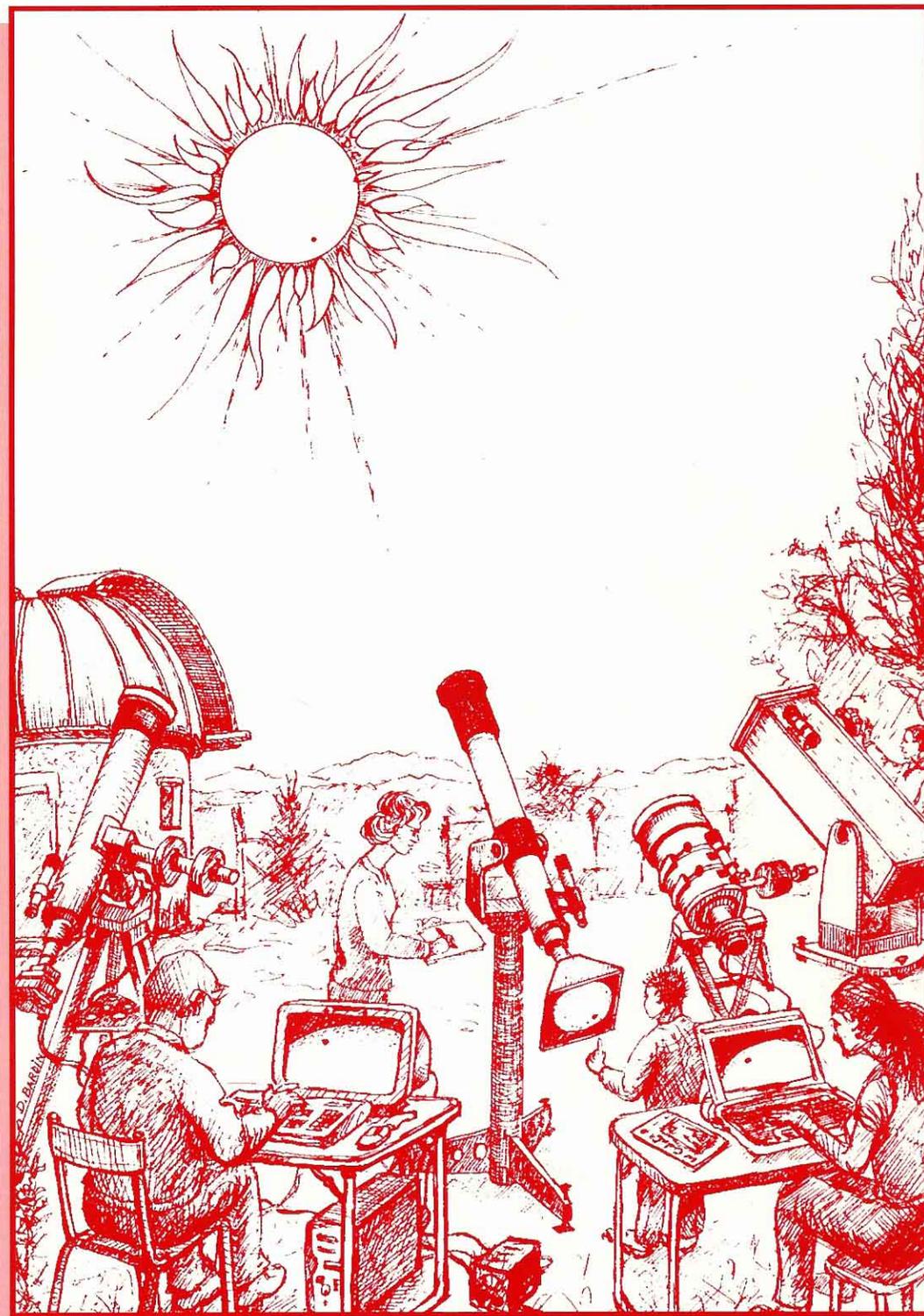


Bulletin du comité de liaison enseignants et astronomes

# Cahier Clairaut



numéro 107 - AUTOMNE 2004

ISSN 0758-234X

# Comité de liaison enseignants 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 primaire, du collège et du lycée et, de manière générale, à tous les formateurs. On s'efforce d'y conjuguer l'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. L'adresse est la suivante : C-L-E-A@yahoogroupes.fr.



Pour toute information s'adresser au siège du CLEA :

Laboratoire d'Astronomie, bât. 470

Université Paris Sud 91405 Orsay cedex

Tél./fax : 01 69 15 63 80

Adresse électronique :

CLEA : [clea.astro@astro.u-psud.fr](mailto:clea.astro@astro.u-psud.fr)

Secrétaire : [jean.a.ripert@wanadoo.fr](mailto:jean.a.ripert@wanadoo.fr)

Le CLEA est présent sur internet à l'adresse :

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

## Bureau du CLEA pour 2004

### Présidents d'honneurs

Lucienne Gouguenheim,

Jean-Claude Pecker

Evry Schatzman

Gilbert Walusinski

### Président

Georges Paturel

### Trésorière

Béatrice Sandré

### Trésorier Adjoint

Jacky Dupré

### Rédacteurs des Cahiers

Georges Paturel

Chantal Petit

### Secrétaire

Jean Ripert

### Secrétaire Adjointe

Cécile Ferrari

### Responsable du site web

Francis Berthomieu

## Comité de rédaction

### des Cahiers Clairaut

Daniel Bardin

Francis Berthomieu

Michel Bobin

Lucette Bottinelli

Pierre Causeret

Frédéric Dahringer

Jacky Dupré

Charles-Henri Eyraud

Jean-Luc Fouquet

Lucienne Gouguenheim

Marie-Agnès Lahellec

Christian Larcher

Colette Le Lay

Lucette Mayer

Philippe Merlin

Georges Paturel

Jean Ripert

Josée Sert

Jean-Noël Terry

Daniel Toussaint

# Les Cahiers Clairaut

## Automne 2004 n° 107

### EDITORIAL

Dans ce cahier, nous poursuivons le dossier sur le "Transit de Vénus". Cette opération a été un succès. Les déterminations de la distance Terre-Soleil que nous déduisons sont d'une excellente précision (5%) et nous devons féliciter nos amis de La Réunion dont la contribution a été tout-à-fait essentielle. Un "Travail Pratique", prêt à l'emploi, sera donné dans le prochain Cahier Clairaut, en conclusion de ce dossier.

Nous présentons aussi dans ce Cahier un deuxième dossier sur la mesure du diamètre de la Terre. Cette expérience se prête bien à une utilisation en classe. Notre ami C. Larcher a même répété l'expérience sur les lieux historiques où Eratosthène fit la première mesure il y a plus de vingt siècles, et F. Berthomieu nous pose la question pertinente : qu'aurait trouvé Eratosthène si la Terre avait été plate ?

Enfin, dans le troisième cours élémentaire, bref, mais plus difficile, nous abordons l'étude quantitative des mouvements des planètes. Une occasion de découvrir les lois fondamentales de la mécanique de Newton.

### La Rédaction

patu@obs.univ-lyon1.fr

### Cours

Cours élémentaire d'astronomie et d'astrophysique - III : mécanique des mouvements des astres.

G. Paturel p. 2

### Histoire

Galilée philosophe

P. Lerich p. 5

### Travaux Pratiques

Terminateur de la Lune

J. Ripert p. 5

### DOSSIER : Mesure du rayon de la Terre

Le premier jour de l'été à la Bibliotheca Alexandrina

C. Larcher p. 12

Calcul du rayon de la Terre en classe

S. Latouche p. 14

Le retour d'Eratosthène

F. Berthomieu p.17

### DOSSIER: Transit de Vénus

Le CLEA et le passage de Vénus.

P. Causeret, G. Dodray, Th. Derolez p. 19

La distance Terre-Soleil à partir des données du CLEA

G. Paturel p. 24

La distance Terre-Soleil entre Versailles et La Réunion

O. Abderrazik, J. Barral, C. Leclerc, B. Sandré, L. Tonnelier p. 27

Un peu d'histoire : II - Les observations du transit de Vénus de 1761/1769

J.N. Terry p. 32

### RUBRIQUES FIXES

- *Remue-méninges*
- *Lectures pour la Marquise*
- *La vie associative*
- *Courrier des lecteurs*

## Cours élémentaire d'astronomie et d'astrophysique: III- mécanique des mouvements des astres

Georges Paturel, Observatoire de Lyon

**Résumé:** *Dans ce cours, nous montrons comment les lois empiriques qui régissent le mouvement des astres, les lois de Kepler, ont été retrouvées sur la base d'une nouvelle loi, celle de l'attraction universelle, formulée par Newton.*

**Mots-clefs :** COURS - LOI - MECANIQUE

### Introduction

Dans les cours précédents, nous avons vu comment s'est lentement élaborée la certitude, d'une part que la Terre tournait sur elle-même en un jour, et d'autre part qu'elle avait un mouvement de révolution de 365,25 jours autour du Soleil. Nous avons saisi l'importance primordiale du principe d'inertie qui permettait de comprendre pourquoi un corps céleste, comme une planète, pouvait se mouvoir librement dans l'espace sans avoir besoin d'une force pour maintenir sa vitesse. Cela n'expliquait pas pourquoi la Terre, par exemple, tournait autour du Soleil ou pourquoi la Lune tournait autour de la Terre. Cela n'expliquait pas non plus quantitativement ces mouvements : les périodes de révolution des planètes étaient-elles reliées à d'autres grandeurs ? Y avait-il dans cette merveilleuse mécanique céleste des lois précises ? C'est ce que nous allons découvrir ensemble dans ce troisième petit cours élémentaire.

Comme nous l'avions dit dans notre introduction générale, nous ne ferons pas de calculs compliqués, mais juste un peu d'arithmétique. Nous rappellerons les deux ou trois connaissances nécessaires dans des encadrés. Nous espérons ainsi que les personnes les plus réfractaires aux mathématiques pourront néanmoins suivre ces calculs et découvrir ainsi, au détour d'une explication, la magie de la compréhension quantitative.

### Les données d'observation

Il est très difficile de suivre chronologiquement l'évolution des idées, car à un même instant cohabitent des idées qui ne résisteront pas au couteau de l'expérience et celles qui s'imposeront comme "justes". Ainsi, pour l'histoire qui nous occupe, la chose est assez flagrante. Kepler (1571-1630), à la suite de Copernic (1473-1543) et grâce aux excellentes mesures de son maître Tycho Brahé, avait élaboré ses trois lois expérimentales, que nous allons étudier. Et pourtant, trois ans après la mort de Kepler dont les lois auraient dû prouver la justesse du système héliocentrique, Galilée (1564-1642), le père de la physique, ce philosophe génial (cf. l'article de P. Lerich ci-après), avait dû renoncer publiquement en 1633 au système héliocentrique. La science progresse rarement en ligne droite !

Kepler élaborait trois lois sur la base des observations : **La première**, selon laquelle les planètes décrivaient des ellipses (et non pas des cercles) dans leur mouvement de révolution ; la distance d'une planète au Soleil variait donc au cours de la révolution. **La deuxième**, la loi des aires, qui établissait que la distance de la planète au Soleil balayait toujours la même surface en des temps égaux et ce pour n'importe quel point de l'orbite ; comme cette distance variait, il s'ensuivait que la vitesse orbitale d'une planète n'était pas constante. Enfin **la troisième loi**, celle qui va nous intéresser plus particulièrement et qui exprime la façon dont la période de révolution,  $P$ , est liée à la distance

maximale,  $R$ , séparant la planète et le Soleil. Ecrivons cette loi mathématiquement :

$$\frac{R^3}{P^2} = \text{constante}$$

Nous verrons plus tard que ces lois se retrouvent dans le mouvement de l'électron autour du noyau atomique et, mieux, nous comprendrons pourquoi. Mais n'anticipons pas sur la physique atomique.

Pour aller plus loin, en toute simplicité, nous supposons que les trajectoires des planètes sont des cercles au lieu d'ellipses. Sans cela, il aurait fallu des développements mathématiques plus fastidieux. De ce fait, nous ne considérerons pas les deux premières lois de Kepler, qui justement posent que les trajectoires ne sont pas des cercles. Rassurez-vous cependant. L'écart à la circularité est très faible.

### Et Newton vint...

Newton a compris un peu plus de choses que Galilée, mais il était conscient d'avoir vu plus loin pour être "monté sur les épaules de géants".

Après Galilée, il savait qu'une force n'était pas nécessaire pour entretenir le mouvement, mais qu'elle modifiait le mouvement. Plus précisément, une force fait changer la vitesse. En physique, un changement de vitesse s'appelle une accélération. Si la force s'exerce dans le même sens que la vitesse, la vitesse augmente; si elle s'exerce dans une direction opposée, la vitesse diminue (on parle encore d'accélération, mais négative). Newton a donc écrit sa loi sous la forme suivante:

$$F = M.a$$

$F$  est la force<sup>1</sup>,  $a$  est l'accélération (c'est-à-dire le changement de vitesse pendant un intervalle de temps donné),  $M$  est une constante de proportionnalité qu'on appelle la masse. On sait d'expérience que plus un corps est "lourd" plus l'effort doit être grand pour le mettre en mouvement. Donc  $M$  sera sans doute proportionnel au poids. En fait, le poids  $P$  peut être vu comme une force attirant un corps vers la Terre. La même loi s'écrit ainsi:

$$P = M.g$$

<sup>1</sup> On comprend intuitivement ce qu'est une force par l'effort que l'on fait. Une force possède les mêmes caractéristiques qu'un objet mathématique que l'on nomme un vecteur : direction, sens et longueur (ou norme). Les vecteurs seront notés en caractères gras.

Où  $g$  est une accélération produite par la Terre. Les forces et les poids se mesurent en une unité qu'on appelle "Newton" (N en abrégé), les masses se mesurent en "kilogramme" (kg en abrégé) et les accélérations se mesurent en mètre par seconde et par seconde, puisqu'elles mesurent combien de mètres par seconde un corps va gagner, ou perdre, par seconde.

D'où vient cette accélération  $g$  produite par la Terre? Elle doit résulter d'une force entre le corps considéré et la Terre, puisque nous savons que les accélérations sont produites par des forces. Or ce corps peut être un morceau de la Terre elle-même. Si par la pensée je découpe un morceau de Terre de plus en plus gros pour constituer le corps, il arrivera un moment où le corps attiré sera plus gros que la Terre et toujours de même nature. Va-t-il attirer ce qui reste de la Terre ?



Newton a compris que l'attraction était réciproque. Cette idée lui est soi-disant venue en voyant tomber une pomme. La Terre attirait la pomme, mais la pomme attirait la Terre. Cette réciprocity des attractions a été traduite en termes mathématiques.

$$F_{pT} = -F_{Tp}$$

Cette expression signifie que l'attraction de la Terre sur la pomme est de même direction, de même norme que l'attraction de la pomme sur la Terre mais de sens opposé. Mais comment s'exprime cette force ?

La mesure de cette force (ce qu'on appelle la norme de la force) est:

$$F_{pT} = G \frac{M_T M_p}{d^2}$$

$G$  est une constante de proportionnalité et  $d$  la distance qui sépare les deux corps qui s'attirent. Si vous avez lu le Cahier Clairaut précédent (CC105), vous savez qu'il est possible de mesurer  $G$  avec la balance de

Cavendish. La valeur de  $G$  n'était pas connue à l'époque de Newton. On peut se demander d'ailleurs, pourquoi Newton n'a pas réalisé cette expérience lui-même. La raison tient sans doute au fait que la balance de torsion n'était pas encore inventée. C'est Coulomb qui imagina cet instrument d'une sensibilité extrême et surtout exempt de frottement. Il n'avait pas non plus de cassette "audio" pour constituer le ruban de suspension comme nous l'avons fait.

Cette loi n'a pas été démontrée par Newton. Il l'a proposée et, comme les conséquences qu'il en a tirées s'accordaient avec les observations, la loi s'est trouvée vérifiée. Les astronomes comme Clairaut ont parfois douté de la justesse de cette loi. Mais finalement, la loi s'est révélée juste du moins jusqu'à l'avènement de la théorie de la Relativité Générale dont nous reparlerons en temps voulu.

Envisageons le cas où la force s'applique au corps dans une direction perpendiculaire à sa vitesse. La vitesse ne changera pas de valeur (de module) mais elle changera d'orientation. Pour l'instant nous avons presque ce qu'il nous faut pour interpréter les mouvements.

### Force transversale

Nous allons donner une relation très utile, qui va nous permettre de retrouver de manière simple la troisième loi de Kepler. Cette relation exprime, de manière générale, l'accélération que subit une masse en mouvement sous l'effet d'une force transversale (perpendiculaire à la direction de sa vitesse). L'expression de cette accélération est :  $a=V^2/R$ . La démonstration simplifiée est donnée l'encadré ci-dessous.

Si cette accélération est produite par une masse  $M$ , qui agit sur  $m$  par une force de Newton  $F=GMm/R^2$ , que va-t-il se passer ? Cette force va produire sur  $m$  une accélération  $GM/R^2$ , donc  $GM/R^2 = V^2/R$ , soit en simplifiant :

$$GM/R = V^2.$$

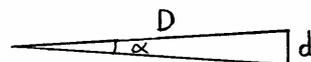
Si  $V$  est constant,  $R$  sera constant puisque  $G$  et  $M$  le sont. La masse  $m$  continuera perpétuellement à tourner autour de  $M$ , comme la Terre autour du Soleil, comme la Lune autour de la Terre.

Encore un petit effort et nous y sommes ! Si la masse  $m$  tourne autour de  $M$  à la vitesse  $V$ , le temps pour faire un tour, ce qu'on appelle la période de révolution  $P$ , est simplement  $P=2\pi R/V$ . On tire de là que  $V^2=4\pi^2 R^2/P^2$ , qui, reporté dans notre précédente relation, donne:

$$\frac{R^3}{P^2} = \frac{GM}{4\pi^2}$$

### Encadré 1 : Accélération produite par une force transversale modifiant la direction d'un corps en mouvement

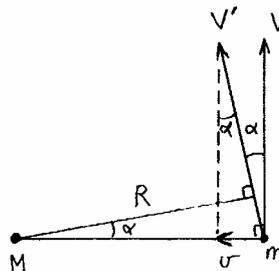
Nous allons appliquer une relation déjà signalée comme importante dans le cours précédent :  $d/D=\alpha$  (en radians) si  $\alpha$  est petit.



Imaginons un corps de masse  $m$  se déplaçant à la vitesse  $V$  en ligne droite. Faisons agir sur ce corps une force perpendiculaire à la direction de sa vitesse. La vitesse initiale va changer de direction pour devenir  $V'$ . Une petite composante  $v$  va donc apparaître, dirigée vers le centre  $M$ , point de concours des perpendiculaires aux directions de  $V$  et  $V'$ . L'accélération prise par  $m$  en direction de  $M$  est, par définition de l'accélération :  $a=v/t$ ,  $t$  étant le temps supposé très court, pendant lequel l'action a lieu. En considérant le graphique ci-dessous, on voit que  $v/V=\alpha$ , c'est-à-dire  $\alpha=v t/V$ . Mais  $m$  se sera déplacé d'une longueur  $V t$  sur un arc de rayon  $R$ . Donc  $\alpha=V t/R$ . En égalisant les deux expressions de  $\alpha$  on trouve l'accélération cherchée :

$$a=V^2/R.$$

Notons que  $t$  peut être choisi aussi petit que l'on veut pour que l'approximation soit correcte, puisqu'il n'intervient pas.



C'est bien la troisième loi de Kepler. Newton est ainsi parvenu, non seulement à retrouver la loi, mais à préciser l'expression de la constante :  $GM/4\pi^2$ . Certes Newton ne connaissait pas encore la valeur numérique de  $G$  comme nous l'avons dit plus haut, mais il venait de comprendre que cette constante faisait intervenir la masse du corps attirant (masse du Soleil quand on considère les planètes, ou masse de la Terre quand on considère la Lune).

Nous n'avons pas pris en compte le fait que les trajectoires sont des ellipses et que la vitesse le long de ces trajectoires n'est pas rigoureusement constante. Nous verrons dans le prochain cours que les conséquences pratiques sont pourtant sensibles.

■

## Galilée philosophe

Pierre LERICH

**Résumé :** *Publié récemment dans une collection de poche (« Points–sciences », le Seuil), le Dialogue sur les deux grands systèmes du monde, de Galilée (1632), rend accessible, pour la première fois en français, ce chef-d’œuvre de science, de polémique et de philosophie. Galilée lui-même attachait beaucoup d’importance à ce titre de « philosophe ».*

**Mots-clefs :** HISTOIRE, PHILOSOPHIE, HELIOCENTRISME.

Tous les savants sont amenés, un jour ou l’autre, à « philosopher », ne serait-ce que pour évaluer les conditions et les limites de leur travail. Plus encore que les autres fondateurs de l’astronomie, Galilée a beaucoup réfléchi sur la science en général et l’astronomie en particulier. Dans le Dialogue sur les deux grands systèmes du monde, il distingue les « astronomes-calculateurs » et les « astronomes-philosophes », titre qu’il revendique. Les premiers se contentent de calculer les positions des planètes et le système de Ptolémée leur convient malgré l’extrême inélégance et le caractère peu convaincant de cet échafaudage d’épicycles et d’excentriques. Les positions calculées sont acceptables (pour l’époque), pourquoi aller chercher plus loin ? Les « astronomes-philosophes » ne sont pas satisfaits de cette situation et quand ils découvrent le système de Copernic, ils ont le sentiment de découvrir enfin le vrai monde, ordonné, harmonieux, simple.

« Se moquer de la philosophie, c’est vraiment philosopher » (Pascal). Galilée ne s’en prive pas, revenant sans cesse à la charge contre le plus grand obstacle au progrès, l’incontournable Aristote. La Terre immobile au centre de l’univers tournant, c’est le système d’Aristote-Ptolémée, dont la principale « preuve » est que, si la terre tournait, une pierre lâchée depuis le sommet d’une tour, ne tomberait pas au pied de la tour, mais à une certaine distance. Comme on ne constate pas ce phénomène, c’est que la Terre ne tourne pas et que, par conséquent, c’est le ciel qui tourne. La réfutation de cette prétendue preuve occupe toute la partie centrale du Dialogue et constitue

l’apport fondamental de Galilée à la science du mouvement et, par conséquent, à l’astronomie. Mais ce n’est pas la seule idée d’Aristote que Galilée conteste ironiquement. On peut citer aussi l’opposition entre mouvement « naturel » et mouvement « violent » qui ne tient pas debout, ou l’affirmation arbitraire du caractère inaltérable et incorruptible des astres. Comment ce tissu d’idées fausses, appuyées sur des démonstrations inconsistantes, a-t-il pu s’imposer pendant des siècles ? Pascal éprouvera le même étonnement à propos du dogme de la prétendue « horreur du vide », admis lui aussi depuis des siècles. Pourquoi l’erreur triomphe-t-elle si souvent de la vérité ?

Apprendre ses formules et les appliquer, c’est (hélas !) l’image la plus habituelle des études scientifiques. A notre époque, les formules en question sont parfaitement démontrées et incontestables. Pendant tout le Moyen-Âge, on enseignait plutôt des « principes », qui étaient bien souvent faux comme, justement, la plupart de ceux d’Aristote. Mais qui oserait contester l’autorité du maître ? Comme il y a des « bulles financières », on peut aussi parler de « bulles intellectuelles », qui finissent par éclater un jour, parfois après des siècles de domination sans partage. La bulle « Aristote » a duré presque vingt siècles : c’est sans doute un record. Les hommes sont ainsi faits, ils sont avant tout paresseux et conformistes. Galilée se moque abondamment du « troupeau » qui, devant tout problème scientifique, consulte Aristote : « quand ils se sont assurés du vrai sens du texte, ils ne désirent plus rien et n’estiment pas possible d’en savoir

plus.» Ce sont les « esclaves d'Aristote », dont certains refusent même de regarder dans la lunette, de peur d'y voir quelque chose qui ne serait pas dans Aristote. Bien sûr, celui-ci n'est coupable de rien. Il est même, malgré ses erreurs manifestes, l'un des grands fondateurs de la science, et Galilée en est bien conscient. C'est plutôt la foule innombrable des perroquets qui est à blâmer, ainsi que tous ceux qui préfèrent les livres à l'expérience directe et personnelle.

Pourtant, l'expérience ne doit pas non plus être considérée naïvement comme la source de toute vérité. Par exemple, l'expérience de la pierre lâchée du haut d'une tour a été faite mille fois au cours des siècles, volontairement ou non, mais elle a toujours été mal interprétée quand on a cru y trouver la preuve de l'immobilité de la Terre. De même pour le boulet de canon qui, avec une même charge de poudre, a la même portée vers l'est ou vers l'ouest. Cette observation ne prouve rien non plus sur le mouvement de la Terre. Il faut se méfier des fausses évidences qui résultent parfois des expériences. Galilée admire ceux qui ont « par la vivacité de leur intelligence, exercé une contrainte sur leurs propres sens et fait prévaloir ce que le raisonnement leur dictait sur ce que les expériences sensibles leur montraient très clairement en sens contraire. (...) Mon admiration est sans limite face à un Aristarque et à un Copernic chez qui la raison a pu faire une telle violence aux sens jusqu'à devenir, malgré les sens, maîtresse de leur croyance. » Certes, on fait de la science avec ses mains (pédagogie de la "main à la pâte") mais plus encore avec son cerveau. Des mains actives ne compensent pas un cerveau paresseux.

Philosopher sur les sciences, c'est aussi s'interroger sur l'enseignement. Après 18 ans d'enseignement à l'Université de Padoue, Galilée en avait une longue expérience personnelle qui apparaît dans le Dialogue. Comme Platon, Montaigne, Descartes, Leibniz et bien d'autres, il pense qu'on n'introduit pas la vérité dans un esprit comme on verserait avec un entonnoir. « Je vous le dis, si par soi-même on ne sait pas la vérité, les autres ne peuvent vous la faire savoir ». Les choses vraies, nécessaires, qui ne peuvent être autrement, « ou bien tout homme ordinaire qui raisonne les sait par lui-même, ou bien il ne les saura jamais ». Le rôle du maître est de conduire l'esprit vers des sujets auxquels il n'avait jamais réfléchi, parfois de donner des noms à des notions qui étaient présentes dans l'esprit, mais à l'état latent, non encore exprimées : « Vous savez la chose et seuls vous manquent les termes ». Ces passages pédagogiques, bien que brefs et dispersés, donnent à penser que Galilée devait être un maître exceptionnel. Il ne

prétend pas pour autant enseigner n'importe quoi à n'importe qui : « J'ai plusieurs fois rencontré des têtes fort dures. Ce que de vous-même vous avez compris d'un seul coup, j'ai eu beau le leur répéter mille fois, je n'ai jamais pu le leur faire saisir » On voit que même Galilée ne pouvait faire de miracle.

Les pouvoirs politiques et religieux peuvent aussi bien protéger les sciences que les persécuter suivant leur intérêt du moment. Ils les protègent pour se donner une image humaniste quand celle-ci peut leur être utile, et les persécutent quand elles dérangent leurs ambitions ou leur tranquillité. Galilée ne se faisait aucune illusion sur ces sujets et on voit bien dans le Dialogue qu'il évite soigneusement tout ce qui pourrait apparaître comme une provocation. La dédicace au grand-duc de Toscane ainsi que l'avertissement « au lecteur avisé » (titre astucieux !) sont des exercices d'hypocrisie qui donnent une idée très fidèle de l'ouvrage dans son ensemble. C'est bien affligeant de voir le grand homme contraint à ruser, essayant tant bien que mal de tromper la vigilance des autorités religieuses et surtout de la redoutable Inquisition. Trente ans seulement avant le Dialogue, Giordano Bruno a été brûlé vif pour hérésie, et justement, parmi une foule d'idées audacieuses, il glorifiait Copernic aux dépens d'Aristote. Il convient donc d'appliquer la maxime de Rabelais, humaniste lui aussi persécuté pour des raisons religieuses un siècle plus tôt : Il faut soutenir son opinion jusqu'au bûcher « exclusivement ». Autrement dit, n'essayons pas d'être des héros. Face à la bêtise menaçante, il faut être prudent et habile. Ici, par la force des choses, la philosophie reste implicite : il faut la lire entre les lignes. L'Eglise interdit d'enseigner la mobilité de la Terre. Qu'à cela ne tienne : Galilée a seulement présenté des arguments à l'appui de cette « hypothèse », toujours équilibrés par des arguments contraires. Si, au total, c'est évidemment l'opinion de Copernic qui prévaut, ce n'est pas la faute de Galilée... La ficelle était un peu grosse et Galilée a perdu son procès devant l'Inquisition. Il a dû reconnaître publiquement son « erreur ». Il ne fut pas emprisonné mais simplement assigné à résidence chez lui dans sa maison de Florence. Il ne pouvait plus rien publier dans aucun pays catholique, mais ne pouvait évidemment pas empêcher les imprimeurs hollandais de diffuser ses ouvrages dans toute l'Europe. (Il s'en réjouissait secrètement mais en public faisait semblant de déplorer cette situation.) De même, dans les années 1970, les œuvres de Soljenitsyne circulaient dans le monde entier, sauf en URSS et dans les pays de l'Est.

Epicure disait que le plus grand plaisir de la vie (et le plus simple) était de discuter entre amis. Dans ce

sens, Galilée était un épicurien convaincu, malgré sa réputation de mauvais caractère, orgueilleux et coléreux. La forme choisie pour le dialogue était celle d'une conversation à trois personnages autour de deux théories. C'était un artifice littéraire destiné à masquer les véritables intentions de Galilée, à rendre plus vivante la confrontation des théories et à permettre de nombreuses digressions qui font tout le charme de l'ouvrage. Mais ce n'est pas seulement un artifice : l'agrément de la conversation entre gens de bonne compagnie est cent fois affirmé dans des termes dont la sincérité ne fait aucun doute. C'est un véritable art de vivre qui est proposé, auquel le décor de Venise apporte un raffinement particulier. Galilée est tout le contraire de Newton, dont l'austérité est restée légendaire. Quand la conversation entre amis porte sur la science, le plaisir est total : « J'ai toujours pris beaucoup de plaisir en ce que j'ai trouvé ; s'y ajoute l'immense agrément que j'éprouve à discuter avec un ami qui comprend et montre du goût pour ces choses... ». Il y a aussi la joie de découvrir ce que d'autres ont cherché vainement comme, par exemple, la mesure de l'accélération. Les philosophes ont écrit des volumes entiers sur le mouvement sans jamais définir avec précision un mouvement accéléré. Bonheur de comprendre, de découvrir, de discuter, de démontrer, d'expérimenter. C'est ce qu'on pourrait appeler une conception épicurienne de la science. On comprend que Galilée n'ait manifesté aucune vocation pour le martyre et l'héroïsme inutile.

Un philosophe digne de ce nom se doit d'épingler un jour ou l'autre les charlatans, alchimistes, astrologues et autres illuminés. Galilée n'y manque pas et son humour trouve là une belle occasion de

s'exercer. Par exemple, il remarque à propos des prédictions des astrologues : « c'est seulement une fois accomplies qu'on les voit si clairement dans le thème astrologique ». Remarque pertinente si on pense que de nos jours, aucun astrologue au monde n'avait prévu les attentats du 11 septembre 2001. Ils sont pourtant des milliers à examiner leurs éphémérides chaque jour. Le talent polémique de Galilée aurait pu s'employer à décortiquer, pièce par pièce, les arguments de ces amateurs de mystères : il n'avait pas son pareil pour pulvériser des arguments astucieux mais faux. Cela aurait cependant nécessité de longs développements bien éloignés de Copernic et d'Aristote. Or, le Dialogue était déjà un gros livre.

Galilée mérite bien le titre d'astronome-philosophe qu'il revendiquait fièrement. Parmi les quatre piliers de l'astronomie que sont Copernic, Galilée, Kepler et Newton, il est sans doute l'homme le plus complet, l'esprit le plus ouvert et la personnalité la plus attachante. C'est lui qu'on aimerait le mieux rencontrer au paradis des astronomes où il se trouve certainement, malgré son indiscipline et son sale caractère.

#### **NOTE :**

La même collection « Points-sciences » au Seuil propose également l'excellent « Galilée » de Ludovico Geymonat, très précis aussi bien sur le plan scientifique que sur le plan historique (notamment sur certains points pas très clairs du procès).

■

Si vous souhaitez contribuer au développement du CLEA, que ce soit comme éditeur adjoint des Cahiers Clairaut ou comme correspondant académique, allez voir la rubrique "la Vie Associative".

Vous pouvez aussi contribuer aux Cahiers Clairaut comme auteur; N'hésitez pas à nous faire part de vos idées, connaissances, expériences pédagogiques ...

# TRAVAUX PRATIQUES

## Position du terminateur de la Lune

Jean Ripert

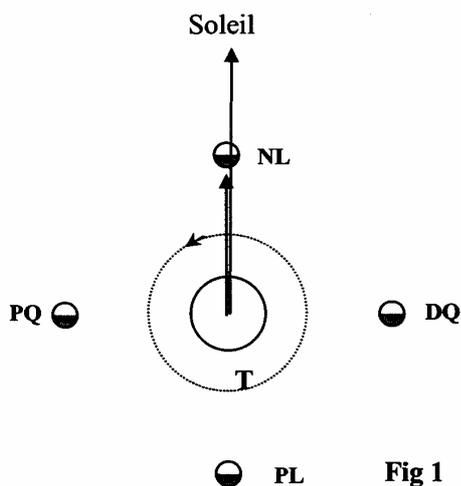
**Résumé :** *Lorsqu'on organise une observation de la Lune avec un groupe d'élèves, ceux-ci posent toujours des questions sur les cratères ou les reliefs qu'ils voient le mieux, c'est-à-dire ceux situés sur le terminateur. Il est donc nécessaire de préparer cette observation et de faire chercher aux élèves la position du terminateur le jour de l'observation. Ils peuvent également se documenter à l'avance sur les caractéristiques des différents reliefs.*

*Le présent article propose de construire géométriquement la position du terminateur à un instant donné.*

**Mots-clefs :** TERMINATEUR, LUNE, OBSERVATION

Lorsqu'on observe la partie éclairée de la Lune, on distingue le limbe (bord du disque lunaire), qui est un demi-cercle, et le terminateur (séparation entre la partie éclairée et la partie dans l'ombre), qui est en général une demi-ellipse, sauf à la Pleine Lune où c'est un demi-cercle (confondu avec le limbe) et aux Quartiers (PQ et DQ) où c'est un segment de droite.

### PRINCIPE



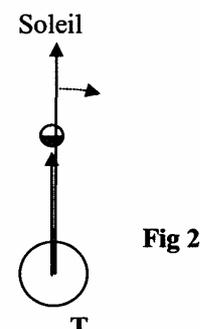
La Lune présente toujours la même face vers la Terre, car son axe de rotation est pratiquement perpendiculaire au plan de son orbite autour de la Terre, et sa période de rotation est égale à sa période sidérale de révolution (27,32 j). Mais du fait que l'axe

de rotation n'est pas parfaitement perpendiculaire au plan de son orbite (il fait un angle de  $6,68^\circ$  avec la perpendiculaire au plan de son orbite), on aperçoit tantôt un peu plus de la région Nord et tantôt un peu plus de la région Sud. C'est la libration en latitude.

De plus, l'orbite de la Lune étant une ellipse (première loi de Kepler), d'après la loi des aires (deuxième loi de Kepler), son mouvement n'est pas uniforme, et donc au cours d'une révolution, on aperçoit tantôt un peu plus du bord Est et tantôt un peu plus du bord Ouest. C'est la libration en longitude.

Dans la construction ci-dessous, on ne tiendra pas compte des librations (phénomènes de faible amplitude).

Au cours d'une lunaison (période synodique de révolution : 29,5 j) la direction Terre – Lune tourne de  $360^\circ$  dans le sens direct par rapport à la direction Terre – Soleil ("direction" au sens de l'astronomie et non de la géométrie).



On observe le même phénomène (même éclairement de la Lune) en faisant tourner la direction Terre - Soleil de  $360^\circ$  dans le sens rétrograde en une lunaison. On admettra la distance Terre - Soleil très grande devant la distance Terre - Lune (Fig.2).

Supposons que l'on veuille observer la Lune quatre jours après la Nouvelle Lune. Le Soleil aura tourné d'un angle  $\alpha$  tel que :

$$\alpha \Rightarrow 4 \text{ j et } 360^\circ \Rightarrow 29,5 \text{ j ; d'où } \alpha = [360 \times 4] / 29,5 = 48,8^\circ.$$

Il est alors possible de (Fig. 3) :

- construire les directions Terre - Lune et Terre - Soleil,
- tracer le terminateur perpendiculaire aux rayons solaires,
- repérer les parties de la Lune éclairées et dans l'ombre (grisées),
- repérer la partie visible depuis la Terre (entre les repères A et B).

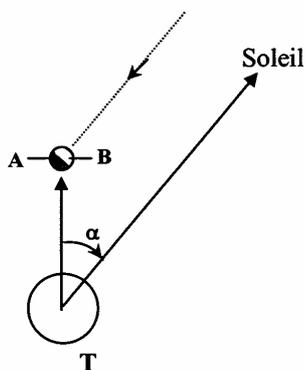


Fig 3

Si on regarde de plus près la Lune (Fig. 4), on constate que :

- $P_N$  est le pôle Nord de la Lune,
- B est sur l'équateur et sur le limbe (partie éclairée visible depuis la Terre)
- le segment  $P_N C$  représente la partie du terminateur visible depuis la Terre.

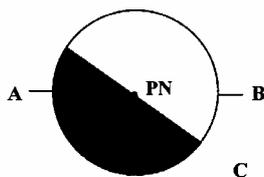


Fig 4

Quand on regarde la Lune depuis la Terre, on n'est pas placé au-dessus du pôle Nord de la Lune, mais pratiquement dans le plan de l'équateur lunaire. Les parallèles sont donc vus pratiquement sous forme de segments de droite.

### Construction

On trace des parallèles centrés sur  $P_N$ . Les points d'intersection ( $T'_1, T'_2 \dots$ ) de ces parallèles avec le terminateur seront projetés sur les parallèles correspondants tels qu'ils sont vus depuis la Terre. On obtient les points  $T_1, T_2 \dots$ .

En joignant ces points, on obtient la trace du terminateur dans l'hémisphère Nord et par symétrie dans l'hémisphère Sud.

Si ce travail a été fait sur un calque, il suffit de placer celui-ci sur une carte de la Lune de même diamètre pour repérer les cratères situés au voisinage du terminateur.

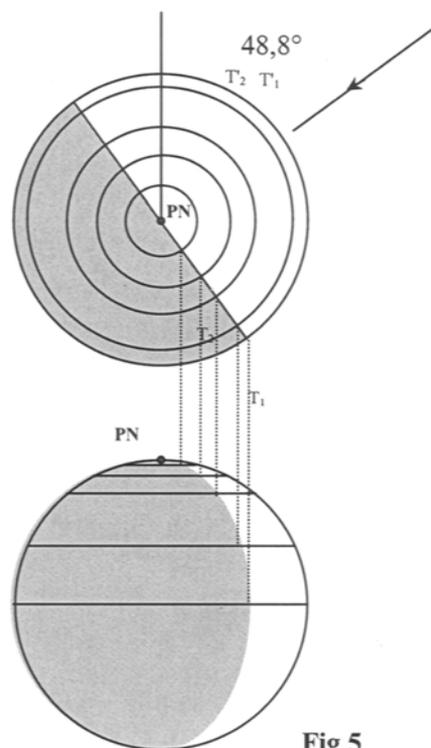


Fig 5

**Exemple** : Détermination du terminateur le 22 août 2004 à 2h 00min heure légale, soit 0h 00min TU. Quel est le temps  $t$  qui s'est écoulé depuis la dernière Nouvelle Lune (le 16 août 2004 à 1h24min TU) ?

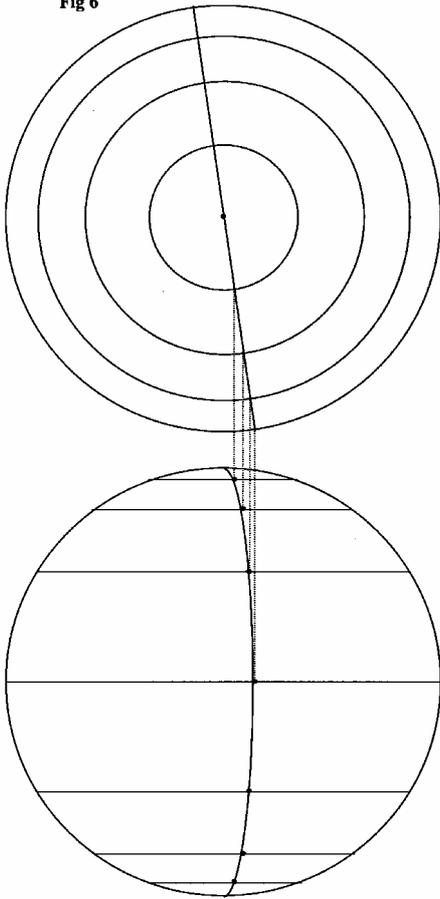
$$T = 5\text{j}22\text{h}36\text{min} = 5,94\text{j}.$$

L'angle  $\alpha$  dont a tourné la direction Terre - Soleil est donc :

$$\alpha = [360 \times 5,94] / 29,5 = 72,5^\circ$$

D'où la construction de la figure 6.

Fig 6



- tracé du terminateur (perpendiculaire aux rayons solaires),
- obtention des points  $T'_1, T'_2 \dots T'_n$ ,
- projection de ces points sur les parallèles correspondants  $\Rightarrow T_1, T_2, \dots T_n$ ,

*Remarque on peut tracer directement le terminateur car il fait un angle  $\alpha$  avec le segment AB.*

Il suffit alors de reproduire la position du terminateur sur un transparent et de placer celui-ci sur la carte de la Lune (Fig. 7).

On constatera que le terminateur passe dans la case 66 de la carte. C'est là que se trouve le cratère ... CLAIRAUT.

*Citons l'éditeur de la carte : « Alexis Clairaut 1713 - 1765, mathématicien, géodésien et astronome français de premier plan (et l'éditeur ne connaissait pas les Cahiers du même nom !), son nom a été donné à un cirque de 75km de diamètre dont la muraille est interrompue au. Sud par deux petits cirques »*

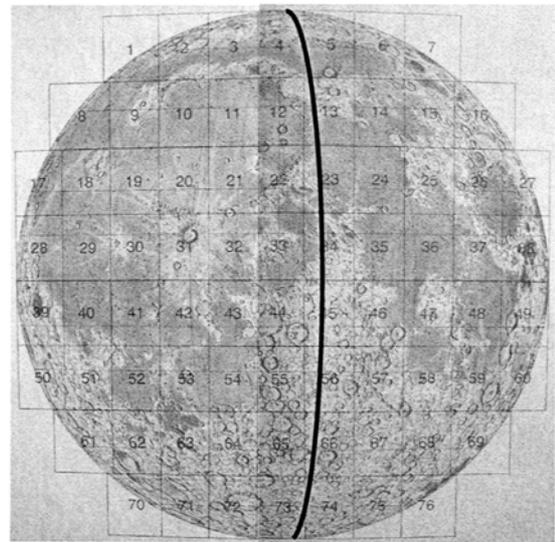


Fig 7

Cette carte a été tirée de "Atlas de la Lune", collection "Approche de la Nature", Gründ, ouvrage peu onéreux qui donne une cartographie détaillée de la Lune.

#### Librations :

Les puristes peuvent essayer de tenir compte des phénomènes de libration. Les éphémérides donnent les longitudes ( $\lambda$  ou  $l$ ) et les latitudes ( $\beta$  ou  $b$ ) sélénographiques de la Terre, c'est-à-dire du point central observé à un instant donné.

Les longitudes sélénographiques sont comptées positivement vers l'Est de la Lune (Ouest géocentrique), c'est-à-dire vers la Mer des Crises. Les latitudes sélénographiques sont comptées positivement vers le Nord de la Lune (vers la Mer des Pluies).

Donc, si  $\beta > 0$ , on voit un peu plus de la région Nord ; si  $\lambda > 0$ , on voit un peu plus de la région Est de la Lune, donc vers la Mer des Crises. Pour 1991, les valeurs extrêmes sont :

$$-7,73^\circ \leq \lambda \leq +7,52^\circ \quad -6,80^\circ \leq \beta \leq +6,86^\circ$$

Le 21 avril 1991 :  $\lambda = +3,18^\circ$  et  $\beta = +0,11^\circ$

Pour la carte reproduite dans le présent article,  $6^\circ$  représentent un déplacement de 6 mm au niveau de la case 33 et 3 mm au niveau de la case 15.

Avec des élèves, il est préférable d'effectuer la démarche inverse : constater que l'observation ne concorde pas avec le tracé, et donc introduire le phénomène de libration

Supposons que la construction prévoie que le terminateur passe par un cratère : au moment de l'observation, si  $\lambda > 0$ , ce cratère sera dans l'ombre, et si  $\lambda < 0$ , il sera déjà éclairé

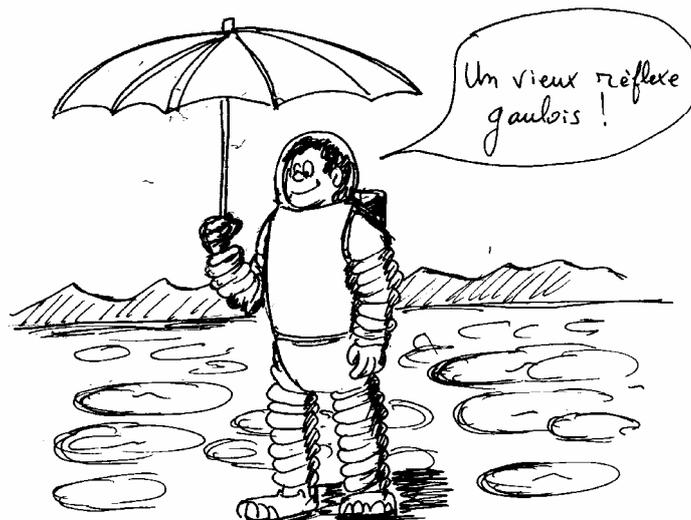
Évidemment, il faut que  $|\alpha| = 3$  à  $6^\circ$ . Sinon, les erreurs de construction risquent de compenser le phénomène. ■

## Explosions sur la Lune en 1178... et 1953

C'était le dimanche précédent la fête de Saint Jean-Baptiste en l'été 1178. Les moines de la cathédrale de Canterbury venaient de terminer leurs prières du soir et s'apprêtaient à se retirer pour la nuit. Frère Gervaise, un érudit, se rendait à sa cellule ; d'autres moines sortaient dans le jardin pour profiter de la douceur de la soirée. Quelques instants plus tard, ils devaient être les témoins d'un spectacle étonnant, une violente explosion sur la Lune. A l'époque on pensait les cioux immuables [...] Etait-il sage de discuter d'une telle vision ? [...]

Voici le témoignage reçu : C'était la nouvelle Lune brillante et comme d'habitude, à cette phase, ses cornes étaient inclinées vers l'ouest quand soudain une corne supérieur se sépara en deux. Du centre de cette division jaillit une torche enflammée qui se mit à cracher du feu, du charbon brûlant et des étincelles sur une distance incroyable....[Gervaise releva les dépositions de tous les témoins. Quand il écrivit dans son rapport le témoignage des hommes qui ont vu l'événement de leurs yeux et qui sont prêts à jurer sur l'Honneur d'avoir dit toute la vérité et ne rien avoir à ajouter [il] inscrivit le récit sur un parchemin. (D'après un texte du Dr Bernard, 1981).

Un autre événement similaire fut photographié le 15 novembre 1953 par l'astronome amateur L. Stuart (Oklahoma). Le phénomène apparaissait sur le cliché comme un point lumineux dans la partie sombre de la Lune. Il pourrait s'agir de l'impact d'un astéroïde de 20 mètres de diamètre (selon Sciences et Avenir, Avril 2003).



**Un autre phénomène bien plus courant vous a peut-être déjà intrigué. Pourquoi, lorsque vous regardez la Lune alors que vous vous déplacez rapidement (en train par exemple), celle-ci semble vous suivre à la même vitesse ? La réponse à cette question posée par un CLE@naute est donnée dans le courrier des lecteurs.**

# DOSSIER : RAYON DE LA TERRE

## Le premier jour de l'été 2004 à la « Bibliotheca Alexandrina »

C. Larcher

Professeur de Physique Membre du CLEA et de la SAF

*« Les sirènes du port d'Alexandrie  
Changent encore la même mélodie  
La lumière du phare d'Alexandrie  
Fait naufrager les papillons de ma jeunesse »*

**Résumé :** *Dans le cadre des échanges entre la France et l'Égypte, une opération, placée sous l'égide de l'Académie des Sciences, de l'Institut National de la Recherche Pédagogique et de l'École Normale Supérieure de Cachan, a été organisée par «la main à la pâte» avec des élèves égyptiens et français. Cette opération avait pour objectif de refaire l'expérience d'Eratosthène en utilisant la même méthode et les mêmes moyens qu'il y a 22 siècles.*

Je me suis rendu à Alexandrie à l'invitation de Madame Iman Nour el Dine, Conservatrice du Musée d'Histoire des Sciences. J'ai reçu là-bas un accueil chaleureux aussi bien de la part des responsables de la « Bibliotheca » que du côté français de la part de Cedric Montel (Attaché au Centre Culturel Français d'Alexandrie) et de Aurélia et Yannick Vernet (Volontaires du progrès de la Région PACA).

Le 21 juin 2004, jour du solstice d'été, les élèves étaient présents à leur poste respectif. Certains se trouvaient à Assouan dont la latitude est presque celle du tropique du Cancer  $24^\circ$  de latitude Nord, d'autres à Alexandrie dont la latitude est d'environ  $31^\circ\text{N}$ , enfin un groupe d'élèves français était à l'Université d'Orsay, près de Paris, dont la latitude est à peu près  $48^\circ\text{N}$ .

La journée a débuté, en présence de Madame Hoda El Mikaty, Directrice du secteur Scientifique de la « Bibliotheca », par l'inauguration d'un cadran solaire analemmatique horizontal fixé sur l'immense esplanade de la «Bibliotheca Alexandrina», face à la mer. J'ai eu l'honneur de couper le ruban bleu (Figure 1).



Figure 1 : Inauguration du cadran solaire analemmatique

Ce cadran a été conçu par Denis Savoie, Directeur du planétarium du Palais de la Découverte à Paris et Président de la commission des cadrans solaires de la Société Astronomique de France (SAF).

Il est composé de points horaires (matérialisés par des disques en marbre) qui, reliés entre eux formeraient une ellipse, « l'ellipse des heures ». Le style est un gnomon mobile en fonction de l'époque de l'année. Il est vertical et très souvent il est constitué par une personne qui se tient debout à l'endroit adéquat. La lecture de l'heure solaire s'effectue en utilisant la direction de l'ombre de cette personne.

Cette heure solaire, après quelques corrections, permet de retrouver l'heure légale que donne la montre.

Une conférence était ensuite prévue avant la rencontre via Internet avec les deux autres classes. La traduction était assurée remarquablement par Madame Liliane Eskandar. Les élèves d'Alexandrie (une centaine) étaient réunis dans un auditorium.

J'avais apporté un peu de matériel pour rendre les élèves actifs : un disque solaire dont l'échelle était choisie de façon qu'en le regardant à 30 m on puisse le voir sous le même diamètre apparent que le véritable Soleil, et des petites pancartes (une par planète). J'ai demandé que l'on fasse monter sur scène dix élèves. Le premier tenait entre ses mains le disque solaire, les autres les « planètes ». Les élèves ont su se disposer dans l'ordre des distances au Soleil.

A l'aide d'un vidéo projecteur, j'ai montré aux élèves des photos du Soleil et de chaque planète (sauf Pluton), avec parfois un gros plan sur un site caractéristique, comme Olympus Mons sur la planète Mars, qui fait près de trois fois la hauteur de l'Himalaya. J'ai donné quelques caractéristiques qualitatives sur chaque planète.

J'ai ensuite rappelé en quoi consistait l'expérience d'Eratosthène. Un tableau papier permettait de réaliser des croquis. J'ai toujours matérialisé les rayons du soleil par des droites parallèles et montré que, le jour du solstice d'été, ces rayons pouvaient atteindre, à Assouan, le fond d'un puits. Ce qui signifie que ce jour-là, à midi heure solaire, le Soleil est au zénith, c'est-à-dire à la verticale du lieu. J'ai demandé aux élèves de m'indiquer le lieu des points où ce phénomène se reproduit à l'équinoxe d'automne, à celui du printemps, au solstice d'été, au solstice d'hiver ; ils ont mentionné à bon escient l'équateur, le tropique du Cancer ou celui du Capricorne.



Figure 2 : mesure de la hauteur du Soleil

Peu avant le passage du Soleil au méridien, les élèves sont remontés sur l'esplanade pour faire les mesures avec l'aide de M. Max-André Humbert Attaché de coopération, et de Mme Marie Chesné, Conseillère pédagogique.

Répartis en onze groupes, ils ont disposé leur gnomon et mesuré la longueur de l'ombre portée. Avec un rapporteur, ils ont déterminé la valeur de l'angle alpha entre la direction des rayons lumineux et la verticale du lieu indiquée par le gnomon. Certains ont mesuré l'angle complémentaire à titre de vérification.

Tous sont revenus à l'auditorium pour la mise en commun des résultats avec les classes d'Assouan et d'Orsay. Chaque porte-parole indiquait son nom et son âge, puis donnait successivement : la hauteur du gnomon, la longueur de l'ombre et la moyenne des valeurs des angles alpha.

Les élèves n'ont pas eu de difficulté, aidés par un schéma sur le tableau papier, à comprendre que cet angle alpha, le 21 juin, était le même que celui que faisait, au centre de la Terre, la verticale d'Assouan et celle passant par Alexandrie.

Valeurs moyennes trouvées par les élèves :

7,5° 8,0° 7,25° 7,25° 6,0° 8,0° 7,29° 6,4° 7,2° 8,0° 7,0°

A Assouan, les élèves ont pu constater qu'ils n'obtenaient pas d'ombre à la même heure ce jour-là. Le Soleil était bien au zénith.

La moyenne des valeurs obtenues à Alexandrie donne 7,26° arrondie à 7,3°. Donc, au centre de la Terre, l'angle que font les verticales passant par Assouan et par Alexandrie est aussi de 7,3°. A cet angle de 7,3 degrés au centre de la Terre correspond, à sa surface, un arc de cercle de 800 km de longueur, qui est la distance séparant Assouan d'Alexandrie.

Si à 7,3 degrés au centre de la Terre correspond un arc de 800 km à sa surface, à un angle de 360° degrés correspond la circonférence totale du globe Terrestre. Il reste un petit calcul pour trouver cette circonférence.

J'ai fait remarquer qu'un angle de 7,3 degrés correspond à une petite partie de la circonférence totale que l'on peut donc calculer. Cette petite partie est  $7,3/360$  de la circonférence totale. Le calcul de cette fraction donne pour résultat environ 0,02. On peut écrire :  $0,02 = 2/100$  ou  $1/50$ . En d'autres termes on peut estimer que la distance, de valeur 800 km, qui sépare Assouan d'Alexandrie correspond à  $1/50$  de la circonférence totale de la Terre.

Par conséquent le tour de la Terre est d'environ  $800 \times 50 = 40\,000$  km ce qui est une très bonne approximation.

Les élèves ont ensuite calculé le rayon de la Terre qui est d'environ 6 400 km. Une fois la connexion vidéo et audio établie avec les deux autres villes, les valeurs ont pu être échangées et comparées. On a pu ainsi déterminer la distance, mesurée le long d'un méridien, entre la latitude d'Assouan et d'Orsay. On trouve environ 2 700 km.

J'ai terminé cette journée en faisant remarquer que nous possédons une technologie puissante

(ordinateurs, vidéo-projecteur, satellite, GPS...), mais qu'il y a 22 siècles, avec un simple bâton en bois, on pouvait déterminer :

- la direction Nord-Sud (par exemple pour construire les pyramides)
- l'heure donnée par le cadran solaire
- et (en prime) la mesure du tour de la Terre.

■

## Calcul du rayon de la Terre en classe

Serge Latouche

**Résumé :** *Je présente le calcul du rayon de la Terre fait en utilisant les villes de Gien (France) et Grenade (Espagne) le 26 mai 2004, mesures effectuées par les lycées Padre Manjon de Grenade et Bernard Palissy de Gien.*

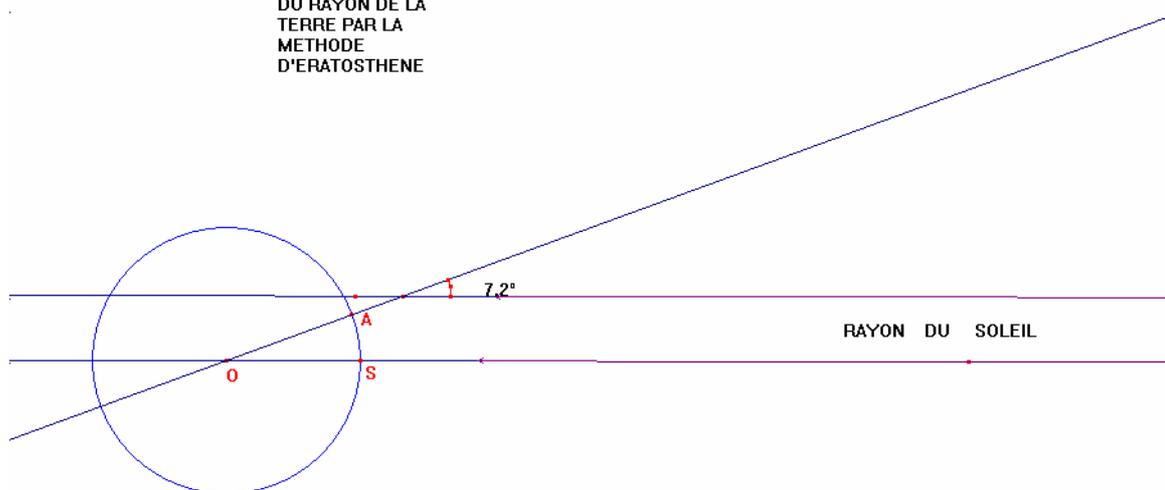
### Méthode d'Eratosthène (284-192 avant JC)

Eratosthène avait observé qu'au solstice d'été, le 21 Juin à midi, le Soleil se reflétait à la verticale des puits à Syène, qui deviendra Assouan.

Alexandrie, port alors le plus prestigieux du monde, étant situé à peu près à la même longitude que Syène, et connaissant la distance Syène-Alexandrie (5000 stades), il eût l'idée, en mesurant la hauteur du soleil à Alexandrie le 21 Juin à midi, de calculer le rayon de la Terre ; voici la méthode qu'il a employée.



DETERMINATION  
DU RAYON DE LA  
TERRE PAR LA  
METHODE  
D'ERATOSTHENE



A : Alexandrie

S : Syène

Distance des deux villes  
5000stades

un stade  
environ  
157,5m

L'angle  $\widehat{AOS}$  mesure 7,2 degrés, la distance de Syène à Alexandrie est de 5000 stades, on en déduit la circonférence de la Terre, soit :  $5000 \times \frac{360}{7,2} = 250000$  stades, et donc le rayon de la

Terre :  $\frac{250000}{2 \times \pi} \approx 39789$  stades, et donc :  $39789 \times 0,157 \approx 6247$  km. Ce qui est une très bonne approximation du rayon de la Terre.

## Calcul du rayon de la Terre

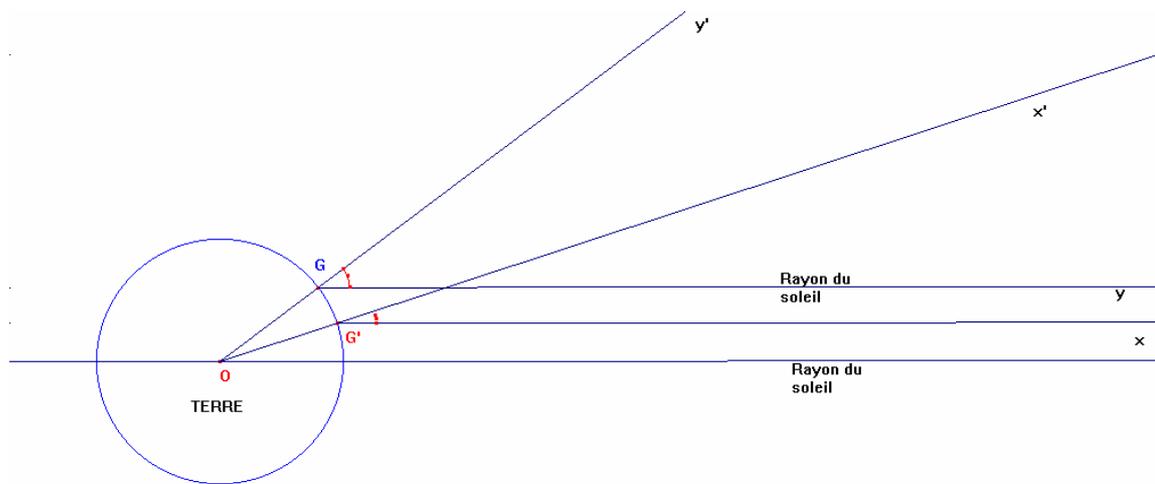
Le 26 Mai 2004, à 10h 15, 9 groupes d'élèves de seconde ont mesuré, à Gien, l'ombre du soleil donnée par un gnomon (un simple bâton planté dans le sol). Nous en avons déduit l'angle entre la verticale de Gien et les rayons du soleil : environ  $50,31^\circ$

Puis, 25 minutes plus tard, pour tenir compte du décalage horaire, les élèves du lycée Padre Manjon de Grenade ont effectué la même mesure (voir photos ci-dessous), ils ont obtenu un angle de  $39,65^\circ$ .

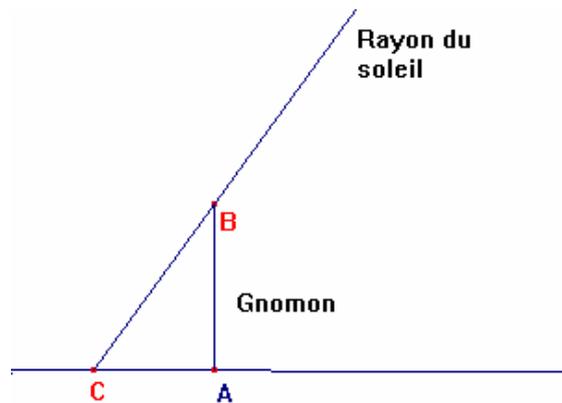
Nous avons estimé la distance entre Gien et Grenade en ligne droite à environ 1200 km.



## Schéma de l'expérience :



Calcul du rayon de la Terre par la méthode d'Eratosthène avec les villes de Gien et de Grenade



Le premier schéma montre clairement que la différence de la mesure des angles obtenue à Gien et à Grenade correspond à l'angle  $G\hat{O}G'$ , on en déduit le rayon de la Terre :

$$1200 \times \frac{360}{(50,31 - 39,65)} \times \frac{1}{2 \times \pi} \approx 6449 \text{ km}$$

Ce qui est un excellent résultat

■

# Le retour d'Eratosthène

Francis Berthomieu

**Résumé:** *La chance veut que notre planète soit pratiquement sphérique et que le Soleil soit vraiment infiniment éloigné d'elle ! Sans ces deux propriétés, le nom d'Eratosthène serait-il resté gravé dans toutes les mémoires ? Et qu'aurait-il trouvé si la Terre avait la forme d'un Œuf ? Bon sujet pour un « remue-méninges ».*

## Prologue

Il est bibliothécaire. Pas n'importe où. A la Grande Bibliothèque d'Alexandrie. Il est le dépositaire de tout le savoir du monde : une impressionnante collection de rouleaux de papyrus. Les a-t-il tous lus un jour ? Peut-être. Est-ce le hasard qui lui a fait rassembler aujourd'hui trois d'entre eux devant lui ? Nul ne le saura jamais : pas de témoins. Seulement une belle histoire que chacun peut raconter à sa manière. On peut voir en cet homme un penseur sédentaire. Denis Guedj, dans un fort sympathique roman (« Les cheveux de Bérénice » - Seuil) a préféré le lancer, lui et ses assistants, dans une grande aventure au fil du Nil... Quelle qu'ait été sa véritable histoire, cet homme restera pour l'humanité l'immense savant qui trouva un moyen aussi simple que puissant de déterminer la taille de notre planète Terre. Son nom restera au Panthéon de la Science : Eratosthène...

## 2004

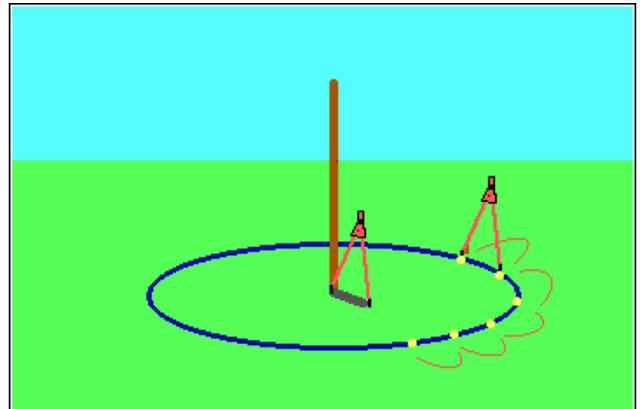
Voici quatre ans que l'expérience d'Eratosthène a fait son apparition parmi les suggestions de travaux pratiques des classes de seconde des lycées. Les Cahiers Clairaut se sont maintes fois penchés sur cette opportunité de faire de l'astronomie en classe et en plein jour. Divers protocoles ont été proposés (par exemple dans le CC N°98). Notre toute jeune liste de diffusion a montré récemment que le sujet restait d'une brûlante actualité et qu'il pouvait être bon de revenir une fois encore sur ce sujet.

## Le bâton d'Eratosthène

J'aime imaginer Eratosthène plantant un bâton bien vertical devant le bâtiment dont il est le gardien. Il regarde ce bâton avec une extrême attention : un regard scientifique ! Il examine plus précisément son ombre, qui tourne lentement avec le Soleil, et qui se raccourcit peu à peu depuis le lever du Soleil jusqu'au passage de l'astre au méridien. Il est alors « midi ». L'ombre est la plus courte de la journée, elle est même très courte à Alexandrie. Désormais, elle va s'allonger jusqu'au

coucher du Soleil. Chaque jour, la longueur de cette ombre minimale est différente. Astronome confirmé, Eratosthène sait que l'ombre la plus courte de l'année sera observable le jour du Solstice d'Été (notre 21 juin) : C'est ce jour qu'il a choisi pour faire un peu de géométrie.

On lit souvent qu'il découvrit que cette ombre du Solstice « correspondait à  $1/50$  de cercle ». La mesure était simple : traçons un cercle dont le rayon est égal à la longueur du bâton, puis reportons sur sa circonférence la longueur de l'ombre... Quand nous aurons fait le tour complet, il aura fallu 50 reports ! Si nous avons reporté cette même longueur de l'ombre sur le bâton, nous aurions trouvé  $50/2\pi$ , c'est-à-dire pratiquement 8 !



## Trois manuscrits de la Grande Bibliothèque

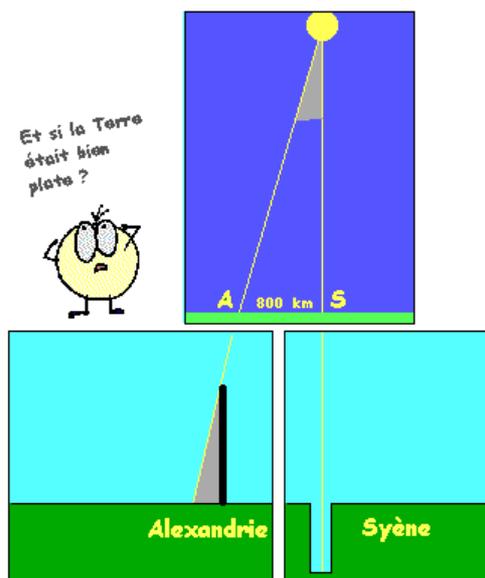
Le premier était sans doute le texte d'Aristote qui démontre, preuves à l'appui, que la Terre est bien ronde (cf. CC N° 102).

Dans le deuxième, on trouve la relation d'un « fait divers » : On a constaté qu'à Syène, belle ville située sur les bords du Nil, quelque part au Sud d'Alexandrie, le jour du Solstice d'Été, les rayons du Soleil pénètrent à midi jusqu'au plus profond d'un puits, prouvant que ce jour là, le Soleil est « au Zénith ». Événement digne d'être remarqué puisque ce passage du Soleil au Zénith est rarissime : seuls les

lieux situés dans la bande intertropicale y ont droit et cela ne se produit que deux fois par an... A Syène, cela ne se produit même qu'une seule fois ! Et pour cause, Syène se situe exactement sur le Tropique du Cancer... Dans le troisième, sans doute un récit de voyage, Eratosthène apprend la durée des voyages que les caravanes de chameaux accomplissent le long du Nil entre Alexandrie et Syène, deux villes situées pratiquement sur le même méridien. Et le voici sur la grand place du marché d'Alexandrie, où il interroge discrètement un chamelier : quelle distance sa caravane parcourt-elle dans la journée ? Il ne reste plus qu'à déduire de ces données la distance entre les deux villes. On dit souvent qu'il trouva 5000 stades, correspondant environ à 800 de nos kilomètres.

### Hypothèses et conséquences

A l'époque d'Eratosthène, et pour longtemps encore, ceux qui savent que la Terre est ronde ne sont pas légion. Imaginons avec eux que la Terre est plate. Et essayons d'utiliser les données des trois manuscrits. Un schéma résume les faits.



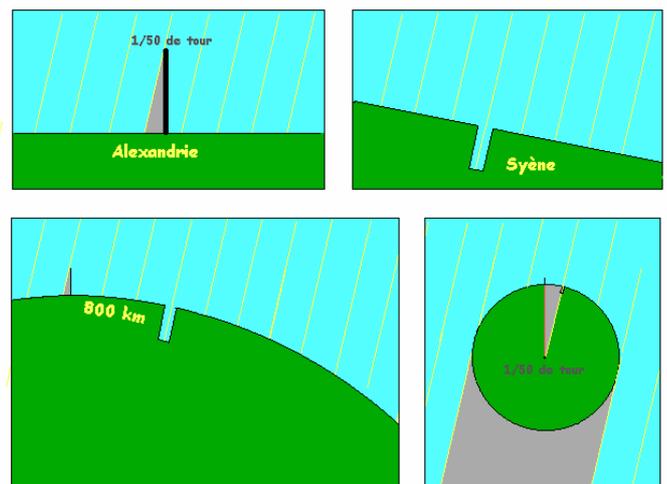
longueur de l'ombre est à celle du bâton ce que la distance entre les deux villes est à la distance Terre-Soleil.

Quatre distances dont trois sont connues ! Il saura calculer la quatrième... Puisque le bâton est 8 fois plus long que son ombre le jour du Solstice, le Soleil est donc 8 fois plus loin de la Terre que Syène d'Alexandrie : le Soleil est donc à 6400 km de la Terre. La proche banlieue en quelque sorte !

L'autre hypothèse suppose que la Terre est sphérique, et que le Soleil en est très éloigné. Cette deuxième hypothèse est tout aussi importante que la première : elle permet d'affirmer qu'alors les rayons du Soleil arrivent en tout point de la Terre selon une direction unique. Tous sont parallèles.

L'examen des figures ci-contre permettra au géomètre de tirer de nouvelles conclusions. Ici, la longueur de l'ombre est à celle du bâton ce que la distance des deux villes est au rayon de la Terre. Et c'est le rayon de la

Terre que l'on obtient alors par la belle « règle de trois » : on retrouve d'ailleurs les mêmes 6400 km !



On y voit le bâton d'Eratosthène, son ombre, les deux villes et le Soleil. Le géomètre Thalès affirme que la

Dans son très beau livre sur ce sujet, « Les cheveux de Bérénice », Denis Guedj décrit avec talent tout le processus des mesures d'Eratosthène. Mais il conclut (page 364) :

*"Le rapport de la longueur de l'ombre à celle du gnomon à Alexandrie est 1/50. Grâce à l'utilisation du puits de Syène, cette unique mesure donne la valeur de l'angle au centre entre Alexandrie et Syène : 1/50 du tour de la Terre".*

Il est clair qu'il commet là une malheureuse confusion. L'angle mesuré entre le bâton et les rayons du Soleil représente bien 1/50 de tour... mais le rapport de la longueur de l'ombre à celle du gnomon ... est de 1/8 !

Profitions-en pour affûter l'esprit critique de nos élèves en leur faisant lire ce livre puis en disant :

« Cherchez l'erreur ! ».

FB

# DOSSIER : TRANSIT DE VENUS

## Le CLEA et le passage de Vénus du 8 juin 2004 (\*)

P. Causeret, T. Derolez, G. Dodray

**Résumé :** *Nous l'attendions depuis longtemps et nous n'avons pas été déçus. Du moins ceux qui ont bénéficié d'un ciel dégagé, heureusement la plupart d'entre nous. Je me rappelle il y a quelques années, lorsque nous commençons à parler de cet évènement, j'étais sceptique sur la possibilité de calculer la distance du Soleil avec des moyens d'amateurs. Et puis finalement, en étudiant de plus près le sujet, le CLEA a proposé un protocole d'observation et la manip a pu être menée à terme. Les photos sont là, les résultats aussi, et nous avons obtenu une approximation correcte de cette fameuse unité astronomique. Après coup, on se dit qu'on aurait pu faire de meilleures mesures et avoir des résultats plus précis, mais ce qui nous importe avant tout, c'est le principe, c'est de pouvoir utiliser cette méthode avec nos élèves.*

### Les participants

Le protocole du CLEA était présenté sur notre site, le magazine *Astrosurf* l'avait publié en entier, l'observatoire des Makes à l'île de la Réunion le proposait, et de nombreux sites comme celui de l'IMCCE avait un lien vers nos pages Internet. Bref, petit à petit, des contacts se sont noués et une vingtaine de personnes se sont inscrites pour participer à ces mesures.

Vous trouverez sur la page <http://www.ac-nice.fr/clea/VenusImages.html> des photos provenant de treize sites différents. Nous vous présentons trois de ces sites :

### Le Spitzberg

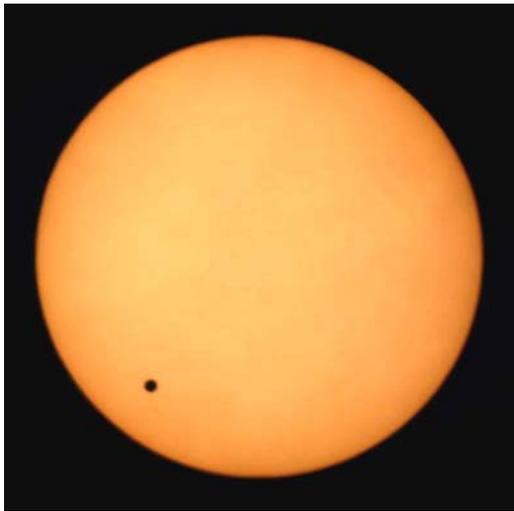
Je laisse Gilles Dodray en parler : "Le groupe au Spitzberg : Pour faire un point le plus boréal possible, l'atelier d'astronomie du lycée Gaston Bachelard de Chelles-77- est parti observer le passage de Vénus depuis le cœur de l'océan arctique : dans l'archipel du Spitzberg au nord de la Norvège. On désirait ainsi être à l'image des astronomes aventuriers des siècles passés. Huit élèves de seconde et les deux professeurs d'astro : Gilles Dodray et Stéphane Garel, étaient du voyage. Sur place, le ciel n'eut pas la qualité de l'Europe du Sud, mais la mission de réaliser des images du passage fut réussie. Nos images conjointes avec celles des autres observateurs du CLEA nous ont permis d'évaluer la distance Terre-Soleil à 156,2 Mkm. Nous sommes aussi revenus avec des images de glaciers, de montagnes, de banquise plein les têtes ! Parés pour une nouvelle expédition en 2012 au Spitzberg."



De gauche à droite, debout : B. Morleo, L. Ledru, T. Mannoury, R. Soullignac, S., Duquesnoy, G. Dodray, F. Perez, S. Poli (guide). En bas: M. Courageux, N. Leveque, les chiens: Quito et Henne, S. Garel



L'archipel du Spitzberg au nord de la Norvège



*Photo prise à 7 h TU*

## La Réunion

C'est Thérèse Derolez, du lycée Antoine Roussin à St-Louis dans l'île de La Réunion, qui nous expose son activité :

Le transit de Vénus a été le déclic pour la création d'un atelier astronomie. Je me suis mobilisée dès le transit de Mercure en 2003 et après la lecture du livre de Jean-Pierre Luminet, le "Rendez-Vous de Vénus". J'ai pensé que le transit de Vénus pouvait faire un excellent sujet de TPE, mais les TPE se terminaient en février et les élèves de 1ère et terminales n'étaient pas disponibles pour le 8 Juin. J'ai donc décidé avec mon collègue de SVT de créer un atelier astronomie pour les secondes dès la fin des TPE. Le but premier de cet atelier était d'inciter les élèves à se tourner vers les sciences ! Nous avons donc animé un atelier tous les samedis matins pendant 3h. Une dizaine d'élèves sont venus régulièrement, plusieurs sorties aux Makes (\*) ont été organisées afin de familiariser les élèves avec les instruments. Nous avons eu un financement de 760 euros par la DAAC (action culturel du Rectorat), ce qui nous a permis d'acheter une lunette pour l'observation de ce phénomène

. Le reste du matériel m'appartenait en propre et le télescope nous avait été prêté par une collègue.

Notre dernier atelier a eu lieu le 28 Juin, alors que les élèves étaient en vacances depuis le 8 Juin ! Pour le calcul, nous avons suivi votre démarche, démarche qui me paraissait extrêmement claire et très adaptée à mon public !

Parallèlement, un concours scientifique a été organisé autour du transit de Vénus ; il s'agissait de répondre à une question sur ce phénomène (via Internet) chaque semaine et la dernière question sélectrice portait sur la

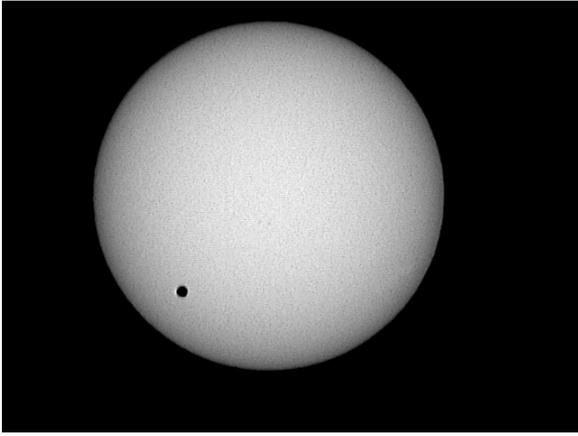
description de ce transit. Beaucoup d'élèves se sont inscrits, mais peu sont allés jusqu'au bout (il n'y avait pourtant aucun piège et toutes les réponses étaient sur Internet !). Il y a eu de très beau prix (télescopes avec système Goto etc..) et un prix spécial du jury : un voyage sur le Marion Dufresne. Ce bateau ravitailleur, fait régulièrement des rotations dans le Grand Sud pour relever les équipes de scientifiques. Le prix a été offert par les TAAF (Territoires des Terres Australes et Antarctiques Françaises) qui se sont impliqués pour ce phénomène en souvenir des observations à l'île Saint-Paul, 1874. Yohan Gauliris, élève de seconde, qui a suivi l'atelier astronomie, a gagné ce prix.



*Certains des élèves qui ont suivi l'atelier "astronomie". On voit une partie du matériel mis à leur disposition ; solarscopes, télescope type Newton 114/900 pour l'observation directe avec un filtre Astrosolar et une lunette 70/900 pour la projection sur écran.*



*Me voici avec la lunette 80/480 motorisée munie d'un réducteur de focale, d'un filtre et d'une webcam*

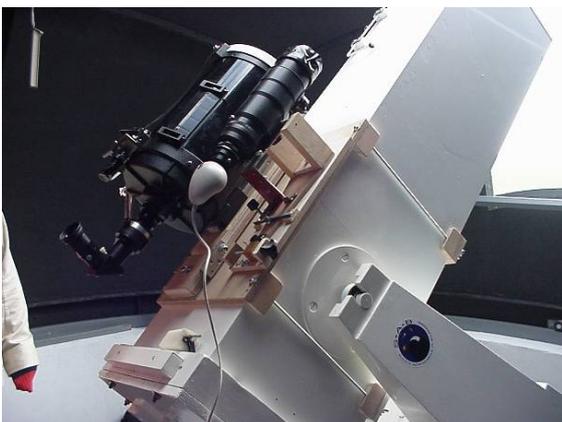


Une image prise à 7h TU. Le nord est en haut, comme prévu dans le protocole, mais à l'oeil nu, Vénus traversait le côté supérieur du Soleil de droite à gauche.

Une image prise à 7h TU. Le nord est en haut, comme prévu dans le protocole, mais à l'oeil nu, Vénus traversait le côté supérieur du Soleil de droite à gauche. (\*) Il s'agit de l'observatoire des Makes, à La Réunion, qui a d'ailleurs mis sur son site de très nombreuses photos du 8 juin ([www.ilereunion.com/observatoire-makes](http://www.ilereunion.com/observatoire-makes))

## Dijon

Pendant que plusieurs centaines de personnes étaient accueillies pour observer le passage de Vénus à l'extérieur, quelques amateurs s'étaient réfugiés dans leur petit observatoire pour réaliser les photos nécessaires à la mesure de la distance du Soleil. Sur l'une de nos installations, une webcam était fixée derrière un téléobjectif de 300 mm de focale. Pour suivre le protocole du CLEA, nous avons soigné l'orientation qui pouvait être réglée grâce à une molette à environ  $0,1^\circ$ . Nous avons vérifié la bonne orientation la nuit précédente sur une étoile.



Webcam et téléobjectif en parallèle. Une installation fixe permet une bonne mise en station.

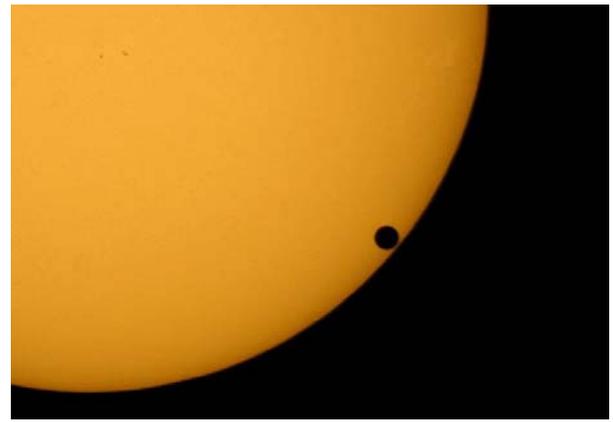
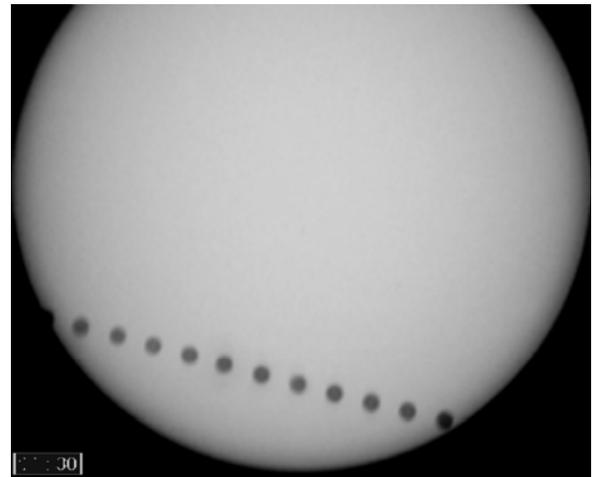


Photo faite avec un appareil photo numérique sans objectif derrière un télescope C8. (photo Samuel Challéat/SAB)

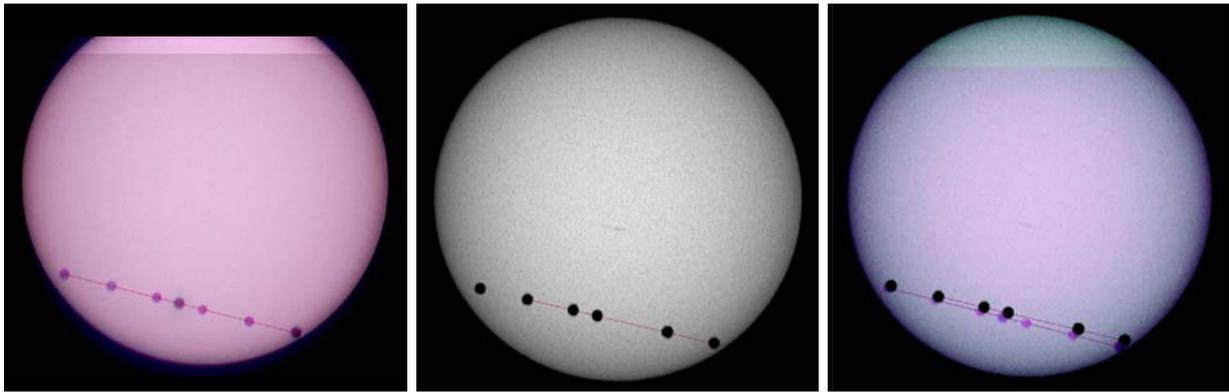


Douze images réalisées à la webcam de 5h30 à 11h, une toutes les demi-heures.

## Les problèmes d'alignement

Si le protocole avait été parfaitement suivi, il suffisait d'utiliser deux photos prises à la même heure depuis deux lieux éloignés. J'ai auparavant voulu vérifier l'alignement des photos, qui devait être est-ouest, en utilisant un chapelet d'images pour chacun des sites.

En superposant les photos prises depuis un même lieu à des heures différentes, il nous semblait que les positions de Vénus devaient être alignées à condition que la mise en station soit correcte, donc que l'appareil n'ait pas bougé par rapport à l'équateur. Ce qui semble avoir été le cas sur les images de Dijon et celles de La Réunion.



Sept photos prises depuis Dijon superposées	Six photos prises depuis La Réunion superposées	Les deux résultats superposés
---	---	-------------------------------

Mais lorsque l'on superpose les deux séries d'images, les cordes suivies ne sont pas parallèles et forment un angle de  $2^\circ$ . J'ai d'abord cru que l'orientation des webcam était imparfaite. Mais comme Gilles me l'a rappelé, les cordes devraient être parallèles pour des lieux situés sur le même méridien. En effet, pendant que Vénus se déplace autour du Soleil, la Terre tourne sur elle-même.

Pour bien comprendre ce qui se passe, je suis allé chercher sur le site suisse fourmilab (déjà signalé dans le protocole) les positions des observateurs sur Terre, vus depuis le Soleil.

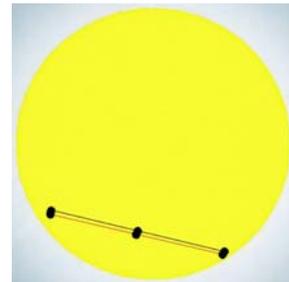


Voici approximativement la position du Spitzberg, de Dijon et de La Réunion au début, au milieu et à la fin du passage (5h30, 8h30 et 11h30 TU), l'image de la Terre étant celle de 11h30.

Vue depuis le centre de la Terre, on peut considérer que Vénus se déplace devant le Soleil en suivant un segment. Mais vue par un Dijonnais, cela ne semble plus vrai, l'observateur ne se déplaçant pas en ligne droite. Calculs faits, le Dijonnais s'écarte sur cette carte du segment départ - arrivée d'un dixième de rayon terrestre soit environ 640 km. Cela entraîne un écart de 1600 km pour la position de Vénus sur le Soleil soit  $0,03'$  vu depuis la Terre. Sur une corde d'environ  $20'$ , c'est peu, mais ce n'est pas totalement négligeable si on compare à l'écart de  $0,5'$  que l'on voulait mesurer.

On va néanmoins assimiler la trajectoire observée de Vénus devant le Soleil à une corde, même si ce n'est pas tout à fait le cas.

En regardant les trajectoires suivies par les observateurs de Dijon et de La Réunion sur le globe, on comprend que les deux cordes ne seront pas parallèles, le Dijonnais se déplaçant vers le bas sur la carte alors que le Réunionnais se déplace presque horizontalement



*Simulation du passage de Vénus observé depuis Dijon et depuis La Réunion : les cordes ne sont pas parallèles.*

Pour déterminer l'angle que doivent former ces deux cordes, j'ai pris la solution de facilité, utiliser un logiciel pour simuler le passage plutôt que d'effectuer des calculs. On trouve environ  $1^\circ$  entre les deux cordes. Sur les  $2^\circ$  mesurés entre les positions de Dijon et celles de La Réunion,  $1^\circ$  seulement doit provenir d'un défaut d'orientation.

Conclusion : le problème d'orientation des images est un vrai problème : utiliser des cordes parallèles, ce n'est pas une méthode exacte pour deux raisons : d'abord, les trajectoires observées de Vénus devant le Soleil depuis deux points de la Terre ne sont pas en général parallèles, et de plus ce ne sont pas de vraies cordes.

Cela m'a encore plus persuadé du bien-fondé du protocole que nous avons mis au point, et qui

consiste à n'utiliser que deux photos prises au même instant et bien orientées, sans tenir compte de la trajectoire dans le temps.

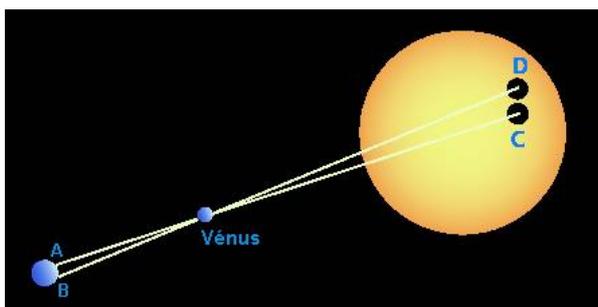
Quand on utilise ces trajectoires, on fait énormément d'approximation et il est très difficile ensuite de savoir quelle est la précision de la méthode.

## Un premier calcul de la distance du Soleil

J'ai choisi une heure, 8 h TU, et j'ai travaillé à partir de deux photos, l'une de La Réunion, l'autre de Dijon, en supposant qu'elles étaient parfaitement alignées suivant l'axe est-ouest, ainsi que le prévoyait le protocole. J'ai donc laissé tomber le degré d'erreur que nous avons décelé.

### Rappel du principe

L'observateur situé à Dijon en A observe Vénus devant le point C du Soleil alors qu'une personne habitant La Réunion la verra devant le point D. En mesurant le décalage entre les deux positions C et D, et connaissant la distance entre les deux observateurs, on détermine la distance du Soleil.



### Première étape : Mesure du décalage

A partir des deux images superposées à 8h TU, on mesure l'écart angulaire entre les deux positions de Vénus devant le Soleil (croix), sachant que le diamètre apparent du Soleil était alors de  $31,5^\circ$  et on trouve un écart de  $0,55'$ .



Images superposées de Vénus photographiée à 8hTU depuis Dijon (en bas) et La Réunion (en haut).

## Deuxième étape : Mesure de la distance entre les observateurs

Ayant mesuré l'azimut et la hauteur du Soleil, on a pu matérialiser sur un globe terrestre la direction du Soleil observé depuis La Réunion et depuis Dijon.

Il faut mesurer la distance entre ces deux lignes de visée. On obtient environ 8200 km.



## Troisième étape : calcul de CD

On travaille ici dans le plan défini par les observateurs et par le centre de Vénus, V. On a trouvé 8200 km pour l'écartement entre les deux points A et B. L'observation de Vénus montre que la distance Soleil-Vénus vaut 0,72 fois la distance Soleil Terre (vous pouvez retrouver les explications dans le CC n° 105, p. 25).

$AB = 8200 \text{ km}$ .  $AV = 0,28 \text{ UA}$ .  $CV = 0,72 \text{ UA}$ . (UA = Unité Astronomique = distance Terre-Soleil). Le théorème de Thalès permet de calculer CD :

$$CD = 8200 \times 0,72 / 0,28 \approx 21\,100 \text{ km}.$$

## Quatrième et dernière étape : la distance du Soleil

A quoi correspond le décalage de  $0,55'$  obtenu en superposant les deux images ? Imaginons que, par hasard, il y ait juste une tache solaire en C et une autre en D. Le décalage de  $0,55'$ , c'est la distance angulaire entre les deux taches solaires vues depuis la Terre.

A quelle distance d faut-il se placer pour observer deux points distants de 21 100 km sous un angle de  $0,55'$  ?

On assimile CD à un arc de cercle de centre A

$$0,55' \mapsto 21\,100 \text{ km}$$

en divisant par 0,55 puis en multipliant par  $60 \times 360$  :

$$360^\circ \mapsto 828\,700\,000 \text{ km} ;$$

en divisant par  $2\pi$  :

$$d \approx 132\,000\,000 \text{ km}$$

(On peut aussi utiliser les angles en radian ou de la trigonométrie).

## Quelques remarques

Quelle est la précision du résultat ? Sur les photos originales, l'incertitude sur l'angle de  $0,55^\circ$  est d'au moins 10%. En travaillant à partir d'images ayant une

meilleure définition, nous devrions pouvoir améliorer la précision. Il faut rappeler que ce calcul a été fait à partir de deux photos incorrectement orientées. Ce qui a rajouté bien évidemment une erreur. La distance d était plus proche de 8400 km que de 8200 km, ce qui rajoute une erreur de 2 à 3 %.

Le 8 juin, la distance réelle du Soleil était d'un peu plus 151 800 000 km. L'erreur est d'environ 13%.

### **Pour la prochaine fois (6 juin 2012)**

Le protocole, me semble-t-il, était bien défini. Mais pour avoir de meilleurs résultats, trois améliorations dans les photos peuvent être apportées :

1. L'orientation des capteurs devra être beaucoup plus précise. Il faudra utiliser une monture parfaitement mise en station, donc fixe de préférence, et réaliser un montage permettant un réglage précis, au dixième de degré par exemple.

2. Les webcams sont bien pratiques mais leur nombre de pixels est limité. Il faudra travailler avec une meilleure définition, avec des appareils photos numériques ou argentiques

3. La remise à l'échelle des images prises avec des instruments différents s'est faite à partir du diamètre du Soleil mais il peut y avoir des erreurs, le bord n'étant jamais parfaitement net. Il faudrait auparavant étalonner l'image, soit à partir d'une photo de deux étoiles choisies d'avance, soit en faisant deux photos du Soleil espacées d'exactly 2 minutes sans entraînement.

■



**Peut-être enfin toute la lumière sur l'hortensia (voir le courrier des lecteurs)**

## **La distance Terre-Soleil à partir des données du CLEA (\*\*)**

**G. Paturel, Observatoire de Lyon**

**Résumé :** *Je présente dans cet article la détermination de la distance Terre-Soleil obtenue à partir de l'ensemble des mesures respectant le protocole CLEA et disponibles sur le site du CLEA. Le calcul a été fait exactement selon la méthode présentée par B. Sandré dans le précédent Cahier Clairaut. Cette méthode ne nécessite pas de connaître l'orientation des clichés. Le résultat moyen est correct à 5% près.*

Je n'expliquerai pas la détermination de la distance Terre-Soleil par l'observation du transit de Vénus. J'incite les lecteurs à se reporter aux précédents Cahiers Clairaut (CC105 et CC106). J'utiliserai des jeux de trois observations prises à intervalles égaux (le protocole CLEA recommandait un cliché toutes les demi-heures rondes) depuis des sites éloignés les uns des autres. En pratique, le seul site très distant utilisable est celui de St-Louis de la Réunion, grâce aux excellents clichés obtenus par le groupe de Th. Derolez (voir l'article précédent). **Ce sera le site de référence.**

L'orientation des clichés sera faite avec la méthode de B. Sandré (CC106, p26). Le calcul de la séparation "effective" entre un site donné et St-Louis de la Réunion sera fait par la méthode exacte publiée également par B. Sandré (CC105, p25). Cette distance effective est la distance entre les lignes de visée. Elle sera désignée par AB (cf. CC105, p23).

J'ai choisi les observations faites à TU=7h00, TU=8h30 et TU=10h00 (à une ou deux exceptions près). Le calcul sera fait avec le cliché de 8h30, les autres clichés servant à obtenir l'orientation de la

trajectoire de Vénus devant le Soleil. Une bonne justification du choix du cliché de 8h30 est que le Soleil est sensiblement à la même hauteur au-dessus de l'horizon, en France métropolitaine et à la Réunion ( $h=45^\circ$  et  $46^\circ$ ), ce qui minimise les effets parasites de la réfraction. Pour chacune des trois positions nous devons mesurer la distance entre le centre de Vénus et le centre du Soleil. Cette mesure sera exprimée en rayon apparent du Soleil ( $R=945.5''$  le 8 juin 2004). Il sera donc aisé de l'avoir en seconde d'angle en multipliant par  $R$ . Les mesures de Rennes n'ont pas pu être exploitées, le mauvais temps ayant hélas interrompu très tôt les mesures (dommage !). Les mesures de Vincenzo de La Réunion seront exploitées par la méthode du temps de transit.

## Les participants et les mesures

Dans la table A je donne la liste des participants et une brève description de leur matériel.

Le tableau B donne l'enchaînement des mesures : mesure de AB à partir des longitudes, latitudes et heure (TU=8h30) de la mesure. Le calcul est assez compliqué. J'ai dû écrire un petit programme (FORTRAN) qui m'a permis de faire rapidement le calcul pour tous les sites.

Ensuite, j'ai mesuré les distances  $d(7h00)$ ,  $d(8h30)$  et  $d(10h00)$  pour chaque site. Dans certains cas (Dijon, Calern) j'ai utilisé  $d(6h30)$  et  $d(10h30)$  au lieu de  $d(7h00)$  et  $d(10h00)$ . Cela ne gêne en rien l'orientation de la ligne de transit par rapport à celle de St-Louis. Pour Draguignan  $d(7h00)$  a été recalculé par extrapolation. Pour Chinon  $d(8h30)$  a été interpolé avec les deux clichés qui encadraient (8h00 et 9h00), mais ces mesures d'encadrement étaient trop proches ; l'orientation était donc approximative. Pour Tarentaise, l'orientation semblait complètement fautive : il y a une erreur sur les labels des photos (les photos de 7h00 et 7h30 semblent identiques). Il faut utiliser les photos notées 7h00, 9h00 et 10h30. Enfin, les mesures de Lyon étaient données directement (en minutes d'angle), nous les avons reconverties, pour les besoins du tableau, en unités de rayon solaire ( $R=945.5''$ ). Quand aux clichés que j'ai faits moi-même, ils étaient si mauvais (verre de lunette associé à une webcam), que je les pensais inexploitable. Il s'avère qu'ils conduisent à des mesures acceptables.

A partir des valeurs  $d(7h00)$ ,  $d(8h30)$  et  $d(10h00)$  j'ai fait la construction géométrique du parallélogramme (cf. CC106) sur papier calque. En superposant à la même construction faite pour St-Louis sur papier blanc, j'ai pu faire pivoter les figures de telle manière que les lignes de transit soient parallèles (ce qui sur un intervalle de temps relativement court est correct). J'ai déduit la distance entre les centres de

Vénus, vus depuis les deux sites. Cette valeur a été convertie en la valeur  $\Delta$  en seconde d'angle en multipliant par le rayon du Soleil ( $R=945.5''$ ). J'ai alors calculé la distance Terre Soleil  $D_{TS} = AB(1-k)/k\Delta$ , sachant que  $k=0.277$  (cf. CC105) et que dans cette expression  $\Delta$  est exprimé en radians.

## Un point de déontologie

Evidemment nous connaissions la distance Terre Soleil avant de commencer les mesures (151.85 Mkm). J'ai mis un point d'honneur à ne pas "forcer" les données. Dans deux cas les résultats semblaient très discordants, pour les sites de Versailles et de Tarentaise. Pour ce dernier site, cela m'a permis de trouver l'erreur mentionnée plus haut sur les labels des photos. Pour Versailles j'ai refait les mesures sans trouver de faute. Cependant le bord du Soleil était assez difficile à définir. Le groupe de Versailles a imaginé une méthode originale (mais complexe) qui ne nécessite pas de mesurer précisément le bord du Soleil. Cette méthode est exposée dans l'article qui suit (B. Sandré et ses élèves).

## Les résultats

Quand on fait la moyenne des onze déterminations on trouve  $D_{TS}=160$  millions de kilomètres (Mkm), avec un écart quadratique moyen de 37 Mkm. L'incertitude sur la valeur moyenne est donc :  $37/\sqrt{11}=11$  Mkm. Le résultat :  $D_{TS}=160\pm 11$  Mkm est déjà assez satisfaisant. Mais il y a un test que les statisticiens appliquent souvent pour éliminer des erreurs ponctuelles : c'est le rejet des mesures qui s'écartent de la moyenne de plus ou moins deux fois l'écart quadratique moyen. Un tel test conduit à éliminer la mesure de Versailles et donne le résultat final (l'incertitude interne suppose qu'il n'y a pas d'effet systématique propre à la méthode) :

$$D_{TS} = 152 \pm 8 \text{ millions de kilomètres.}$$

## Qu'aurions-nous fait sans les clichés de St-Louis ?

A Vincenzo de La Réunion, C. Chon-Hock et ses élèves ont enregistré les temps des deuxième et troisième contacts : 9h38min48s et 15h07min02s respectivement. A St-Genis-Laval j'ai mesuré ces temps en observant avec un Vénuscope de la société SODAP-SOBOMEX. J'ai trouvé 7h40min40s et 13h04min27s. Les durées de transit entre ces contacts sont donc  $t_1=5.55388$  heures pour Vincenzo et  $t_2=5.39638$  heures depuis la France métropolitaine. En notant  $d_1$  et  $d_2$  les distances entre le centre du Soleil et les droites de transit vues depuis Vincenzo et la France

métropolitaine, on a (théorème de Pythagore) :

$$\left(\frac{t_1}{t_2}\right)^2 = \frac{(R'^2 - d_1^2)}{(R'^2 - d_2^2)}$$

Attention  $R'$  n'est pas exactement le rayon apparent du Soleil, mais approximativement le rayon du Soleil diminué du rayon de Vénus, soit  $R'=914''$ . La quantité  $d_1$  est ce que nous cherchons et  $d_2$  peut se mesurer sur un cliché composite montrant le transit depuis la France métropolitaine, seule. Nous avons choisi le cliché composite fait à Ferney-Voltaire par B.

Haguenaer et ses élèves. Nous trouvons  $d_2=0.6644$  en unité de rayon solaire, i.e.,  $d_2=628''$ . Il était environ  $TU=8h10$  et la distance AB était alors de 8294 km. De l'équation ci-dessus nous tirons  $d_1=606.8''$  et  $\Delta'=21.2''$  (car  $\Delta'=d_2-d_1$ ). Si on suppose (ce qui est incorrect comme cela est expliqué dans le CC105) que AB était perpendiculaire aux lignes de transit nous trouvons :  $D_{TS}=211$  Mkm. L'ordre de grandeur est correct, mais bien moins satisfaisant que le résultat obtenu par la méthode que le CLEA préconisait.

**Tableau A** : Les participants

SITE	MOYEN	RESPONSABLE
Calern	Télesc.	G. Kober (Association Argetac)
Chinon	Téléobj. 300mm + webcam	J.L. Duhamel
Dijon	Téléobj. 300mm + webcam	P. Causeret
Draguignan	Télesc. 130/720 + webcam	Club Astro du lycée Jean-Moulin
Ferney-Voltaire	Téléobj. 1000mm + photonum	B. Haguenaer + groupe
Spitzberg	Lunette 60/870 + webcam	G. Dodray + élèves
Lyon	Téléobj. 135mm + webcam	Ph. Merlin + visiteurs
Marseille	-	L. Ruiz + Association Andromède
Rennes	Télesc. 150/762 + photonum	G. Pascual, S. Barbier, N. Le Berder
St-Genis Laval	lentille 250mm + webcam	G. Paturel
St-Louis	Télesc. 114/900	Th. Derolez
Tarentaise	Télesc. 254/1600	J.N. Terry
Versailles	Télesc. 100/600 + photonum	B. Sandré et élèves
Vincendo	Télesc. 90/1000 + photo	C. Chon-Hock + élèves

**Tableau B** : Les mesures et les résultats

SITE	long. °	lat. °	AB(8h30) km	d(7h00)	d(8h30)	d(10h00)	$\Delta$ "	$D_{TS}$ Mkm
Calern	6.92	43.75	8094	0.8286*	0.6714	0.8638*	28.4	153
Chinon	0.25	47.17	8580	0.6802*	0.6831§	0.6860*	37.8	122
Dijon	5.00	47.30	8386	0.8267*	0.6705	0.8728*	23.6	191
Draguignan	6.47	43.53	8101	0.7653‡	0.6714	0.7934	23.6	184
Ferney-Voltaire	6.12	46.25	8278	0.7649	0.6749	0.8006	26.5	168
Spitzberg	15.38	78.22	9923	0.7527	0.6771§	0.8036	33.1	161
Lyon	4.78	45.70	8303	0.7709	0.6865	0.8014	37.8	118
Marseille	5.39	43.31	8137	0.7688	0.6687	0.7875	26.5	165
Rennes	-1.67	48.10	8710	-	-	-	-	-
St-Genis Laval	4.78	45.70	8303	0.7410	0.6826	0.7829	35.9	125
<b>St-Louis</b>	<b>55.42</b>	<b>-21.27</b>	-	<b>0.7426</b>	<b>0.6496</b>	<b>0.7794</b>	-	-
Tarentaise	4.49	45.37	8301	0.7638	0.6806	0.8056	33.1	135
Versailles	2.15	48.68	8581	0.7529	0.6647	0.7824	18.9	(244)
MOYENNE BRUTE								160±11
MOYENNE FINALE								152±8

\* heures d'encadrement différentes de 7h00 et 10h00

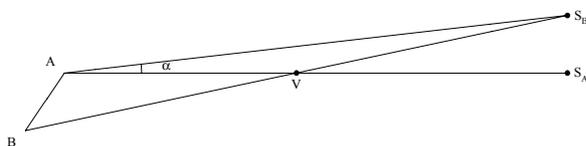
§ mesure interpolée

‡ mesure extrapolée

# La distance Terre-Soleil déterminée entre Versailles et La Réunion (\*\*\*)

Omar Abderrazik, Jérôme Barral, Clémence Leclerc, Béatrice Sandré, Lucie Tonnelier

**Résumé :** Nous avons essayé de mesurer la distance Terre – Soleil par parallaxe à partir de nos photos du passage de Vénus prises depuis Versailles (lieu A) et celles de Thérèse Derolez prises depuis Saint Louis-de-la Réunion (lieu B). Une méthode itérative originale est proposée qui permet d'utiliser des clichés dont l'orientation n'est pas connue et dont la qualité n'est pas assez bonne pour donner une mesure précise du bord du Soleil. Ce travail a été réalisé dans le cadre des TIPE d'une classe de PCSI.



$S_A$  et  $S_B$  sont les deux points de la surface solaire où se forme l'ombre de Vénus vue depuis les deux points d'observation A et B. Pour déterminer l'écart angulaire  $\alpha$ , il "suffit" de mettre les deux photos prises au même instant à la même échelle, puis de les superposer après s'être assuré de leur orientation.

Le télescope dont nous disposons est mobile. Nous avons fait la mise en station grâce à une lunette polaire avec un maximum de soin, mais nous ne pouvons donner la précision sur ce réglage. Nous avons placé le grand côté de la photo parallèlement à l'axe du télescope mais ce deuxième réglage est très approximatif. Une simple superposition des photos risque donc d'engendrer de grosses erreurs.

La mise à l'échelle des deux photos peut se faire grâce au diamètre du Soleil qui doit être le même. Mais la superposition de photos du Soleil prises consécutivement, du même lieu, avec le même télescope mais des temps de pose différents, nous a révélé des variations du rayon du Soleil de l'ordre de 2,5 % soit 24". C'est justement l'ordre de grandeur de l'écart angulaire à mesurer.

Ces remarques expliquent pourquoi nous avons eu recours à une méthode plus complexe pour l'orientation et la mise à l'échelle. L'orientation est obtenue grâce au parallélisme des cordes décrites par Vénus vue de A et B. La

mise à l'échelle est obtenue grâce aux longueurs des cordes.

Si on néglige les vitesses  $\vec{v}_A$  et  $\vec{v}_B$  des points A et B dans le référentiel géocentrique devant la vitesse  $\vec{V}_T$  du centre de la Terre dans le référentiel héliocentrique, les vitesses de déplacement de l'ombre de Vénus vue des deux lieux sont identiques et constantes. En faisant cette approximation nous déterminerons une première valeur de la distance Terre – Soleil. Le résultat obtenu nous permettra de calculer les vitesses  $\vec{v}_A$  et  $\vec{v}_B$  et donc de corriger notre calcul.

## 1. Lecture des photos

A l'aide d'un logiciel de dessin vectoriel (Visio 2000), nous avons déterminé sur les photos prises depuis Versailles (A) le rayon du Soleil (78,9 mm) et les distances  $dA_i$  entre le centre du Soleil et le centre de Vénus.

Nous avons ensuite modifié l'échelle des photos prises de Saint Louis (B) pour que le rayon du Soleil soit approximativement le même puis mesuré les distances  $dB_i$  entre le centre du Soleil et le centre de Vénus. Les mesures de  $dA$  et  $dB$  sont données dans le Tableau 1 à la fin de l'article.

## 2. Coordonnées du centre du Soleil et première évaluation de la distance Terre – Soleil

La corde décrite par l'ombre de Vénus est choisie comme axe  $x'x$  et la position occupée par Vénus à 8h30 TU comme origine.

Dans l'hypothèse où  $v_A$  et  $v_B$  sont négligeables devant  $V_T$ , on note  $e$  la distance parcourue par l'ombre pendant une demi-heure.

Le Tableau 2 à la fin de l'article donne l'abscisse de l'ombre de Vénus pour chacune des photos.

Un point quelconque de coordonnées  $x$  et  $y$  dans le plan de la photo, est à la distance  $l_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + y^2}$  du centre de Vénus à l'heure  $t_i$ .

Soit  $x_{CA}$  et  $y_{CA}$  les coordonnées du centre du Soleil sur les photos prises de A et  $e_A$  la valeur de  $e$  sur ces photos.

Si les valeurs des  $dA_i$  étaient parfaites, la fonction  $U(x, y, e) = \sum_i (l_i - dA_i)^2$  serait nulle en  $(x = x_{CA}, y = y_{CA}, e = e_A)$ .

Les mesures étant entachées d'erreur,  $U(x, y, e)$  ne s'annule pas mais son minimum défini  $(x_{CA}, y_{CA}, e_A)$ .

A l'aide d'un logiciel de calcul formel (Maple), nous avons recherché les valeurs de  $x$ ,  $y$  et  $e$  qui annulaient les dérivées de  $U$  par rapport à  $x$ ,  $y$  et  $e$  et obtenu :

$$x_{CA} = -2,4412 \text{ mm}$$

$$y_{CA} = +52,6753 \text{ mm}$$

$$e_A = 10,0452 \text{ mm par } 1/2 \text{ heure}$$

$$U(x_{CA}, y_{CA}, e_A) = 0,250 \text{ mm}^2$$

Nous avons fait de même pour l'ensemble des photos prises de B et obtenu :

$$x_{CB} = -3,0177 \text{ mm}$$

$$y_{CB} = +51,1523 \text{ mm}$$

$$e_B = 10,3229 \text{ mm par } 1/2 \text{ heure}$$

$$U(x_{CA}, y_{CA}, e_A) = 0,182 \text{ mm}^2$$

On constate que  $e_A$  et  $e_B$  sont légèrement différentes. Il suffit de multiplier toutes les longueurs mesurées sur les photos prises depuis A par  $e_B/e_A$  pour que les deux séries de photos soient à la même échelle :

$$X_{CA} = x_{CA} \times \frac{e_B}{e_A} = -2,5087 \text{ mm}$$

$$Y_{CA} = y_{CA} \times \frac{e_B}{e_A} = +54,1318 \text{ mm}$$

La distance entre les deux points  $(X_{CA}, Y_{CA})$  et  $(x_{CB}, y_{CB})$  est la distance entre les ombres de Vénus sur les photos prises depuis A et B à 8h30

avec pour échelle  $15,76'$  (le rayon angulaire du Soleil le 8 Juin 2004) représenté par  $78,9 \text{ mm}$  :

$$\alpha = \sqrt{(X_{CA} - x_{CB})^2 + (Y_{CA} - y_{CB})^2} \times 15,76 \times 60 / 78,9 = 36,2''$$

A 8h30 le calcul expliqué p 26 du n°105 des cahiers Clairaut donne  $AB \sin \psi = 1,3455$  en unité de rayon terrestre d'où

$$a = R \frac{AB \sin \Psi}{\alpha} \times \frac{z}{1-z} = 127,6 \text{ millions de km}$$

Où  $R = 6380 \text{ km}$  est le rayon de la Terre et  $z = \frac{SV}{ST} = 0,723$  le rapport des rayons des orbites de Vénus et de la Terre.

### 3. Calcul des vitesses

Connaissant  $a$ , on peut calculer  $V_T = \frac{2\pi a}{T_T}$  où

$$T_T = 1 \text{ an.}$$

Si  $a = 127,6$  millions de km, on obtient

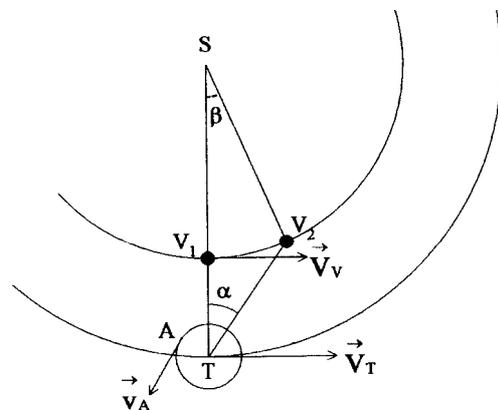
$$V_T = 25,2 \text{ km/s.}$$

$\lambda_A$  étant la latitude de A,  $v_A = \frac{2\pi R \cos \lambda_A}{T_0}$

où  $T_0 = 1$  jour est la période de rotation de la Terre autour de l'axe des pôles.

A Versailles,  $\lambda_A = +48^\circ 48' 00''$  et  $v_A = 0,30 \text{ km/s}$ .

A Saint Louis,  $\lambda_B = -21^\circ 16' 24''$  et  $v_B = 0,43 \text{ km/s}$ ;  $v_A$  et  $v_B$  sont petits devant  $V_T$  mais non négligeables. Il faut en tenir compte dans le facteur d'échelle.



Nous allons donc établir les expressions des vitesses angulaires<sup>1</sup> de déplacement de l'ombre de Vénus par rapport au Soleil vue depuis A et B.

Soit  $v'_A = \frac{\vec{v}_A \cdot \vec{V}_T}{V_T}$  la projection de  $\vec{v}_A$  sur  $\vec{V}_T$ .

$$\frac{d\beta}{dt} = \beta^g = \frac{V_V}{z \times a} - \frac{V_T + v'_A}{a}$$

$V_V$  étant la vitesse de Vénus dans le référentiel héliocentrique

$$\text{Or } V_V = \frac{2\pi a}{T_V}$$

$T_V$  étant la période de révolution de Vénus, et d'après la troisième loi de Kepler,  $T_V = T_T \sqrt{z^3}$ .

$$\text{D'où } V_V = \frac{2\pi a}{T_T} \times \frac{z}{\sqrt{z^3}} = V_T \times \frac{1}{\sqrt{z}}$$

et

$$\beta^g = \frac{V_T}{a} \left( \frac{1}{z\sqrt{z}} - 1 \right) - \frac{v'_A}{a} = \frac{V_T}{a} \left( \frac{1}{z\sqrt{z}} - 1 \right) \left( 1 - \frac{v'_A}{V_T \left( \frac{1}{z\sqrt{z}} - 1 \right)} \right)$$

Les angles  $\alpha$  et  $\beta$  étant petits, la relation des sinus dans le triangle  $SV_2T$  s'écrit :

$$\frac{\alpha}{z \times a} = \frac{\beta}{(1-z)a} \quad \text{d'où}$$

$$\alpha^g = \frac{d\alpha}{dt} = \frac{V_T}{a} \frac{z}{1-z} \left( \frac{1}{z\sqrt{z}} - 1 \right) \left( 1 - \frac{v'_A}{V_T \left( \frac{1}{z\sqrt{z}} - 1 \right)} \right)$$

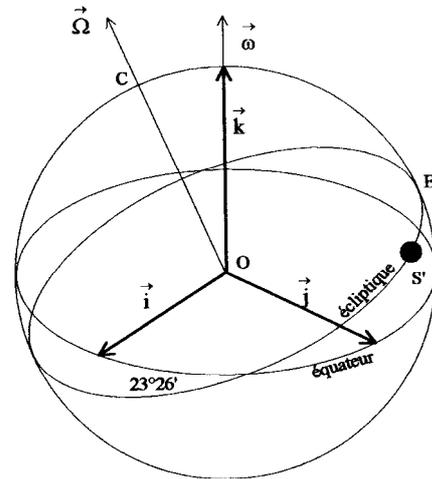
Pendant le même intervalle de temps (1/2 heure par exemple), le déplacement de l'ombre de Vénus par rapport au Soleil peut s'écrire :

<sup>1</sup>A cause de problèmes typographiques, les dérivées par rapport au temps d'une grandeur sont notées par le symbole de cette grandeur surmonté d'un petit carré blanc, au lieu du point noir habituellement utilisé.

$$e \left( 1 - \frac{v'_A}{V_T \left( \frac{1}{z\sqrt{z}} - 1 \right)} \right) \text{ vu de A et}$$

$$e \left( 1 - \frac{v'_B}{V_T \left( \frac{1}{z\sqrt{z}} - 1 \right)} \right) \text{ vu de B.}$$

Il faut donc calculer  $\frac{v'_A}{V_T}$  et  $\frac{v'_B}{V_T}$  qui sont fonctions du temps, les angles de  $\vec{v}_A$  et  $\vec{v}_B$  avec  $\vec{V}_T$  étant fonction du temps.



Nous reprenons ici les notations et le calcul de la page 26 du n°105 des cahiers Clairaut.

Soit  $\vec{\omega}$  le vecteur rotation de la Terre sur elle-même.

$$\vec{v}_A = R \vec{\omega} \wedge \vec{OA}$$

$$\vec{v}_B = R \vec{\omega} \wedge \vec{OB}$$

(O est le centre de la Terre,  $\vec{OA}$  et  $\vec{OB}$  sont des vecteurs unitaires).

Soit  $\vec{\Omega}$  le vecteur rotation du centre de la Terre autour du Soleil.

$$\vec{v}_T = \vec{\Omega} \wedge \vec{ST} = -a \vec{\Omega} \wedge \vec{OS}'$$

$\vec{OS'}$  est un vecteur unitaire colinéaire à la direction Terre – Soleil).

Soit la base unitaire orthonormée et directe définie par :

$\vec{i}$  intersection du plan équatorial et du plan méridien de longitude  $0^\circ$

$\vec{j}$  intersection du plan équatorial et du plan méridien de longitude  $90^\circ$

$\vec{k}$  colinéaire à l'axe des pôles et orienté du Sud vers le Nord.

$$\vec{\omega} = \frac{2\pi}{T_o} \vec{k}$$

$\vec{\Omega}$  est perpendiculaire au plan de l'écliptique qui fait un angle de  $23^\circ 26'$  avec le plan de l'équateur.

L'angle de  $\vec{\Omega}$  avec le plan de l'équateur est donc  $\lambda_C = 90^\circ - 23^\circ 26' = 66^\circ 34'$ .

Le 8 Juin, le soleil est dans la direction de S' ; d'après les éphémérides, son ascension droite est 5h 07min. Le jour du solstice d'été, le soleil est dans la direction de E et son ascension droite est 6h 00min. L'écart entre les longitudes de E et de S' est donc

$$\varphi_E - \varphi_{S'} = 53 \text{ min} = 13,25^\circ.$$

La longitude de C est donc

$$\varphi_C = \varphi_{S'} + 13,25^\circ + 180^\circ = 360^\circ \times \frac{12 - h_{TU}}{24} + 13,25^\circ + 180^\circ$$

On en déduit

$$\vec{\Omega} = \frac{2\pi}{T_T} \left[ \sin \lambda_C \vec{k} + \cos \lambda_C \left( \cos \varphi_C \vec{i} + \sin \varphi_C \vec{j} \right) \right]$$

On peut alors calculer  $\vec{v}_T = -a \vec{\Omega} \wedge \vec{OS'}$ ,

$\vec{v}_A = R \vec{\omega} \wedge \vec{OA}$  et  $\vec{v}_B = R \vec{\omega} \wedge \vec{OB}$  puis

$$\frac{v'_A}{V_T} = \frac{\vec{v}_A \cdot \vec{V}_T}{V_T^2}, \frac{v'_B}{V_T} = \frac{\vec{v}_B \cdot \vec{V}_T}{V_T^2} \text{ et}$$

$$\varepsilon_A = \frac{v'_A}{V_T \left( \frac{1}{Z\sqrt{Z}} - 1 \right)} \text{ et } \varepsilon_B = \frac{v'_B}{V_T \left( \frac{1}{Z\sqrt{Z}} - 1 \right)}.$$

$\varepsilon_A$  et  $\varepsilon_B$  sont comme  $\varphi_{S'}$  fonction de l'heure TU et calculés à l'aide du logiciel de calcul.

#### 4. Calcul de la distance Terre - Soleil

Les cordes décrites par l'ombre de Vénus seront toujours choisies comme axe des abscisses avec

pour origine la position de l'ombre à 8h 30 TU. Nous écrivons que l'abscisse de l'ombre de Vénus vue depuis A est :

$$\text{à } 9\text{h } 00 \text{ TU : } x_{9h} = x_{8h30} + e \left( 1 - \varepsilon_{A(8h45)} \right)$$

$$\text{à } 9\text{h } 30 \text{ TU : } x_{9h30} = x_{8h} + e \left( 1 - \varepsilon_{A(9h15)} \right)$$

$$\text{à } 8\text{h } 00 \text{ TU : } x_{8h} = x_{8h30} - e \left( 1 - \varepsilon_{A(8h15)} \right) \dots$$

De même que dans le paragraphe 2, on calcule les

$$l_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + y^2}, \text{ la fonction}$$

$$U(x, y, e) = \sum_i (l_i - dA_i)^2 \text{ et les valeurs}$$

$(x = x_{CA}, y = y_{CA}, e = e_A)$  qui annulent les dérivées de U par rapport à x, y et e. On fait de même pour B.

Puis la mise à l'échelle des photos prises de A :  $X_{CA} = x_{CA} \times \frac{e_B}{e_A}$  et  $Y_{CA} = y_{CA} \times \frac{e_B}{e_A}$

On calcule

$$\alpha = \sqrt{(X_{CA} - x_{CB})^2 + (Y_{CA} - y_{CB})^2} \times 15,76 \times 60 / 78,9$$

et la distance Terre – Soleil.

En ayant pris  $a = 127$  millions de km, on obtient  $\alpha = 27,3''$  et  $a = 169 \times 10^6$  km. Il suffit de réinjecter cette nouvelle valeur de a en tête de programme et de recalculer  $\alpha$  et a ... et ce jusqu'à ce que les valeurs initiale et finale de a soient identiques, ce qui se produit au quatrième calcul (avec 4 chiffres significatifs).

On obtient alors  $\alpha = 29,03''$  et  $a = 159,2 \times 10^6$  km. Il reste à déterminer l'incertitude sur ce résultat.

#### 5. Précision de la mesure

Si les mesures des  $dA_i$  avaient été parfaites, nous aurions obtenu  $U(x_{CA}, y_{CA}, e_A) = 0$  alors que le calcul nous donne

$$U(x_{CA}, y_{CA}, e_A) = \sum_i (l_i - dA_i)^2 = 0,230.$$

Comme nous utilisons 10 photos, la valeur de l'écart type entre les  $dA_i$  et les  $l_i$  est donc :

$$\sigma_A = \sqrt{\frac{0,23}{10}} = 0,15 \text{ mm}$$

De même,

$$U(x_{CB}, y_{CB}, e_B) = \sum_i (l_i - dB_i)^2 = 0,180 \text{ et}$$

comme nous utilisons 12 photos,

$$\sigma_B = \sqrt{\frac{0,18}{12}} = 0,12 \text{ mm}$$

En choisissant pour les  $dA_i$  et les  $dB_i$  des valeurs aléatoires dans des distributions gaussiennes de largeurs  $\sigma_A$  et  $\sigma_B$ , autour des valeurs mesurées, nous avons obtenu un écart type de 18 millions de km sur  $a$ . C'est l'ordre de grandeur de l'incertitude sur la distance Terre – Soleil :

$$a = (159 \pm 18) \times 10^6 \text{ km}$$

## 6. Utilisation d'autres lieux d'observation

Afin d'améliorer le résultat et son incertitude, il est possible de refaire le même travail à partir de photos prises d'autres points de la surface de la Terre. Nous avons réutilisé celles de Saint-Louis-de-La-Réunion et remplacé Versailles par

Longyearbyen au Spitzberg (photos prises par Gilles Dodray).

Un calcul rigoureusement identique au précédent nous donne :

$$a = (146 \pm 11) \times 10^6 \text{ km}$$

L'intersection des deux domaines d'incertitude nous permet d'écrire :

$$a = (149 \pm 8) \times 10^6 \text{ km}$$

Ce calcul n'a nécessité aucune hypothèse sur les orientations et les échelles des photos. Mais il assimile la trajectoire de l'ombre de Vénus à une droite, ce qui revient à négliger les composantes des vitesses  $\vec{v}_A$  et  $\vec{v}_B$  perpendiculaires à  $\vec{V}_T$  et à  $\vec{OS}'$  et donc parallèles à  $\vec{\Omega}$ .

**Tableau 1** : Mesures des distances apparentes entre le centre de Vénus et le centre du Soleil sur des clichés mis à la même échelle et pris depuis deux sites A et B.

heure TU	5h45	6h00	6h30	7h00	7h30	8h00	8h30	9h00	9h15	9h30	10h00	10h30	10h45	11h00
$dA_i$ en mm		71,076	64,698	59,552	55,954	52,980	52,659	54,072		57,362	61,903	67,807		
$dB_i$ en mm	74,055	70,745	63,780	58,334	54,230	51,553	51,305		54,222	56,521	61,303	67,760	71,128	74,867

**Tableau 2** : Abscisses de l'ombre de Vénus pour chacune des photos.  $e$  est la distance parcourue par l'ombre de Vénus en une demi-heure.

heure TU	5h45	6h00	6h30	7h00	7h30	8h00	8h30	9h00	9h15	9h30	10h00	10h30	10h45	11h00
$x_i$	-5,5 e	-5 e	-4 e	-3 e	-2 e	-e	0	+e	+1,5 e	+2 e	+3 e	+4 e	+4,5 e	+5 e

■

# Un peu d'histoire: II - Les observations des transits de Vénus de 1761/1769 (\*)

Jean-Noël Terry

**Résumé :** *Ce petit article est sans prétention : son seul but est de vous faire partager le plaisir que j'ai eu à « écouter » les passionnés d'astronomie des siècles précédents. Ils ont tenté l'observation, ont souvent échoué... et ont recommencé ! Allons à leur rencontre. Même si l'actualité est au transit de Vénus, Mercure ne peut être dissocié de la recherche de la parallaxe du Soleil.*

## En 1761 :

**Jean-Dominique Cassini** rapporte que « l'Académie nomma des commissaires pour concerter entre eux les lieux où l'on pourrait concilier, d'un côté l'avantage de l'observation, et de l'autre la facilité d'y aborder et la commodité de s'y établir. Le choix des lieux une fois réglé, l'on n'était pas embarrassé de trouver des astronomes qui voulussent s'y rendre. »

Les astronomes étaient motivés, mais la guerre de Sept ans compliquait tout.

Cette guerre commença en 1755, quand les Anglais saisirent 300 navires français. Il y aura d'un côté la France (Louis XV), l'Autriche (Marie-Thérèse), la Russie (Elisabeth I), la Saxe, la Suède et l'Espagne ; de l'autre l'Angleterre, la Prusse (Frédéric II), et le Hanovre. La guerre fit rage des Amériques en Asie, avec la lutte pour le contrôle des mers. En 1762, à la mort de la reine de Russie, son successeur Pierre III signe une paix séparée avec la Prusse, c'est la désintégration de la coalition antiprussienne et la fin de la guerre en 1763... avec l'empire de Louis XV décimé.

**Joseph-Nicolas Delisle** (1688-1768) envoya sa mappemonde du passage à plus de cent astronomes. L'Académie Royale des Sciences organisa trois campagnes.

Il écrit : « Si nous laissons échapper cette occasion, cela ne saurait être ensuite compensé, ni par les efforts de génie, ni par la constance des travaux, ni par la magnificence des plus grands rois ; moment que le siècle passé nous enviait, et qui serait dans l'avenir, j'ose le dire, une injure à la mémoire de ceux qui l'auraient négligé. »

Le transit de 1761 fut observé par de très nombreux observateurs. Parmi eux Pingré, Chappe, Cassini, Maraldi, Lalande...

**Mikhaïl Vassilievitch Lomonosov** (1711-1765), depuis St-Petersbourg, nota que le bord de Vénus apparaissait flou, et attribua ceci à l'existence d'une atmosphère, mais sa remarque passa inaperçue.

Les mesures de distance Terre-Soleil étaient moins précises que prévues par Halley : l'image de Vénus est en effet déformée, au moment où elle entre dans le disque et, quand elle redevient normale, le transit est commencé. Ce que les Anglo-saxons appellent le « Black Drop » est un phénomène qui n'a pas été observé, semble-t-il, en 2004. Attribué à l'atmosphère de Vénus, n'était-il dû qu'au manque de qualité du matériel ?

Les conditions des expéditions étaient aussi cause d'imprécision.

## Quelques expéditions

**Joseph-Nicolas Delisle** (1688-1768) : il avait rencontré Halley en 1724, et désirait mesurer la parallaxe du Soleil. Il organisa des expéditions pour les transits de 1761 et 1769, mais mourut un an avant la deuxième.

**Jean-Baptiste Chappe d'Auteroche** (1722-1769) fut choisi comme responsable d'une expédition à Tobolsk en Sibérie, suivant l'invitation de l'impératrice Elisabeth I.

On sait peu de choses de lui. De petite noblesse, il rejoint l'Observatoire de Paris comme dessinateur. Son habileté fut remarquée. Il observa le transit de Vénus de 1753 avec le directeur de l'Observatoire,

Cassini de Thury, et avec Maraldi et Legentil. En 1760, il devint astronome officiellement.

Le voyage pour la Sibérie vers un site mal accessible fut pénible. Parti en novembre 1760 pour la Hollande, après avoir rédigé son testament, afin d'embarquer pour St-Petersbourg, il dut faire le voyage par terre, le bateau étant parti !

D'un autre côté, le navire coula près de la Suède ! Il lui fallut 8 jours pour atteindre Strasbourg. Ayant cassé voiture, baromètre et thermomètre après une chute dans un fossé, il fait refaire les instruments. Il part alors pour Ulm, pour emprunter le Danube. Gêné par le brouillard, il ne navigue que quelques heures par jour, et teste son baromètre, dresse la carte du fleuve. Il arrive à Vienne le 31 décembre 1760, où l'archiduc Joseph et l'impératrice Marie-Thérèse le reçoivent, car une lettre de Delisle l'avait annoncé comme grand mathématicien. Il repart le 8 janvier 1761 en carrosse, il fait très froid (-23°C), les rivières sont en partie gelées, mais la glace n'est pas assez solide, et les chemins glissants !

Le 22 janvier, il arrive à Varsovie. A partir de Riga il prend des traîneaux. En arrivant à St-Petersbourg, il apprend que l'Académie de Russie, inquiète, a envoyé sa propre expédition (Paupof à Irkoutsk et Rumovsky à Nertchinsk). L'impératrice lui donne 4 traîneaux, un guide, un interprète, un horloger et une escorte militaire. Il reste 3500 km à faire ! En arrivant à Moscou, le 12 mars, les traîneaux sont cassés. Le 17 mars, Chappe repart après remise en état. A Nijni-Novgorod, un équipage manque de suivre un cheval tombé dans un ravin.

Alors qu'il ne lui reste que la Tobol à traverser, le chef de la station refuse les chevaux, disant que la glace est trop fragile. Chappe ruse alors, ayant remarqué la fascination des hommes pour son thermomètre à mercure. Il leur dit que c'est un animal magique qui protégera le voyage si « l'animal descend ». Après avoir chauffé le thermomètre près d'un poêle, il l'expose au froid...

« Je m'aperçus bientôt de la fermentation que produisaient l'ignorance et la superstition dans toutes ces têtes lorsque le mutin, que je n'avais pas vu sortir, entra avec enthousiasme, et me dit que l'animal était descendu en dessous de l'endroit indiqué. Tous coururent s'en assurer, et je n'eus en ce moment d'autre embarras pour partir que de faire taire mon interprète. »

Il arriva le 10 avril ; comme Tobolsk est au milieu d'un réseau de rivières, il s'installe sur une colline, teste le matériel avec une éclipse de Lune le 18 mai et une de Soleil le 3 juin. Le dégel provoque des inondations, les habitants du lieu, excités par le pope, le prennent pour un sorcier. Il finit par coucher dans

l'observatoire pour veiller sur le matériel, dans la crainte aussi que le vent ne le mette à bas.

Le moral est au plus bas quand le ciel se couvre la veille du transit. Chappe racontera qu'il a passé la nuit à guetter la météo, angoissé à l'idée de tous ces efforts inutiles. Finalement, le ciel se dégagera après le premier contact et Chappe pourra observer le reste du transit.

Il quittera Tobolsk le 28 août. Pendant son retour, Chappe étudie les battements du pendule, les variations du magnétisme terrestre, la géologie, la météorologie, les coutumes.

Il repasse à St-Petersbourg, au moment de la prise de pouvoir de Pierre III et fait une communication à l'Académie des Sciences en présence de la Grande-Duchesse Catherine, la future Catherine II qui proposera à Chappe de diriger l'Académie impériale des Sciences, ce que Chappe refusera. Dans son récit à l'Académie royale des Sciences (« Extrait du voyage fait en Sibérie, novembre 1762 ), il condamne la servilité en Russie, la cruauté des dirigeants et méprise ses savants. Cela provoquera le « Chappe est un sot » de Diderot et une réponse anonyme signée par « Un amant de la Vérité », qui est due à l'impératrice Catherine II.

Les écrits de Chappe furent fort critiqués. Il n'y a qu'à lire la descente en flèche par Grimm et Diderot dans leur « Correspondance littéraire, philosophique et critique » (tome 8, p298 et suivantes). Grimm parle de « la puérité de l'auteur » et met en doute, aussi, les mesures de Chappe (à cause du mauvais temps), au moment où celui-ci mourait en Californie.(1769).

Par contre, en 1772, Pingré dit de lui : « Feu M. l'Abbé Chappe était connu pour un bon observateur »...

**Alexandre-Guy Pingré** (1711-1796) assisté de Denis Thuillier. Ils prirent le bateau, « Le Comte d'Argenson » de la Compagnie des Indes, le 9 janvier 1761, partant de l'Orient, pour l'île Rodrigue (au nord de Madagascar), où ils arrivèrent sans encombre le 28 mai. Pingré a laissé une relation très détaillée de son voyage, tant sur le plan astronomique que des pays rencontrés.

Jérôme de Lalande le décrit comme travailleur infatigable :

« On a vu ... que l'extrême complaisance de Pingré et sa prodigieuse facilité pour le travail suffisaient à tout : on découvrait une comète, c'était à Pingré de la calculer ; on avait besoin de deux ou trois mille ans d'éclipses, il ne fallait que les lui demander ; d'un voyage au-delà des mers, il était prêt à partir ; de deux volumes de traduction, ce n'était rien pour lui, non plus que des hymnes pour le bréviaire de sa congrégation : car on les lui demanda, parce qu'on

savait qu'il pouvait suffire à tout, et que ses grands ouvrages n'en souffraient presque point ; il n'y avait que les astronomes qui voyaient avec regret cette perte de temps. »

L'Académie des Sciences avait sollicité un laissez-passer délivré par lord Anson, Grand Amiral d'Angleterre et d'Irlande :

« Vous êtes par la présente requis de la façon la plus stricte de ne jamais molester (Pingré) ou ses effets, mais au contraire de le laisser procéder sans interruption à l'exécution de sa mission ».

Ils observèrent l'entrée, mais les nuages vinrent, empêchant la suite de l'observation. L'expédition en profita pour faire des relevés de latitude et longitude, ainsi que des observations biologiques.

Mais la France et l'Angleterre étaient en guerre. La corvette « L'Oiseau », chargée de les ramener, fut coulée par le navire anglais *Plassey*, l'île occupée, puis abandonnée avec, en plus, l'équipage de l'Oiseau.

Pingré fait une description détaillée de l'île. Citons un passage amusant :

« La tortue de terre n'est pas un bel animal ; mais il nous a été le plus utile de ceux que nous avons trouvés à Rodrigue. En trois mois et demi de temps que j'ai passés dans cette île, nous ne mangions presque rien d'autre chose ; soupe de tortue, tortue en fricassée, tortue en daube, tortue en gaudiveau, œufs de tortue, foie de tortue, tels étaient presque nos uniques ragoûts ; cette chair m'a paru aussi bonne le dernier jour que le premier ; je n'en goûtais pas beaucoup les œufs ; le foie me paraissait la partie la plus délicieuse de l'animal. »

Il fallut attendre le 8 septembre pour qu'un bateau français les dépose sur l'île Maurice. De là, ils embarquèrent pour l'île Bourbon, où ils passèrent 8 semaines à explorer, puis partirent à bord du *Boutin*... qui fut capturé par les Anglais. Une partie de l'équipage fut faite prisonnière, mais les astronomes furent autorisés à rester à bord. Ils purent rejoindre Lisbonne le 23 février, où leurs bagages furent pillés, puis Paris... mais, cette fois, en traversant l'Espagne en char à bœufs !! Résultat : parallaxe de 10.5''.

**Guillaume Joseph Hyacinthe Jean Baptiste Le Gentil de la Galaisière** (1725-1792).

*L'histoire de Guillaume Le Gentil a été publiée dans le dossier "Transit de Vénus", numéro 105 des Cahiers Clairaut.*

**John Winthrop**, professeur de mathématiques à Harvard, réussit à convaincre la province du Massachusetts d'organiser une expédition vers le nord-est, là où Vénus serait visible. Il partit de Boston le 9 mai, pour arriver à St-John, à Terre-Neuve, et s'installer tranquillement. Il eut d'excellentes

conditions et fit une des meilleures observations de ce transit (5 mesures de trajectoire et la fin du transit), bien qu'« entouré de milliards d'insectes décidés à saboter sa besogne ».

**Charles Mason** (1728-1786), **James Bradley** et **Jeremiah Dixon** (1733-1779) partirent pour l'Inde de l'est. A cause de la guerre, leur navire, le *Seahorse*, attaqué et endommagé par la frégate française *Le Grand*, dut regagner Plymouth. La Royal Society leur donna ordre de repartir, sous peine de poursuites. Ils s'arrêtèrent au Cap de Bonne Espérance, avec succès, n'ayant plus le temps de rejoindre les Indes, leur destination étant, d'ailleurs, tombée aux mains des Français. Résultat : parallaxe de 8.5''.

**César-François Cassini de Thury** (1714-1784) observa la sortie du disque depuis Vienne, en compagnie de l'archiduc Joseph (notre allié).

Le **Cardinal de Luynes** observa de Sens, avec micromètre. **M. Le Monnier** observa du château de St-Hubert, en présence du roi, « La présence de Sa Majesté qui a désiré voir Vénus plusieurs fois depuis les deux tiers de sa traversée jusqu'aux derniers moments de sa sortie, n'a pas peu contribué au succès de toutes les déterminations : voyant que nous jugions les derniers contacts de la plus grande importance, un profond silence nous environnait en ce moment-là. »

*Maraldi observa de l'Observatoire royal, M l'Abbé De La Caille depuis une maison de Conflans-sous-Carrière, le Père de Merville depuis le collège Louis-le-Grand.*

**Joseph-Jérôme Lefrançois de Lalande** (1732-1807) se rendit au Luxembourg.

Il y eut aussi l'Italien **Eustacio Zanotti** à Bologne, le Portugais **De Almeida** à Porto, les Hollandais **Johan Lulofs** à Leiden, **Jan de Munck** à Middelburg, **Dirk Klinkenberg** à la Hague, **Johan Maurits Mohr** à Jakarta, **Hirst** (aumônier des vaisseaux britanniques dans les Indes) au fort St-Georges de Madras, **Sustander** à Abo en Finlande, **Gister** et **Strom** à Hernosand en Suède.

**Etienne Rumowski** en Laponie (sortie seule à cause de nuages).

Le **Père Amot** à Pékin, avec un ciel nébuleux jusqu'à 8h du matin.

En tout 120 observateurs professionnels sur 62 sites (selon S. Newcomb). Une partie des lieux (Bencoolen à Sumatra, Pondichéry, Batavia) avaient été sélectionnés par Halley dès 1716.

## Le bilan :

Le bilan fut décevant, montrant une grande dispersion des résultats, la parallaxe du Soleil allant de 8.5'' à 10.5''.

La faute en était surtout à l'imprécision de la détermination des latitudes et des longitudes à l'époque.

La méthode de Halley demande les temps d'entrée et sortie, l'observation des deux est rare en 1761.

Le problème de la goutte noire est bien gênant : Maskelyne « remarque que quoique les bords du Soleil & de Vénus fussent aussi bien déterminés qu'on pouvait le souhaiter, cependant lorsque les deux bords les plus voisins des deux astres se touchèrent à l'aide du micromètre objectif, celui de Vénus semblait se dilater & se contracter alternativement, gagnant & perdant un petit espace sur le bord du Soleil. » (Mémoires Académie, 1763, p355).

## En 1769 :

*Il fallait donc multiplier les chances : d'où des expéditions dans les deux hémisphères, il y eut plus de 150 mesures faites en 80 lieux.*

L'Espagne n'autorise pas les séjours dans les îles du Pacifique. Elle refuse d'ailleurs l'accès de la Basse Californie au jésuite, le Père Boscovich. L'autorisation est accordée aux Français s'ils adjoignent deux Espagnols à leur équipe.

En particulier, **Chappe** partit le 18 septembre 1768, de Paris, pour Vera Cruz dans le golfe du Mexique, puis San José del Cabo sur la côte du Pacifique. Il emmenait l'ingénieur-géographe Pauly, le dessinateur Noël, l'horloger Dubois, et deux astronomes espagnols : Vicente de Doz et Salvador de Medina.

Après 77 jours de traversée, ils arrivent à Vera Cruz en mars 1769, en direction du Mexique. Ils arrivent sur le site en mai à la mission San José del Cabo. Mais une épidémie semblable au typhus décimait la population. Chappe décida de rester quand même.

Les observations furent excellentes. Mais l'équipe n'échappa pas à la maladie. Chappe put observer une éclipse de Lune le 18 juin. Il tomba malade, s'improvisa infirmier, mais fut atteint. Il aura quand même la force d'observer :

« On ne pourra, sans admiration, jeter les yeux sur les détails de cette observation. Il est inconcevable comment M.Chappe, languissant, accablé par les souffrances, affaibli par les accès qu'il venait d'essuyer, a pu donner à ce phénomène une attention

suivie, comme l'aurait pu faire le plus habile. » (Cassini IV).

Il mourut le 1<sup>er</sup> août. Seuls deux astronomes, Pauly et Doz, purent rentrer. Chappe aurait pu se sauver en quittant la zone contaminée.

La troisième expédition avait surtout pour but de tester les horloges marines inventées par Berthoud. **Pingré** et le comte de Fleurieu, commandant l'expédition, observèrent depuis le Cap François à St-Domingue.

Le **père Maximilien Hell**, né en Hongrie en 1720, directeur de l'Observatoire de Vienne en 1755, fut invité par Christian VII du Danemark pour observer le transit depuis Vardo, une île Arctique.

Il quitte Vienne en avril 1768, rencontre Charles VII en juin, accepte de se faire accompagner et d'aider un jeune botaniste danois qui doit récolter plantes et algues. Il quitte Copenhague en août 1768 et arrive à destination en octobre.

Observations réussies. Il resta une partie de l'année pour d'autres observations, y compris en biologie, météo et océanographie.

Cela retarda la publication de ses résultats jusqu'en 1772 ! Mais il fut accusé en 1836, par Karl von Littrow, de les avoir falsifiés (réécriture de certaines mesures avec une autre encre), ce qui ruina sa réputation. En 1883, Simon Newcomb réexamina les papiers et innocenta Hell.

Les Anglais équipèrent leurs équipes d'un quadrant, d'une horloge, de 2 télescopes de 2 pieds avec micromètres, baromètre, compas et thermomètre.

**William Wales** et **Joseph Dymond** allèrent dans la baie d'Hudson, **William Bayley** au Cap Nord, **James Dixon** en Norvège, **Mason** en Irlande, **Winthrop** dans le Massachusett, et ... **James Cook** dans les mers du Sud.

L'**expédition de William Wales**, un calculateur de l'observatoire de Greenwich, fut envoyée à Fort-Prince dans la baie d'Hudson au Canada. C'est un coin isolé du reste du Canada, connu pour ses ours ! Wales et son assistant Joseph Dymond, reçurent les consignes de Maskelyne, ils devaient recevoir une somme de 200£ à leur retour... sous réserve de travail satisfaisant.

Il faut remarquer que c'est la première expédition dans l'Arctique canadien à but astronomique unique. Nous en avons le journal, publié dans le volume LX des Philosophical Transactions of the Royal Society de 1770. Il est écrit de façon scientifique, sans parler des personnes, même quand la glace recouvre les planches du lit d'une épaisseur égale à leur demi-épaisseur.

Par contre les glaces limitaient l'accès par mer à une période de 2 mois par an. Le 3 juin était trop tôt, il fallait venir pendant l'été précédent, en 1768, et hiverner. Ils partirent le 23 juin 1768 d'Angleterre. Le

19 juillet, ils passèrent près d'un iceberg et rencontrèrent les premiers Esquimaux en canoë. Le 27 juillet, Wales compte 58 « îles de glace », le 9 août, il arrive et débarque à 14h. Le 10, il est reçu par le gouverneur qui se montre très affable.

Il se plaint de la présence de multitude d'insectes et note le peu de matériaux pour construire un abri. Du 11 au 18, le matériel est débarqué. Les 19 et 20 les fondations de l'observatoire sont faites. Les 22 et 23 sont jours de courrier, on ne travaille pas, mais du 24 au 27 les charpentiers font les lits. Le 31, le navire repart.

Le 8 septembre, il y a déjà 5 cm de neige et mi-octobre il faut mettre les tenues d'hiver. Le 22, Wales se rend compte que le toit va gêner pour mesurer les angles au zénith, il décide de rehausser le plancher et déplacer les colonnes qui portent le quadrant. Puis, jusqu'en août 1769, Wales ne tient plus son journal, sauf pour la météo.

Le 6 novembre, on peut marcher sur la rivière gelée. Il gèle même dans la maison, le gel bloque un réveil dont il faut alourdir le poids d'entraînement, il fait résonner de sinistres craquements la nuit. Wales voit même geler, à l'extérieur, en moins de 2 minutes, une demi-pinte de brandy

En mars le froid diminue, en avril des plaques de sol réapparaissent, les chasseurs préparent leur saison.

Wales observe des aurores boréales, ce qui n'est pas exceptionnel ici.

Le 3 juin, le temps fut favorable, malgré quelques passages nuageux pendant les 6 heures du transit, mais pas pendant les contacts.

Le 16 juin, la rivière fut libérée, autorisant une partie de pêche au saumon. Embarqués fin août, ils revinrent à Londres le 19 octobre, avec l'observation, en route, de la comète observée par Messier le 8 août 1769. A l'arrivée, ils furent vexés par la confiscation, par la douane, de ce qu'ils avaient rapporté en vêtements en peau donnés par la Compagnie de la baie d'Hudson.

On ne sait rien d'autre sur Dymond, mais Wales accompagna James Cook dans ses deuxième et troisième voyages dans le Pacifique. Il finit sa carrière en enseignant les mathématiques au Christ's Hospital School de Londres.

L'observateur choisi était en fait **Alexander Dalrymple**, mais il voulait commander le navire ! Chose impensable dans la marine car il n'était pas officier de marine. C'est donc le jeune James Cook qui fut désigné le 5 mai 1768 pour commander l'Endeavour. L'astronome associé fut Charles Green de Greenwich.

La destination retenue fut Tahiti : une exploration de Samuel Wallis avait découvert l'île, déclarant les habitants accueillants et ayant calculé sa

position avec précision. L'Endeavour partit donc pour Tahiti le 26 août 1768 où ils arrivèrent le 10 avril 1770.

L'observation fut réussie, le navire quitta Tahiti le 13 juillet.

Malheureusement, Charles Green mourut pendant le trajet, près de Java.

**L'Académie impériale de Russie**, sous l'impulsion de Catherine II, invita de nombreux astronomes : le jésuite allemand C.Mayer, les Suisses Mallet et Pictet, le Suédois J.Lexell, L.Euler.

**A Paris** il y eut un orage peu avant le transit. Des nuages empêchèrent de voir le premier contact. Ce fut le cas à St-Hubert pour le roi et M. Le Monnier ; à l'Observatoire Royal avec Messieurs de Thury, Maraldi, le duc de Chaulnes et du Séjour, M de Lalande et l'abbé Marie du collège Mazarin (aucun contact vu).

Libour observe de l'Hôtel de Cluny et note « une atmosphère » : « j'entends par atmosphère une nébulosité qui paraissait entourer la Planète pendant tout le temps de son passage ».

Bochart de Saron observe de son château avec une lunette de 3 pieds ½, et un grossissement de 68, mais ne voit pas le premier contact à cause des nuages.

**A Rouen** les nuages empêchèrent toute mesure sérieuse (Bouin et Dulague). **A Béziers**, l'évêque, président de l'Académie de la ville, accueille les observateurs dans son palais : « Nous fîmes transporter notre pendule, notre quart de cercle & deux lunettes à sa tour ; & nous couchâmes dans des chambres voisines la nuit du 5 au 6, afin de nous rendre à la tour avant que le Soleil se levât : nous y montâmes un peu avant 4 heures du matin. » (Bouillet père et fils et De Manse, Académie 1774). Un peu de gêne à cause de nuages.

**A Porto**, mesures du Père Theodoro De Almeida.

Les Anglais firent 69 observations, les Français 34 seulement. Au total il y en eut 151 sur 77 sites, avec 27 lunettes achromatiques (contre 3 en 1761).

## Les résultats

Malgré les soins apportés, les mesures restaient décevantes : 8.43'' pour Planmann (1772), entre 8.55 et 8.63 pour Lalande (1771), 8.60 pour William Smith (1770), 8.68 et 8.63 pour Lexell (1771 et 1772), 8.70 pour Hell (1772), 8.78 pour Thomas Hornsby (1770), 8.80 pour Pingré (1772), 9.2 et 8.88 pour Pingré et Lalande (1770). ■

**Le troisième volet de cet historique des observations des transits de Vénus sera présenté dans le prochain Cahier Clairaut.**

### Relation entre distance et parallaxe horizontale

Pour des raisons pratiques, les astronomes utilisent une façon inhabituelle de quantifier les distances qui nous séparent des astres. Ils parlent en parallaxe  $p$ . Quelle relation y a-t-il entre la parallaxe  $p$  et la distance  $d$ , exprimée dans le système métrique conventionnel?

Les distances de références sont déterminées en astronomie par la méthode des parallaxes, en visant un astre depuis deux points dont la distance respective, la base, est connue. Par convention la parallaxe horizontale est l'angle sous lequel on voit le rayon équatorial de la Terre depuis l'astre considéré (voir le CC105 - p.11 pour les explications plus détaillées). Compte tenu du fait que les angles de parallaxe sont toujours très faibles, on peut écrire la relation :  $R/d = p$ , où  $R$  est le rayon de la Terre et  $p$  la parallaxe mesurée en radians. Une bonne valeur de  $R$  est 6378 km. On a donc :

$$d = \frac{6378 \times 3600 \times 180}{3,1415926 p},$$

où  $d$  est en km et  $p$  en seconde de d'angle. Si on exprime  $d$  en million de km et  $p$  en seconde d'angle, la relation entre  $d$  et  $p$  est :

$$d = \frac{1315}{p} \quad (d \text{ en million de km et } p \text{ en seconde d'angle})$$

On voit qu'en 1769 les différentes déterminations de la distance Terre-Soleil s'échelonnaient entre 156 Mkm et 143 Mkm. avec une valeur très probable autour de 151Mkm.

Pour terminer sur ces questions de parallaxes, insistons sur le fait que pour les distances plus grandes, ce n'est plus le rayon de la Terre qui sert de base, mais la distance Terre-Soleil elle-même, ce qu'on appelle l'unité astronomique. On parle alors de parallaxe annuelle par opposition à la parallaxe horizontale que nous venons de voir.

## REMUE MENINGES

### Lever de Terre sur la Lune :

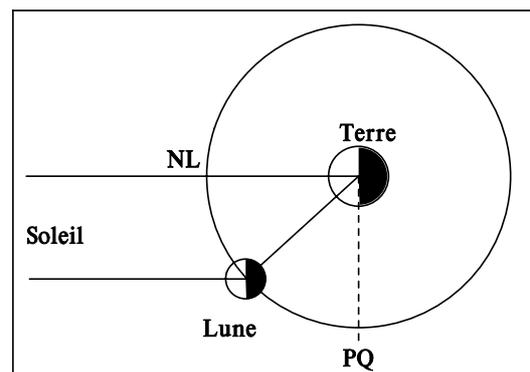
Le 24 décembre 1968, Borman, Lovell et Anders, assistaient, dans Apollo 8 à un lever de Terre, depuis la Lune. C'est une des plus célèbres photos de la conquête spatiale.



Photo NASA

Le terminateur traverse l'Afrique. Le pôle sud est la zone blanche vers la gauche, près du terminateur.

La question qui se pose est : comment un terrien situé dans la partie nuit de la Terre voyait-il la Lune, et de quelle partie de la Lunaison s'agissait-il ?



La Lune apparaîtra en croissant comme le montre le schéma qui correspond à la Lune à environ mi-chemin du premier quartier. Les éphémérides confirment notre croquis, ils donnent la Nouvelle Lune le 19 décembre et le Premier Quartier le 26 décembre.

Jean-Noël Terry



# LECTURE POUR LA MARQUISE

**La planète Mars. Histoire d'un autre monde.**  
Forget-Costard-Lognonné- Editions Belin-Pour la science-2003 - ISBN : 2701126576

Entre Jupiter, avec la masse de données envoyées par Galileo, et Saturne, à venir avec Cassini-Huyghens, n'est-il pas temps de faire un bilan sur Mars ? Pas moins de trois sondes en orbite envoient actuellement des informations sur cette planète. Pour télécharger régulièrement les images de Mars Global Surveyor, j'ai éprouvé le besoin de mieux les comprendre. Le livre de Forget, Costard et Lognonné répond très bien à cette demande.

En une soixantaine de chapitres de deux pages chacun, nous sommes initiés à la naissance, à l'évolution, à la géophysique, au climat de Mars.

La présentation est très agréable, avec une bande chronologique situant notre voyage au gré des chapitres. Les illustrations sont fidèles à la qualité de la collection. Elles représentent sans doute près de la moitié des pages, mais complètent bien utilement le texte.

Les auteurs présentent les différentes hypothèses avec clarté et prudence. Une fois n'est pas coutume, je souhaiterais citer cet extrait de l'épilogue : « Seule certitude : notre livre, lui aussi, est appelé à être remis en question. Il ne fait aucun doute qu'à terme, les données des nouvelles missions spatiales viendront contredire quelques-unes des théories que nous avons exposées dans les précédentes pages. Est-ce du pessimisme ? Bien au contraire ! L'objectif de ce livre n'est autre que de vous inviter à participer à cette formidable aventure scientifique et technologique que sont l'exploration de la planète rouge et la quête de ses origines et de son fonctionnement. Notre espoir est d'avoir réussi à vous transmettre la capacité à s'émerveiller des découvertes et des surprises que Mars n'a pas fini de nous offrir. »

Voilà une Mission Mars qui est un plein succès !

Jean-Noël Terry

**"Les Passages de Vénus",**  
Christophe Marlot- Editions Vuibert- 2004 - ISBN : 2701126576

J'ai depuis hier entre les mains un livre, un ouvrage exceptionnel, écrit par l'un d'entre nous .....

Il s'agit de Christophe Marlot (responsable de la Liste AstroMétéoros ). Son Livre " Les Passages de Vénus" est un pur bonheur, 390 pages composées de textes et d'illustrations d'époque, de très belles pages de l'auteur, représentent un travail titanesque : consultations de plusieurs milliers d'ouvrages, d'articles, de rapports, de récits ..... Ce livre peut être lu comme un roman nous plongeant dans les folles épopées à travers le temps vers l'observation des Transits de Vénus.

Ces passages de Vénus étant définitivement mystiques, même en 2004 il n'y a qu'à lire les mails depuis le 8 juin sur les "gouttes noires ", "arcs", "halo", sujets pleins de controverse.

Christophe, qui a la modestie des "grands", un des Astronomes de Niveau mondial, qui sillonne la Planète pour nous faire vivre avec bonheur les moments "astro" forts et exceptionnels, ne sera sans doute pas content de mon message, mais tant pis .Devant l'intérêt de ce livre, je ne pouvais m'empêcher de dire tout ça

Bernard Bayle

**"Arpenter l'Univers : Comment Observer, Photographier & Filmer le ciel en direct",**  
Gilles Dodray, Editions Vuibert 2004,  
ISBN : 2711753328

Ce livre m'a plu car il permet au lecteur de découvrir l'Univers à travers des applications très concrètes, basées sur une approche expérimentale. L'auteur nous fait partager le plaisir qu'on a à découvrir le monde par soi-même, à mettre nos pieds dans les traces d'illustres savants. Je crois que c'est la bonne façon de comprendre les choses, en profondeur, en touchant du doigt les difficultés et en les surmontant.

On passe ainsi de la mesure du rayon de la Terre, à la détermination des distances de la Lune, des planètes, du Soleil des étoiles et même des galaxies. L'auteur nous fait partager aussi toute son expérience dans l'observation faite avec des moyens modernes, de la photographie classique à la "Webcam".

Ce livre sera une source précieuse d'applications pratiques pour les enseignants, animateurs de club ou simplement astronomes amateurs. La présentation est sobre mais d'une grande clarté. Un livre remarquable, tout à fait dans l'esprit des documents du CLEA.

G. Paturel

■

# LA VIE ASSOCIATIVE

## EEA 2004 au col Bayard

L'école d'été d'astronomie 2004 vient juste de s'achever. Ce fut une magnifique réussite, dans un cadre merveilleux, avec une ambiance exceptionnelle. Nous relaterons plus tard ce séjour, inoubliable à plus d'un titre.



Le groupe des participants à l'EEA 2004 (Photo : P. Causeret)



Le site du col Bayard près de Gap. (Photo : A-M. Paturel)

## Production d'un document pédagogique commenté, disponible sur internet

Le CLEA vient de recevoir une subvention de l'opération LUNAP et du Ministère de la Recherche pour produire un document pédagogique en 2005. Ce sera un important travail pour notre association.

## Fin du dossier "transit de Vénus"

Dans le prochain Cahier Clairaut nous présenterons le bilan final du transit de Vénus avec une fiche pédagogique pour une exploitation en classe. On peut dire, d'ores et déjà, que cette opération a été couronnée de succès, la valeur trouvée pour la distance Terre-Soleil étant bien meilleure qu'un simple ordre de grandeur.

## Réorganisation de l'édition des CC

Une réorganisation de l'édition des Cahiers Clairaut va se mettre en place afin de mieux répartir la charge de travail. Des éditeurs adjoints prendront en charge les différentes rubriques. Plusieurs personnes ont déjà répondu à l'appel à participer à ce travail. Si, lecteurs assidus, experts en édition ou simplement passionnés de pédagogie astronomique, vous êtes intéressés, contactez la rédaction.

## Les correspondants académiques du CLEA

Nous devons préparer le renouvellement ou la reconduction des correspondants académiques du CLEA pour la prochaine Assemblée Générale du 28 novembre 2004. Les correspondants recevront des exemplaires du matériel CLEA pour faire connaître notre association dans les différentes régions. Si vous êtes intéressés contactez la rédaction.

■

## Liste de diffusion pour le CLEA

Une liste de diffusion, C-L-E-A@yahoogroupes.fr, a été mise en place par Jean Ripert et Christian Larcher. Cette liste connaît un fort succès. Elle permet des échanges rapides et très vivants entre les membres du CLEA. Il y a actuellement plus de 130 inscrits. Inscrivez-vous!

# LE COURRIER DES LECTEURS

**Nous avons reçu une lettre de Jean-Pierre Guillot de Dijon qui complète ce que nous disions à propos de l'origine du nom Hortensia.**

*Je lis actuellement "Le journal de Bourgogne" des éditions Larousse et j'y trouve à ce sujet: "l'amour des fleurs peut mener loin - C'est le cas de Philibert Commerson, médecin à Toulon-sur-Arroux, qui meurt en 1773 à l'île Maurice. Né à Chatillon-les-Dombes, il se rend célèbre parmi les hommes de sciences en herborisant à travers la Suisse, la Savoie, l'Auvergne. Le Duc de Praslin, Ministre de la Marine, en fait le naturaliste attaché à l'expédition de Bougainville qui part faire le tour du monde fin 1766. C'est ainsi qu'au cours de ses pérégrinations qu'il donne son nom définitif à l'hortensia, plante chinoise, rapportée d'Inde en l'honneur de Hortense, la fille du prince de Nassau". Commerson s'éteint avant d'apprendre que l'Académie des Sciences l'a élu en son sein.*

**Voici une question posée par un CLE@naute et la réponse formulée par Francis Berthomieu.**

*Bonjour à vous,  
D'abord bravo pour ce site, c'est vraiment très intéressant.*

*La raison du message est une question se rapportant à l'effet de la Lune lorsque nous la regardons.*

*Mon fils de 7 ans me demande souvent : Pourquoi la lune nous suit ? Il y a sûrement une réponse scientifique et j'aimerais la connaître pour pouvoir l'informer convenablement.*

**La réponse de Francis:**

Il y a bien sûr une réponse, pas si simple à comprendre quand on a 7 ans, et mettant en jeu des notions de mouvements relatifs... et de vitesses angulaires...

On peut cependant tenter de simplifier les explications et dire que c'est parce qu'elle est **très loin** et essayer de comprendre :

Plaçons-nous dans une voiture qui roule à vive allure sur l'autoroute ou dans un TGV. Nous avons la sensation que c'est le paysage qui défile et que **nous** restons immobiles (d'ailleurs nous devons rester immobiles sur notre siège, et c'est bien difficile quand on a 7 ans !)

Les objets proches de nous semblent se déplacer **très vite** vers l'arrière du véhicule. Les objets plus lointains semblent se déplacer plus lentement...

On peut alors extrapoler un peu : si les objets sont **très loin**, ils ne vont plus sembler se déplacer **par rapport** à nous : ils restent donc "à côté" de nous... et semblent nous accompagner !

Mais si nous réfléchissons un peu, nous réalisons que **nous** sommes en mouvement et que le paysage est **immobile**... Les objets proches **doivent** être immobiles... et l'on conclut que ceux qui sont très loin, en nous accompagnant... vont **aussi vite** que nous et donc... **nous suivent**...

J'espère que ces quelques lignes pourront vous aider... tout en sachant que les enfants ont toujours leurs propres explications (voir la rubrique ci-dessous). ■

## Au fil des perles des enseignants et des astronomes

Une petite fille qui, visitant l'observatoire de Nice, s'étonna du fait que la Lune soit là dans le ciel **en plein jour**. Elle la montre à sa "copine", qui jette un regard vers la Lune, prend quelques secondes pour réfléchir, puis explique avec conviction : " C'est normal que la Lune soit ici ! On est dans un observatoire "...

FB

## Articles à venir

Cours élémentaire d'astronomie et d'astrophysique IV ; Les ondes gravitationnelles ; Jean-Paul Grandjean de Fouchy ; Pendule de Foucault en carton ; La détermination de la distance de la galaxie M31 ; Les flashes d'Iridium ; Référentiels et Satellites ; Les étoiles variables.

Remerciements: Nous remercions Pierre Causeret, Christian Larcher, Jean-Noël Terry et Marie-Agnès Terry, pour la relecture de ce Cahier ainsi que Chantal Petit pour son assistance.

### Les fiches pédagogiques du CLEA

<b>HS1</b> L'astronomie à l'école élémentaire	10 €
<b>HS2</b> La Lune, niveau "collège"	10 €
<b>HS3</b> Le temps, les constellations, niveau "lycée"	10 €
<b>HS4</b> Astronomie en quatrième	10 €
<b>HS5</b> Gravitation et lumière, niveau "terminale"	12 €
<b>HS6</b> L'âge de la Nébuleuse du Crabe, niveau "lycée" 4 diapositives et 12 jeux de 2 photographies	16 €
<b>HS7</b> Etude du spectre du Soleil	8 €
<b>HS8</b> Etoiles variables	12 €
<b>HS9</b> Mathématiques et Astronomie	12 €

Numéros hors série des Cahiers Clairaut réalisés par le Groupe de Recherche Pédagogique du CLEA.

### Documents édités par le CLEA

<b>Transparents animés pour rétroprojecteurs</b>	8 €
<b>T1</b> le Transsolite (phases de la Lune et éclipses)	
<b>T2</b> Les fuseaux horaires	
<b>Filtres colorés</b>	11 €
Six feuilles de filtres colorés et une feuille de réseaux	
<b>CD Rom CLEA</b>	8 €
Astronomie et Astrophysique Programme de seconde, collège, TPE	

<b>Documents photographiques CLEA-Belin</b>	5 €
20 exemplaires des 8 documents (phases de la Lune spectres de Rigel, Saturne, Arcturus, 69 Pisces, etc)	

# Publications du CLEA

Les publications ne peuvent être vendues qu'aux adhérents du **CLEA** (loi de 1901). Prix franco de port.  
Toute commande de documents est à envoyer à :

**CLEA - Laboratoire d'Astronomie, Bât. 470 – Université Paris Sud – 91405 Orsay cedex**

En joignant un chèque à l'ordre du **CLEA**.

### Fascicules pour la formation des maîtres en astronomie

<b>F1</b> L'observation des astres, le repérage dans l'espace et le temps	7 €
<b>F2</b> Le mouvement des astres	8 €
<b>F3</b> La lumière messagère des astres	9 €
<b>F4</b> Naissance, vie et mort des étoiles	10 €
<b>F6</b> Univers extragalactique et cosmologie	9 €
<b>F7</b> Une étape de la physique, la relativité restreinte	16 €
<b>F8</b> Moments et problèmes dans l'histoire de l'astronomie	10 €
<b>F9</b> Le système solaire	14 €
<b>F10</b> La Lune	10 €
<b>F11</b> La Terre et le Soleil	12 €
<b>F12</b> Simulation et astronomie sur ordinateur	8 €

### Cours polycopiés d'astrophysique

Maîtrise de l'université Paris XI Orsay

<b>P1</b> Astrophysique générale	10 €
<b>P2</b> Processus de rayonnement	5 €
<b>P3</b> Structure interne et évolution des étoiles	5 €
<b>P4</b> Astrophysique solaire	5 €

### Diapositives

Chaque série de 20 vues avec son livret de commentaires 10 €

<b>D1</b> Les phénomènes lumineux	
<b>D2</b> Les phases de la Lune	
<b>D3</b> Les astres se lèvent aussi	
<b>D4</b> Initiation aux constellations	
<b>D5</b> Rétrogradation de Mars	
<b>D6</b> Une expérience pour illustrer les saisons (série de 8 vues)	5 €
<b>D7</b> Taches solaires et rotation du Soleil	
<b>D8</b> Comètes	

## CONDITIONS D'ADHESION ET D'ABONNEMENT POUR 2004

Adhésion au CLEA pour 2004 5 €  
Abonnement aux **CAHIERS CLAIRAUT** n° 105 à 108 25 €  
*L'adhésion est indispensable pour tout achat de documents y compris l'abonnement aux Cahiers Clairaut*

Le numéro des Cahiers Clairaut 7 €

COLLECTIONS DES **CAHIERS CLAIRAUT** des années antérieures :  
. du début (1978) à 1997 14 €/an  
. à partir de 1998 17 €/an

**Pour adhérer au CLEA et s'abonner aux Cahiers Clairaut, s'adresser à :  
Béatrice Sandré, trésorière du CLEA,  
11, rue Couperin – 91440 BURES SUR YVETTE. Chèque à l'ordre du CLEA.**

### CLEA

**Laboratoire d'astronomie, bât. 470  
Université de Paris Sud, 91405 ORSAY cedex  
Tél./fax : 01 69 15 63 80  
Adresse électronique [clea.astro@astro.u-psud.fr](mailto:clea.astro@astro.u-psud.fr)  
Adresse du site du CLEA [www.ac-nice.fr/clea](http://www.ac-nice.fr/clea)**

Trois livrets (40 pages en quadrichromie), 1CD et 1 DVD en exclusivité pour le **CLEA** :

- Livrets "Terre, Planète à Protéger" (par J. diMeglio, géophysicienne) et "L'univers astronomique" (par A. Acker et J.C. Pecker, astrophysiciens) – Format A5 – Prix unitaire = 1,2 € HT
  - Livret "La Terre et son Univers en 7 animations" (par M. Dumas) – A4 – Prix unit = 2,5 € HT
- **Offre spéciale = 36 € pour 10 de chacun des livrets (30 en tout) soit 1,2 € HT par livret**
- CD "Terre, planète à protéger" (avec animation sonores, vidéos et images) pour 8 € HT
  - DVD "40 ans de l'ESO" (d'après un film de 52 minutes) pour le prix exceptionnel de 4 € HT

(+ TVA = 5,5 %). Merci de vous adresser à Laurence DEMOND, APLF – Observatoire de Strasbourg  
11, rue de l'université – 67000 Strasbourg (Fax 03 90 24 24 17) e-mail : [aplf@astro.u-strasbg.fr](mailto:aplf@astro.u-strasbg.fr)

Directeur de la Publication : Georges Paturel  
Imprimerie Haugel, 92240 Malakoff

dépôt légal : 1er trimestre 1979  
numéro d'inscription CCPPAP : 61660  
prix au numéro : 7 €