d'où} \quad \frac{GT}{TL} = \frac{m}{m+M} = k \quad \text{et}$$

$$\frac{M}{m} = \frac{1}{k} - 1 = 81,5$$

La masse de la Terre vaut 81,5 fois celle de la Lune

Remarque

Ce résultat permet de calculer la constante C et, en appliquant la deuxième loi de Kepler, d'en déduire la durée T d'une révolution de G (et non de la Terre) autour du Soleil.

$$C = \frac{2\pi ab}{T} = \frac{2\pi a^2 \sqrt{1-e^2}}{T} \quad \text{si les angles}$$

intervenant dans le calcul C sont exprimés en radians. S'ils sont exprimés comme ici en secondes,

$$C = \frac{360 \times 3600 \times a^2 \sqrt{1-e^2}}{T}$$

Sachant que

$a = 1$ ua = 149 597 870 km et $e = 0,01671022$, on obtient $T = 365,256$ jours

On a vérifié ici que les valeurs de l'IMCCE sont bien calculées. ■

Détermination rapide de quelques éléments de l'orbite de Mars connaissant trois longitudes et la période (méthode de l'excentrique)

Blaise SIMON

L'auteur montre que le modèle de l'excentrique permet de retrouver des éléments de l'orbite de Mars avec une bonne précision.

Connaissant trois longitudes héliocentriques de Mars, les dates correspondantes et sa période de révolution, nous allons déterminer la longitude du périhélie, l'excentricité de l'orbite, la date de passage au périhélie. La méthode présentée ici est une méthode expéditive, qui ne donne que des résultats approchés, mais qui a l'avantage de la facilité de mise en oeuvre.

Principe de la méthode

Nous appliquons le « modèle de l'excentrique », modèle ancien, inexact, abandonné par conséquent depuis longtemps, mais dont nous allons montrer qu'il donne, on première approximation, des résultats très satisfaisants.

Nous nous plaçons dans le cadre du système héliocentrique de Copernic. L'orbite d'une planète est un cercle de centre O, de rayon R, le Soleil S étant excentré. Le point P est le périhélie.

La planète M parcourt le cercle à vitesse angulaire ω constante autour du point O, l'angle POM = α étant proportionnel à l'intervalle de temps $(t - t_p)$ écoulé depuis le passage au périhélie $\alpha = \omega (t - t_p)$ avec ω en degrés par jour et $(t - t_p)$ en jours.

Entre deux positions A et B de la planète, l'intervalle angulaire est $\Delta\alpha = \omega (t_B - t_A)$. La quantité OS / R est l'excentricité. La direction origine des longitudes étant $S\gamma$, la longitude de la planète est l'angle γSM .

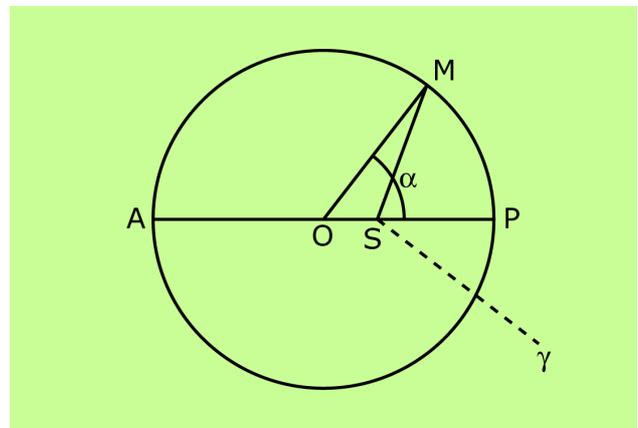


Fig.1.

Connaissant trois oppositions de la planète, donc trois longitudes héliocentriques, et la période de sa révolution sidérale, il s'agit de déterminer la longitude H du périhélie et l'excentricité de l'orbite.

Application à la planète Mars

La période étant de 686,97 jours, la vitesse angulaire de la planète autour de O est $\omega = 360 / 686,97 = 0,524$ degré par jour. On néglige l'inclinaison de l'orbite. Les longitudes sont rapportées à l'équinoxe 2000, et les dates sont en temps universel.

On a trois longitudes héliocentriques de Mars lors des oppositions suivantes :

le 7 novembre 2005 à 8 h : $L_A = 44,93^\circ$

le 17 mars 1997 à 8 h : $L_B = 176,81^\circ$

le 13 juin 2001 à 18 h : $L_C = 262,75^\circ$.

La planète est en B le 17,33 mars 1997, mais elle est à la même position cinq années martiennes plus tard, c'est-à-dire le 12,18 août 2006. Elle est en C le

13,75 juin 2001 et encore au même endroit, trois années martiennes plus tard, c'est-à-dire le 3,66 février 2007. Ce sont ces dates qui figurent en troisième ligne du tableau ci-dessous : de cette manière nous avons trois longitudes de Mars pendant une seule révolution. Entre les positions A et B, puis entre B et C, il y a respectivement 277,85 jours et 175,48 jours :

les angles $\omega(t_B - t_A)$ et $\omega(t_C - t_B)$ sont donc $145,59^\circ$ et $91,95^\circ$; ce sont les intervalles angulaires de Mars sur son orbite vus du centre O de celle-ci.

A	B	C
$L_A = 44,93^\circ$	$L_B = 176,81^\circ$	$L_C = 262,75^\circ$
7 novembre 2005	17 mars 1997	13 juin 2001
7 novembre 2005	12 août 2006	3 février 2007
$\Delta t_1 = 277,85$ jours	$\Delta t_2 = 175,48$ jours	
$\omega \Delta t_1 = 145,59^\circ$	$\omega \Delta t_2 = 91,95^\circ$	

Traçons un cercle de centre O et de rayon R (figure 2) et plaçons sur ce cercle trois points A, B, C tels que l'angle $AOB = \omega(t_B - t_A)$ soit $145,6^\circ$ et l'angle $BOC = \omega(t_C - t_B)$ soit $91,9^\circ$.

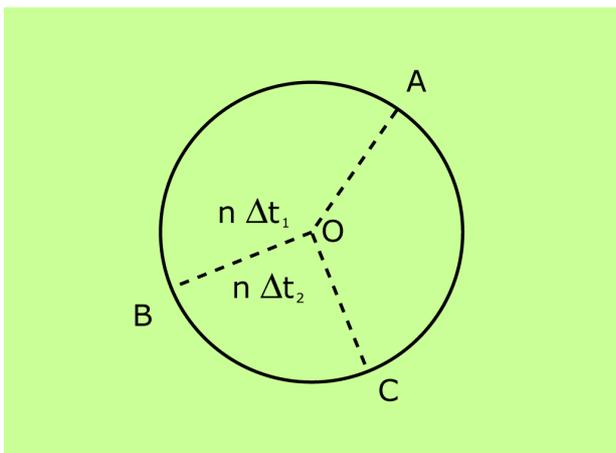


Fig.2.

Il s'agit maintenant de placer sur ce dessin la position S du Soleil telle que les angles ASB et BSC soient égaux aux différences de longitudes de Mars : $ASB = L_B - L_A = 131,88^\circ$ et $BSC = L_C - L_B = 85,94^\circ$.

Pour cela nous appliquons une méthode graphique, la « méthode des arcs capables », appliquée couramment par les navigateurs qui, au voisinage d'une côte, trouvent leur position en mesurant les distances angulaires de points figurant sur la carte. Sur une feuille de papier calque (figure 3), à partir d'un point S (le Soleil) on trace une ligne $S\gamma$ origine des longitudes, et trois lignes SL_A , SL_B , SL_C , correspondant aux longitudes de A, de B, de C. Les

figures 2 et 3 doivent être de grande taille (nous avons pris un cercle de 14,1 cm de rayon) et tracées avec le maximum de précision et de finesse. Avec un rapporteur de grande taille, la précision sur les angles peut atteindre $0,2^\circ$.

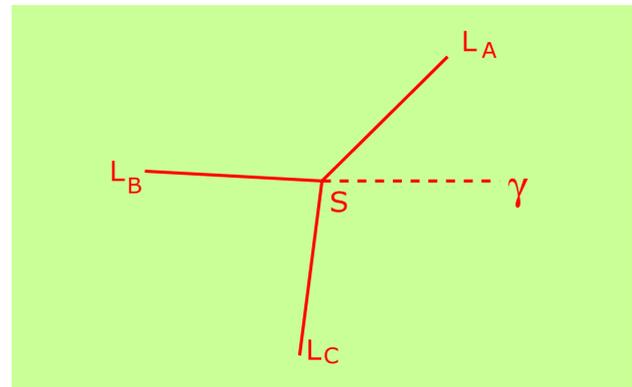


Fig.3.

On porte alors le calque sur le premier dessin et on le place de manière que les lignes SL_A , SL_B , SL_C , passent par les points A, B, C.

La figure 4 ci-dessous montre la solution obtenue. La ligne OS est la ligne des apsides, ses intersections avec le cercle sont le périhélie P (le plus proche de S) et l'aphélie. La longitude du périhélie se mesure sur la figure : $\Pi = 334,25^\circ$.

On a alors l'excentricité $e = OS/R = 0,184$ (environ deux fois plus grande que l'excentricité de l'orbite képlérienne de Mars, ce que nous expliquerons plus loin).

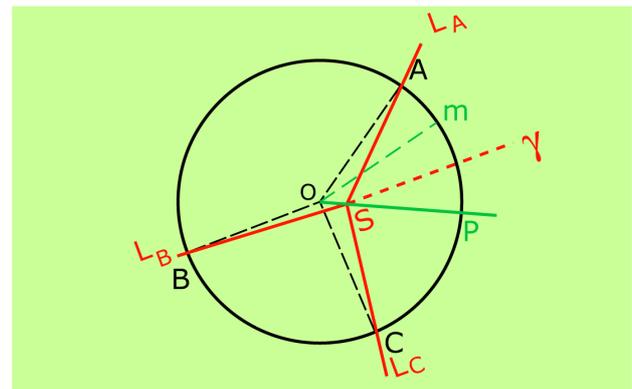


Fig.4.

Sur ce dessin on mesure l'angle $POA = 60,5^\circ$; le temps mis pour aller de P en A est donc de : $60,5 / 0,524 = 115,45$ jours.

Comme Mars était en A le 7,33 novembre 2005, nous déduisons que le passage au périhélie (115,45 jours plus tôt) doit s'être produit le 14,88 juillet 2005, (modulo 686,97 jours).

Selon la qualité de son dessin, le lecteur obtiendra des valeurs un peu différentes.

Test

Pour tester pratiquement la validité de nos résultats, nous calculons grâce à ce modèle la longitude de Mars qu'il prédit à une date éloignée.

Les astronomes prévoient une opposition de Mars le 13 octobre 2020 à 23 h, date à laquelle la longitude du Soleil étant de $200^{\circ} 47'$, la longitude de Mars en opposition sera de $20^{\circ} 47'$. Entre le passage au périhélie du 14,88 juillet 2005 et la date en question il y a 5 570,08 jours ; l'angle ω ($t_M - t_P$) correspondant est donc de $2\ 918,72^{\circ}$. Mars est donc en m, l'angle POM étant de $38,72^{\circ}$. La longitude de Mars, l'angle γSm , est alors mesurée au rapporteur :

$L = 20,75^{\circ} = 20^{\circ} 45'$. Accord satisfaisant.

Le modèle de l'excentrique n'est donc pas si méprisable.

Discussion

On sait que le modèle de l'excentrique est tout à fait insuffisant pour décrire les mouvements des planètes, dès qu'on cherche un peu de précision. Un modèle bien meilleur, peu éloigné du modèle képlérien, est le suivant (modèle de l'équant).

La trajectoire d'une planète est un cercle de centre O, le Soleil étant excentré en S.

Mais dans ce modèle, la planète parcourt ce cercle à vitesse angulaire constante, non pas autour du point O, mais autour du point O' symétrique de S par rapport à O.

L'excentricité de l'orbite est le rapport OS / R qui, si l'excentricité est faible, est la moitié de l'excentricité O'S / R donnée par le modèle de l'excentrique.

Dans ce modèle, il n'y a pas de construction géométrique directe pour obtenir les éléments de l'orbite. Le problème ne peut se résoudre que par approximations successives.

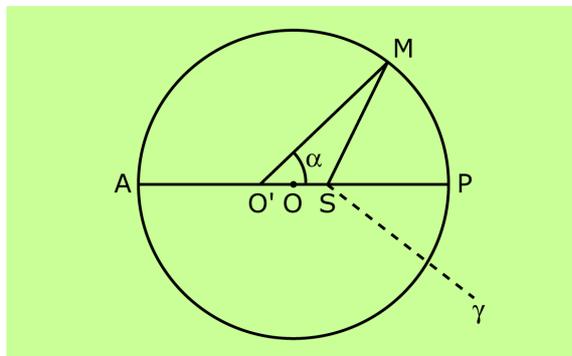


Fig.5.

Connaissant les éléments coperniciens, nous en déduisons donc les éléments képlériens :

$$e = 0,184 / 2 = 0,092$$

$$\Pi = 334,25^{\circ}$$

Passage au périhélie le 14,88 juillet 2005.

Les incertitudes résultant du manque d'exactitude du dessin sont d'environ de $\pm 0,002$ sur l'excentricité; de $\pm 1^{\circ}$ sur H ; de ± 2 jours sur la date de passage au périhélie.

Les valeurs officielles des éléments de l'orbite képlérienne sont les suivantes

$$e = 0,0934$$

$$\Pi = 336,06^{\circ}$$

Passage au périhélie le 17,52 juillet 2005

Conclusion

Nos éléments sont donc d'assez bonne qualité, et très suffisants en tout cas pour commencer une détermination rigoureuse d'orbite en appliquant les formules du mouvement képlérien. La méthode de l'excentrique, d'application si facile, est donc très utile en première approximation. On pourrait bien entendu trouver la position du point S par une méthode analytique rigoureuse, mais la précision ainsi obtenue ne serait qu'illusoire, étant donné que le modèle de l'excentrique n'est, par nature, valable qu'en première approximation.

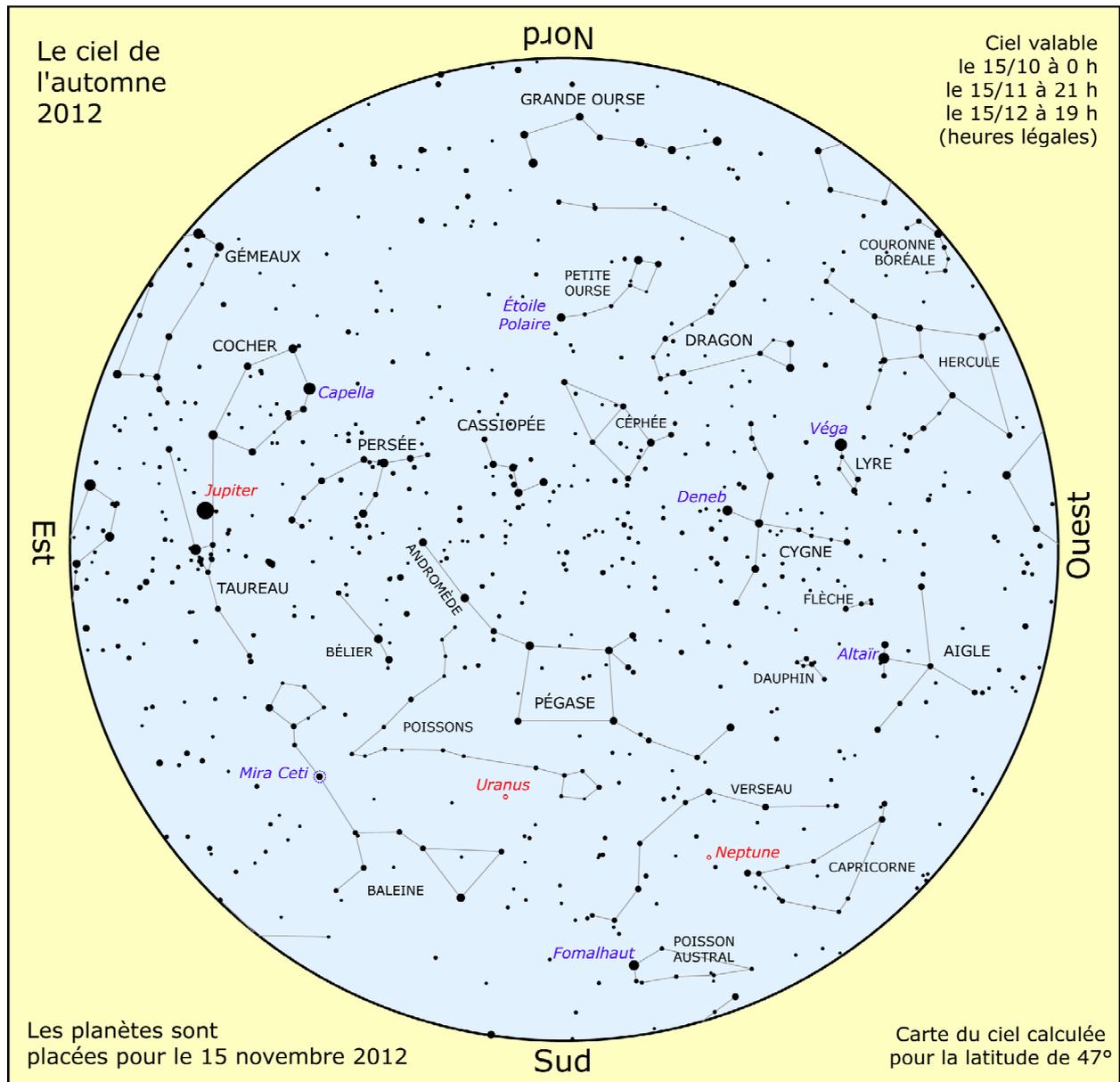
C'est en appliquant ce modèle que Hipparque et Ptolémée déterminaient les éléments de l'orbite du Soleil dans le système géocentrique.

Ils considéraient comme positions A, B, C du Soleil celles qu'il occupe à l'équinoxe de printemps, au solstice d'été, à l'équinoxe d'automne (dont les longitudes sont par définition 0° , 90° , 180°), et dont les dates étaient connues avec la précision de l'époque. Bien entendu la résolution du problème ne pouvait se faire par le procédé pratique décrit ici. Il fallait donc faire un peu de géométrie.

Actuellement on trouve ces dates, à la minute près, sur le calendrier de la Poste (l'almanach du facteur) et, sachant que la période sidérale de révolution de la terre est de 365,256 jours, on obtient les éléments de l'orbite terrestre avec une précision surprenante.



Le ciel de l'automne 2012



Visibilité des planètes

Mercury est visible le matin début décembre (élongation maximale le 4).

Venus peut être observée tout l'automne, elle aussi le matin. Elle apparaît gibbeuse au télescope.

Mars est encore visible le soir mais sa distance à la Terre continue d'augmenter et elle a peu d'intérêt dans un instrument.

Jupiter se lève 3 h après le coucher du Soleil fin septembre et est visible toute la nuit en décembre dans le Taureau (opposition le 3 décembre).

Saturne est invisible (conjonction le 25/10).

Uranus est dans les Poissons (opposition le 29/09)

Lune

Pleine Lune : 30/09, 29/10, 28/11.

Nouvelle Lune : 15/10, 13/11, 13/12.

Quelques événements (heures légales)

22/09 : équinoxe d'automne à 16 h 49.

3/10 (matin) : conjonction Vénus Régulus (0,1°).

5/10 : conjonction Lune Jupiter (1,5°).

8/10 : maximum des Draconides, jusqu'à plus de 100 étoiles filantes à l'heure entre le 7 et le 10.

13/11 : éclipse totale de Soleil visible de l'Australie et du Pacifique.

15/11 : début de l'année 1434 du calendrier musulman.

17/11 : maximum des Léonides (15 à 100 étoiles filantes à l'heure).

27/11 (matin) : conjonction Vénus Saturne (0,6°).

29/11 : conjonction Lune Jupiter (0,6°).

13/12 : maximum des Géminides.

18/12 : opposition de la planète naine Cérés (mag 6,7).

21/12 : solstice d'été à 12 h 11.

Des épicycles à la matière noire

G. Paturel, Observatoire de Lyon

Nous partirons des conceptions imaginées par les premiers astronomes pour terminer par celles d'aujourd'hui. Nous trouverons dans ce parallèle quelques similitudes, propres à stimuler l'imagination des hommes, chercheurs de métier ou simples curieux de la chose scientifique.

Il est remarquable que plusieurs siècles avant le début de notre ère, des savants aient pu bâtir une vision de notre univers. Certes, les limites de l'univers de cette époque n'étaient pas les mêmes qu'aujourd'hui. Pour simplifier, il y avait la Terre, la Lune, le Soleil, les planètes, sortes d'astres errants, et les étoiles. Nous verrons que l'univers connu aujourd'hui est bien plus grand et qu'il est riche d'une multitude d'astres divers.

Les astres furent utilisés d'abord pour établir des calendriers dont les plus anciens remontent à environ 1500 ans avant notre ère.

De fait, les Chinois, les Babyloniens, les Égyptiens avaient une bonne connaissance du ciel.

Naturellement, il fut reconnu très tôt que tous les astres tournent (ou semblent tourner) autour de nous en une journée. Il suffit d'observer le ciel pendant quelques heures pour se convaincre que le ciel tourne. Est-ce réellement le cas ? Nous découvrirons que la nature passe son temps à nous entraîner sur des fausses pistes. Le Soleil aussi semble suivre ce mouvement. La Lune elle-même obéit à cette rotation. Résumons les observations faites plusieurs siècles avant notre ère :

- 1) L'ensemble du ciel fait un tour en un temps que l'on appelle un jour. Ce temps est actuellement divisé en 24 heures régulières (ce qui n'a pas toujours été le cas)
- 2) La Lune se déplace par rapport aux étoiles en faisant un circuit complet autour de la Terre en une trentaine de jours.
- 3) Le Soleil se déplace également par rapport aux étoiles. Ceci se constate en observant les étoiles visibles au lever ou au coucher du Soleil, ce que les anciens appelaient les levers ou couchers héliaques. Ce sont des étoiles différentes tout au long de l'année. Le Soleil se déplace dans un plan, l'écliptique, et il parcourt un tour complet en 365 jours mais avec un mouvement plus ou moins rapide selon les saisons. On retrouve ainsi les trois unités fondamentales de temps : le jour, le mois et

l'année. Mais une autre constatation allait permettre de construire une première description du monde :

4) Les planètes ont un mouvement superposé à la rotation générale. Elles se déplacent par rapport aux étoiles, mais le mouvement est complexe (*planète* signifie "qui erre"). Cette constatation est facile à faire en observant plusieurs nuits de suite une planète brillante comme Jupiter, Vénus ou Mars.

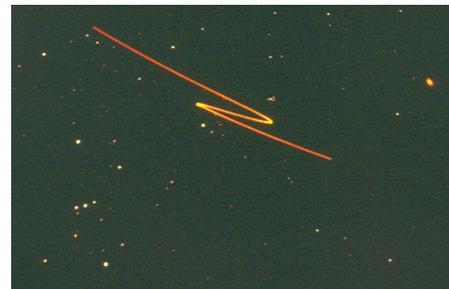


Fig.1. Le mouvement erratique de la planète Mars.

Il se trouve que les mouvements des corps cités se font tous dans des plans assez peu différents les uns des autres. Un premier modèle simple consiste à imaginer la Terre au centre de l'Univers et l'ensemble des astres tournant autour, presque dans le même plan. Mais des problèmes se posaient : Comment expliquer le mouvement irrégulier du Soleil ? Comment expliquer le mouvement rétrograde de Mars et des autres planètes ?

Premier modèle du monde

Hipparque (150 av. JC) montra que la vitesse irrégulière du Soleil pouvait s'expliquer en décentrant la Terre ou en imaginant que le Soleil tournait sur un petit cercle (un cercle épicycle) dont le centre tournait autour de la Terre sur un grand cercle (cercle déférent). Les deux conceptions permettaient d'obtenir le même résultat en ajustant soit le décentrement de la Terre, soit les rayons de ces cercles épicycles et déférents ainsi que les vitesses de rotation sur ces cercles. Hipparque préférait considérer le décentrage de la Terre, plus simple (figure 2).

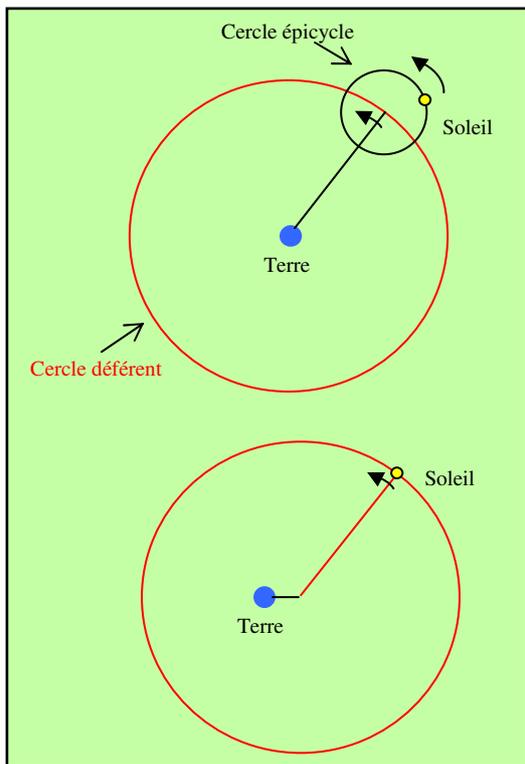


Fig.2. Hipparque propose deux méthodes pour expliquer les anomalies du mouvement du Soleil

On voit apparaître l'argument de "simplicité" comme méthode de sélection entre deux modèles équivalents vis-à-vis de l'expérience. Ce principe subsiste actuellement sous le nom de principe du rasoir d'Occam.

Mais Claude Ptolémée, dans les années 140, c'est-à-dire près de trois cents ans après Hipparque préféra appliquer la méthode des épicycles et des déférents. Dans une vision plus unitaire, il l'appliqua non seulement au Soleil mais à tous les astres du système solaire. Chaque planète avait son propre cercle épicycle et son propre cercle déférent. En ajustant les vitesses et les rayons il pouvait reproduire les déplacements des planètes, y compris leur mouvement rétrograde.

Cependant, ce modèle ne rendait pas compte de petites anomalies que la précision des observations permettait de déceler. Ptolémée parvint à représenter encore plus précisément les mouvements, y compris ceux du Soleil, en ajoutant le décentrement de la Terre. Il fallut encore ajouter un ingrédient au modèle : le mouvement de déplacement du centre de l'épicycle devait être régulier, non par rapport au centre du cercle déférent mais par rapport à un autre centre, le point équant (figure 3). Bref, le modèle est devenu très précis mais extrêmement complexe. La nature était-elle ainsi ?

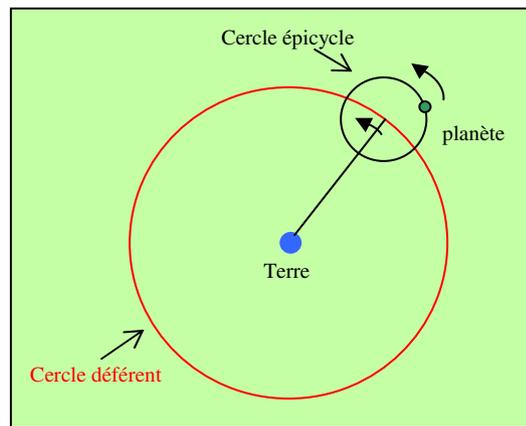


Fig.3. Explication du mouvement rétrograde des planètes par les cercles épicycles.

Le modèle de Ptolémée permettait de prédire avec une précision remarquable les positions des planètes et du Soleil. Les observations confirmaient les prédictions. La description de Ptolémée était donc bonne, mais d'une grande complexité mathématique. Ce modèle sera le modèle unique (ce qu'on appellerait aujourd'hui le "modèle standard") jusqu'à ce qu'un chanoine Polonais, inspiré par des écrits des grecs anciens, imagina un autre modèle.

Ce chanoine s'appelait Nicolas Copernic. Il naquit en Pologne en 1473. Son modèle était d'une grande simplicité. C'est le Soleil qui occupait le centre du monde et non plus la Terre. La Terre était alors une planète comme les autres et toutes tournaient autour du Soleil. Avec cette description Copernic pouvait prédire toutes les positions des planètes.

Le mouvement rétrograde d'une planète était le simple reflet de la trajectoire circulaire de la Terre.

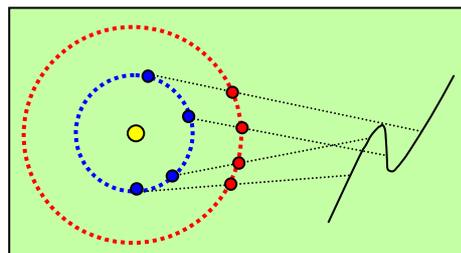


Fig.4. Mouvement rétrograde des planètes dans la vision de Nicolas Copernic.

Cependant, en considérant des trajectoires circulaires les prédictions étaient moins bonnes que celles de Ptolémée. Les détracteurs avaient beau jeu de dire que ce modèle était faux, puisque non conforme aux observations précises. Copernic proposait-il un modèle simpliste parce qu'il ne comprenait pas le modèle complexe de Ptolémée ? Peu nombreux, en effet, étaient les savants capables de maîtriser les calculs du modèle de Ptolémée.

On connaît la suite de l'histoire. Johannes Kepler (1571-1630), une centaine d'années après Copernic reprit le modèle héliocentrique. Grâce aux mesures les plus précises du moment, il montra que les trajectoires n'étaient pas des cercles mais des ellipses. Certes, chaque ellipse était définie par plusieurs paramètres (demi grand axe, excentricité, orientation du grand axe) pour donner encore un modèle complexe, mais un modèle unificateur, où chaque planète obéissait aux mêmes lois, les lois de Kepler. Isaac Newton (1643-1727) montra ensuite que la loi d'Attraction Universelle permettait de retrouver toutes ces lois de Kepler. Tout s'expliquait par la gravitation. Les quelques anomalies restantes furent levées quand Albert Einstein (1879-1955) montra que la force d'attraction universelle de Newton pouvait se représenter par une déformation de l'espace-temps, espace dans lequel le temps est intimement lié à l'espace via la vitesse de la lumière, posée comme vitesse universelle et comme limite de toutes les vitesses. Ainsi est-on arrivé au modèle actuel où la théorie d'Einstein (théorie de la Relativité Générale) explique tout... ou presque.

Modèle moderne du monde

La Relativité Générale n'a jamais été prise en défaut. Quelques anomalies subsistent dans certains phénomènes astronomiques. Mais des ingrédients subtils ont été proposés pour rendre ces anomalies compatibles avec la Relativité Générale. L'ensemble constitue le modèle standard que nous allons résumer.

Ce modèle standard s'applique à tout l'Univers, tel que les astronomes le connaissent aujourd'hui. Les étoiles ne sont plus sur une sphère mystérieuse ("la sphère des fixes") mais elles se rassemblent en immenses agglomérations, les galaxies. Notre Soleil accompagné de son cortège de planètes est une étoile particulière d'une agglomération particulière, la Voie Lactée, notre Galaxie. Les étoiles que nous voyons dans le ciel sont les étoiles de notre Voie Lactée. Avec les très gros télescopes on distingue les étoiles individuelles des galaxies les plus proches. L'univers est donc peuplé de milliards de galaxies, chacune d'elles contenant des milliards d'étoiles. Les galaxies elles-mêmes se rassemblent en énormes structures, amas ou filament de galaxies.

La théorie de la Relativité Générale laisse prévoir que l'Univers de galaxies n'est pas statique, il se dilate, ce que l'observation confirme. Cette expansion laisse prévoir que l'Univers doit avoir un début. A cette époque ancienne (15 Milliards d'années environ), il était très dense et très chaud. Le rayonnement de cette période chaude est encore

visible, l'observation l'a également confirmé. Bref, "*tous les évènements s'enchaînent dans le meilleur des mondes possibles*". Quelles sont donc les anomalies qui ont nécessité l'addition des ingrédients subtils dont nous parlions plus haut ?

L'astronome Fritz Zwicky (1898-1974) mesura la masse d'un amas de galaxies par deux méthodes différentes. Tout d'abord par la dynamique. L'agitation des galaxies au sein d'un amas conduit à la valeur de la masse de cet amas, via le théorème du viriel. La seconde méthode consiste simplement à compter les galaxies de l'amas, d'estimer la masse totale en assignant à chaque galaxie une masse donnée, selon sa luminosité. Certes, on ne s'attend pas à trouver un accord parfait mais c'est un désaccord énorme qui est constaté. L'amas a une masse dix fois supérieure à la masse visible. Il y aurait donc de la *masse cachée* ! Une mise en évidence récente de cette masse cachée (qu'on appelle aussi *masse manquante*) provient de la déflexion de la lumière qu'engendre la masse des amas de galaxies en déformant les images des galaxies lointaines situées derrière eux. Les galaxies apparaissent sous forme d'arcs.

Une autre preuve de cette matière cachée fut trouvée par l'étude de la rotation des galaxies. Les galaxies ne tournent pas selon les lois de Kepler, en particulier loin du centre, là où on s'attend à trouver une diminution de la vitesse de rotation, comme pour les planètes tournant autour du Soleil. Une présence de masse cachée permet d'expliquer cette anomalie. Il a donc fallu ajouter un ingrédient au modèle standard : une mystérieuse matière noire que les astronomes et physiciens essaient de détecter, sans succès pour l'instant. Le plus surprenant est que, selon les estimations, la matière noire nécessaire représenterait plus de 80% de la matière totale de notre univers.

Mais ce n'est pas tout. L'expansion de l'univers est décrite par une loi simple entre le décalage des longueurs d'onde et la distance, la loi dite de Hubble. Plus une galaxie est lointaine, plus les longueurs d'onde de sa lumière sont décalées vers les grandes longueurs d'onde. C'est ce qu'on appelle le *redshift*. En attribuant ce décalage à la vitesse d'expansion on trouve ainsi que les galaxies se fuient mutuellement selon une loi simple : la vitesse est proportionnelle à la distance. Les prédictions laissaient plutôt attendre un ralentissement de cette expansion. Mais, contre toute attente, l'observation a montré que l'expansion s'accélérait. D'où l'univers tire-t-il son énergie pour accélérer son mouvement de dilatation ? Là encore un nouvel ingrédient a dû être inventé pour expliquer l'observation. On l'a appelé *l'énergie noire*. On sait que matière et

énergie sont une seule et même chose. En cumulant la matière noire et énergie noire, la matière ordinaire ne représenterait que 5% de l'énergie totale de notre Univers.

Cette façon de réagir devant un fait expérimental inexplicable n'a rien d'anormal. Il est raisonnable de maintenir la meilleure théorie cosmologique du moment (à savoir la théorie de la Relativité Générale) en imaginant des ingrédients nouveaux pour expliquer les observations. Le jour où les ingrédients en question sont découverts, la théorie s'en trouve confortée. Mais, si ce n'est pas le cas, il faut se poser la question de savoir quelles sont les limites de la théorie actuelle. Il faut alors éventuellement englober la théorie ancienne dans une théorie plus large, qui redonnera la théorie ancienne dans son domaine d'application spécifique. Il n'y a pas de route déductive menant de la théorie ancienne à la théorie nouvelle. Il faut nécessairement introduire une hypothèse qui paraîtra sans doute comme absurde aux yeux des tenants du cadre ancien. Seule l'expérience et la simplicité logique valideront la nouvelle théorie. S'il n'y a pas de route pour trouver la nouvelle théorie, l'histoire des sciences peut nous aider à voir comment s'y prendre pour trouver l'hypothèse nouvelle. Comme le suggérait Poincaré, dès 1904, la généralisation de quelques grands principes devrait nous guider. Principe de conservation de l'énergie⁹, principe de relativité, principe d'équivalence, etc... autant de principes qui ont bien résisté au couperet de l'expérience. Ne faut-il pas en généraliser certains d'entre eux, comme l'a magnifiquement fait Albert Einstein avec le Principe de Relativité de Galilée.

Une autre approche peut nous guider dans cette recherche : l'analyse de résultats expérimentaux inexplicables que l'on préfère glisser sous le tapis, faute de trouver aisément un ingrédient à ajouter au modèle. On considère alors que ces résultats ne sont pas sûrs ou qu'ils sont fortuits. Par exemple, plusieurs sondes spatiales situées très loin dans le système solaire montrent une accélération anormale (dite "anomalie Pioneer"), très faible mais bien observée sur plus de sept ans. Cette accélération anormale n'est-elle pas aussi le reflet d'un problème réel de notre description.

Bien sûr, il y a parfois des coïncidences ou des erreurs de mesure qui peuvent conduire sur de fausses pistes, mais le devoir du chercheur n'est-il pas d'explorer toutes les voies, même les plus périlleuses ?

⁹ En Relativité Générale, il n'y a pas de conservation globale de l'énergie, il n'y a qu'une conservation locale.

La matière noire et l'énergie noire ne sont-elles pas les cercles épicycles et déferents du modèle standard cosmologique. Personnellement je suis enclin à le penser. L'Univers a clairement un problème avec l'énergie : la matière noire est un manque de masse donc d'énergie. L'énergie noire mystérieuse en est aussi le signe. De plus, l'inflation primordiale nécessaire pour expliquer, entre autre, l'uniformité du rayonnement fossile de l'univers, réclame, elle aussi, une source d'énergie (on l'a comparée à une énergie latente de changement d'état). Des considérations très générales faites par Emmy Noether (1882-1935) ont montré que la loi de conservation de l'énergie est liée à l'uniformité du temps. N'est-ce pas notre définition du temps à l'échelle cosmique qui pose problème ? Il semble possible de trouver plusieurs définitions du temps (voir S. Hawking : "*Une brève histoire du temps*"). Laquelle de ces définitions est la bonne ? Ne faut-il pas inventer un nouveau principe pour unifier ces définitions.

Certains chercheurs ont essayé des pistes audacieuses. Par exemple une variation séculaire de la vitesse de la lumière. Mais cette hypothèse remet en question l'utilisation d'un espace courbe de Riemann, donc de la forme géométrique de la Relativité Générale¹⁰. Une autre voie a été de considérer qu'il n'y avait pas de longueur absolue, ni d'intervalle de temps absolu. C'est de là qu'est né le principe d'invariance d'échelle. Toutes ces tentatives se sont heurtées à des arguments contraires qu'il faudrait analyser. Bref ! Il y a peut-être une idée neuve à trouver, mais laquelle ?

La route est encore longue avant d'avoir une théorie générale qui englobe toutes les expériences connues, d'autant que pour expliquer tout l'univers, depuis les objets microscopiques jusqu'aux objets astronomiques, nous avons aujourd'hui deux théories distinctes : la Mécanique Quantique et la Relativité Générale, qui ont des formalismes très différents, mais qui contiennent, toute deux, un formidable pouvoir explicatif.

Cette quête d'une théorie ultime n'aura sans doute pas de fin, car plus la science progresse, plus les expériences sont précises et plus il y a de choses nouvelles à expliquer. L'ennui ne menace pas les gens curieux !

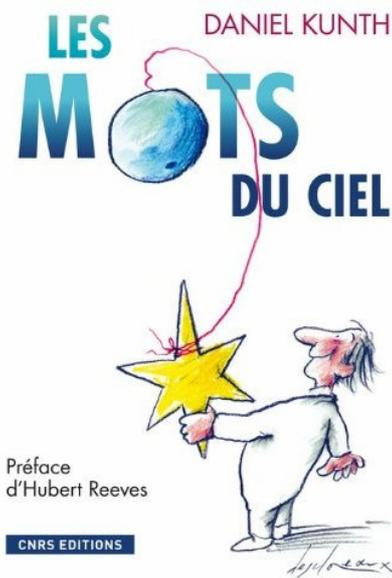
¹⁰ Dans ses livres de vulgarisation Einstein affirme qu'en Relativité Générale on est obligé de considérer une vitesse de la lumière variable. Ce point de vue n'est pas admis aujourd'hui, ou, plus exactement, c'est la vitesse dans l'espace euclidien local (tangent) qui est variable.

LECTURE POUR LA MARQUISE

Les Mots du ciel

Préface d'Hubert Reeves
Daniel Kunth, CNRS ÉDITIONS

Dans cet ouvrage de 182 pages, l'auteur part de mots courants d'astronomie et cherche à en faire ressortir le sens d'origine, puis l'histoire parfois étrange, enfin la signification actuelle. Le titre est déjà un clin d'œil et le texte en recense bien d'autres.



Quelques mots clefs structurent l'ouvrage : *Ciel, Lumière, Étoiles, Cosmos, Système solaire, et Calendrier*. L'entrée « Étoiles » se subdivise en : *Constellations et Influences astrales* tandis que « Système solaire » intègre les mots clefs *Lune, Éclipses, Comètes, Planètes*. À la fin de chaque chapitre quelques locutions proverbiales sont mentionnées.

Certains termes donnent lieu à des apports complémentaires. Par exemple la double signification du mot « jour » est rappelée : L'une a trait à la lumière comme dans : *il fait jour ou le jour se lève* l'autre désigne une durée comme dans *le jour le plus long* ou *jusqu'à la fins de mes jours*. L'auteur profite de l'étude du mot lumière pour rappeler malignement qu'en astronomie : *Trop de lumière nuit...*

Le chapitre « étoiles » inclut : les mots ou expressions : *Edelweiss* (étoile d'argent ou des glaciers), *Étoiles de mer* (elles ne voient jamais le

ciel) ou *Étoiles filantes* constituées de si petites particules que l'on pourrait en tenir quelques centaines dans le creux de sa main.

Notre célèbre *Astérix le gaulois* est doublement « star » d'une part dans les BD mais aussi par son nom issu de *astérisque*, cette petite étoile qui indique un renvoi de page en bas d'un texte. Quand au Soleil, « notre étoile », d'après *l'Almanach Vermot* c'est un astre alors que la Terre est plutôt un désastre...

Le chapitre sur « le système solaire » est introduit par une référence à Sophocle. Le Sphinx pose à Œdipe l'énigme suivante : *Quelles sont les deux sœurs dont l'une engendre l'autre et dont la seconde engendre à son tour la première ?* « Le jour et la nuit » répond Œdipe. Le Sphinx dépité se jette dans un abîme.

Dans le chapitre sur « la Lune », on apprend pourquoi elle fait pâlir la couleur des étoffes qui sèchent la nuit mais aussi le lien historique avec le croissant frais du petit déjeuner.

L'entrée « éclipse » permet de retrouver Charles Trenet et le rendez vous entre la Lune et le Soleil mais aussi le rôle historique des éclipses le 29 février 1504 pour Christophe Colomb puis pour Tintin dans le *Temple du Soleil*.

L'entrée « planète » renvoie à certains aspects culturels comme dans *la planète des singes* ou scientifiques avec le terme excentricité - symbolisé par la lettre e - qui mesure le degré d'aplatissement de la trajectoire d'un astre. Mais devinez pourquoi l'astéroïde numéro 2642, découvert en 1982 et dont l'orbite est fortement excentrée, porte le nom de « Georges Pérec » auteur d'un roman dont le titre est : *La Disparition (1969) ?*

L'entrée « calendrier » permet à l'auteur d'expliquer à des élèves de CM2 le sens du mot *Révolution* et surtout de leur poser la question : *Combien de fois as-tu déjà fait le tour du Soleil ?*

Il ne faudrait pas croire que l'auteur ne s'intéresse qu'à l'aspect anecdotique et ludique. La plupart des mots scientifiques utilisés, par exemple, le nom de chacune des planètes du système solaire donne lieu à des encadrés scientifiques tout à fait sérieux.

Par ailleurs à la fin de l'ouvrage un *abécédaire* revient sur chaque terme scientifique utilisé et quelques autres avec, à chaque fois, une indication de nature étymologique et une définition précise.

Cet ouvrage grand public devrait trouver des lecteurs intéressés par l'histoire des Mots du ciel, ces mots *pullulent, se déguisent, désertent, fondent*

des familles et parfois quelques avatars incongrus. Jean Audouze, dans l'avant propos, indique que Daniel Kunth appartient à cette prestigieuse lignée d'auteurs « qui se jouent des mots autant qu'ils les utilisent. Il vient mettre les mots du ciel à la disposition de tous ceux qui ne veulent pas seulement les comprendre mais qui veulent éventuellement en rire ou en sourire »

Histoire de l'inertie d'Aristote à Einstein

Robert Signore, Vuibert 2012

Ce livre est écrit par le même auteur que celui intitulé : *Histoire de la chute des corps, d'Aristote à Einstein*, publié chez le même éditeur en 2008 voir CC n° 137

Il s'agit d'un livre de seulement 100 pages (sans les annexes). C'est donc un livre de taille réduite mais dont le contenu est particulièrement riche. Il est divisé en quatre parties, respectivement :

2. Une physique sans inertie,
3. Émergence de la notion d'inertie,
4. Le temps des interrogations,
5. L'inertie replacée dans l'espace-temps.

Une physique sans inertie

Le début de l'ouvrage relate les efforts pour rendre compte du mouvement des corps. Pour Aristote un corps lancé dans l'air poursuit sa course en vertu d'une sorte de rétroaction de l'air. L'air déplacé et tourbillonnant viendrait pousser le projectile tout en s'épuisant peu à peu.

Dans la dynamique aristotélicienne les corps graves (c'est-à-dire pesants) tomberaient d'autant plus vite qu'ils sont plus lourds. C'est-à-dire que leur vitesse (au lieu de leur accélération comme le découvrira Newton) seraient proportionnelles à leur poids.

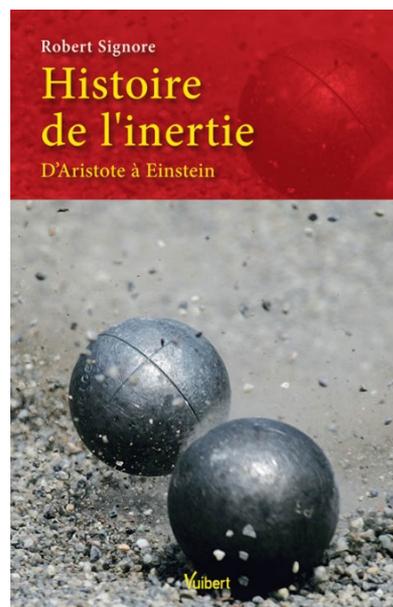
Avec le XIV^e siècle est introduit l'idée de l'**impetus** qui concerne le mobile lui-même. Galilée compare cet effet à celui d'une cloche frappée par un marteau. Le choc du marteau produit le son puis celui-ci s'épuise et disparaît.

Émergence de la notion d'inertie

Galilée explique le mouvement parabolique d'un corps pesant comme résultant de la composition 2 mouvements qui agissent indépendamment (sans se contrarier) :

- Un mouvement rectiligne et uniforme qui représente la **part inertielle**,
- Un mouvement uniformément accéléré qui représente la part liée à la **gravité du corps**.

Dans sa démonstration, il utilise le concept de temps (absolu et uniforme).



Avec **Huygens** (1629-1693) apparaît, vers 1673, le concept de force centrifuge qui manifeste l'effet d'inertie. Huygens se demandait pourquoi le pendule qui bat la seconde à Cayenne (qui se trouve à 4° au nord de l'équateur) a une longueur plus courte qu'à Paris. Il détermine qu'à l'équateur si l'on voulait que l'effet du poids soit exactement compensé par l'effet de la force centrifuge il faudrait que la Terre tourne 17 fois plus vite qu'elle ne le fait. La vitesse de rotation de la Terre étant d'un tour par 24 h il en déduit qu'à l'équateur il faut déduire du poids une petite partie de la pesanteur *qui soit à la pesanteur entière comme 1 au carré de 17, c'est-à-dire 1/289* car les forces centrifuges des corps (...) sont entre elles comme les carrés des vitesses (...) Chaque corps sous l'équateur, étant donc moins pesant de 1/289 de ce qu'il serait si la Terre ne tournait pas sur son axe (...) Il en conclut que la longueur du pendule, en cet endroit, doit être aussi diminuée de 1/189.

Au XIX^e siècle **Gustave Coriolis** (1792-1843) découvre l'effet qui porte son nom de nos jours et qui permettra d'expliquer, en 1851, l'apparent mouvement du pendule de Foucault puis plus tard le tourbillonnement des dépressions atmosphériques. Il précise pourquoi la force de Coriolis, *comme on l'appelle souvent par commodité, est une pseudo-force, une fiction, une manière de parler.*

Cette seconde partie (la plus longue) se termine par un chapitre intitulé : la loi d'inertie selon Kant. **Emmanuel Kant** (1724-1804) est d'abord un des plus grands philosophes, mais il apporte aussi une contribution étonnante dans de nombreux autres domaines, en particulier, en 1786, dans *Premiers principes métaphysiques de la science de la nature.*

Le temps des interrogations

À la question existe-t-il des repères inertiels ? L'auteur raconte qu'Albert Einstein eut l'idée, qu'il qualifia plus tard comme étant « *La plus heureuse de sa vie* », à la suite d'un accident survenu en 1908 à Berne lorsqu'un couvreur tomba du toit où il travaillait. En méditant sur ce drame, Einstein perçut que, pour ce pauvre couvreur et seulement durant sa chute, il n'existait plus de gravitation dans son voisinage immédiat. Par la suite il utilisa en pensée un ascenseur qui tomberait du haut d'un gratte-ciel après rupture de son câble de traction.

Pour répondre à la question : les masses inerte et grave d'un même corps sont-elles identiques ? L'auteur décrit les expériences faites par **Roland Eötvös** (1848-1919) à Budapest en 1889 et refaites ultérieurement, qui le confirment.

Quelle est l'origine de l'inertie ? L'expérience du seau de Newton permet de poser la question mais la réponse n'est pas évidente sauf si l'on admet le

principe de Mach qui suppose que l'inertie de la matière résulte d'une interaction avec tous les corps présents dans l'univers.

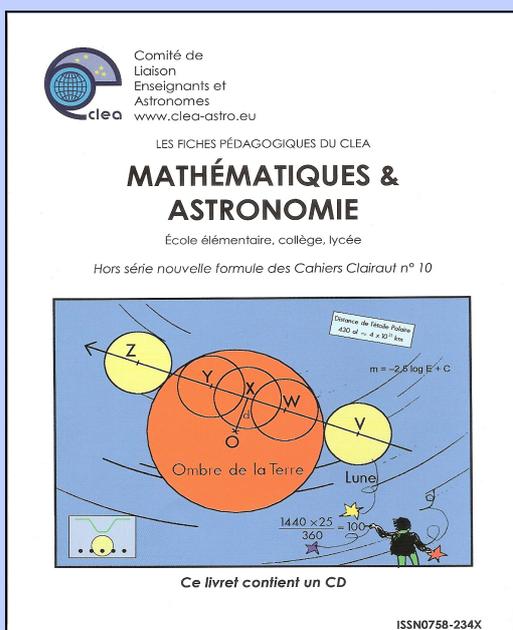
L'inertie replacée dans l'espace-temps

Cette dernière partie aborde la relativité restreinte et générale de manière simple. La force de gravitation de Newton devient un artefact. La force de pesanteur n'est plus considérée comme résultant de l'attraction de la Terre mais comme la conséquence de la courbure de l'espace-temps.

Ce livre devrait aider les enseignants de physique qui devront aborder le nouveau programme de terminale. L'auteur aborde avec simplicité ces questions délicates, il a le souci d'économiser les mots et de les choisir avec un soin, il en résulte un ouvrage à la fois clair et rigoureux.

Christian Larcher

Le Hors-Série N°10 des Cahiers Clairaut, « Mathématiques et Astronomie », est arrivé !



Livret d'exercices et CDROM multimédia composent ce nouveau hors-série qui s'adresse aux enseignants désireux de faire des mathématiques avec de l'astronomie...ou bien le contraire ! Pour tous les enseignants et les élèves, de l'école élémentaire aux classes terminales (voire plus).

Vous trouverez dans ce livret :

- une centaine d'énoncés d'exercices regroupés en 12 thèmes (le mouvement apparent du ciel, la Terre, les saisons, la Lune, les calendriers, les éclipses de Lune, les éclipses de Soleil, le système solaire, les étoiles, les cadrans solaires, cartes du ciel et astrolabes, exoplanètes) ;
- un CD avec les solutions, des compléments, des feuilles de calcul, des fichiers Geoplan-Geospace et GeoGebra, des schémas, des photos, des maquettes, des diaporamas, des animations...

Solutions des mots croisés p. 16

Horizontalement

1. Sélénologie. 2. Exa (axe à l'envers). Oraux. 3. Riccioli. LC. 4. EG. Ouie. 5. Nutation (mouvement de l'axe de la Terre d'une période de 18,6 ans dû à l'attraction de la Lune et du Soleil sur le bourrelet équatorial). Un. 6. Atlas. HST (Hubble Space Telescope). 7. Télescope. 8. Exer. Envahi. 9. Crises. 10. NL. Sus. Imbu. 11. Fusée. Bleue.

Verticalement

1. Sérénité. NF. 2. Exigu. Exclu. 3. Lac. Taler. 4. Cratérisé. 5. Nui. TLS (l'angle Terre Lune Soleil est appelé angle de phase). Sue. 6. Opiacées. 7. Lol. Osons. 8. Orion (ce n'est pas une constellation du Zodiaque mais la Lune peut cependant s'y trouver grâce aux 5° d'inclinaison de son orbite sur l'écliptique). PV. Il. 9. GA (giga années ou milliard d'années). Heaume. 10. Iulius. Bu. 11. Excentrique.

VIE ASSOCIATIVE

Stages dans l'académie de Nice - Pierre Le Fur

L'Observatoire du Pic des Fées situé à Hyères (83) constitue un pôle régional unique pour l'astronomie d'amateur de haut niveau. Mais son activité pédagogique rayonne sur tout le département du Var et apporte une contribution exceptionnelle à la diffusion de l'astronomie auprès des jeunes et des enseignants. Chaque année, le CLEA y organise le stage de formation des professeurs varois.

L'air tiède d'une soirée d'été varoise s'engouffre dans la voiture, baignant les passagers d'une douceur parfumée. Le paysage défile virage après virage ; les palmiers, les villas fleuries et les pins décorent cette route qui grimpe sur le Mont des Oiseaux près de la ville d'Hyères, laissant la grande bleue à quelques encablures plus bas, avec ses derniers wind-surfeurs et ses touristes rôtis. Il est vingt et une heures et comme plusieurs centaines d'estivants, ce soir, nous avons rendez-vous avec les étoiles, là-haut au sommet du Pic des Fées : le festival d'été organisé par la société astronomique hyéroise d'amateurs bat son plein. Comme tous les vendredis de la mi-juillet à la mi-août, les coupoles sont ouvertes, l'amphithéâtre est prêt à accueillir les jeunes et les moins jeunes. Au détour du dernier lacet, l'excitation monte d'un cran lorsqu'on rencontre le premier de ces fous du ciel, siglés « OPF », qui nous guide vers le parking : dans quelques instants, grâce à eux, le ciel sera à nous ! La nuit n'est pas encore tombée et depuis la terrasse supérieure nous admirons les derniers rayons du soleil éclairer la presqu'île de Giens et ses salins alors que les îles d'or, Porquerolles et Port Cros étalent au loin leurs silhouettes sombres se détachant sur la méditerranée.



L'observatoire, l'île de Porquerolles et la presqu'île de Giens. Crédit OPF

Déjà la lune gibbeuse montre son ventre arrondi et délicatement tacheté très au-dessus de l'horizon Est où monte tranquillement l'ombre de la Terre puisque l'astre du jour est parti avec sa barque pour son voyage nocturne. Nul ne peut être insensible à ces instants de communion avec la nature, où l'on a l'impression d'être seul avec le ciel, alors que le site est heureusement envahi d'enfants, de parents ou d'amoureux... La force et la magie des lieux

commencent à opérer. L'ultime chant des cigales retentit pour fêter l'apparition de la première touche étoilée; Véga s'invite à la fête.

Une voix retentit et, comme un appel à la prière, elle nous invite à rejoindre l'amphithéâtre de plein air. Réalisé entièrement par les membres du club, en creusant le rocher de la colline, maçonnant avec goût les estrades et l'écran, il accueille sans difficultés les deux cents spectateurs dans son écrin verdoyant. Toutes lumières éteintes, son plafond infini laisse découvrir le ciel de Provence, sous lequel le conférencier se prépare. Astronome de Marseille, ville proche, ou d'ailleurs, rôdé à la vulgarisation, il fait décoller notre imagination vers les berceaux d'étoiles ou les quasars fulgurants grâce à sa projection vidéo soigneusement construite. Les regards étonnés des enfants comme des plus âgés démontrent, une nouvelle fois, le vieux pouvoir du ciel à élever notre esprit. Puis les questions fusent, interrompues seulement par la minute de silence imposée par le majestueux passage zénithal de la station spatiale internationale dont les astronautes participent à cette fête étoilée, sans le savoir.

Mais déjà le bruit court parmi les plus jeunes que les télescopes tapis dans les coupoles sont entrés en action. Alors certains quittent leur place assise pour chercher dans la douce obscurité lunaire l'une des sept coupoles ouvertes au public. Équipés de miroirs de 200 à 500 mm, il n'y a pas d'astres qui leur échappent. Mais parvenir à l'oculaire nécessite de se glisser sous les entrées surbaissées de ces anciennes coupoles militaires, dons de la Marine Nationale qui réalise également un mécénat scientifique en louant le terrain au Club.

Chaque affût-monture a donc son servent dévoué. Dans ce lieu circulaire et si inhabituel, un membre du club passionné d'observation lunaire commente à loisir la taille, l'origine ou le nom des cratères lunaires. De l'instrument voisin s'élèvent les voix étonnés d'enfants plus excités qu'un Galilée en janvier 1610 : le roi Jupiter leur présente sa cour médicéenne et son drapé de nuages, son œil rougeâtre qui tourne si vite et, pour montrer sa puissance, il fait disparaître la frêle Io dans son

ombre immense. Le spectacle est partout, peut-on tout voir, tout entendre, tout comprendre ? Non, surtout pas. Les bonnes « fées » qui nous guident habilement nous incitent à revenir, à prendre notre temps pour saisir ces fines et subtiles lueurs de nébuleuses planétaires ou goûter à cette lumière provenant du fond des âges, de ces galaxies perdues dans l'immensité du ciel. Que de passion transmise en si peu de temps par le dévouement des membres de l'OPF ! Quelle satisfaction pour eux de voir ses enfants rattrapés par le sommeil, repartir vers le lieu de leurs vacances, la tête pleine de la magie des vrais cioux, toute télévision exclue.

Car l'avenir de la science passe par le rêve et l'envie de savoir, tout autant que par des rencontres mémorables en des lieux rares, comme l'Observatoire du Pic des Fées.

Mais ce festival n'est qu'une des facettes de ce club hors du commun, sa magie opère aussi sur les enseignants varois qui chaque année ont la chance de venir se former ici lors du stage organisé par l'inspection de physique et le CLEA. En effet, je vous ai caché d'autres merveilles auxquelles on accède après une initiation dans l'ambiance cavernicole de la salle d'étude, fraîchement logée sous une terrasse-bunker. On passe des simulations informatiques du ciel avec « Stellarium » ou « Asynx » à la séance de mise en pratique, célébrée par le grand maître du nouveau planétarium: Marcel Portès. Il nous attend dans une coupole réservée à sa moderne lanterne magique, née de la rencontre de l'astronomie et de l'informatique. Les constellations défilent, les planètes errent, la Lune grossit, s'amincit et danse à l'infini. Se repérer dans le ciel devient un jeu. On termine l'heure par une plongée dans le temps, celui où les constellations se dessinaient comme autant de légendes.

Le retour à la lumière du midi nous annonce la suite du programme de formation : le Soleil sera notre objet d'étude.

En effet, nous apprenons à repérer les taches solaires avec différents moyens: comme le faisait Galilée par projection, ou avec un solarscope et même par photographie

L'exploitation quantitative n'est pas oubliée (période de rotation, effet différentiel), et le lien avec les clichés de la sonde SOHO nous conforte dans l'analyse des détails observés; comme l'ombre et la pénombre des taches solaires, leurs positions par rapport aux facules et autres protubérances qui apparaissent en rose-clair dans les images filtrées en H α que nous présentent Henry Gourmelen et Raymond Leclerq.



Les stagiaires en pleine action avec le télescope de 100 mm (crédit photo : Sarah Galvez, stagiaire 2012)

Puis Claude Legat nous conduit jusqu'au magnifique cadran solaire, avec lequel on peut aborder concrètement le mouvement apparent du Soleil dans le ciel, après l'avoir étudié avec « Asynx » ou « Stellarium »...



Chacun attend son tour pour manipuler le « Coronado » et admirer les protubérances solaires (crédit photo : Sarah Galvez, stagiaire 2012)

Ainsi va ce temps de formation pour les professeurs, qui solliciteront de nouveau les membres les plus actifs du club, mais cette fois avec leurs classes, en visite au Pic des Fées sur le Mont des Oiseaux ou directement dans leur établissement pour une opération de type « observatoire à l'école ». En définitive, le lien entre les enseignants et les astronomes amateurs chevronnés profite, comme il se doit, aux élèves.

Chaque année le président du club, Xavier Henry, vous invitera à venir partager leur passion de l'astronomie lors du festival d'été, ou au cours d'une formation académique CLEA.

Site de l'OPF : www.astrosurf.com/opf

N.B. : l'observatoire est agréé par l'Éducation Nationale.

Remerciements à Sarah Galvez pour les photos et à toute l'équipe de l'OPF pour son extraordinaire disponibilité. ■

École d'été du CLEA : une semaine « au plus près des étoiles »

Le stage d'astronomie proposé par le CLEA du 17 au 24 août a atteint des sommets de convivialité au centre d'oxygénation du Col Bayard situé sur les hauteurs de Gap dans les Hautes-Alpes à 1200 m d'altitude. De nombreux aspects se rapportant à l'astronomie ont été abordés par des astronomes professionnels et des animateurs chevronnés, tous bénévoles.

Dès sa création en 1977, le CLEA a proposé une université d'été à destination de toutes les personnes curieuses d'approfondir leurs connaissances dans ce vaste domaine qu'est l'astronomie, « mère de toutes les sciences qui n'en finit pas de surprendre et de susciter de nombreuses interrogations ». Depuis 1988, les activités se déroulent dans le cadre d'une école estivale au centre d'oxygénation du col Bayard, lieu réputé pour la pratique du golf et désormais celle de l'astronomie !

Une quarantaine de stagiaires et animateurs venus de toute la France, mais également de Suisse, ont activement participé à cette école. Un échange fructueux entre personnes venant d'horizons différents s'est très rapidement établi, instaurant un état d'esprit profitable à tous. Une balade matinale facultative, autour du terrain de golf, débutait la journée. De succulents repas gastronomiques ont permis aux intervenants et aux stagiaires de garder un rythme conséquent.

De nombreux ateliers, passionnants et intéressants sont venus illustrer, compléter de manière pratique les cours du matin. Les notions de bases ont permis d'aborder différents aspects de l'astronomie, son histoire, l'évolution des conceptions de l'Univers en fonction des civilisations, les informations spectroscopiques déduites de la décomposition de la lumière messagère des astres. Mais également : les mesures de distances depuis les planètes du système solaire jusqu'aux astres les plus lointains, « tout » sur les galaxies, les niveaux d'énergie des atomes, la vie et la mort des étoiles, le principe de fonctionnement des instruments d'optique...

Actualité spatiale oblige, une belle conférence a valorisé les enjeux de l'envoi du robot *Curiosity* sur la

planète Mars et un exposé portait sur l'utilisation d'un instrument pour explorer le sol martien et nous avons pu voir les premières images transmises par le robot. Quelle chance ! Les stagiaires ont été initiés à la détection des exo-planètes et au phénomène des aurores boréales, conséquences esthétiques du vent solaire, expérience à l'appui ! Les ateliers ont combiné réalisation de montures équatoriales, maquettes, utilisation de l'informatique pour l'exploitation des données, logiciels stellaires, construction d'appareils de mesures des angles. Carte du ciel mobile, mythologie, exploitation de relevés d'ombres, calendriers, bande du zodiaque, phases lunaires et vénusiennes, satellites joviens n'ont pratiquement plus aucun secret pour les participants !

Un planétarium mobile et gonflable permettait de comprendre les noms donnés à ces regroupements d'étoiles, de les repérer plus facilement avant pointages dans le ciel.

Certains stagiaires sont allés arpenter le terrain de golf à côté du centre pour y mesurer des angles afin d'en déduire par triangulation les dimensions du pré ainsi que la circonférence terrestre, à l'instar des aventuriers « du mètre » qui sont allés mesurer la longueur du méridien terrestre après la Révolution française, grandeur qui a servi de base à la définition du « mètre-étalon ».

Au cours de la sortie d'une journée à Cadarache, les participants ont visité l'institut de recherche sur la fusion par confinement magnétique « Tore-Supra » détenant le record du monde de durée de confinement du plasma (6 min 30 s), ainsi que le chantier « ITER », réacteur expérimental destiné à démontrer les faisabilités scientifiques et techniques de la fusion thermonucléaire par confinement magnétique.

Les activités nocturnes ont permis d'utiliser télescopes et lunettes astronomiques pour observer notamment les joyaux du ciel que sont les galaxies, amas globulaires et autres nébuleuses planétaires. De jour, comme de nuit, la devise de certains cadrans solaires était plus que jamais d'actualité : « FUGIT HORA CARPE DIEM », la vie fuit, profite de l'instant présent !

Lionel Muller ■



Réalisation de parapluies-constellations

un exposé sur les instruments

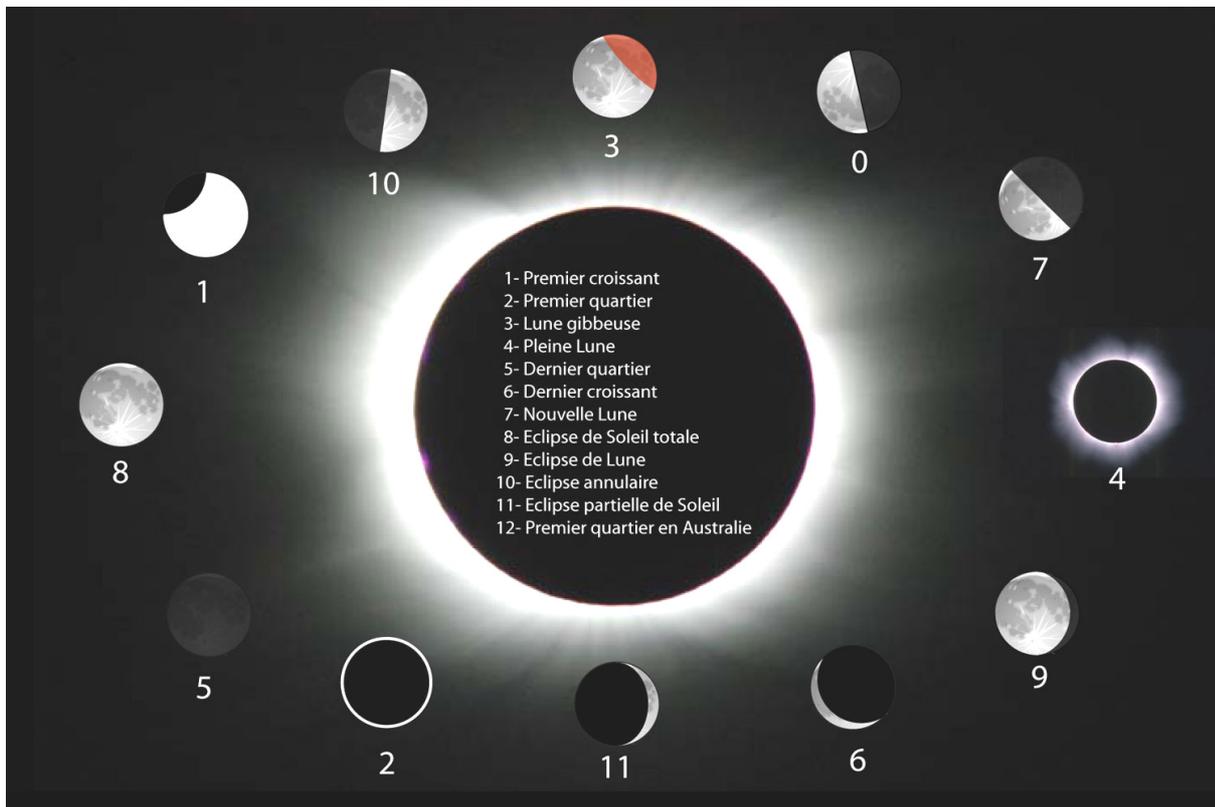
spectre du Soleil (en visant un nuage)

École d'Été d'Astronomie du CLEA – Gap 2012 Le groupe (incomplet !)



Phases et éclipses – Jean-Luc Fouquet

Retrouvez-les, en attribuant l'une des légendes (du centre) à chacun des dessins



Et voilà les solutions : (vous trouverez d'autres jeux sur la Lune dans le numéro de décembre)

0- Premier quartier en Australie (la Lune est vue dans l'autre sens dans l'hémisphère sud, on distingue la mer des Crises). 1- Eclipsé partielle de Soleil (la Lune qui a pratiquement le même diamètre apparent que le Soleil se découpe sur celui-ci). 2- Eclipsé annulaire de Soleil. 3- Eclipsé de Lune (la partie orangée simule l'ombre de la Terre sur la Lune, lors de l'éclipsé totale la Lune est visible par la lumière du Soleil réfractée par l'atmosphère terrestre). 4- Eclipsé totale de Soleil (on voit la couronne solaire). 5- Nouvelle Lune. 6- Dernier Croissant. 7- Dernier Croissant. 8- Dernier Quartier. 9- Lune gibbeuse (photo prise après la pleine Lune). 10- Premier quartier. 11- Premier quartier. 12- Premier quartier.

Écoles d'Été d'Astronomie



Vous souhaitez débiter en astronomie ?

Vous souhaitez vous perfectionner ?

Vous avez le projet d'animer un club ?

Venez participer à une école d'été d'astronomie, au col Bayard, à 1 200 m d'altitude, dans un cadre prestigieux.



Des exposés accessibles à tous



Des ateliers pratiques et des observations

Toutes les activités sont encadrées par des astronomes professionnels et des animateurs chevronnés.

Renseignements sur le site du CLEA

Voir la vidéo à l'adresse :

accs.ens-lyon.fr/clea/aLaUne/EEA-clea

Les productions du CLEA ⁽¹⁾

En plus du bulletin de liaison entre les abonnés que sont les Cahiers Clairaut, le CLEA a réalisé diverses productions.

Fruit d'expérimentations, d'échanges, de mises au point et de réflexions pédagogiques d'astronomes et d'enseignants d'écoles, de collèges, de lycées, ces productions se présentent sous différentes formes :

Fiches pédagogiques

Ce sont des hors série des Cahiers Clairaut conçus par le Groupe de Recherche Pédagogique du CLEA : astronomie à l'école, la Lune, gravitation et lumière, mathématique et astronomie, ...

Fascicules thématiques de la formation des maîtres, en astronomie

Repérage dans l'espace et le temps, le mouvement des astres, la lumière messagère des astres, vie et mort des étoiles, univers extragalactique et cosmologique, ...

Matériel

Filtres colorés et réseaux de diffraction

DVD

Les archives du CLEA de 1978 à 2006 (Cahiers Clairaut et Écoles d'Été d'Astronomie)

Le formulaire de commande est sur le site.

(1) vente aux adhérents uniquement

Planétarium

Il est possible également de louer le planétarium gonflable (starlab) du CLEA. Cette année 2012, il sera en Région Midi-Pyrénées.(uniquement pour le planétarium contact : jean.a.ripert@wanadoo.fr)

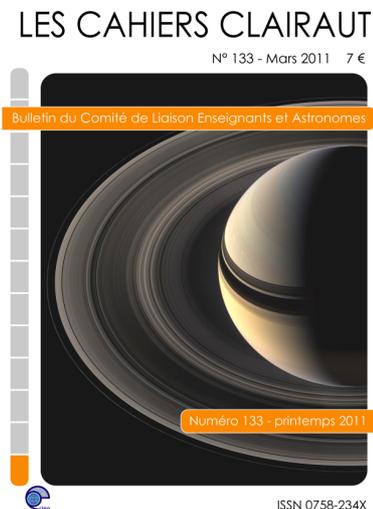
Le site internet

Une information toujours actualisée

www.clea-astro.eu



LES CAHIERS CLAIRAUT



Publiés quatre fois par an, aux équinoxes et aux solstices, les Cahiers Clairaut offrent des rubriques très variées:

Articles de fond
Réflexions
Reportages
Textes : extraits, citations, analyses
Pédagogie de la maternelle au supérieur
TP et exercices
Curiosités
Histoire de l'astronomie
Réalizations d'instruments et de maquettes
Observations
Informatique
Les Potins de la Voie Lactée

COMMENT NOUS JOINDRE ?

Informations générales :

www.clea-astro.eu

OU

www.ac-nice.fr/clea

Siège Social :

CLEA, c/o CFEED
5, rue Thomas Mann
case courrier 7078
75205 PARIS Cedex

École d'Été d'Astronomie :

daniele.imbault@cea.fr

Cahiers Clairaut :

larcher2@wanadoo.fr

Ventes des productions :

www.clea-astro.eu

Site internet :

berthomi@ac-nice.fr

charles-henri.eyraud@ens-lyon.fr

Adhésion / Abonnement :

Adhésion CLEA pour 2011 :	5 €
Abonnement CC pour 2011 :	25 €
Adhésion + abonnement CC :	30 €
Adhésion + abonnement CC + abonnement numérique :	35 €

Chèque à l'ordre du CLEA, à envoyer à :

Roseline Jamet
83, rue Pierre Curie
33140 VILLENAVE D'ORNON

Directrice de la Publication : Cécile Ferrari
Rédacteur de publication : Christian Larcher
Imprimerie France Quercy 46090 MERCUÈS

Premier dépôt légal : 1er trimestre 1979

Numéro CPPAP : 0315 G 89368

Prix au numéro : 7 €

Revue trimestrielle : numéro 139, septembre 2012