

# LES CAHIERS CLAIRAUT

N° 151 - Septembre 2015 9 €

Bulletin du Comité de Liaison Enseignants et Astronomes

Numéro 151 - automne 2015



ISSN 0758-234X

# Comité de Liaison Enseignants et Astronomes

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

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

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

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

## Présidents d'honneur :

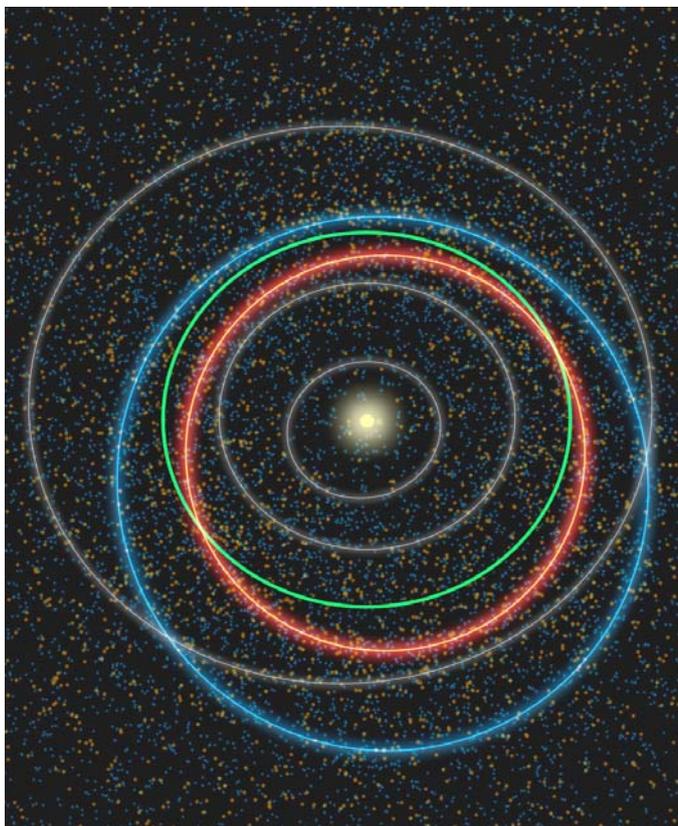
Jean-Claude Pecker  
Lucienne Gouguenheim  
Georges Paturol

## Bureau du CLEA pour 2014

**Présidente :** Cécile Ferrari  
**Trésorière :** Sylvie Thiault  
**Trésorière adjointe :** Chantal Lecoutre  
**Secrétaire :** Danièle Imbault  
**Secrétaire adjoint :** Jean-Luc Fouquet

## Responsables des groupes

**Vie associative :** Jean-Michel Vienney  
**Cahiers Clairaut :** Christian Larcher  
**Productions Pédagogiques :** Pierre Causeret  
**Communication :** Charles-Henri Eyraud  
**École d'Été d'Astronomie :** Danièle Imbault  
**Responsables du site :**  
Francis Berthomieu et Charles-Henri Eyraud



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

Daniel Bardin, Janet Borg, Nathalie Cartier, Pierre Causeret, Camille Esquerré, Olivier Gayard, Véronique Hauguel, Christian Larcher, Pierre Lauginie, Chantal Lecoutre, Georges Lecoutre, Stéphane Le Gars, Jean Ripert, Sylvie Thiault, Roland Trotignon.

Les auteurs recevront plusieurs numéros 151, afin de faire connaître la revue autour d'eux.

Orbites planétaires. On a représenté en blanc, les orbites de Mercure, Vénus et Mars autour du Soleil. L'orbite terrestre est en vert. Il reste deux lignes, la rouge, orbite typique d'un PHA (Potentially Hazardous Asteroid ou astéroïde potentiellement dangereux) et la bleue, orbite typique d'un NEA (Near-Earth Asteroid ou astéroïde proche de la Terre).

Les points bleus et orange représentent une simulation de la population d'astéroïdes géocroiseurs supérieurs à 100 mètres. (*échelle non respectée*).

Crédit image : NASA/JPL-Caltech.

# Les Cahiers Clairaut

Automne 2015

## Éditorial

Dans ce numéro, dont la thématique concerne **la trajectoire des astres**, vous êtes invité à jongler avec les épicycles et les déférents (p. 9) mais aussi à réaliser avec vos élèves ou vos étudiants de nombreuses activités :

Au collège, « libérez la Terre » en imaginant collectivement une machine à remonter le temps et en décodant le sens mystérieux d'une anagramme latine... (p. 13)

En technologie, au collège ou dans le cadre d'un club-astro, pratiquez une démarche d'investigation en fabriquant un objet technique simple : une maquette pédagogique en bois et en carton permettant de comprendre l'évolution des différentes montures de télescopes (p. 28)

Avec des élèves de TS découvrez, à la suite de Johannes Kepler, l'harmonie du monde en recherchant les liens étroits unissant les accords musicaux et les planètes du Système solaire. Amusez-vous à une transposition avec les exoplanètes. On en comptabilise actuellement 1950 (le 27 août 2015). Les astronomes-amateurs et mélomanes pourront participer au spectacle Kepler Music Project. (p. 23)

Plongez-vous dans l'évolution de l'histoire des trajectoires des planètes en commençant par l'époque où les hommes imaginaient que chaque nuit une barque ramenait le Soleil de l'ouest vers l'est. Étudiez les 56 sphères qu'Aristote estimait nécessaires pour expliquer le mouvement des astres. Avec Philolaos, découvrez le nombre supposé parfait : dix ou Tétractys (somme de  $1 + 2 + 3 + 4$ ) qui incitait nos ancêtres à rechercher un dixième astre, baptisé AntiTerre, supposé situé au-delà du feu central Hestia. Dans ce numéro, la référence au Tétractys apparaît 3 fois sans concertation des auteurs. (page 16, 24 et 38).

Construisez un planétaire avec Geogebra. (p. 20)

À l'Université, reproduisez en T.P. avec les étudiants des expériences historiques fondamentales. Dans l'exemple proposé (p. 31) il s'agit de refaire l'expérience réalisée en 1862 par Foucault pour mesurer avec précision la vitesse de la lumière à l'Observatoire astronomique de Paris. À l'époque Le Verrier avait besoin d'une mesure précise pour déterminer la distance moyenne Terre-Soleil définissant l'Unité Astronomique.

Enfin pour tous ceux qui s'intéressent à l'actualité astronomique, découvrez les informations transmises par Rosetta, véritable pierre de Rosette moderne, pour mieux comprendre l'histoire des comètes et, peut-être, l'origine de la vie.

**Christian Larcher, pour l'équipe.**

### Article de fond

**Premiers résultats de la mission Rosetta**

Janet Borg p 2

### Thème : LES TRAJECTOIRES

**Notions de base**

Pierre Causeret p 9

**Avec nos élèves**

**Libérez la Terre**

Olivier Gayard p 11

**Jeux**

**Mots croisés en orbite**

Pierre Causeret p 14

**Histoire**

**Évolution des trajectoires des planètes**

Véronique Hauguel, Pierre Causeret p 15

**Avec nos élèves**

**Un planétaire construit avec Géogebra**

Sylvie Thiault p 20

**Histoire**

**Kepler, les astres et la musique**

Stéphane Le Gars p 23

**Avec nos élèves**

**Maquettes pédagogiques : montures de télescopes**

Roland Trotignon p 28

**Observation**

**Les principaux évènements astronomiques de l'année**

Pierre Causeret p 30

**Histoire et Pédagogie**

**Mesurer la vitesse de la lumière « à la Foucault »**

Pierre Lauginie p 31

**Ciel d'automne**

Pierre Causeret p 35

**Coin des petits curieux**

**Que de couleurs !**

Jean Ripert p 36

**Lecture pour la marquise**

**L'invention du réel Damien Gayet**

Christian Larcher p 38

**Vie associative**

**EEA GAP 2015**

Camille Esquerré, Daniel Bardin p 39

**Solutions mots croisés**

p 40

# ARTICLE DE FOND

## Premiers résultats de la mission Rosetta

**Janet Borg**, Institut d'astrophysique spatiale (Orsay) et revue *L'Astronomie*

*Dans cet article vous saurez presque tout sur la fabuleuse mission Rosetta après son long périple et l'arrivée tourmentée de son atterrisseur Philae. Le dépouillement des enregistrements commence et les premiers secrets de ce vestige du tout début du système solaire apparaissent : constitution du noyau, composition, structure... Probablement que ces informations permettront une progression significative de la compréhension du démarrage de la vie à partir du monde minéral.*

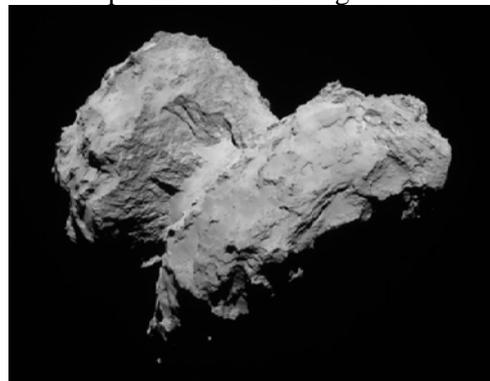
### La mission Rosetta

La mission la plus ambitieuse de ces dernières années en direction d'une comète, est certainement la mission *Rosetta* de l'agence spatiale européenne (ESA), lancée en mars 2004 vers la comète 67P/Churyumov-Gerasimenko (voir encart sur la comète). La sonde transporte à son bord un petit robot *Philae* qui doit atterrir sur le sol de la comète et effectuer toute une série d'analyses. C'est en 1994 que l'ESA a décidé d'envoyer une sonde vers une comète pour la suivre au cours de son voyage alors qu'elle se rapproche de son périhélie, contourne le Soleil et s'en éloigne à nouveau. Tout a commencé au début des années 1980, avant même le survol de la comète Halley par la sonde Giotto en 1986, quand a germé dans l'esprit d'ingénieurs et de chercheurs ambitieux et inventifs l'idée d'une sonde qui se mettrait en orbite autour d'une comète pour la suivre pendant plusieurs mois. De nombreuses péripéties ont retardé le départ (voir *L'Astronomie* d'octobre 2014) et c'est finalement en 2004 que *Rosetta* a quitté la base de Kourou en Guyane pour atteindre sa cible le 6 août 2014, à plus de 500 millions de km du Soleil. Jamais une sonde n'avait été si loin et les panneaux solaires, aussi larges soient-ils [1], ne suffisent pas pour fournir l'énergie nécessaire au fonctionnement de tous les appareils embarqués pendant tout ce trajet. Il faut donc réduire l'énergie utilisée et *Rosetta* est endormie pendant 2 ans, 7 mois et 12 jours ; elle est entrée dans sa période d'hibernation, pendant laquelle tout sera éteint, sauf l'ordinateur de bord, des systèmes de chauffage interne et des horloges programmées pour le réveil à 10:00 UTC, le 20 janvier 2014. Au grand soulagement de tous, le réveil a lieu comme prévu et la mission fonctionnait toujours, prête pour son rendez vous avec la comète. Entre le réveil et le rendez-vous, les 21 instruments embarqués (voir encart sur les instruments embarqués) ont été testés et la sonde a dû effectuer les manœuvres nécessaires pour réduire suffisamment la vitesse pour permettre un rendez-vous plutôt qu'un survol. L'équipe de vol

doit calculer l'orbite de *Rosetta* autour de la comète, pour les mois à venir, quand elle va larguer l'atterrisseur *Philae* à sa surface et suivre la comète au cours de son voyage, tout d'abord jusqu'au périhélie prévu en août 2015, puis au delà, pendant le début de son voyage de retour vers les confins de Jupiter ; il a été décidé en juin 2015, au vu des succès rencontrés, de prolonger la mission jusqu'en septembre 2016, et au lieu de décembre 2015 comme prévu initialement, et, cerise sur le gâteau, il est même question d'un atterrissage de *Rosetta* sur le sol cométaire pour terminer en beauté une mission qui a si bien commencé.

### Les premiers résultats

Pendant la période d'approche, entre le réveil de *Rosetta* et l'arrivée au voisinage de la comète au début août 2014, les instruments embarqués et les caméras de navigation préciseront les caractéristiques de la comète, en cartographiant sa surface, surveillant une éventuelle activité et en précisant les modèles définissant sa masse et son champ gravitationnel, ainsi que sa forme, sa période et son axe de rotation. En même temps, les images envoyées par la caméra à haute résolution OSIRIS affinent la connaissance que l'on a de sa forme si particulière (figure 2), permettant ainsi aux équipes de navigation de mieux contrôler la trajectoire et de commencer à planifier l'atterrissage de *Philae*.



*Fig.2. Image de la comète 67P/Churyumov-Gerasimenko, prise par la caméra de navigation NAVCAM le 22 Août 2014, quand Rosetta était à environ 64 km de la comète. © ESA/Rosetta/NAVCAM*

Deux instruments ont fourni des données essentielles pour la suite des opérations, il s'agit de VIRTIS dont les mesures de température informent sur la nature du sol et MIRO qui renseigne sur l'activité de la comète, qui se manifeste déjà. Des premières mesures montrent des zones toujours illuminées et d'autres jamais, ce qui va aider au choix du site d'atterrissage. Une donnée fondamentale est la nature du sol qui peut être connue par les mesures de sa température et du gradient thermique sur les premiers centimètres. VIRTIS, indique que la température de surface est plus élevée que prévu, suggérant une surface poreuse, plutôt pas glacée, et mesure une modulation de cette température entre un maximum de 222 K pour le corps et un minimum de 205 K pour le cou, ce qui traduit des différences d'illumination et/ou de composition. Plus de 3 millions de spectres sont collectés, pour définir une température moyenne et des points chauds repérés dans les premiers microns de la surface.

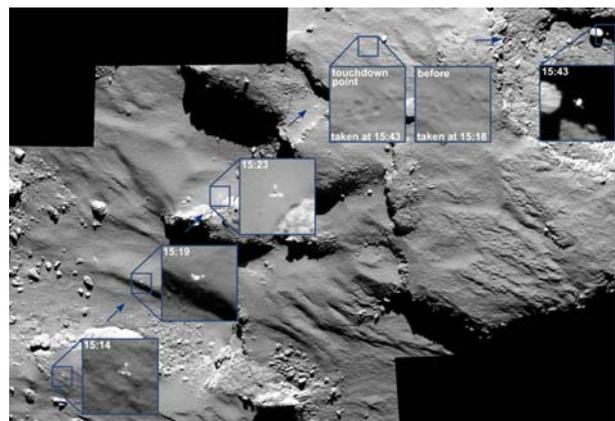
MIRO joue un rôle essentiel dans la caractérisation du noyau cométaire et le suivi de l'évolution de la comète (le dégazage du noyau et le développement de la coma) ; pour cela, a été préprogrammé le suivi de 4 espèces volatiles ( $H_2O$ ,  $CO$ ,  $CH_3OH$  et  $NH_3$ ) et des isotopes  $H_2^{17}O$  et  $H_2^{18}O$ , sondes de l'activité cométaire. Il s'agit de cartographier la comète, mesurer le gaz qui s'échappe, la température et le gradient thermique des premiers 10 cm de surface. D'ores et déjà, avant la mise en orbite, MIRO montre que la vapeur d'eau s'échappe en jets, et non pas de manière continue de l'ensemble de la comète, depuis des sites qui ont été localisés ; l'estimation est d'environ deux verres d'eau par seconde qui s'échappent, quantité qui ne fera qu'augmenter en approchant du périhélie.

### L'atterrissage de *Philae*.

Toutes les images et informations, recueillies entre le 6 août 2014, date d'arrivée de Rosetta au voisinage de la comète et le 12 novembre, date de l'atterrissage de *Philae*, vont jouer un rôle capital dans le choix du site d'atterrissage de *Philae*. Quelles seront les conditions du choix du site qui rendront l'atterrissage possible ? La condition première est que le site doit être techniquement possible, indépendamment des critères scientifiques. Pour cela, plusieurs facteurs entrent en jeu, dont on peut citer les plus importants : pendant la phase de descente, les conditions de communication et d'observation doivent être optimales ; la topographie du lieu doit convenir aux expériences prévues ; il est indispensable que des communications régulières entre atterrisseur et orbiteur puissent être maintenues et enfin, *Philae*

devra atterrir avec la vitesse la plus faible possible ( $< 4$  km/h), une durée de descente la plus courte possible (de 5 à 6 heures), tout en vérifiant les conditions d'ensoleillement ou de visibilité de l'orbiteur.

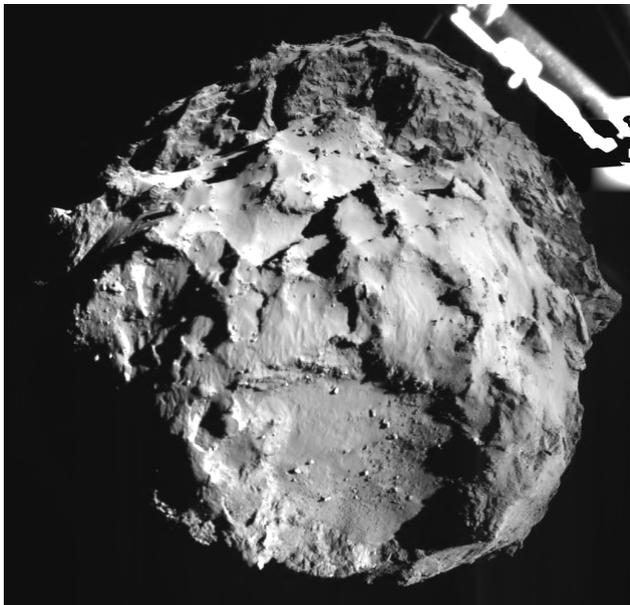
Le feu vert est finalement donné et, le 12 novembre au matin, *Philae* quitte *Rosetta* pour sa longue descente solitaire de 22 km. Après sept heures de chute libre, l'atterrissage à une dizaine de mètres du site prévu a lieu à 16 h 34 min 54 s, heure de Paris, et à 17 h 03 min, le signal radio témoignant de cette réussite sans précédent a été reçu. C'est alors que les inquiétudes ont commencé à se faire jour : les deux harpons semblaient bloqués, les signaux reçus par CIVA tanguaient, et ce n'est qu'au bout de 2 heures que les signaux arrêtent de bouger. Très vite, on comprend que le petit robot s'est bien posé au point voulu, mais que la communication fluctuante entre Rosetta et *Philae* est le signe qu'« on n'a peut-être pas atterri une fois sur la comète mais deux ... » (Stephan Ulamec, responsable de *Philae* à l'agence spatiale allemande DLR, le 12 novembre au soir). En fait, on saura que *Philae* a atterri trois fois : il y eut deux rebonds, dont le premier a duré près de 2 heures en culminant à 1 km d'altitude et le second seulement 7 minutes. Au final, *Philae* s'est retrouvé à quelques centaines de mètres du site prévu d'atterrissage (figure 3). Un poids de 100 kg sur Terre ne représenterait que 1 gramme sur la comète, compte tenu de sa très faible gravité, et il était donc facile pour une "petite" sonde comme *Philae* (volume de  $1\text{ m}^3$  et masse de 100 kg) de rebondir, d'où l'utilité des harpons, qui n'ont pas rempli leur rôle.



**Fig.3.** La descente et le premier rebond de *Philae* sur 67P. Mosaique d'images prises par la caméra OSIRIS-NAC de Rosetta à 15,5 km de distance, le 12 novembre 2014. La résolution est de 28 cm/pixel et chaque image encadrée mesure 17 m de côté. Les heures indiquées dans l'image sont en UTC (Paris est à UTC + 1 h).

Crédits : ESA/Rosetta/MPS for OSIRIS Team MPS /UPD /LAM /IAA /ISSO/INTA / UPM /DASP/IDA

Philae a pu prendre des photos du sol cométaire pendant la descente, grâce à la caméra ROLIS, l'une des deux caméras à bord de Philae (figure 4). C'est une caméra CCD miniature, placée sous le ventre de Philae afin d'imager le site d'arrivée sur la comète avec une résolution spatiale de plus en plus pointue.

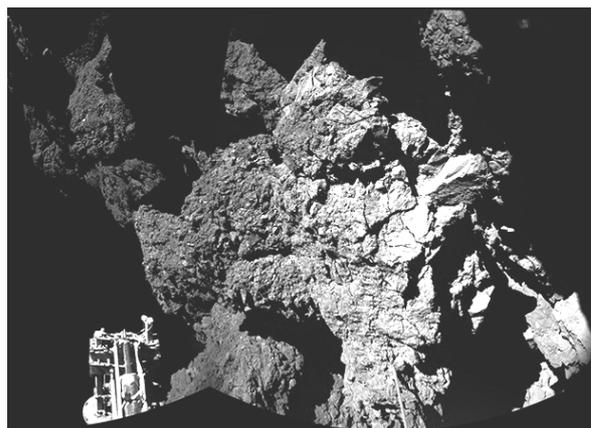


**Fig.4.** Image de la descente de Philae, à 3 km du sol de la comète (résolution de 3 m/pixel). En haut à droite on remarque un segment du train d'atterrissage.

Copyright: ESA/Rosetta/Philae/ROLIS/DLR

De son côté, grâce à la caméra OSIRIS, Rosetta a eu l'occasion de prendre des photos splendides de sa descente (figure 3). Celle-ci s'est effectuée très lentement, à 3,5 kilomètres à l'heure, la vitesse d'un humain marchant tranquillement au pas. La lenteur est nécessaire : toujours à cause de la très faible gravité à la surface de 67P/C-G, la vitesse horizontale devait être nulle à l'arrivée, faute de quoi la sonde aurait pu capoter. Il fallait donc arriver bien verticalement, et se poser "en douceur", après 20 kilomètres de descente, ce qui a été le cas. Après les deux rebonds à la surface de la comète, Philae s'est finalement stabilisé contre ce qui semble être un gros bloc ou une paroi, et les caméras de CIVA ont pu réaliser des images de l'environnement de l'atterrisseur (figure 5). Philae, qui reçoit l'énergie solaire d'en haut est coincé contre une falaise, avec un des trois pieds qui ne touche rien. On a eu quelques nouvelles fraîches après l'atterrissage. Les premières analyses laissent penser que le site sur lequel Philae s'est arrêté n'est que très faiblement actif actuellement, voire totalement inactif : aucune poussière retombant sur le sol n'a en effet été détectée, ce qui implique qu'il n'y a pas de dégazage dans le voisinage immédiat de Philae. Quant aux mesures de transmission

électrique effectuées à l'aide des électrodes de PP, (l'élément Permittivity Probe de SESAME) elles semblent compatibles avec la présence de glace d'eau en abondance juste sous Philae. Le vendredi 14 novembre, la pile de Philae étant bientôt vide, les responsables de la mission ont décidé d'utiliser l'énergie encore disponible pour essayer de forer la surface et recueillir un échantillon pour l'analyser. Le 20 novembre, ils ne savaient pas si la foreuse avait atteint le sol et si un échantillon avait été prélevé. Philae a peut-être basculé en réaction à l'action du forage sur la surface.



**Fig.5.** Gros plan réalisé au sol par 2 des caméras de CIVA. Au premier plan, l'un des 3 pieds de Philae est reconnaissable, calé contre la paroi qui a sans doute arrêté la dérive de l'atterrisseur.

Crédits : ESA/Rosetta/Philae/CIVA.

Le vendredi 15 novembre, à l'issue de la première séquence scientifique, Philae a ensuite basculé dans un mode comparable à une sorte d'hibernation, dont il ne sortira que lorsque, en s'approchant du Soleil, les panneaux solaires qui tapissent ses parois récolteront assez d'énergie pour le réchauffer et le réveiller. L'idée est alors de retenter un forage. En se rapprochant, la température à laquelle sont soumis les instruments pourra lentement augmenter. Les calculs indiquent que quand, début mars 2015, 67P/C-G sera à 2,15 UA du Soleil, presque 2 fois plus d'énergie pourra être emmagasinée par les panneaux solaires des deux sondes. Hélas, on se souvient que l'arrivée de Philae a été quelque peu acrobatique. Il s'est finalement calé contre une sorte de corniche de glace loin du site initialement visé, ce qui explique qu'au final, un seul panneau est éclairé durant seulement 1 h 20 pendant les 4 h 30 que dure le jour sur la région où est coincé Philae. Ce n'est que le 13 juin que Philae donnera les premiers signes d'un réveil, un peu délicat, avec des périodes de communication avec Rosetta soit insuffisamment stables soit trop courtes pour espérer des échanges de données efficaces.

## **LA COMÈTE 67P/Churyumov-Gerasimenko**

### **Ce qu'on en savait avant Rosetta**

67P/Churyumov-Gerasimenko, 67P/C-G en abrégé ou Chury plus familièrement, a été découverte en 1969 par les deux astronomes ukrainiens Churyomov et Gerasimenko. C'est une comète de la famille de Jupiter (c'est à dire que son mouvement est fortement influencé par la gravité de Jupiter) de forme irrégulière, d'environ 4 km de diamètre, qui tourne en 12,4 heures autour de son axe ; sa période de révolution autour du Soleil est de 6,5 ans et depuis sa découverte, elle a été vue 6 fois lors de ses approches au périhélie situé à 186 millions de km du Soleil (entre la Terre et Mars). Son orbite elliptique l'amène au-delà de Jupiter, à près de 850 millions de km du Soleil.

Les premières images prises par la caméra embarquée OSIRIS ont tout d'abord révélé fin juillet 2014 une comète constituée de deux parties distinctes, qui lui donnent sa forme de canard (la tête et le corps attachés par un « cou » étroit) et au fur et à mesure de l'approche, des falaises, des blocs rocheux, des zones plus lisses, un environnement jamais rencontré sur un autre petit corps observé au cours d'un survol. L'instrument VIRTIS a pu donner une première estimation de sa température, de l'ordre de - 70 °C (220 K).

### **Ce qu'on cherche à apprendre**

Rosetta devra répondre à une série de questions, fondamentales pour une meilleure compréhension de ce qu'est notre Système solaire. Ainsi, il faudra :

- Caractériser la morphologie et la composition de sa surface grâce aux instruments à bord de Rosetta et Philae ;
- Suivre le développement de l'activité cométaire et de la coma au fur et à mesure que 67P/C-G s'approche du Soleil ;
- Étudier l'environnement planétaire de la comète et son interaction avec le vent solaire.

On aura alors des réponses aux questions qui ont justifié la mission Rosetta :

- Quels sont les constituants du noyau cométaire, quelles sont sa composition, sa structure ?
- Comment évoluent le noyau et la coma, quotidiennement et au cours de son voyage autour du Soleil ?
- Comment une comète "fonctionne"? Comment est générée son activité ?
- Quel rôle ont joué les comètes dans l'évolution du Système solaire ?
- Quel rôle ont-elles joué dans l'apport d'eau sur Terre ?
- Les comètes contiennent-elles les ingrédients nécessaires au démarrage de la vie sur Terre ?

Beaucoup de questions ! Bien évidemment, une seule comète ne peut pas tout nous faire comprendre, surtout que l'on sait, depuis le survol de la comète de Halley en 1986 et les nombreuses autres missions vers comètes et astéroïdes que chaque objet rencontré et étudié est singulier. Toutefois, de même que la mission Stardust de la NASA, de retour en janvier 2006 de la comète Wild-2 avec sa cargaison de quelques milliers de grains cométaires, nous a permis des avancées considérables dans la connaissance de ces petits corps grâce à l'analyse de ces grains par les instruments les plus performants disponibles, de même la mission Rosetta de l'ESA nous apportera sa moisson d'informations nouvelles qui permettront des progrès indéniables dans la compréhension des petits corps du Système solaire et de leur rôle dans la formation et l'évolution de celui-ci.

## **Les premières données de Rosetta.**

*(références des articles d'où sont tirées ces informations en fin d'article)*

Courant novembre 2014, la sonde *Rosetta* est en orbite autour de la comète, à une distance d'environ 30 km. Ce survol à basse altitude permet aux instruments à bord d'effectuer des mesures inédites permettant une meilleure compréhension d'un des objets les plus primitifs du Système solaire.

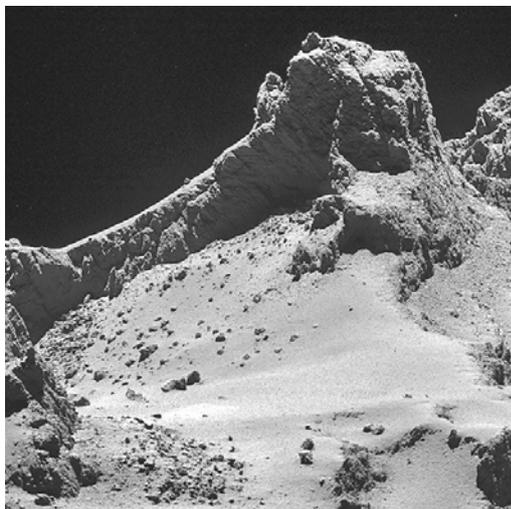
Les premiers résultats de ces mesures ont été publiés courant janvier (dans les revues *Science* et *Nature*). On peut souligner ci-dessous les principales informations que l'on a obtenues sur la comète.

## **Le noyau de la comète 67P/C-G**

Les deux lobes de dimensions inégales sont séparés par un « cou », d'origine inexplicée à ce jour. L'ensemble des images prises a permis de réaliser un modèle du noyau en 3 dimensions, avec un petit lobe de 2,6 x 2,3 x 1,8 (en km) et un grand lobe de 4,1 x 3,3 x 1,8 (en km), ce qui donne un volume total d'environ 21,4 km<sup>3</sup>. La masse de la comète étant estimée à 10<sup>13</sup> kg, la détermination de sa masse volumique est de 470 kg/m<sup>3</sup> (comme le bois ou le liège). Ces résultats contraignent fortement la composition et la structure interne du noyau qui est sans doute extrêmement poreux. Cette hypothèse d'un sol poreux avait déjà été proposée au vu des résultats des mesures de température par VIRTIS pendant l'approche de Rosetta.

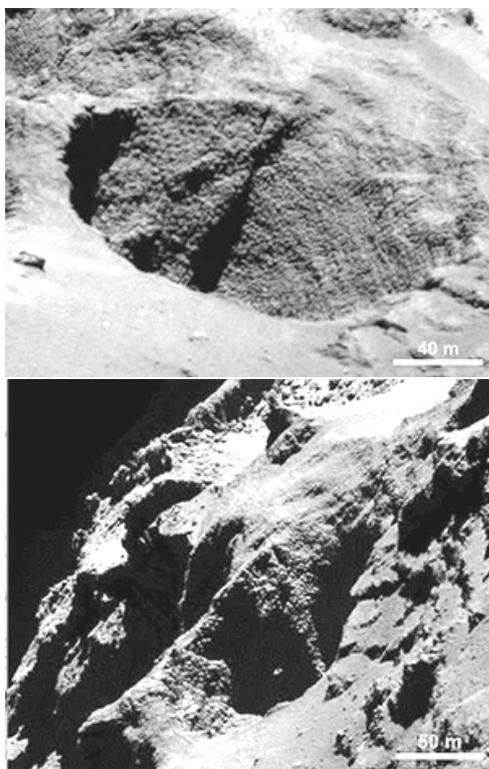
## La surface

La surface, de composition globalement homogène, apparaît riche en composés organiques, avec peu de signes de glace d'eau, sauf peut être dans la région du « cou ». Elle présente une grande diversité de structures géologiques, résultant de phénomènes d'érosion, d'effondrement et de re-déposition (figures 6a et 6b).



**Fig.6a.** Ce gros plan sur une portion du petit lobe du noyau de 67P a été pris par la caméra OSIRIS-NAC de Rosetta le 14 octobre 2014 à l'altitude de 8 km ; résolution 15 cm/pixel.

Crédits : ESA/Rosetta/MPS for OSIRIS Team MPS/UPD/LAM/IAA/SSO/INTA/UPM/DASP/IDA.



**Fig.6b.** Exemple de trou circulaire observé sur le noyau ; l'augmentation du contraste révèle la présence d'activité. OSIRIS-NAC, le 28 août 2014 à 60 km de distance (1 m/pixel).

Crédits : ESA/Rosetta/MPS for OSIRIS Team  
MPS/UPD/LAM/IAA/SSO/INTA/UPM/DASP/IDA.

L'activité de la comète se concentre dans la région du « cou », comme le laissaient voir les images prises par OSIRIS au moment de l'approche de Rosetta au voisinage de la comète. Avec l'instrument MIRO, les chercheurs ont établi une carte de la température de la proche sous-surface de 67P/C-G.

Celle-ci montre des variations saisonnières et diurnes de température qui laissent supposer que la surface est faiblement conductrice thermiquement en raison d'une structure poreuse et peu dense. Les chercheurs de MIRO ont également effectué des mesures du taux de production d'eau de la comète : de 0,3 L/s (on parlait d'environ 2 verres d'eau/seconde) début juin il passe à 1,2 L/s fin août, soit 4 fois plus. Celui-ci varie au cours de la rotation du noyau, l'eau dégagée par la comète étant localisée dans la zone de son « cou ».

## La matière organique

L'instrument VIRTIS a apporté l'évidence de la présence de composés organiques sur le noyau de 67P/C-G. La très faible réflectance du noyau, les caractéristiques spectrales en lumière visible et IR ainsi que la large bande d'absorption dans le domaine 2,9 – 3,6 microns indiquent que ces composés sont associés avec des minéraux opaques et sombres tels que des sulfures de fer. Dans le même temps, l'instrument ROSINA a mesuré la composition de la coma en suivant la rotation de la comète ; il a détecté plusieurs molécules ( $H_2^{17}O$ ,  $H_2^{18}O$ , CO,  $CO_2$ ).

## Le rapport D/H

Le rapport D/H mesuré par Rosetta (instrument ROSINA) dans l'eau dégazée par la comète 67P vient raviver la discussion avec une valeur de  $5,3 \pm 0,7 \times 10^{-4}$ , plus élevée que celle des comètes de Oort et en contradiction avec les deux autres comètes de la famille de Jupiter, pour lesquelles des mesures avaient été possibles et qui indiquaient une valeur compatible avec le rapport mesuré dans les océans terrestres ( $\approx 1,5 \times 10^{-4}$ ).

Les auteurs, Alwegg et al, en concluent que, si, en accord avec les modèles de formation du Système solaire primitif, on assiste à une augmentation régulière de ce rapport avec la distance héliocentrique, l'origine des comètes à courte période doit être assez dispersée. De plus, ce résultat vient renforcer une origine principalement astéroïdale des océans terrestres.

## Les poussières

Des observations faites à 3,6 u.a. du Soleil ont permis de mettre en évidence un nuage constitué de

poussières de dimensions supérieures à 5 cm qui entoure la comète sur des orbites liées et que l'on explique par un passage antérieur au périhélie. De plus, le noyau émet des poussières jusqu'à 2 cm en taille, ce qui donne un rapport moyen en masse poussière/gaz de  $4 \pm 2$ , sur la face éclairée de la comète, plus élevé que ce qui est généralement accepté pour les comètes (instrument COSIMA).

### **Mesures du champ magnétique à la surface de la comète**

Le magnétomètre de Philae, ROMAP, a pu enregistrer des mesures du champ magnétique, avant le sommeil du robot. C'est sans doute le seul instrument qui a bénéficié des rebonds successifs de Philae avant son arrêt puisque des mesures du champ magnétique de la comète ont pu ainsi être faites au cours des trajets du robot au dessus du sol cométaire, mais aussi en quatre positions à la surface de la comète. Les mesures à la surface de la comète ont pu être comparées au champ magnétique externe que mesure pendant le même temps le magnétomètre RPC-MAG, à bord de Rosetta.

La trajectoire de Philae a été reconstruite et les différentes mesures de champ magnétique montrent une signature identique pour les différentes positions, principalement due à l'interaction du vent solaire avec la comète, dont le champ magnétique propre est inférieur à 2 nT, ce qui représente un champ magnétique extrêmement faible ; à titre de comparaison, l'intensité du champ magnétique terrestre varie en moyenne entre 40 000 et 60 000 nT. La résolution spatiale des mesures étant de l'ordre du mètre, on peut conclure que, à l'échelle du mètre ou plus, les forces magnétiques ne sont pas la cause de l'accumulation de matériau planétaire dans la formation de 67P.

Bien évidemment, rien ne peut être dit à l'échelle du cm ou du mm. À bord de Rosetta, le magnétomètre RPC-MAG a enregistré depuis le mois d'août 2014 un signal très clair autour de 50 mHz, signature de l'interaction du vent solaire avec l'environnement de la comète. Ce signal est aussi enregistré par ROMAP et le fait que les 2 familles de signaux soient corrélées est une indication que le champ magnétique qui est mesuré à la surface de 67P est principalement dû aux oscillations du plasma et pas à une magnétisation de la surface.

C'est l'association des deux magnétomètres, l'un à bord de Rosetta et l'autre à bord de Philae qui a permis de discriminer entre les différents signaux, et de confirmer que le champ magnétique au sol est

extrêmement faible, bien inférieur à ce qui est mesuré sur une planète comme la Terre.

### **Et Philae ? Que devient Philae ?**

La figure 3 montre la trajectoire suivie par le petit robot entre sa descente, son arrivée sur la comète puis ses 3 rebonds successifs, telle qu'elle a pu être calculée à partir des données de différents instruments. Sa localisation actuelle, connue à 10 mètres près, est entourée de falaises, ce qui rend difficile son éclairage par les rayons solaires : Philae est à l'ombre d'un rocher ou dans un trou et reçoit très peu d'illumination solaire : un seul des panneaux est éclairé 1 h 20 pendant les 12,4 h que dure un jour sur 67P, les autres panneaux sont beaucoup moins éclairés, sinon pas du tout. L'énergie reçue est insuffisante pour réveiller les instruments, mais la situation ne peut que s'améliorer au fur et à mesure que la comète approche du Soleil. On sait que le robot repose dans une faille, avec un des 3 pieds en l'air. On sait aussi que les harpons d'ancrage ne sont pas déclenchés, mais que Philae ne peut pas rebondir et repartir. Les communications radio fréquence sont théoriquement possibles, bien que la faible illumination rende la communication très difficile.

Afin de « réveiller » Philae, deux conditions doivent être remplies : la puissance reçue doit être supérieure à 19 watts et la température doit être au dessus de - 45 °C. Une fois que le réveil aura eu lieu, le contact sera établi avec Rosetta toutes les 35 minutes, si la géométrie entre l'orbiteur et l'atterrisseur le permet. Une première tentative de communications a eu lieu entre le 12 et le 18 mars dernier, mais aucun signal n'a été reçu par Rosetta. Une nouvelle tentative à la mi-avril n'a pas donné plus de résultats. La puissance reçue sur les panneaux devrait être suffisante et de nouvelles tentatives ont lieu régulièrement les jours suivants. Ce n'est que le 13 juin que Philae donnera les premiers signes d'un réveil, un peu délicat, avec des périodes de communication avec Rosetta soit insuffisamment stables soit trop courtes pour espérer des échanges de données efficaces.

En conclusion provisoire, on sait que le robot est placé en un endroit où il reçoit très peu d'illumination solaire, mais la situation de ce point de vue s'améliore chaque jour. Il n'y a évidemment aucun risque de surchauffe, ce qui était une préoccupation au départ ; au contraire, tant que la température est trop basse, les instruments ne peuvent pas se remettre en marche, c'est sans doute le problème majeur. Un calendrier provisoire prévoit que dès les communications entre Rosetta et

Philae reprennent, il faudra à nouveau éloigner Rosetta afin d'éviter que l'augmentation de l'activité cométaire détruise l'orbiteur ; pendant ce temps, les instruments de Philae pourront accumuler des données, qui seront renvoyées ultérieurement à Rosetta, qui, à son tour, les communiquera à la Terre. Entre juillet et septembre, autour du périhélie, les batteries internes pourront se recharger. On peut espérer que l'automne sera riche en informations sur la comète. On sait maintenant que les instruments à bord de Philae ont pu effectuer pendant leurs 60 heures d'activité avant de s'éteindre, une série de mesures qui apporte un éclairage nouveau sur une comète.

C'est le propre de la « science en marche » d'être en retard sur les derniers résultats.

Références des 8 articles parus dans *Science* le 23 janvier 2015 (vol 347 issue 6220)

H. Sierks et al. « On the nucleus structure and activity of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko » Instrument OSIRIS

A. Rotundi et al. « Dust measurements in the coma of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko inbound to the Sun » Instrument GIADA

F. Cappaccioni et al. « The organic – rich surface of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko as seen by VIRTIS/Rosetta » Instrument VIRTIS

H. Nillson et al. « Birth of a comet magnetosphere : a spring of water ions » Instrument PCICA

N. Thomas et al. « The morphological diversity of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko » Instrument OSIRIS

K. Altwegg et al. « Comet 67P/Churyumov-Gerasimenko, a Jupiter family comet with a high D/H ratio » Instrument ROSINA

M. Hässig et al. « Time variability and heterogeneity in the coma of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko » Instrument ROSINA

-S. Gulikis et al. « Subsurface properties and early activity of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko » Instrument MIRO

### Instruments embarqués

Rosetta, comme la pierre de Rosette, une tablette en pierre trouvée en 1799 dans le delta du Nil, près du village de "Rashid", et comportant un texte dont le déchiffrage a permis à Champollion de décrypter les hiéroglyphes. Les archéologues avaient alors une clef pour comprendre une civilisation ancienne, ce qui fut confirmé par la découverte ultérieure dans l'île de Philae, sur le Nil, d'une inscription sur un obélisque qu'il était possible de comprendre.

De même, Rosetta et Philae permettront aux scientifiques de déverrouiller les mystères des comètes, constituants les plus primitifs de notre Système solaire. Pour cela, l'orbiteur et l'atterrisseur sont équipés d'une batterie d'instruments ; ainsi les observations depuis l'orbite seront directement corrélées aux mesures *in-situ* de la surface. Les onze expériences de Rosetta analyseront la comète de très près pendant son voyage dans le Système solaire interne et les dix instruments de Philae, (des spectromètres, des caméras haute résolution et un système de forage) permettront des mesures précises du noyau en surface et en profondeur.

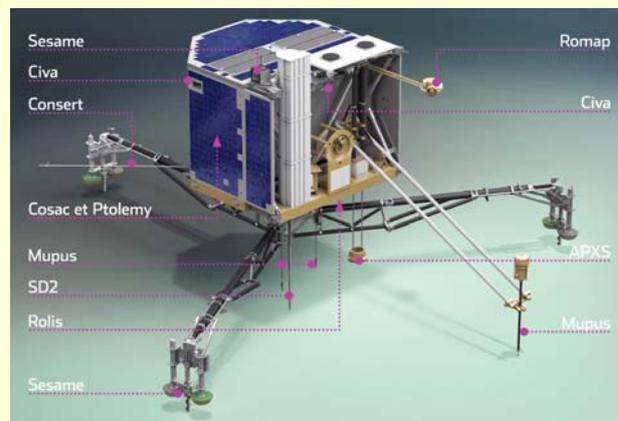
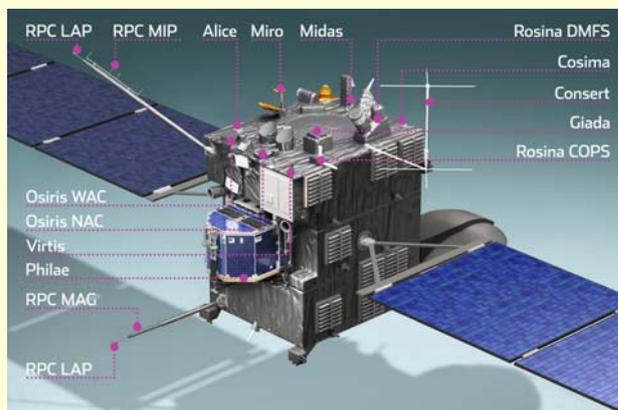
En plus de l'atterrisseur, Rosetta comporte 11 instruments, fabriqués dans divers instituts d'Europe et des États-Unis. Ils sont tous situés sur la partie de l'orbiteur qui fera constamment face à la comète pendant les principales phases scientifiques de la mission.

[http://missions-scientifiques.cnes.fr/IcROSETTA/Rosetta\\_Philae.png](http://missions-scientifiques.cnes.fr/IcROSETTA/Rosetta_Philae.png)

L'atterrisseur Philae comporte 10 instruments, dont certains sont sous un couvercle tapissé de cellules solaires. L'ensemble des instruments pèse 21 kg.

[http://missions-scientifiques.cnes.fr/IcROSETTA/Philae\\_instruments.png](http://missions-scientifiques.cnes.fr/IcROSETTA/Philae_instruments.png)

Pour avoir la description précise des instruments : [http://missions-scientifiques.cnes.fr/ROSETTA/Fr/GP\\_instruments.htm](http://missions-scientifiques.cnes.fr/ROSETTA/Fr/GP_instruments.htm)



# THÈME : Les trajectoires des planètes

## Notions de base

Pierre Causeret, Esbarres

Plusieurs des articles qui suivent font référence aux observations et aux différents modèles planétaires. Vous trouverez ici un résumé des notions à connaître pour mieux les comprendre.

### Les observations

Cinq planètes sont visibles à l'œil nu. Vénus et Mercure brillent le soir ou le matin sans jamais s'écarter du Soleil (figure 1). Mars, Jupiter et Saturne se déplacent au milieu des constellations le plus souvent d'ouest en est, mais en présentant par moment des « rétrogradations » en marche arrière (figure 2). Comment expliquer ces phénomènes ?

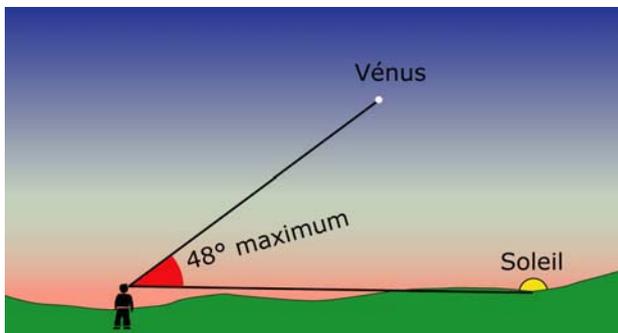


Fig.1. Vénus au coucher du Soleil. Elle est visible soit le soir, soit le matin, toujours à moins de 48° du Soleil.

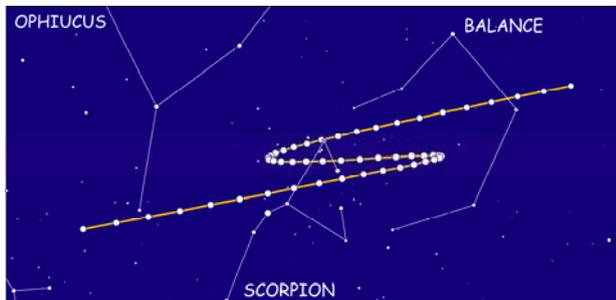


Fig.2. Positions de Mars dans la Balance et le Scorpion notées tous les 5 jours de janvier 2016 (à droite) à septembre 2016 (à gauche). La luminosité de Mars est maximale au milieu de la rétrogradation.

### Les modèles géométriques

Depuis l'époque classique grecque, on a imaginé des modèles pour tenter de comprendre le mouvement des planètes et pour prévoir leurs positions. On en distingue deux sortes, les modèles géocentriques, avec au centre la Terre (Gé), et les modèles héliocentriques avec le Soleil (Hélios) au centre.

Le modèle géocentrique qui s'est perpétué jusqu'à Copernic est celui des épicycles développé par

Apollonius puis Ptolémée<sup>1</sup>. Dans ce système, présenté ici de manière simplifiée, chaque planète tourne sur un cercle, l'épicycle (en vert sur les figures 3 et 4), dont le centre tourne autour de la Terre sur un autre cercle, le déférent (en orange). Ce modèle explique les observations de manière assez correcte.

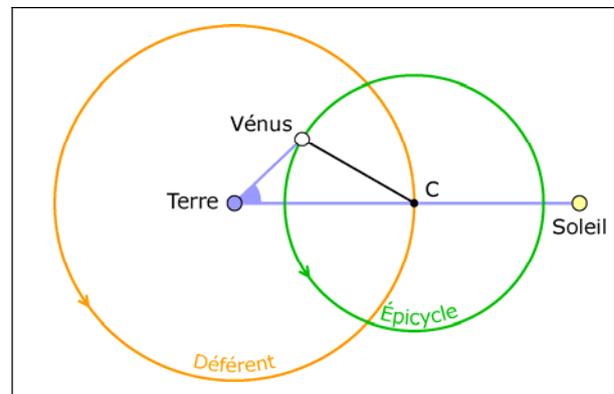


Fig.3. Vénus dans le système des épicycles. L'angle entre la direction du Soleil et celle de Vénus (angle en bleu sur la figure) ne peut pas dépasser une certaine valeur, comme on peut l'observer en réalité (figure 1).

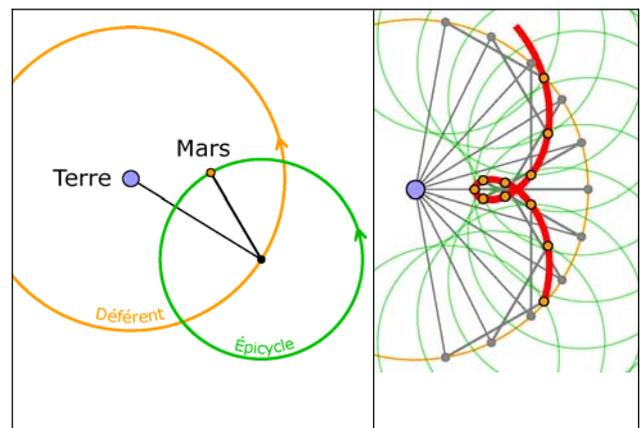
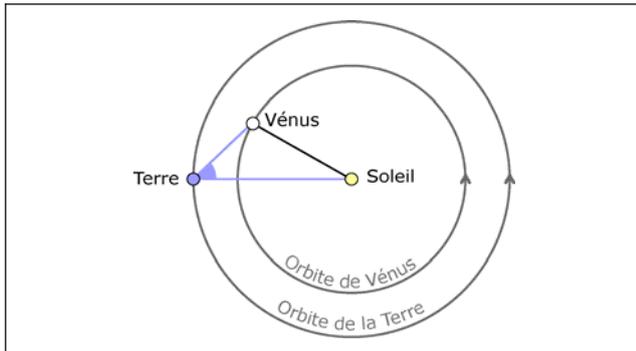


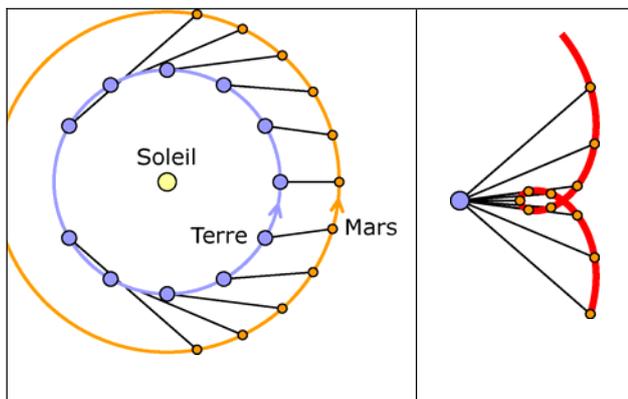
Fig.4. Mars dans le système des épicycles. À gauche, une seule position. À droite, positions de Mars tous les mois pendant 10 mois. On a tracé en rouge la trajectoire de Mars. On retrouve une rétrogradation. De plus, Mars est au plus près de la Terre au milieu de la rétrogradation, il est donc normal qu'elle soit plus brillante.

<sup>1</sup> Vous trouverez beaucoup plus de détails dans l'article sur l'histoire page 15.

Au XVI<sup>e</sup> siècle, Copernic propose de faire tourner les planètes autour du Soleil, éjectant la Terre de sa place centrale. Son modèle explique lui aussi correctement les observations (figures 5 et 6).



**Fig.5.** Vénus dans le système de Copernic. L'angle entre la direction du Soleil et celle de Vénus (angle en bleu sur la figure) ne peut pas dépasser une certaine valeur (voir figure 1), car Vénus est plus proche du Soleil que la Terre.



**Fig.6.** Mars dans le système de Copernic. À gauche, on a représenté les positions de la Terre et de Mars tous les mois pendant 10 mois. Pour savoir ce que l'on observe depuis la Terre, on a reporté à droite le vecteur Terre-Mars à partir d'un point fixe qui représente l'observateur. On obtient une rétrogradation au moment où la Terre double Mars.

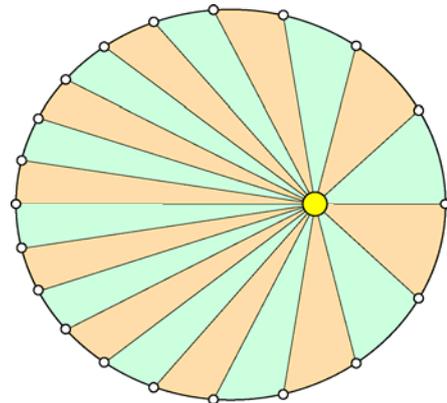
On peut montrer que les modèles simplifiés de Ptolémée et de Copernic tels qu'ils sont présentés ici sont équivalents géométriquement<sup>2</sup>. Copernic n'a pas apporté plus de précision que ses prédécesseurs dans les prévisions de position de planètes, il a surtout modifié la place de la Terre dans l'Univers.

Moins d'un siècle après Copernic, Kepler énonce 3 lois qui régissent les mouvements des planètes :

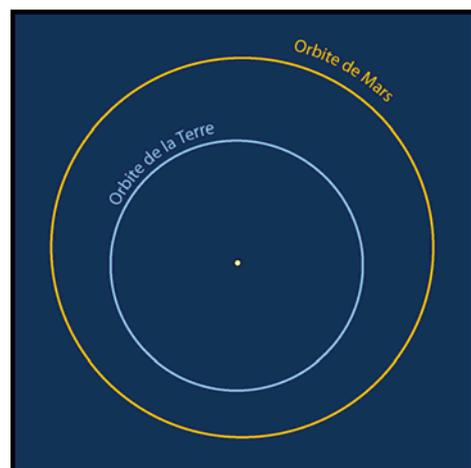
1. Les orbites des planètes sont des ellipses dont le Soleil est un foyer (une ellipse est un cercle aplati ou vu en perspective ; elle possède deux foyers qui sont deux points particuliers associés à la courbe).
2. Les aires balayées par le rayon vecteur (rayon joignant le Soleil à la planète) en des temps égaux sont égales.

<sup>2</sup> Voir page 18.

3. Les carrés des périodes de révolution  $T$  sont proportionnels aux cubes des distances  $a$  au Soleil pour toutes les planètes ( $T^2/a^3 = \text{constante}$ ).



**Fig.7.** Orbite d'une planète pour Kepler. Selon sa première loi, c'est une ellipse et le Soleil est situé à l'un de ses foyers. La planète est placée ici sur son orbite à des intervalles de temps réguliers. La 2<sup>e</sup> loi de Kepler indique que les surfaces coloriées ont toutes la même aire. La planète va donc plus vite quand elle est plus proche du Soleil.



**Fig.8.** Les orbites de la Terre et de Mars à l'échelle. Elles sont peu aplaties et ressemblent à des cercles excentrés.

## La mécanique céleste

Moins d'un siècle après Kepler, Newton énonce la loi de la gravitation universelle. Ainsi, c'est l'attraction du Soleil sur une planète qui la maintient sur son orbite. Elle permet de comprendre aussi que la trajectoire d'une planète est influencée par l'attraction des autres planètes. Ainsi va naître le calcul des perturbations. Neptune sera découverte grâce aux anomalies de la trajectoire d'Uranus, dues à l'attraction de Neptune. La mécanique céleste sera pendant longtemps une grande partie du travail des astronomes.

Enfin, il y a un siècle, Einstein remplace les forces d'attraction par la déformation de l'espace temps par les masses.

# AVEC NOS ÉLÈVES

## Libérez la Terre

Olivier Gayrard, Toulouse

Dans le n° 148 des Cahiers Clairaut (décembre 2014), Olivier Gayrard se proposait de faire travailler les collégiens de son club d'astronomie sur « la contribution de Copernic et Galilée à l'évolution des idées en astronomie ». Il raconte ici le déroulement de cette recherche où des collégiens doivent comprendre et expliquer ces découvertes à des élèves de CM. Un petit film de 10 minutes relatant cette expérience a été réalisé, il a reçu le prix d'Histoire des Sciences de la Société Française d'Astronomie et d'Astrophysique (SF2A).

### Le travail des élèves et leurs réalisations

Le projet présenté a enthousiasmé les élèves du club astronomie. Il fallait dès lors trouver le vecteur qui nous permettrait de non seulement être passeur de savoir, mais aussi de faire manipuler. Une même idée émerge dans deux groupes d'élèves : construire une machine à remonter dans le temps ! Avec un tel instrument, Ptolémée, Copernic et Galilée nous rendront visite. Un premier travail de recherche est mis en place. Il nous faut découvrir qui sont ces illustres astronomes, et quels sont leurs modèles.



Fig.1. La machine à remonter le temps.

Le travail est alors partagé entre quatre équipes. Chacune des trois premières devra écrire le scénario correspondant à son modèle, et en construire une maquette. Le dernier groupe va gérer la logistique.

### Résumé du scénario

Les Ptoléméens arrivent les premiers. Ils demandent à observer la course du Soleil et la ronde des étoiles. Que peut dire d'autre la jeune demoiselle interrogée ? « Je vois le Soleil qui se couche », puis « Je vois les étoiles qui tournent ». N'est-ce pas là l'observation la plus directe ?

À cela, les Coperniciennes, fraîchement débarqués rétorquent. « Toi, assieds-toi sur cette chaise qui est la Terre », puis, la faisant tourner. « Et maintenant,

que vois-tu ? ». C'est bien embarrassant. L'observation est la même dans les deux cas !



Fig.2. Est-ce le Soleil qui se couche ou la Terre qui tourne ?



Fig.3. Le mouvement apparent du ciel. Qui tourne ici ?

Pour départager ces deux groupes, il faut une nouvelle idée d'observation. Mars dont la course dans le ciel est parfois des plus intrigantes fera l'affaire. Comment rendre compte de ce drôle de  $\gamma$  dans le ciel ?<sup>1</sup>

L'un après l'autre, les élèves reportent à l'aide d'une ficelle, (en prenant soin de bien rester

<sup>1</sup> Lors de la rétrogradation de Mars, la forme de la trajectoire apparente de la planète sur le fond du ciel peut ressembler à un S, un Z ou un  $\gamma$  (voir « les boucles de rétrogradation de Mars », n° 120 des Cahiers Clairaut (hiver 2007).

parallèle), les positions mois après mois, sous lesquelles Mars est vu depuis la Terre.<sup>2</sup> Mais, quel que soit le modèle, géocentrique ou héliocentrique, la figure reste la même !



Fig.4. Système de Ptolémée et rétrogradation de Mars.



Fig.5. Rétrogradation de Mars avec Copernic.

Il faudra bien trouver une observation décisive pour trancher entre ces deux modèles. Arrivent alors les Galiléennes et leur lunette astronomique. Les phases de Vénus ne peuvent pas apparaître gibbeuses ni même en quartier dans le modèle de Ptolémée !

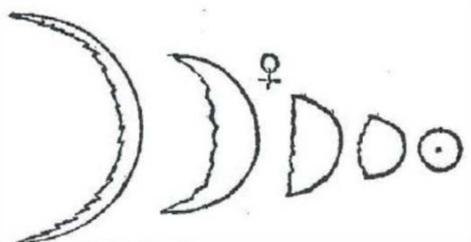


Fig.6. Les phases de Vénus dessinées par Galilée.



Fig.7. Quelques photographies des phases de Vénus.

Cette dernière observation renverse le modèle des Anciens. Mais attention, elle ne permet de conclure

<sup>2</sup> Voir les figures 4 et 6 pages 9 et 10 pour la construction des boucles de rétrogradation dans les systèmes de Ptolémée et de Copernic.

que sur la révolution de Vénus autour du Soleil. La Terre n'est pas définitivement libérée. Il faudra bien une ultime observation pour invalider le modèle de Tycho Brahé.<sup>3</sup>



Fig.8. Vénus vue depuis la Terre dans le système de Ptolémée. La partie située à l'opposé du Soleil n'est pas éclairée et a été peinte en noir. Vénus n'est visible qu'en croissant ici.

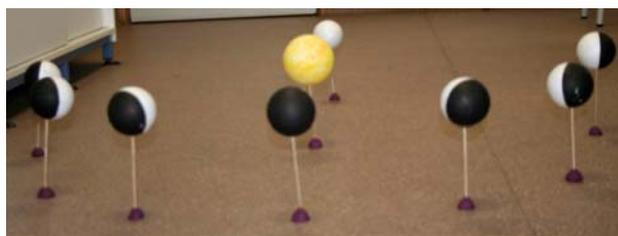


Fig.9. Vénus vue depuis la Terre dans le système de Copernic. On retrouve les phases observées par Galilée.

## Suggestions d'activités

Faites approprier aux élèves le questionnement. Demandez-leur ce que signifie le titre. Il peut être reformulé par : « La Terre est-elle enchaînée ? Si oui, le titre présente-t-il une Terre mobile, ou immobile ? »



Des représentants de l'astronome grec Ptolémée (vers 90-168) nous rendent visite. Ils nous présentent leur système. Demandez aux élèves de critiquer ce modèle. Ils savent déjà que « le Soleil est une étoile, centre d'un système solaire constitué de planètes dont la Terre ».

Mais pour autant, sauront-ils apporter un argument qui contredirait nos jeunes Ptoléméens ?

<sup>3</sup> Dans le système de Tycho Brahé, Vénus tourne autour du Soleil qui lui-même tourne autour de la Terre. Ce système est équivalent à celui de Copernic et prévoit aussi des phases pour Vénus.



Fig.10. Les Ptoléméens.

Après l'observation de la course du Soleil, puis celle de la voûte céleste, demandez-leur ce qu'ils ont vu (on peut projeter un time-lapse montrant ces mouvements<sup>4</sup>). Difficile de ne pas répondre comme la jeune fille : un Soleil qui se couche et des étoiles qui tournent. À celui qui y voit la rotation de la Terre qui nous entraîne à la vitesse de 325 m/s à la latitude de la France, demandez-lui s'il perçoit notre mouvement de révolution autour du Soleil (30 km/s), et s'il détecte le mouvement propre de notre système solaire en direction de l'étoile Véga (20 km/s). A-t-il conscience de notre mouvement autour du centre de la Galaxie (à plus de 200 km/s) qui nous dirige vers la constellation de Céphée, et de notre course vers la galaxie d'Andromède (120 km/s). Tout est une histoire de choix de repère. Et lorsque nous regardons le Soleil ou les étoiles, nous nous sentons immobiles sur une Terre immobile. Ptolémée rencontre durant 13 siècles le succès que l'on sait. Applaudissements !

Des représentantes de l'astronome polonais Copernic (1473-1543) arrivent à leur tour. Tout comme elles le font avec la jeune fille, faites tourner vos élèves sur eux mêmes dans le sens inverse des aiguilles d'une montre (vu de dessus). Leurs bras tendus figurent l'horizon. Prenez comme point de départ midi ; leurs visages sont alors face au sud. Un quart de tour plus tard, il faudra jeter un coup d'œil vers sa main droite (ouest) pour voir que le Soleil passe sous la ligne d'horizon.

<sup>4</sup> Voir par exemple sur <http://clea-astro.eu/activites>



Fig.11. Les Coperniciennes.

Encore un demi tour, et il réapparaîtra au dessus de votre ligne d'horizon, vers votre main gauche (est). Ce modèle est tout aussi efficace. Il mérite aussi d'être applaudi.

Faites exercer l'esprit critique des élèves. Il devrait en ressortir que les observations ne permettent pas, pour l'instant, de retenir un modèle plutôt qu'un autre. Il faut donc en trouver de nouvelles.

Les planètes extérieures, dont Mars fait partie, semblent parfois reculer dans leur mouvement par rapport aux étoiles. C'est ce qu'on appelle le mouvement de rétrogradation. Il s'explique par les différences relatives de vitesses angulaires de chaque mouvement. Ici, il ne s'agit pas de faire comprendre aux élèves toute l'ingéniosité du modèle géocentrique, mais de les faire s'interroger de nouveau. Cette observation permet-elle d'invalider l'un ou l'autre de nos deux modèles ? La réponse est encore négative (voir les figures 4 et 5). Décidément, il faut absolument chercher une autre observation.

Les Galiléennes arrivent, et annoncent leur découverte par cette anagramme « *Haec Immatura a me jam frustra leguntur, o.y* » (en vain, ces choses sont accueillies aujourd'hui prématurément par moi). En changeant l'ordre des lettres, nous obtenons « *Cynthiae<sup>5</sup> figuras aemulatur mater amorum* » (les phases de Diane imitent la mère des amours). Faites découvrir par quelques tableaux aux élèves qui sont la mère des amours et Diane. Ils connaissent déjà les phases de la Lune, et les dessins des observations des phases de Vénus par Galilée doivent leur faire comprendre la teneur du message du célèbre pisan.



Demandez enfin qu'ils mettent en place un protocole élémentaire pour tester cette ultime observation. Des piques à brochettes et des boules de polystyrène dont un hémisphère est peint en noir permettront de modéliser le Soleil et Vénus. Chaque enfant aura le rôle des yeux de Galilée. Expérimentez les deux modèles ; celui de Ptolémée n'explique pas l'observation des phases de Vénus. Il est enfin invalidé ! (voir les figures 8 et 9).

Ne restent que les contributions de Copernic et Galilée à l'évolution des idées en astronomie !

<sup>5</sup> Cynthia en référence au Mont Cinthe le lieu de naissance de Diane/Artemis.

## Note importante à l'usage des maîtres

Certes, l'observation de Galilée rejette définitivement le système de Ptolémée. Mais il ne prouve pas pour autant que le modèle de Copernic soit le bon. En effet, les observations de Vénus indiquent seulement que cette dernière tourne autour du Soleil. L'astronome danois Tycho Brahé (1546-1601) ne se résout pas à abandonner le géocentrisme et met au point un système mixte, dit géo-héliocentrique. Ce système sera invalidé par les théories de Kepler et de Newton, et définitivement abandonné après la découverte par l'astronome James Bradley de l'aberration de la lumière (première confirmation expérimentale de la révolution de la Terre autour du Soleil). Quant à la rotation de la Terre sur elle-même, il faudra attendre 1851 et le pendule de Foucault.

Le film "Libérez la Terre" est visible à l'adresse suivante : <http://www.saint-joseph-gaillac.com/spip.php?article355>





### Horizontalement

1. Un des paramètres de l'orbite d'une planète.
2. Joint. Adams est l'un de ceux qui a étudié son orbite pour tenter de découvrir une nouvelle planète.
3. Points d'une orbite. Comme Pluton.
4. Au tout début d'intranet. Énergie.
5. Point d'une orbite.  $m^3$ .
6. Rendez-vous annuel d'astronomes dans les Hautes-Alpes. Voit, mais brouillé.
7. Son orbite est en résonance avec ses voisins. À la Bastille. Épaissis.
8. Nombre de satellites de Jupiter pour Galilée. Bouts de ruban.
9. Major du ciel. Mars y passe à la fin de l'année.
10. Elle étudie plus les orbites des satellites que des planètes. Orbite possible de comète, pas de planète.

### Mots croisés en orbite

#### Verticalement

1. Comme une orbite de planète.
2. Comme l'Apollo de juillet 1969. Sorti. Compagnon de Callisto ?
3. Celui de l'orbite terrestre est situé à 2,5 millions de km du Soleil. Avant l'ISO.
4. Trouva l'azimut.
5. Comme la surface de Mars. In Coma Berenices.
6. Elle a souvent représenté Nout, la déesse du ciel en Égypte. Elle termine sa course à Saint-Pétersbourg.
7.  $2\pi$  en un an pour la Terre sur son orbite. La première de Kepler a trait aux orbites. La veille, à l'oreille.
8. Prof d'école. On y trouve aussi bien des astronomes que des spécialistes des déchets.
9. 29 protons. En orbite. En orbite.
10. Son orbite, très excentrique, lui fut fatale. Détecteur, amas ou constellation.
11. Ne dis pas. Mathématicien et cratère lunaire.
12. Il a expliqué l'avance du périhélie de Mercure.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1												
2				■							■	
3		■							■			
4					■		■					
5										■		
6		■				■					■	
7			■					■				
8							■		■			
9					■							■
10				■								

Solutions page 40

## Évolution des trajectoires des planètes

Véronique Hauguel, Rouen, Pierre Causeret, Esbarres

À chaque époque correspond une recherche de cohérence et d'harmonie ontologique pour expliquer l'étrange ballet des astres. Après la justification mythologique (une barque chargée de ramener chaque nuit le Soleil vers l'est) on passe à la représentation géocentrique qui sauve mieux les apparences puis, laborieusement, à l'héliocentrisme. Dans tous les cas il convient de posséder un peu d'esprit de géométrie.

À partir du VI<sup>e</sup> siècle avant notre ère, ce sont les Grecs qui, les premiers, ont cherché à expliquer tous les phénomènes célestes. Auparavant, les explications étaient mythologiques ; par exemple, pour les Égyptiens, le Soleil était ramené par une barque vers l'est pendant la nuit après son coucher.

Il a fallu du temps pour que la Terre apparaisse comme une boule en équilibre dans le cosmos, univers ordonné. Anaximandre imaginait la Terre comme un cylindre isolé au centre de la sphère céleste et c'est probablement Pythagore le premier à avoir eu l'idée d'une Terre ronde comme une boule pour des raisons d'ordre philosophique plutôt que scientifique.

Les astronomes et géomètres grecs ont réussi à mettre en place un système remarquable pour expliquer les mouvements des astres avec des observations remontant seulement au VIII<sup>e</sup> siècle avant J.-C. (il semble qu'ils ne connaissaient pas de tablettes babyloniennes plus anciennes).

### Géocentrisme et héliocentrisme

On peut commencer à parler système à partir des travaux de l'école de Pythagore qui ont permis une première approche des trajectoires des 7 planètes.

Le terme de planète, qui signifie "astre errant", désignait les astres que l'on voit bouger régulièrement sur la voûte céleste, y compris la Lune et le Soleil, même si ces astres gardaient une place à part. Dans un ordre qui variera jusqu'à Hipparque avant de se stabiliser, on énonce la Lune, Mercure, Vénus, le Soleil, Mars, Jupiter et Saturne, de la plus proche à la plus lointaine.

Pythagore a recherché des lois harmonieuses et des analogies pour expliquer le monde et le mouvement des planètes (astronomie) à partir de formes régulières (géométrie), de nombres naturels (arithmétique) et de notes (musique).

« Les Pythagoriciens qui les premiers abordèrent ce genre de recherches sont partis de l'hypothèse que

les mouvements du Soleil de la Lune et des 5 planètes étaient circulaires et réguliers »<sup>1</sup>.

Cette recherche d'harmonie, d'équilibre, de perfection, de régularité et de symétrie guidera les travaux des astronomes jusqu'à Kepler.



Fig.1. Système géocentrique (cosmographie de Pierre Apian, 1544). La figure reprend le modèle de Platon avec les sphères contenant chacune une planète à l'intérieur du premier mobile (la sphère stellaire) centrées toutes sur la Terre immobile formée d'eau et de terre, entourée de feu puis d'air et enfin, au-delà de la Lune, d'éther. (Document BNF).

À partir de Platon, il s'agit, en plus, de « sauver les apparences ». Il faut donc trouver un modèle qui rende compte des observations.

Platon a-t-il choisi l'hypothèse de la Terre immobile au centre du monde pour des raisons philosophiques ou religieuses<sup>2</sup> ? Pour des raisons pratiques ? Il est vrai que le système où l'observateur, c'est à dire la Terre ou nous-mêmes, est à l'origine du repère est a priori plus simple et même plus naturel.

<sup>1</sup> Géménius, Introduction, 1<sup>er</sup> s. avant notre ère.

<sup>2</sup> Platon connaissait les hypothèses de l'école pythagoricienne.

Ce système géocentrique sera privilégié par tous les astronomes jusqu'au livre de Copernic. Cela ne veut pas dire que cette théorie était suivie par tous, comme nous le verrons par la suite<sup>3</sup>.

Mais Ptolémée, au II<sup>e</sup> siècle de notre ère, avait mis en place un tel degré d'ingéniosité et poussé à l'extrême la sophistication d'un modèle avec une précision si remarquable pour l'époque qu'il faudra 2 000 ans, bien après les travaux de Newton, pour que le système héliocentrique soit complètement reconnu.

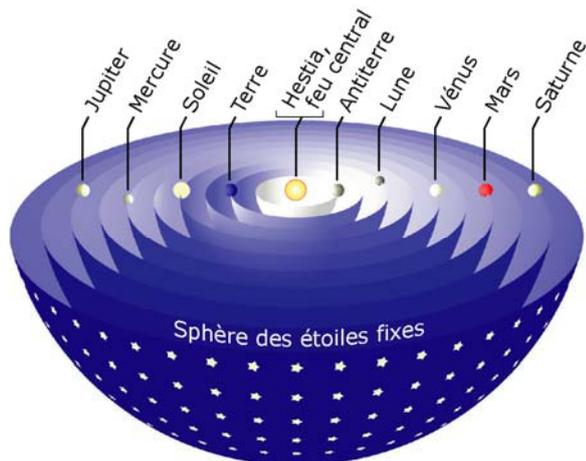
Il est intéressant de noter, qu'après la sortie du livre de Copernic présentant l'héliocentrisme, de nombreux traités (comme par exemple ceux d'hydrographes qui expliquaient la manière de naviguer aux étoiles) continuent à présenter le ciel de Ptolémée.

## Trajectoires avant Apollonius

### 1<sup>er</sup> système

#### Modèle de Philolaos de Crotonne (v.-470 ; v.-395)

Dans le système de Philolaos, pythagoricien du V<sup>e</sup> siècle avant notre ère, le monde est organisé autour d'un feu central, Hestia, au centre du cosmos, autour duquel gravitent 10 sphères de cristal séparées par des intervalles harmonieux. Sur chacune de ces sphères, en plus des 7 planètes des Grecs, il y a la Terre, une Antiterre (opposée à la Terre par rapport au feu central) et les étoiles fixes. Les astres renvoient la lumière du feu central.



**Fig.2.** Système de Philolaos composé de 10 sphères entourant Hestia, le feu central. L'Antiterre ainsi que le feu central nous sont invisibles car situés à l'opposé de la partie habitée de la Terre, l'æcoumène (partie gauche de la Terre sur la figure). La Terre montre la même face au feu central et tourne en 24 heures.

<sup>3</sup> Voir système 3 et 4, puis de Ptolémée à Copernic.

Le nombre de sphères célestes n'est pas un hasard. Elles sont 10, et 10 est la décade, nombre complet et symbolique, composé des 4 premiers chiffres, appelés tétrade car  $10 = 1 + 2 + 3 + 4$ .

Au siècle suivant, Platon « pose alors ce problème aux mathématiciens », d'après Simplicius, « quels sont les mouvements circulaires uniformes et parfaitement réguliers qu'il convient de prendre pour hypothèses, afin que l'on puisse sauver les apparences que les astres errants présentent ? »<sup>4</sup>.

Le cadre est alors fixé, la Terre est immobile au centre du cosmos et tous les modèles qui suivront iront en s'améliorant jusqu'à Ptolémée permettant un calcul de la position des planètes conforme aux observations<sup>5</sup>.

Il est marqué aussi par une définition mystique de l'univers qui imprégnera les esprits longtemps, l'univers fini se divisant en deux parties :

- le monde sublunaire, entre la Terre et la Lune, instable, incertain, altérable (ou monde de la génération et de la corruption) lié au mouvement rectiligne ;

- le monde supralunaire, au-dessus de la Lune, immuable, parfait, stable et éternel, lié au mouvement régulier et circulaire.

Aristote insistera sur les lois physiques différentes régissant chacun des deux mondes.



**Fig.3.** Pour Platon, les 5 polyèdres réguliers représentent chacun un corps élémentaire. Sur la figure, on trouve de gauche à droite : le tétraèdre (le feu), le cube (la terre), l'octaèdre (l'air), le dodécaèdre (l'éther), et l'icosaèdre (l'eau). (Crédit photo 123rf. Darius Turek).

### 2<sup>e</sup> système

#### Modèle d'Eudoxe de Cnide (-408, -355)

Dans le même temps, Eudoxe de Cnide, élève de Platon, met en place un système de 27 sphères homocentriques, sphères emboîtées autour de la Terre pour résoudre le problème de la rétrogradation, un des phénomènes liés à l'observation, jusqu'alors inexpliqué<sup>6</sup>.

Mais ce système n'explique pas les fluctuations d'éclat des planètes qui suggèrent une variation de l'éloignement des astres alors qu'ils sont ici toujours à la même distance de la Terre.

<sup>4</sup> Commentaire sur la physique d'Aristote, Simplicius (490-560)

<sup>5</sup> Pour les observations, voir page 9.

<sup>6</sup> Le modèle des sphères d'Eudoxe montre bien des rétrogradations pour Jupiter et Saturne mais il fonctionne mal pour Mars (pour les rétrogradations voir page 9).

Un mécanisme de 4 sphères est proposé pour chaque planète (voir figure) sauf pour la Lune et le Soleil qui en ont 3. La planète est située sur l'équateur de la sphère intérieure. L'axe de rotation de chaque sphère est solidaire de celle directement extérieure.

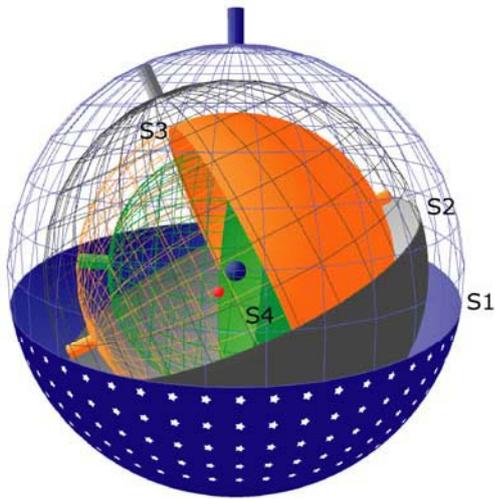


Fig.4. Mécanisme des 4 sphères d'une planète.

La sphère S1, sphère des fixes (en bleu) sert à reproduire le mouvement diurne, S2 en gris donne le mouvement moyen de la planète. S3 et S4, en orange et en vert, permettent de simuler les rétrogradations et les mouvements en latitude.

Pour un observateur situé sur la Terre (en bleu au centre), la sphère extérieure S1 tourne dans le sens direct autour de l'axe polaire en 24 heures, comme la voûte céleste. La sphère S2 dont l'équateur est dans le plan de l'écliptique tourne dans le sens inverse, en un an pour une planète inférieure (Mercure, Vénus) et en une période sidérale pour une planète supérieure (Mars, Jupiter, Saturne). La sphère S3 dont l'axe est dans le plan de l'écliptique, tourne selon la période synodique de la planète. La sphère S4 tourne dans le sens contraire, son axe faisant un petit angle avec celui de S3, qui dépend de la planète. C'est elle qui porte la planète (en rouge).

À ce système cinétique théorique, Aristote ajoute 29 sphères, ce qui donne un total de 56 sphères, pour répondre à une existence physique sans vide (sortes de sphères-engrenage) du système.

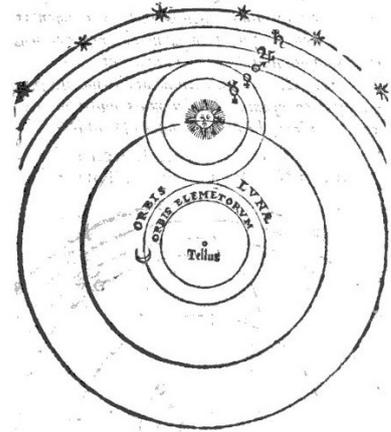
### 3<sup>e</sup> système

#### Modèle attribué à Héraclide du Pont (v.-388 ; v.-310)

Héraclide, élève de Platon puis d'Aristote, aurait été le premier à soutenir que la Terre tourne sur elle-même en 24 heures pour expliquer le mouvement apparent des étoiles au cours de la nuit. Certains auteurs lui attribuent aussi la paternité d'un système qui fait tourner Vénus et Mercure autour du Soleil, la Terre restant au centre, pour expliquer leur proximité avec le Soleil. Ce système est une

première réflexion qui inspirera le 5<sup>e</sup> système des épicycles.

Fig.5. Représentation en 1573 par Valentin Naboth du modèle astronomique géohéliocentrique d'Héraclide transmis par Martianus Capella (au V<sup>e</sup> siècle de notre ère).



Par Valentin Naboth [Public domain], via Wikimedia

### 4<sup>e</sup> système

#### Modèle d'Aristarque de Samos (v.-310, v.-230)

C'est grâce à Archimède que l'on connaît les idées d'héliocentrisme d'Aristarque « Il [Aristarque] suppose que les étoiles fixes et le Soleil sont immobiles tandis que la Terre est emportée, autour du Soleil, le long d'une circonférence dont le Soleil occupe le centre, et d'autre part que la sphère des astres fixes, centrée sur le même centre du Soleil, est si grande que la circonférence sur laquelle la Terre est supposée se mouvoir est à la distance des étoiles comme le centre de la sphère est à sa surface »<sup>7</sup>.

Aristarque est donc bien un précurseur de Copernic. Mais ce même Archimède participe à le faire tomber dans l'oubli... Il lui reproche son manque de précision dans la « proportion » et sa critique de la physique d'Aristote, comme par exemple :

- comment un astre fait de feu, plus léger que la Terre pourrait être immobile ?
- si la Terre se déplace, on verrait des déformations angulaires dans les constellations ;
- si la Terre tournait sur elle-même, les objets non fixés s'envoleraient vers l'ouest.

Pour terminer, s'opposer au dogme de la Terre-divinité et du feu d'Hestia est un sacrilège. La force des préjugés fera le reste et Aristarque meurt isolé dans sa vision du monde.

Il faudra attendre 18 siècles pour en revenir là.

À la même époque, toujours à Alexandrie, un grand géomètre et astronome, Apollonius<sup>8</sup> de Perge met en place une nouvelle manière de résoudre le problème posé par Platon, l'astronomie circulaire, sans remettre en cause les sphères qui supportent les planètes. Son modèle sera amélioré par Hipparque puis par Ptolémée.

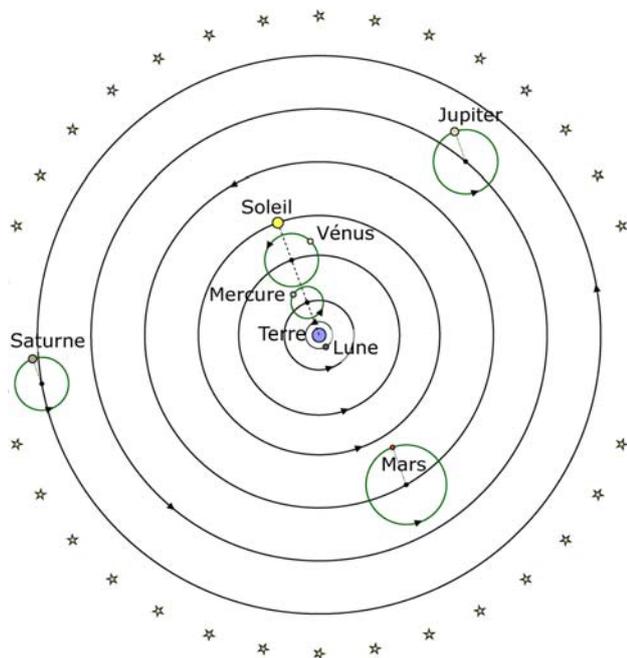
<sup>7</sup> Préface du traité *Arénaire*.

<sup>8</sup> Apollonius est célèbre pour ses écrits sur les coniques.

# Les épicycles

## 5<sup>e</sup> système (astronomie circulaire)

### 1- Apollonius de Perge (v.-262, v.-190)

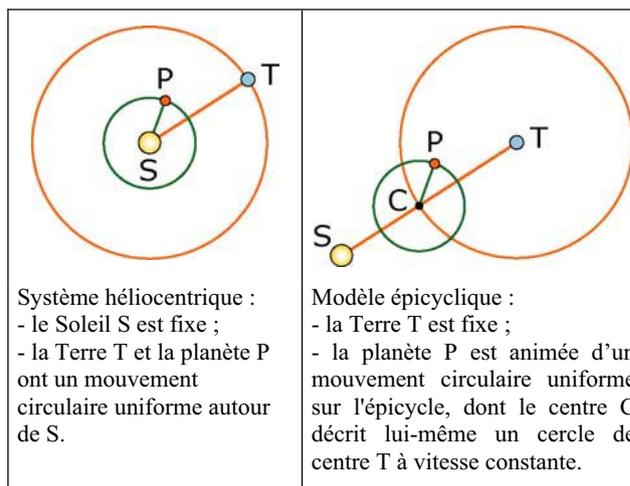


**Fig.6.** Le système des épicycles. Chaque planète se déplace sur un cercle (l'épicycle, en vert), dont le centre tourne autour de la Terre sur un autre cercle, le déférent. Pour les planètes inférieures, les centres des épicycles de Mercure et de Vénus sont alignés avec la Terre et le Soleil. Pour les planètes supérieures, la droite passant par le centre de l'épicycle et la planète est parallèle à la droite Terre – Soleil.

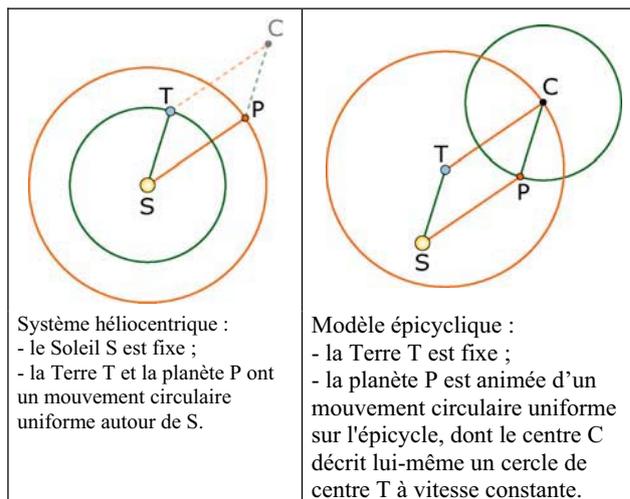
Ce modèle attribué à Apollonius explique les mouvements en y incluant les rétrogradations et les variations de luminosité des planètes<sup>9</sup>.

Cependant, dans ce système, chaque planète est dans le plan de l'écliptique (ce qui est faux en réalité) et seul le mouvement en longitude est pris en compte. De plus, le Soleil a une vitesse angulaire constante (ce qui est aussi faux) ; ce dernier problème sera résolu par Hipparque.

On peut montrer l'équivalence cinématique entre un système héliocentrique, celui d'Aristarque avec le Soleil au centre, et un système géocentrique à épicycles, celui d'Apollonius avec la Terre au centre (figures 7 et 8).



**Fig.7.** Équivalence entre le modèle héliocentrique et un épicycle pour une planète inférieure P comme Vénus. Pour passer de la figure de gauche à celle de droite, il suffit de changer de point fixe. Si on place le Soleil en C dans le modèle à épicycle, on obtient le modèle attribué à Héraclide du Pont (3<sup>e</sup> système). Le Soleil vu depuis la Terre est dans la même direction et l'équivalence avec le système héliocentrique est encore plus évident. Mais pour Apollonius et ses successeurs, le centre C de l'épicycle est situé entre la Terre et le Soleil.



**Fig.8.** Équivalence entre le modèle héliocentrique et un épicycle pour une planète supérieure P comme Mars. Sur la figure de gauche, on a ajouté un point C pour que SPCT soit un parallélogramme :  $\vec{SP} = \vec{TC}$ . Pour passer de la figure de gauche à celle de droite, il suffit de changer de point fixe.

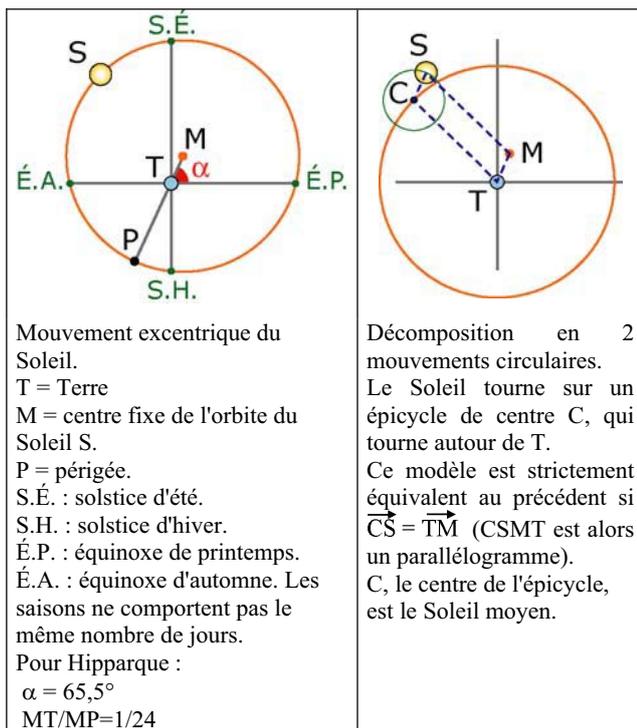
### 2- Hipparque (v.-190, v.-120)

Un siècle plus tard, Hipparque<sup>10</sup>, un des plus grands astronomes grecs, précise ce système. Il rend compte de la différence concernant la durée des saisons en faisant tourner le Soleil à vitesse constante sur un cercle qui n'est pas centré sur la Terre : c'est ce qu'on appelle un excentrique. On

<sup>9</sup> Voir page 9.

<sup>10</sup> Découvreur de la précession des équinoxes, inventeur de la trigonométrie plane (table des cordes), auteur d'un catalogue de 800 étoiles.

peut montrer simplement que ce modèle est équivalent à un modèle épicyclique, composition de deux mouvements circulaires uniformes dont un centré sur la Terre (figure 9).



**Fig.9.** Équivalence entre un excentrique et un épicycle pour le Soleil. On a la même équivalence entre les deux systèmes pour une planète.

L'équivalence excentrique – épicycle est aussi vraie pour une planète mais avec cette fois M mobile. Nous avons vu l'équivalence du système à épicycles avec le système héliocentrique (figures 7 et 8). Les trois systèmes présentés ici sont donc géométriquement équivalents.

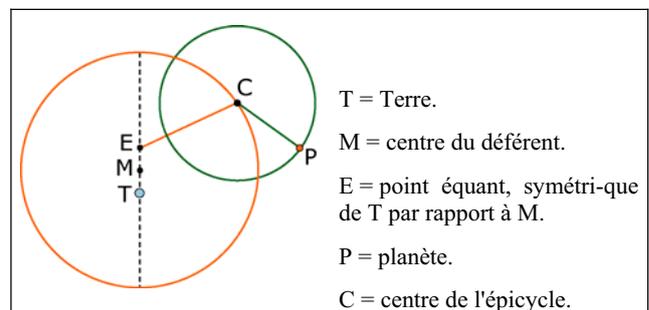
Malgré ces remarquables améliorations<sup>11</sup> en utilisant seulement des mouvements circulaires uniformes centrés sur T, la Terre, Hipparque n'est pas arrivé à déterminer de manière satisfaisante les positions des planètes avec son modèle épicyclique.

On peut se demander comment les mesures arrivaient à une telle précision connaissant les instruments peu précis de l'époque comme la sphère armillaire, le triquetrum et le quadrant, même ancrés dans le sol.

### 3- Claude Ptolémée (v.90, 168)

Plus de 3 siècles plus tard, dans la composition mathématique, appelée l'« Almageste », Ptolémée excentre l'orbite du Soleil comme Hipparque mais

aussi le déférent de chaque planète. Le centre du déférent M n'est pas la Terre T. De plus, il utilise le point équant E, symétrique de T par rapport à M. Le centre de l'épicycle tourne à vitesse angulaire constante non plus autour de la Terre mais autour du point équant.



**Fig.10.** Mouvement des planètes pour Ptolémée.  
 La planète P tourne à vitesse constante sur son épicycle.  
 Le point C, centre de l'épicycle tourne sur le déférent mais c'est la vitesse angulaire autour de E qui est constante.  
 Pour les planètes inférieures, le Soleil est aligné avec T et C (comme sur la figure 7b).  
 Pour les planètes supérieures, la droite (CP) reste parallèle à la droite Terre – Soleil moyen (le Soleil moyen tournant à vitesse constante autour de la Terre).

Avec l'équant, Ptolémée améliore la précision de son modèle pour le mouvement en longitude des planètes.

Pour rendre compte du mouvement en latitude – de part et d'autre de l'écliptique, les planètes ne se déplaçant pas exactement sur l'écliptique – Ptolémée trouve une solution assez satisfaisante en mettant, pour chaque planète, épicycle et déférent dans 2 plans différents faisant un angle réglable par des petits cercles perpendiculaires au plan de l'écliptique. Mais, dans ce modèle, les plans des trajectoires des planètes ne passent pas par le Soleil.

Le point équant est une grosse entorse au mouvement circulaire régulier imposé par Platon et Aristote. Malgré cela, le modèle de Ptolémée va connaître une longue vie. Il ne sera détrôné qu'à partir de 1543 par le modèle héliocentrique de Copernic.

(À suivre...)

Des animations de ces différents systèmes seront prochainement disponibles sur le site du CLEA.

### Bibliographie

« Et pourtant elle tourne » de Jacques Gapaillard, 1993, éditions du Seuil, un excellent livre sur l'histoire des mouvements dans le système solaire.

<sup>11</sup> Hipparque utilise le Soleil moyen (point C de la figure 6) et non S dans le modèle épicyclique des planètes supérieures.

# AVEC NOS ÉLÈVES

## Un planétaire construit avec GeoGebra

Sylvie Thiault, Lyon

Je vous propose de construire un planétaire avec GeoGebra et de l'utiliser pour comprendre par exemple la rétrogradation de Mars, l'élongation de Vénus, les conditions d'opposition, de conjonction ou d'alignement des planètes.

GeoGebra est un logiciel de géométrie dynamique couramment utilisé par les enseignants de mathématiques et par leurs élèves. Il s'agit ici de représenter la révolution de planètes autour du Soleil. On peut ainsi étudier leur position un jour donné ou voir l'évolution de ces positions au cours du temps.

Nous nous intéresserons ici aux seules planètes Vénus, Terre, Mars, Jupiter et Saturne.

Nous faisons ici l'hypothèse que toutes les planètes se déplacent dans le plan de l'écliptique suivant des orbites circulaires, centrées sur le Soleil.

Nous prendrons comme position de départ pour toutes les planètes, la position qu'elles occupaient le 1<sup>er</sup> janvier 2015.

### Données

	Vénus (V)	Terre (E)	Mars (Ma)	Jupiter (J)	Saturne (S)
Période sidérale en jours	225	365	687	4333	10759
Rayon de l'orbite (millions de km)	108	150	228	778	1429
Longitude* au 1/01/2015 (en °)	319	100	349	135	237

\* Il s'agit ici de la longitude écliptique héliocentrique.

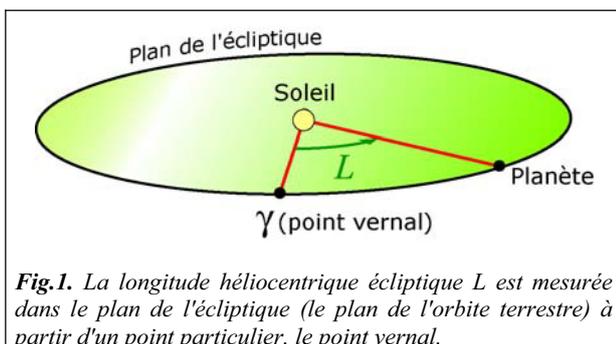


Fig.1. La longitude héliocentrique  $L$  est mesurée dans le plan de l'écliptique (le plan de l'orbite terrestre) à partir d'un point particulier, le point vernal.

### Nom des données

$j$  : nombre de jours écoulés depuis le 1/01/2015 ;

$H$  : centre du Soleil ;

$c_H$  : disque du Soleil ;

$P$  : centre de la planète ;

$o_P$  : orbite de la planète ;

$L0_P$  : longitude écliptique initiale de la planète ;

$L_P$  : longitude écliptique de la planète à la date  $j$  ;

$T_P$  : période sidérale de la planète ;

$r_P$  : distance moyenne de la planète au Soleil.

### Construction

Vous trouverez sur le site du CLEA les instructions détaillées ainsi que le fichier GeoGebra terminé.

Nous indiquons ici uniquement les étapes du travail. On ouvre GeoGebra en faisant apparaître la fenêtre algèbre, la fenêtre graphique et éventuellement la fenêtre tableur (pour le calcul de la date).

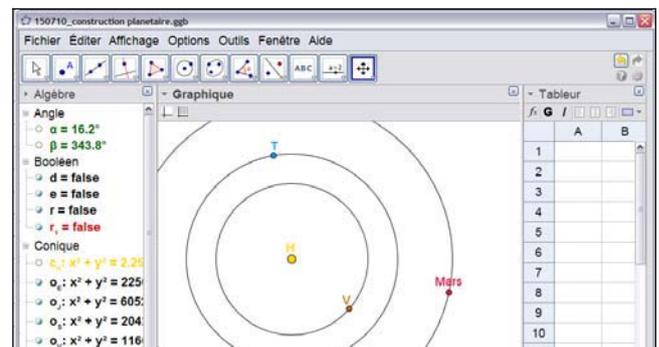


Fig.2. Aspect de la fenêtre de travail de GeoGebra.

### 1. La date

On crée un curseur  $j$  contrôlant le temps avec une plage de 0 à 5 000 jours et un incrément de 1/24.

Les planètes seront ainsi positionnées sur leur orbite  $j$  jours après le 1/01/2015.

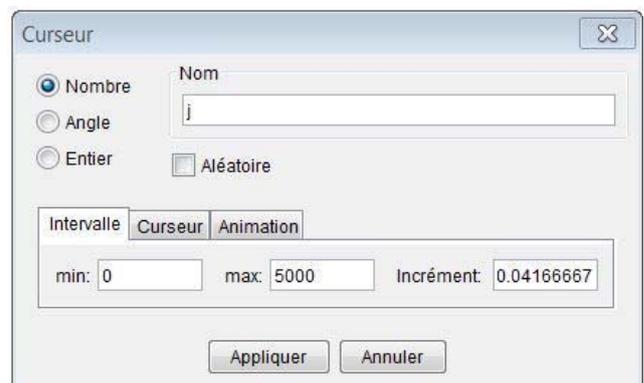


Fig.3. Création du curseur jour.

### Comment calculer $j$ à partir de la date en jour/mois/année ?

On peut compter les jours, mois par mois, depuis le 1<sup>er</sup> janvier 2015. Une autre solution consiste à utiliser les jours juliens.

La date exprimée en jours juliens,  $d_{JJ}$  utilise un système de décompte des jours avec comme date origine le 1<sup>er</sup> janvier de l'an -4712 à 12 heures T.U. Ainsi la date du 1<sup>er</sup> janvier 2015 dans le calendrier julien est 2 457 023,5.

Il suffit donc de calculer  $j = d_{JJ} - 2\,457\,023,5$ .

Mais comment connaître  $d_{JJ}$  à partir de la date en jour/mois/année ?

Sur le site de l'IMCCE :

[http://www.imcce.fr/fr/grandpublic/temps/jour\\_julien.php](http://www.imcce.fr/fr/grandpublic/temps/jour_julien.php)

Avec GeoGebra, sur le site de l'observatoire de Lyon :

<http://cral.univ-lyon1.fr/labo/fc/astrogebra/astrogebra2D.htm>

## 2. Les caractéristiques orbitales des planètes

On crée pour chaque planète  $P$  les grandeurs suivantes :

- sa période sidérale  $T_P$  ;
- sa distance moyenne au Soleil en km  $r_P$  ;
- sa longitude écliptique initiale  $L0_P$ .

## 3. Position du Soleil

On met en place le Soleil, représenté par le point H de coordonnées (0,0).

## 4. Construction de l'orbite de Vénus (V)

On crée le cercle  $o_V$  de centre H et de rayon  $r_V$ . C'est l'orbite de Vénus.

## 5. Positionnement de Vénus sur son orbite à la date $j$

On calcule  $L_V$  la longitude de Vénus à la date  $j$ . En faisant l'hypothèse que Vénus est animée d'un mouvement uniforme, on a :

$$L_V = L0_V + j \cdot 360 / T_V$$

On positionne Vénus sur le cercle  $o_V$  :

- soit avec ses coordonnées cartésiennes

$$(r_V \cdot \cos(L_V^\circ), r_V \cdot \sin(L_V^\circ)) ;$$

- soit par ses coordonnées polaires ( $r_V, L_V^\circ$ ).

Attention ne pas oublier «°» qui indique que la mesure de la longitude est en degrés !

## 6. Positionnement des autres planètes

On reprend les points 4 et 5 pour les autres planètes.

### Astuce GeoGebra

On peut aussi dans la barre de saisie, avec ↑, rappeler les instructions déjà tapées pour Vénus et modifier avec les caractéristiques de la nouvelle planète.

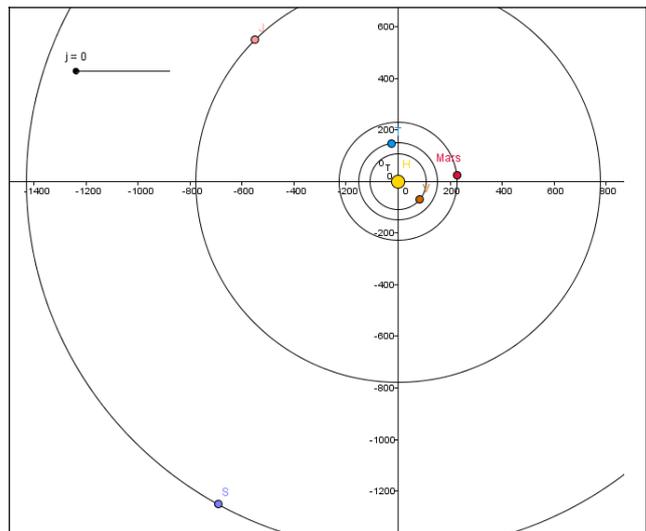


Fig.4. Les planètes positionnées au 1<sup>er</sup> janvier 2015.

## Utilisation du planétaire

### 1. Rapprochement Vénus/Jupiter du point de vue d'un Terrien le 30 juin 2015

Le 30 juin 2015 à 20 h TU, il s'est écoulé un nombre de jours  $j = 180,8$ .

On observe qu'à cette date les trois planètes Terre-Vénus et Jupiter sont proches d'un alignement.

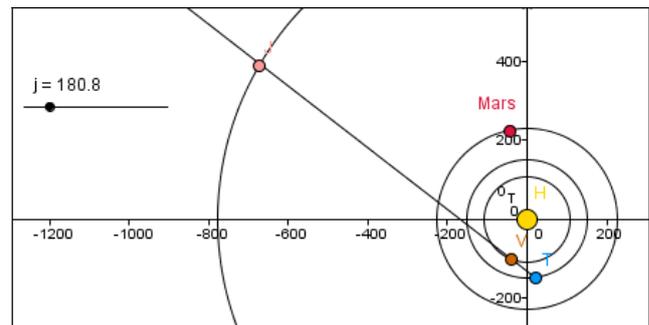


Fig.5. Alignement Terre, Vénus, Jupiter.

On peut de la même manière estimer le prochain rapprochement Saturne-Vénus d'un point de vue terrien... le 13 janvier prochain, en fin de nuit...



Fig.6. Rapprochement serré de Vénus (la plus brillante) et Jupiter (juste au-dessus), le 30 juin 2015.

## 2. Élongation de Vénus

On appelle élongation de Vénus l'angle que fait la direction du Soleil avec la direction de Vénus vus depuis la Terre.

Pour afficher à la demande l'élongation de Vénus, on crée un bouton de sélection qu'on nommera « e » ayant pour légende « Élongation de Vénus ».

On crée deux demi-droites qui représentent respectivement la direction de Vénus vue de la Terre et celle du Soleil vue de la Terre.

Pour déterminer l'élongation de Vénus, on mesure l'angle aigu  $\widehat{HTV}$ .

Méthode : on demande la mesure de deux angles en choisissant dans cet ordre H, puis T puis V pour l'un et V, puis T puis H pour l'autre.

L'élongation de Vénus est l'angle pour lequel la mesure est inférieure à  $180^\circ$ .

On affichera la valeur de l'élongation sous la condition que « e » soit vrai, c'est à dire seulement quand le bouton « Élongation de Vénus » est coché.

On recherche la valeur de l'élongation maximale de Vénus :

Vénus a été visible le soir en début de nuit à son élongation maximale début juin 2015 et sera de nouveau à son élongation maximale en novembre 2015, mais elle sera alors visible le matin en fin de nuit.

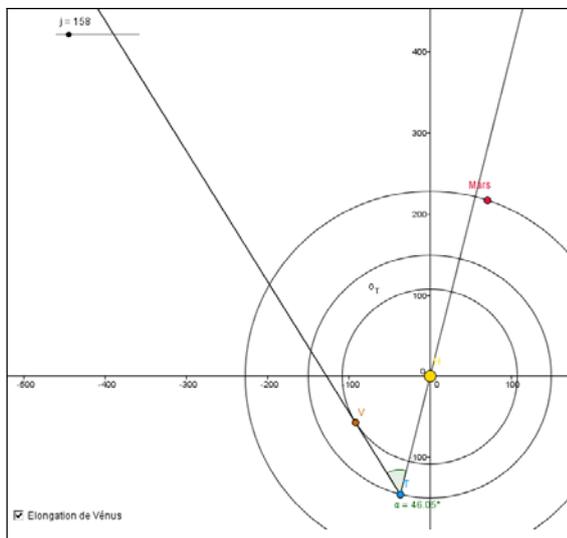


Fig.7. Élongation de  $46,05^\circ$  début juin 2015 ( $j = 158$ ).

## 3. Rétrogradation de Mars

On peut afficher la distance Terre-Mars puis montrer qu'autour de la date de l'opposition, on observe une rétrogradation de Mars.

On crée un bouton de sélection comme au 2 qu'on nommera « r » et ayant pour légende « rétrogradation de Mars ».

On crée un point fixe A, à partir duquel, on va représenter la direction de Mars vu de la Terre sur le fond d'étoiles.

On crée le vecteur  $\vec{EMa}$  puis le vecteur d'origine A égal à  $\vec{EMa}$  qu'on choisit d'afficher seulement quand « Rétrogradation de Mars » est sélectionné.

On observe sa direction quand j varie...

On peut ainsi estimer que la prochaine rétrogradation de Mars aura lieu au printemps 2016. Plus précisément, GeoGebra nous donne une opposition de Mars pour  $j = 539$  donc le 22 juin. En réalité, elle aura lieu un mois plus tôt, le 22 mai. La modélisation par des orbites circulaires parcourues à vitesse constante montre ici ses limites. Elle donne des résultats très approximatifs mais permet de comprendre les phénomènes.

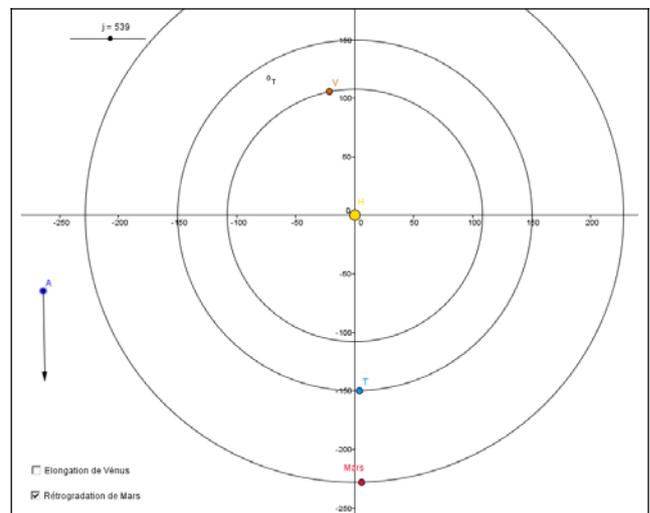


Fig.8. Opposition de Mars et milieu de la rétrogradation à  $j = 539$ .

Ce planétaire très simplifié peut être « amélioré » et complété.

Il est possible :

- d'insérer un zodiaque qui permet de savoir dans quelle constellation se trouve une planète ;
- de ne plus considérer que les orbites des planètes sont des cercles centrés sur le Soleil : on peut construire les orbites elliptiques dont le foyer est le Soleil ;
- de ne plus considérer que le mouvement est uniforme, mais de tenir compte de la loi des aires. On utilise alors l'équation de Kepler pour positionner la planète à la date sur son orbite elliptique ;
- et, raffinement suprême avec Geogebra3D, de tenir compte de l'inclinaison des orbites des planètes sur le plan de l'écliptique.

Vous trouverez sur le site du CLEA le fichier GeoGebra avec zodiaque (pour les abonnés numériques).

# HISTOIRE

## KEPLER, LES ASTRES ET LA MUSIQUE

Présentation simplifiée et extension du projet képlérien à destination des élèves de TS

Stéphane Le Gars, Centre François Viète, Nantes

*Utiliser des données astronomiques pour créer de la musique est un jeu amusant auquel s'adonnent quelques astronomes. Mais, à l'époque de Kepler, il ne s'agissait pas d'un jeu mais de la recherche de l'harmonie du monde. Stéphane Le Gars relate ici les travaux de Kepler sur la musique et les planètes de notre Système solaire et les transpose aux exoplanètes.*

Nous sommes en 1619. L'astronome allemand Johannes KEPLER publie l'Harmonie du Monde, un ouvrage extraordinairement curieux et difficile qui marque l'aboutissement de plusieurs années de recherches et de souffrances au service d'un idéal philosophique. Contemporain de Galilée et, comme lui, adepte du système de Copernic, Kepler bouleverse la vieille astronomie grecque. À une époque de chaos religieux, il est lui aussi à la recherche de l'Harmonie dans les Cieux. Mais contrairement aux pythagoriciens qui ne voyaient que spéculations dans la musique des sphères, Kepler cherche l'Harmonie céleste dans les rapports numériques observés et mis en œuvre dans la musique, l'astrologie et l'astronomie.

Il découvre ainsi que les planètes décrivent des orbites en forme d'ellipse. Il découvre aussi que la vitesse de la planète sur son orbite est la clef de cette Harmonie céleste tant recherchée depuis l'Antiquité. En établissant le chant des planètes et les lois qui portent désormais son nom, Kepler empêche tout retour en arrière sur la manière dont les hommes conçoivent le Monde ou leur Cosmos.

### Contexte historique et méthode scientifique

Le texte ci-dessus constitue l'introduction du *Kepler Music Project*, un spectacle historique, astronomique et musical qui s'attache depuis trois ans à montrer, à tous les publics, comment Kepler a brassé astronomie et musique et construit les lois qui régissent les mouvements des planètes, lois qui sont aujourd'hui enseignées dans les classes de Terminales S.

Ce spectacle est donc l'occasion d'une mise en contexte des travaux de Kepler, d'une découverte de sa méthode originale et parfois farfelue pour un observateur du XXI<sup>e</sup> siècle, et enfin d'une divagation musicale electro-jazz inspirée des idées musicales de Kepler.

C'est en 1596 que Kepler publie son premier ouvrage, le *Mysterium Cosmographicum*. Kepler montre déjà les fondements et particularités de sa pensée : il est influencé tout à la fois par Pythagore et l'idée que le monde est structuré par les nombres, et par la Bible car pour lui « Le Soleil au milieu des astres mouvants, lui-même immobile, mais source de mouvement, porte l'image de Dieu le Père, le Créateur... Il répand sa force motrice dans un médium qui contient les corps en mouvement de même que le Père crée par l'intermédiaire du Saint-Esprit »<sup>1</sup>. Cette citation montre la place que le Soleil occupe chez Kepler : il ne peut qu'adhérer aux idées de Copernic, à savoir un monde non plus géocentrique, mais héliocentrique. Le copernicanisme de Kepler, qui enseigne alors à l'université de Tübingen, déplait fortement aux autorités religieuses, ce qui le conduit à une promotion sous forme d'exil : il est nommé professeur de mathématiques à Graz, éloigné de 600 km de Tübingen, qui est à cette époque le grand centre intellectuel protestant. C'est donc à Graz, devant ses étudiants, que Kepler dessine, d'un point de vue héliocentrique, les rapprochements de Jupiter et Saturne. Il réalise que ces deux planètes se rencontrent tous les 20 ans et divisent le cercle en 3, et que leurs orbites représentent des cercles inscrits dans des triangles équilatéraux : Kepler va alors chercher à trouver l'harmonie au cœur du système planétaire, harmonie qu'il trouvera non dans les polygones mais dans les polyèdres réguliers dits platoniciens, qui sont au nombre limité de 5 : ces polyèdres viennent remplir les espaces entre les orbites des six planètes ; ils sont parfaitement symétriques ; tous les sommets des polyèdres

<sup>1</sup> Toutes les citations de Kepler sont extraites des traductions françaises du *Mysterium cosmographicum* (*Le secret du Monde*, trad. A. Segonds, 1984, Les Belles-Lettres), de l'*Astronomia Nova* et de *L'Harmonie du Monde* par Jean Peyroux, Paris, A. Blanchard.

touchent les sphères dans lesquelles on peut les inscrire. Kepler trouve alors la raison du nombre limité des 6 planètes connues à son époque !



Fig.1. Positions du couple Jupiter-Saturne lors de leur rapprochement tous les 20 ans, entre 1583 et 1763. ( *De stella nova in pede serpentarii*, J. Kepler, e-rara.BNF)

En 1600, Kepler quitte Graz pour Prague, où il va travailler avec Tycho Brahé qui réalise les observations les plus précises du moment. Il découvre, grâce aux observations de Mars faites par Longomontanus, que l'orbite de cette planète n'est pas circulaire mais elliptique, et précise même que cette planète balaie des aires égales en des temps égaux. Il publie ses réflexions en 1609 dans son *Astronomia Nova*, qui contient donc ce que nous appelons aujourd'hui les deux premières lois de Kepler.

Mais c'est en 1619 que paraît son *Harmonices Mundi*, ou *Harmonie du Monde*, ouvrage touffu, dense, qui mêle mathématiques, astronomie et musique. C'est en effet en réutilisant la musique des sphères, due à Platon sur les traces de Pythagore, que Kepler va pouvoir généraliser ses résultats obtenus sur Mars. Ce concept de musique des sphères se base sur l'idée que la musique est le lien entre l'homme et le cosmos. Pour les pythagoriciens, il existe une harmonie universelle dont les nombres sont l'expression sensible : l'harmonie, qu'elle soit cosmique ou musicale, est un état d'équilibre entre divers éléments, régi par des rapports numériques : « l'harmonie est donc générale et concerne tous les degrés d'être. La plus parfaite est celle des sphères célestes, concert des planètes se mouvant de façon régulière et parfaite autour de la Terre. Vient ensuite l'harmonie du monde, qui comprend le rythme des saisons, la composition des différents éléments entre eux, puis l'harmonie humaine, union de l'âme et du corps, des parties rationnelles et irrationnelles au sein de l'âme et des divers éléments du corps humain et

enfin l'art musical »<sup>2</sup>. C'est donc par le concept d'harmonie, fondé sur une grande analogie cosmique, que Kepler espère découvrir le secret du monde : il s'agit pour lui de trouver les rapports harmoniques qui sont au cœur des sons comme au cœur du système solaire. Pour Kepler, « le musicien comme l'astronome imitent Dieu qui a créé le Monde en appliquant les lois géométriques ».

Depuis Pythagore et jusqu'à la Renaissance, seuls trois intervalles sont estimés consonants car ils respectent la vénération des chiffres 1, 2, 3 et 4 (la tetraktys :  $1 + 2 + 3 + 4 = 10$ ) érigée par les pythagoriciens :

Octave	Quinte	Quarte
2/1	3/2	4/3
2	1,5	1,33

Aujourd'hui, nous disons par exemple qu'un son de fréquence 600 Hz est situé à un intervalle de quinte d'un son de fréquence 400 Hz car ces deux sons sont caractérisés par un rapport numérique égal à  $3/2$ .

Au XVI<sup>e</sup> siècle, ces rapports sont revus par Zarlino dans le cadre de la gamme dite naturelle. Dans ce cadre, d'autres nombres que 2 et 3 peuvent être utilisés pour définir les intervalles :

Seconde	Tierce majeure	Tierce mineure	Sixte majeure	Septième
9/8	5/4	6/5	5/3	15/8
1,125	1,25	1,20	1,666	1,875

Influencé tout à la fois par la théorie pythagoricienne de la musique, le concept de musique des sphères, l'héliocentrisme copernicien et par les nouvelles observations astronomiques, Kepler va donc chercher les nombres qui sous-tendent l'harmonie universelle, et donc les mouvements des planètes. Nous en présentons une approche simplifiée pour la rendre opérationnelle auprès des collègues et des élèves de terminale scientifique<sup>3</sup>.

Tout d'abord, il lui faut construire de nouveaux termes : « Pour éviter des erreurs, il m'a fallu faire reposer le fondement du Monde pour ainsi dire au centre du Soleil ; cela a entraîné que les lieux du Zodiaque, où les planètes sont les plus proches ou les plus éloignées, ne peuvent plus garder leur nom d'apogée ou de périégée, comme le fait abusivement

<sup>2</sup> Van Wymeersch Brigitte, Descartes et l'évolution de l'esthétique musicale, Mardaga, 1999, p. 27.

<sup>3</sup> Pour une étude approfondie, voir : Stephenson Bruce, *The Music of the Heavens : Kepler's Harmonic Astronomy*, Princeton University Press, 1994.

Copernic, mais ont reçu de moi un nom propre et signifiant : aphélie et périhélie ».

Ensuite, Kepler attribue à chaque planète une note fondamentale caractéristique de sa vitesse lors du passage à l'aphélie (plus une planète est proche du Soleil, plus elle va vite et plus sa note se trouve dans les aigus).

Enfin, Kepler transforme la variation de vitesse entre l'aphélie et le périhélie en une variation de son, c'est à dire en un intervalle musical. Par exemple, les données les plus récentes dont Kepler dispose pour Saturne montrent que cette variation de vitesse correspond au rapport 5/4 ou 1,25, qui est l'intervalle de tierce majeure dans la musique pythagoricienne (voir le tableau page suivante). Kepler va appliquer cette démarche pour l'ensemble des planètes connues à son époque (Mercure, Vénus, Terre, Mars, Jupiter, Saturne). « Dans l'harmonie céleste, [j'ai trouvé] quelle planète chante la voix de soprano, laquelle celle d'alto, celle de ténor et celle de basse » : il affirme alors que Mercure est le soprano, Vénus le contralto, Mars le ténor léger, tandis que Jupiter et Saturne chantent les basses profondes. Il attribue ainsi une phrase musicale à chaque planète en utilisant donc deux paramètres : la distance de la planète au Soleil qui donne la note fondamentale de la gamme et son excentricité qui lui donne l'étendue de la gamme, comme on le voit bien pour Vénus dont l'excentricité est quasi-nulle (figure 2).

Fig.2. Phrases musicales attribuées à chacune des planètes par Kepler. De haut en bas : Mercure (15ma indique qu'on est deux octaves au-dessus), Vénus, la Terre, Mars, Jupiter et Saturne (8vb une octave en dessous).

C'est donc dans une quête d'harmonie universelle en se fondant sur la musique des sphères, que Kepler trouve ce que nous appelons aujourd'hui la

troisième loi de Kepler ou loi Harmonique qui donne le rapport entre les mouvements et les distances : le rapport  $T^2/a^3$  est le même pour toutes les planètes<sup>4</sup>. Comme l'écrit Kepler dans *l'Harmonie du Monde* :

« La proportion des moyens mouvements diurnes est donc trouvée à partir des Harmonies fixées [...]. En effet, la proportion des moyens mouvements est une fois et demie la proportion inverse des Orbes. »<sup>5</sup>

Pour plus de détails dans les calculs, nous renvoyons le lecteur à l'article de Sylvie Dubois, « La musique des astres », paru dans ces mêmes Cahiers Clairaut, en 1990<sup>6</sup>.

## La musique des exo-sphères

Serait-il possible alors d'utiliser nos nouvelles données d'observations et de généraliser la musique des sphères, après Mars, puis le système solaire, aux systèmes d'exoplanètes ? Ceci constituerait un exercice idéal pour les élèves de Terminales S : les lois de Kepler sont au programme de l'enseignement spécifique de physique-chimie, tandis que l'acoustique musicale constitue une partie importante de l'enseignement de spécialité. Plusieurs séances pourraient être consacrées à comprendre la démarche de Kepler et à la mettre en œuvre à l'aide de logiciels comme Excel et Audacity de façon à faire chanter les systèmes planétaires.

Les données numériques sont largement disponibles sur des sites comme <http://exoplanets.org>. Le travail consiste alors à déterminer les données pertinentes pour le problème (demi grand-axe, excentricité, période), à porter une attention aux unités, à organiser les calculs sous Excel de façon à atteindre le rapport des vitesses angulaires qui donnera l'intervalle. En se basant en premier lieu sur les calculs réalisés et présentés par Kepler, une analyse épistémologique peut être menée pour observer la part de l'arbitraire que Kepler manifeste, et la façon dont il s'arrange avec certains résultats pour aboutir à son Harmonie du Monde : pourquoi commencer sur un sol pour Saturne ? Quelles notes intermédiaires choisir entre les positions extrêmes à l'aphélie et au périhélie ? Sur ce dernier point,

<sup>4</sup> T est la période de la planète, a est la longueur du demi-grand axe de l'ellipse.

<sup>5</sup> Kepler Jean, « L'Harmonie du Monde », traduit pour la première fois du latin en français avec un avertissement et des notes par Jean Peyroux, Librairie Blanchard, Paris, 1979, p. 373.

<sup>6</sup> Dubois Sylvie, « La musique des astres », Cahiers Clairaut, n° 49, 1990, 37-39, accessible en ligne sur [clea-astro.eu](http://clea-astro.eu) (archives des Cahiers Clairaut).

Kepler est assez clair, et c'est là que la pratique musicale guide l'astronomie :

« Vois chacun dans les Notes employées. Certes ils ne forment pas les lieux intermédiaires que tu vois ici remplis par des notes, en articulant, comme les extrêmes, parce qu'ils ne montent pas à partir d'un extrême à l'opposé, par sauts et intervalles, mais par une tension continuelle, parcourant en un acte tous les intermédiaires (infinis en puissance), ce qui ne peut être exprimé par moi autrement que par la série continue des Notes intermédiaires ».

Kepler pointe ici le problème du choix des notes entre la note la plus grave (aphélie) et la note la plus aiguë (périhélie) : quelles discontinuités choisir dans le continu que nous offre le réel, à savoir le continu du mouvement des planètes sur leur trajectoire (qui ne se déplacent pas par sauts ou intervalles) et le continu des sons entre une note et son octave ? Ceci est le problème de toute théorie musicale : quelles notes choisir dans le continuum sonore pour créer un tout harmonieux ?

Pour commencer cette extension du projet képlérien, qui garde dans une approche simplifiée l'esprit de la méthode et balise la voie à des TP qui restent à construire, on peut contrôler les calculs faits par Kepler et l'identification des intervalles pour le Système solaire.

D'un point de vue pratique, les calculs sont les suivants. À partir de  $a$  (le demi grand-axe),  $e$  (l'excentricité) et  $T$  (la période de révolution), on trouve, pour chaque planète :

- sa distance au Soleil à l'aphélie :  $d_a = a \times (1+e)$  ;
- sa distance au Soleil au périhélie  $d_p = a \times (1-e)$  ;
- sa vitesse linéaire  $v_p$  puis angulaire  $\omega_p$  au périhélie

$$v_p = \frac{2\pi a}{T} \sqrt{\frac{1+e}{1-e}} \quad \text{et} \quad \omega_p = \frac{v_p}{d_p}$$

- sa vitesse  $v_a$  linéaire puis angulaire  $\omega_a$  à l'aphélie

$$v_a = \frac{2\pi a}{T} \sqrt{\frac{1-e}{1+e}} \quad \text{et} \quad \omega_a = \frac{v_a}{d_a}$$

Voici une partie du tableau Excel obtenu, suivi de quelques remarques .

Planète	Mercure	Vénus	Terre	Mars	Jupiter	Saturne
Demi grand axe (UA)	0,387	0,723	1	1,52	5,2	9,54
Excentricité	0,206	0,007	0,016	0,093	0,048	0,054
Période (jour terrestre)	87,96	224,70	365,26	686,96	4 332,71	10840,9168
Vitesse angulaire à l'aphélie $\omega_a$ ("/j)	9913	5688	3437	1572	272	107
Vitesse angulaire au périhélie $\omega_p$ ("/j)	22870	5849	3664	2283	330	133
Rapport des vitesses angulaires $\omega_p/\omega_a$	2,31	1,03	1,07	1,45	1,21	1,24
Intervalle musical le plus proche	2,4 = 2×1,2 = 2/1×6/5 soit une octave et une tierce mineure	Proche de 1 soit l'unisson	Proche de 16/15 soit un demi-ton	Proche de 1,5 ou 3/2 soit une quinte	Proche de 1,2 ou 6/5 soit une tierce mineure	Proche de 1,25 ou 5/4 soit une tierce majeure
Rapport des vitesses aux aphélie d'une planète à la suivante	1,74	1,65	2,19	5,78	2,53	
Passage d'une planète à la suivante (en descendant de Mercure à Saturne)	Un peu plus grand qu'une sixte majeure 5/3 (ou 1,67)	Proche de 5/3 (ou 1,67) soit une sixte majeure	Proche de 2×16/15 (2,13) soit une octave et un demi-ton	Proche de 6 = 2×2×1,5 soit deux octaves et moins d'une quinte	2,53 proche de 2,5 = 2×1,25 soit une octave et une tierce majeure	

Il est à noter que les calculs sont établis avec des données actuelles et non avec celles utilisées par Kepler, ce qui peut entraîner de plus grandes approximations dans la détermination des intervalles musicaux. On peut alors appliquer la méthode au système Kepler 62 par exemple, dont 5

planètes ont été détectées à ce jour. Kepler 62 est une étoile située à environ 1206 années-lumière de la Terre. Ce système a été choisi pour la grande variété des excentricités de ses planètes, mais d'autres systèmes sont à trouver !

Les calculs donnent ainsi :

Planète	Kepler 62-b	Kepler 62-c	Kepler 62-d	Kepler 62-e	Kepler 62-f
Demi grand axe (UA)	0,05528	0,0929	0,1195	0,4263	0,718
Excentricité	0,07	0,187	0,095	0,13	0,0944
Période (jour terrestre)	5,71	12,44	18,16	122,39	267,29
Vitesse angulaire à l'aphélie ("j)	197 600	72 600	59 200	8 220	4 030
Vitesse angulaire au périhélie ("j)	261 600	154 800	86 700	13 900	5 890
Rapport des vitesses angulaires	1,32	2,13	1,46	1,69	1,46
Intervalle musical le plus proche	Proche de 4/3 (1,33) soit une quarte	Proche de 2×16/15 (2,13) soit une octave et ½ ton	Proche de 3/2 (1,5) soit une quinte	Proche de 5/3 (1,67) soit une sixte majeure	Proche de 3/2 (1,5) soit une quinte
Rapport des vitesses aux aphélie d'une planète à la suivante	2,72	1,23	7,20	2,04	
Passage d'une planète à la suivante (en descendant de b à f)	Proche de 2×4/3 (2,67) soit une octave et une quarte	Proche de 5/4 (1,25) soit une tierce majeure	Proche de 2×2×15/8 (7,5) soit 2 octaves et une septième	Proche de 2 soit une octave	

Le choix de la note de départ pour la planète la plus éloignée de Kepler 62 est arbitraire : il a été décidé de prendre la note fa pour ne pas entraîner trop d'altérations lors du passage de Kepler 62-d à Kepler 62-e, soit 2 octaves et une septième. Il ne reste alors plus qu'à jouer la partition<sup>7</sup>...



Fig.3. La musique des planètes de Kepler 62

## Le Kepler Music Project

C'est le concept d'Harmonie qui a permis à Kepler de découvrir ses fameuses lois, « l'idée fixe, parfaitement fautive, d'une harmonie universelle bien définie – les cinq polyèdres, les phrases musicales planétaires... »<sup>8</sup>. Peu importe le côté farfelu ou arbitraire de sa méthode, elle nous permet de faire un pont entre musique et astronomie via les « rapports bien proportionnés » qui fondent l'Harmonie Universelle. La divagation autour de Kepler 62 (ou de tout autre système dont le choix est surtout motivé par le nombre et l'excentricité

des planètes) mobilise de nombreux points du programme de Terminale S tels que les lois de Kepler dans l'enseignement spécifique ou les éléments d'acoustique dans l'enseignement de spécialité. Sur cette base, une séquence peut être construite : compréhension et critique de la méthode képlérienne basée sur le concept d'Harmonie, appropriation de la théorie de la musique (notion d'intervalles), réinvestissement de ces notions sur un nouveau système planétaire par l'utilisation d'un tableur et d'un logiciel de traitement audio pour entendre la symphonie planétaire.

C'est le but du Kepler Music Project d'inviter à une réflexion sur la méthode de Kepler, et de donner à entendre le canon planétaire au travers d'une création originale, tout à la fois sonore et visuelle. Le spectacle, animé par Guy Boistel et Stéphane Le Gars (tout à la fois historiens des sciences au Centre François Viète de l'Université de Nantes, enseignants en Lycée et musiciens de jazz), est constitué de deux parties qui s'enchaînent. Dans la première partie, une conférence scénarisée permet à des publics variés (le spectacle est adaptable à tout public) de découvrir la méthode et les résultats de Kepler au travers d'une description de l'époque et des connaissances astronomiques et musicales dont disposait Kepler. Puis le spectacle devient un concert electro-jazz, au travers d'une contemplation musicale et visuelle (à l'aide d'images retraçant entre autres la conquête spatiale) utilisant le canon planétaire et les modes musicaux inventés par Kepler. Le site Internet du *Kepler Music Project*<sup>9</sup> permet d'entendre et de voir une partie du spectacle, ainsi que de trouver des informations supplémentaires sur l'histoire de cette page étonnante de l'astronomie.

<sup>7</sup> Kepler va plus loin : il crée deux chants, ou deux modes, où il mêle les notes de toutes les planètes à l'aphélie ou au périhélie, de façon à créer un ensemble harmonieux.

<sup>8</sup> Pecker Jean-Claude, « La méthode de Kepler est-elle une non-méthode ? », *L'Astronomie*, 1973, 87, p.16.

<sup>9</sup> [http://guyboistel.wix.com/kepler\\_music\\_project#!\\_\\_kmp-enter](http://guyboistel.wix.com/kepler_music_project#!__kmp-enter)

# AVEC NOS ÉLÈVES

## MAQUETTES PÉDAGOGIQUES « LES MONTURES DE TÉLESCOPE »

Roland Trotignon, Société astronomique populaire de Toulouse

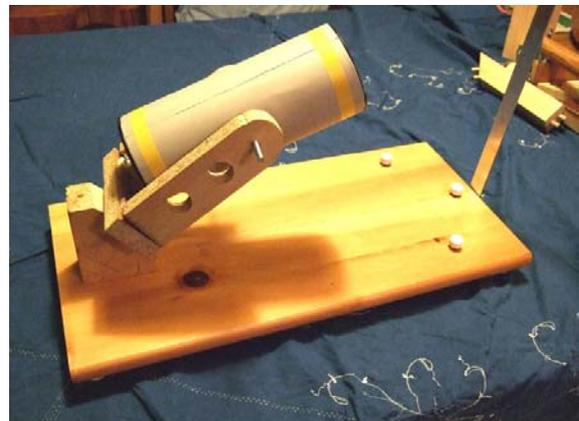
*Le but de la maquette est de faire comprendre la variété et l'évolution des montures des instruments astronomiques depuis la monture altazimutale jusqu'aux montures plus élaborées en soulignant à chaque fois les avantages et les inconvénients de chaque dispositif.*

La maquette est constituée d'un ensemble de pièces qui s'assemblent très simplement par des contacts magnétiques (genre fermeture de portes de placards) ce qui permet de passer en quelques secondes d'un type de monture à l'autre. Un support d'étoile tournante permet de faire immédiatement comprendre pourquoi une monture équatoriale permet d'assurer un suivi facile des astres.

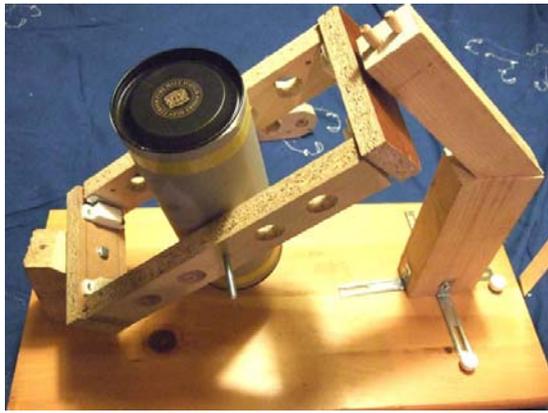


On voit ci-contre l'ensemble des pièces. Le télescope est un tube de carton fermé par un opercule métallique. Les pièces sont en bois (tasseaux, manches à balai etc...). Les trous circulaires percés dans certaines des pièces ont pour but d'en diminuer le poids.

### MONTURES RÉALISÉES AVEC L'ENSEMBLE DES PIÈCES



Montures altazimutales et à fourche (Le pied est le même. Seule l'orientation de l'axe varie)



Monture en berceau et en fer à cheval (Le principe en est le même. La maquette permet d'expliquer clairement comment la monture en fer à cheval élimine la zone aveugle du pôle)



Monture anglaise et monture allemande

## POINTAGE DU TÉLESCOPE



Ce dispositif matérialise l'axe optique du télescope et permet de saisir immédiatement pourquoi cet axe est constamment dirigé vers une étoile (une petite poignée de tiroir...) que le démonstrateur peut faire tourner autour de l'axe du monde.

L'axe optique est matérialisé par une tige métallique qui est rendue à volonté solidaire du couvercle en fer du tube optique par une fixation aimantée.

## UTILISATION DE LA MAQUETTE

Les montures sont présentées successivement en commençant par la monture la plus évidente, la **monture altazimutale**. Il est facile de mettre en évidence sa qualité essentielle (sa simplicité) et ses défauts (difficulté

à suivre un astre car il faut faire tourner l'instrument sur deux axes différents).

On passe ensuite à la **monture à fourche** de façon naturelle en déplaçant l'ensemble fourche et instrument et en introduisant l'axe de la fourche dans le trou percé en oblique dirigé vers le pôle céleste. On met alors en évidence la facilité de suivi. En appuyant légèrement sur l'instrument, on fait effondrer le tout, ce qui met en évidence le principal défaut mécanique de cette monture, à savoir l'effort de flexion important exercé sur la fourche.

Il apparaît alors évident que la présence d'un deuxième pilier corrigera le défaut mentionné et permettra une stabilité importante. C'est la **monture en berceau**. La maquette peut être tapotée de la main sans s'effondrer. Tout semble parfait et c'est parfois un des élèves qui voit immédiatement le principal défaut de cette monture : on ne peut pas observer la région polaire du ciel.

Il y a deux façons de résoudre ce problème : soit on fait un trou (du diamètre de l'instrument !) et la pièce supérieure du berceau prend la forme caractéristique des **montures en fer à cheval**, soit on déporte l'instrument sur le côté (en rajoutant un contrepoids) et l'on obtient la **monture anglaise**.

Ces trois dernières montures se caractérisent par la présence de deux piliers, pilier nord et pilier sud, ce qui présente deux inconvénients : l'encombrement excessif et une certaine difficulté à utiliser des lunettes astronomiques souvent très longues. La solution consiste à rapprocher les deux piliers et mettre l'ensemble sur un seul support de grande hauteur pour donner la **monture allemande**.

L'énormité de certains instruments modernes conduit à un retour vers la première des montures présentées, à savoir la monture altazimutale.

L'ensemble de l'exposé peut être accompagné de la présentation (photographies, projection...) d'instruments réels typiques des montures en cours d'explication.

## **AMÉLIORATIONS PRÉVUES POUR UNE PROCHAINE VERSION**

Cette maquette pourra être améliorée par des fixations des piliers nord et sud par chevilles. Le plateau de présentation pourra sans peine être allégé. Le support du fer à cheval devra être simplifié et s'emboîter par cheville dans le pilier nord des autres montures, ce qui diminuera le nombre de pièces. ■



---

## **Les principaux évènements astronomiques pour l'année à venir**

Attention, tous les horaires sont en heure légale.

### **Éclipses de Lune**

28 septembre 2015 au matin : éclipse totale de Lune visible en France (3 h 07 : entrée dans l'ombre ; 4 h 11 : début de la totalité ; 4 h 47 : maximum de l'éclipse ; 5 h 23 : fin de la totalité ; 6 h 27 : fin de l'éclipse). Plus de détails dans le dernier numéro des CC.

Pas d'éclipse de Lune partielle ou totale en 2016 (seulement des éclipses par la pénombre qui ont très peu d'intérêt).

### **Éclipses de Soleil**

9 mars 2016 : éclipse totale de Soleil visible depuis le Pacifique (de l'Indonésie jusqu'au nord d'Hawaï).

1<sup>er</sup> septembre 2016 : éclipse annulaire de Soleil visible depuis l'île de la Réunion. (*Voir article sur le site*).

### **Passages de Mercure devant le Soleil**

Le 9 mai 2016, on pourra voir la planète Mercure passer devant le Soleil entre 13 h 12 et 20 h 42.

### **Visibilité des planètes**

Meilleure visibilité de Mercure le soir : fin avril 2016.

Meilleure visibilité de Vénus le matin : octobre 2015.

Opposition de Mars : 22 mai 2016 (rétrogradation du 17 avril au 30 juin).

Opposition de Jupiter : 8 mars 2016 (rétrogradation du 8 janvier au 9 mai).

Opposition de Saturne : 3 juin 2016 (rétrogradation du 25 mars au 13 août).

## Mesurer la vitesse de la lumière « à la Foucault »

### *Adaptation pédagogique d'une mesure historique*

Pierre Lauginie, Groupe d'Histoire et de Diffusion des Sciences d'Orsay

*L'auteur nous décrit la réalisation par des étudiants d'une expérience historique.*

### **Contexte historique et pédagogique.**

Cet article fait suite à *'La vitesse de la lumière au XIX<sup>e</sup> siècle : d'un critère épistémologique à un outil métrologique'*, paru dans le numéro 150 des Cahiers Clairaut. Après cet historique des mesures terrestres de la vitesse de la lumière apparues au milieu du siècle, et après avoir souligné l'importance de la mesure de Foucault de 1862, nous abordons maintenant une adaptation pédagogique de cette expérience pour des étudiants d'aujourd'hui.

Cette adaptation s'inscrit dans notre approche expérimentale de l'enseignement de l'histoire des sciences : apporter, via l'adaptation d'expériences « historiques », un support concret ouvrant sur l'histoire des sciences, ou s'intégrant dans un enseignement d'histoire des sciences, sans prétendre, bien entendu, en faire la seule approche possible de l'histoire des sciences. Cette expérience pédagogique s'est développée autour de quelques exemples historiques de physique sur lesquels ont travaillé des étudiants de premier cycle universitaire (aujourd'hui L2), des professeurs de lycées et collèges ainsi que des moniteurs d'enseignement supérieur en stages pédagogiques. Nous traitons donc ici de l'une d'elles : la mesure de la vitesse de la lumière dans l'air par Léon Foucault en 1862 à l'aide du miroir tournant.

### **Entre répllication stricte et enseignement académique standard.**

Ces adaptations pédagogiques d'expériences historiques ne doivent pas être confondues avec le travail de répllication de telles expériences tel qu'il a été mené, par exemple par nos collègues de l'université d'Oldenburg en Allemagne (une répllication = une thèse !)<sup>1</sup>, ou par notre collègue

Armand le Noxaïc à Orsay sur des expériences de Pascal<sup>2</sup>. La répllication est un travail de recherche qui vise, à travers la reproduction « à l'identique », à apporter à l'histoire des sciences des éléments qui ne figurent pas dans les documents écrits – en général d'autant plus lacunaires que l'on remonte plus loin dans le passé –, y compris la redécouverte éventuelle du rôle d'anciens « tours de main »<sup>3</sup>.

Une telle activité de recherche n'est évidemment pas du ressort d'un service d'enseignement de licence. Alors, comment faire ? Accepter un niveau intermédiaire : reproduire en salle des expériences historiques manipulées par les étudiants, avec des contraintes réduites mais en respect complet des concepts originaux. Nous employons le terme « adaptation pédagogique », afin de bien le distinguer de « répllication ».

Qu'entendons-nous par « contraintes réduites » et « respect des concepts » ? Nous n'hésitons pas, par exemple, à utiliser du matériel didactique commercial pourvu que le montage soit « transparent » vis-à-vis de l'original, et naturellement, le document original est fourni pour comparaison. Nous profitons des facilités offertes par les techniques d'aujourd'hui sans mettre en cause l'essentiel. Voyons comment nous y sommes parvenus dans le cas présent. Par rapport à l'expérience de 1862 décrite dans l'article précédent, qu'est-ce qui est conservé et qu'est-ce qui change ?

• *ce qui est conservé* : l'essentiel ! à savoir l'ordre de grandeur des paramètres *physiques* cruciaux :

– la nouvelle distance entre miroirs est de 13 m au lieu de 20 m dans l'original ;

<sup>1</sup> Voir par exemple : Frerks, J., 2000 'Creativity and Technology in Experimentation: Fizeau's terrestrial Determination of the Speed of Light', *Centaurus*, 42, 249-287.

<sup>2</sup> Le Noxaïc, A., et Lauginie, P., 2010, 'Reconstitution de l'expérience des liqueurs de Blaise Pascal', *Courrier du Centre international Blaise Pascal*, n° 32, 48-55.

<sup>3</sup> Voir par exemple : Blondel, C., 1994, 'L'improbable transmission du savoir-faire expérimental', *Pour la science*, n° 202, 10-12.

- la taille du miroir tournant : rectangulaire 8 mm x15 mm, au lieu d'un disque de diamètre 14 mm ;
- la vitesse de rotation peut varier continûment de 0 à 1 300 Hz dans chaque sens. Foucault utilisait 400 Hz et accessoirement 800 Hz ;

• *ce qui change :*

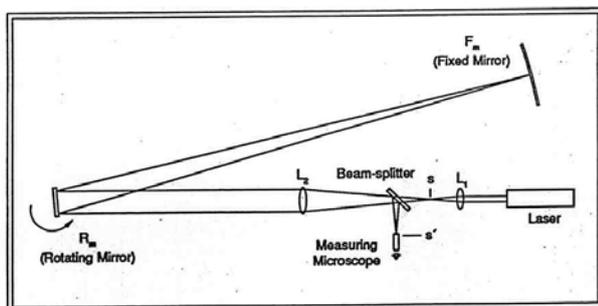
- le faisceau lumineux incident est produit par un petit laser, alors que Foucault utilisait un rayon de soleil piloté par un héliostat ; cela permet aussi d'éliminer le complexe dispositif afocal de Foucault avec 4 miroirs concaves intermédiaires ;
- le miroir tournant est entraîné par un petit moteur électrique au lieu de la turbine à air alimentée par le soufflet d'orgue de Cavaillé-Coll ;
- la vitesse de rotation est affichée directement par le moteur, au lieu de l'horloge stroboscopique construite par Froment.

Ces facilités ne touchent qu'aux aspects accessoires de l'expérience : l'essentiel n'est-il pas qu'un rayon de lumière soit envoyé, que le petit miroir tourne à la bonne vitesse et que le miroir distant soit à bonne distance ? Ainsi, l'expérience est totalement transparente, et les conditions de mesure proches de celles de Foucault, y compris à travers certaines difficultés de réglage.

### Le montage utilisé

#### Principe

Il est similaire à celui de Foucault. Reportons-nous à la figure 1.



**Fig.1.** Schéma de principe des expériences de Foucault. Ce schéma est extrait de la notice d'utilisation de l'expérience moderne utilisée en enseignement réalisée par la firme PASCO que nous remercions. Il correspond à la partie supérieure de l'extrait du Recueil de Foucault reproduit Fig. 1 dans l'article précédent du numéro 105 des Cahiers Clairaut.

Un faisceau lumineux fixe est envoyé sur un petit miroir  $R_m$  tournant rapidement ( de 0 à 1 300 tours par seconde) ; le faisceau réfléchi tombe périodiquement sur un miroir sphérique éloigné  $F_m$ , d'où il est renvoyé vers le petit miroir ; pendant l'aller-retour de la lumière entre les deux miroirs, ce dernier a tourné, certes très légèrement, mais suffisamment pour que le faisceau final soit renvoyé, après cette dernière réflexion, dans une direction différant légèrement de la direction

incidente ; de cette déviation, mesurée à l'aide d'un dispositif optique adéquat, on déduit l'angle dont le miroir a tourné pendant l'aller-retour de la lumière ; connaissant la vitesse de rotation, on obtient alors le temps d'aller-retour, d'où la vitesse de la lumière.

#### Réalisation

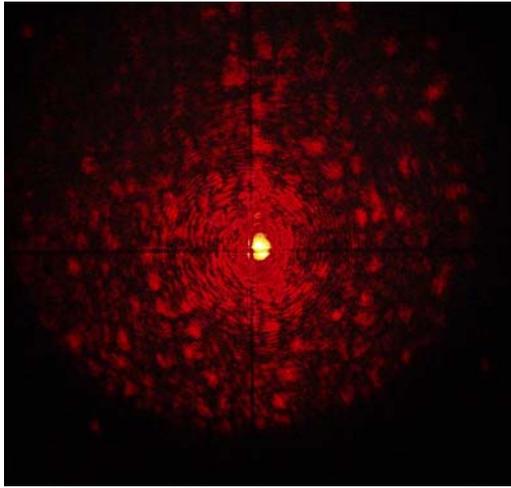
La source lumineuse (un laser aujourd'hui) permet d'obtenir, à l'aide d'une première lentille  $L_1$  une tache lumineuse intense  $S$  : cette tache sera pour nous la source et nous pouvons oublier ce qu'il y a avant. Une seconde lentille  $L_2$  ( focale 25 cm) est disposée de telle façon qu'elle donne de la source  $S$  une image éloignée, vers la gauche de la figure. On ne laisse pas cette image se former à gauche : le faisceau est intercepté par le petit miroir  $R_m$ , d'abord supposé à l'arrêt ; il est renvoyé vers la droite de manière que l'image se forme exactement sur la surface du miroir sphérique fixe  $F_m$  de diamètre 10 cm, faiblement concave, situé à environ 13 m, et tel que son centre de courbure soit situé au centre du miroir  $R_m$ . De cette façon, le faisceau est renvoyé exactement selon le chemin inverse, et revient sur la lentille  $L_2$  qui en donnerait une image finale superposée à la source  $S$ . Sauf qu'une lame séparatrice intercepte le faisceau et renvoie l'image finale à angle droit en  $S'$  où elle peut être observée dans le champ d'un petit microscope.

Lorsque le miroir  $R_m$  tourne,

- d'abord, l'image finale  $S'$  devient intermittente et son intensité est très affaiblie (d'un facteur de l'ordre de 1 000) car il ne revient d'image, à chaque tour, que pendant la fraction de temps très brève pendant laquelle le faisceau balaye le miroir fixe  $F_m$ <sup>4</sup>. Seule la superposition des impressions visuelles fait apparaître une image permanente.

- ensuite, lorsque le faisceau, réfléchi par  $F_m$ , retombe sur le petit miroir  $R_m$  ce dernier a tourné – très peu, mais il a tourné ! – pendant le temps d'aller-retour de la lumière. En conséquence, le faisceau finalement renvoyé par  $R_m$  n'est plus parallèle à l'axe optique de la lentille et l'image finale ne se forme plus en  $S'$  mais en un point légèrement décalé  $S''$ . La mesure consiste à déterminer ce décalage en déplaçant un réticule dans le champ du microscope. Ce déplacement est commandé de l'extérieur par un palmer au 1/100 mm.

<sup>4</sup> L'utilisation d'un miroir concave ayant son centre de courbure sur  $R_m$  a été le facteur déterminant de la réussite de l'expérience de Foucault : au moins, avec cette disposition, l'image revient pendant tout le temps du balayage de  $F_m$ . Avec un miroir plan, l'image serait totalement fugitive et l'intensité moyenne bien trop faible.



**Fig.2.** Ce qu'on voit dans le microscope. La photo a été prise miroir arrêté. On notera les traits du réticule. Lorsque le miroir tourne, le spot se déplace dans la direction verticale.

- que voit-on dans le microscope ? Sur la figure 2, on voit le spot au centre de la figure, photographié lorsque le miroir est à l'arrêt. On devine aussi les traits du réticule. Dans ce cas, on doit fortement atténuer l'intensité du faisceau laser par passage entre des filtres polarisants plus ou moins croisés, car l'image n'est pas intermittente et l'intensité totale revient dans l'oculaire<sup>5</sup>. On met le miroir en rotation ; d'abord, on ne voit rien car l'intensité est divisée par 1 000 environ, on décroise les filtres polarisants pour voir quelque chose. Au fur à mesure que la vitesse augmente, on voit le spot se déplacer dans la direction verticale et, à l'aide du palmer, on ramène le trait sur le spot. On lit sur le palmer la position du spot. Pour fixer les idées, pour une variation de vitesse de rotation de 1 000 Hz, le déplacement est de l'ordre de 0,27 mm. On double l'effet en faisant tourner le miroir dans un sens puis dans l'autre, soit un déplacement total d'environ 0,55 mm. La précision sur une mesure unique ne peut donc guère dépasser 2 %, en supposant que tout soit parfait par ailleurs.

## Quelles sont les difficultés ?

Elles sont de trois ordres principalement :

1. Réaliser un alignement correct des divers éléments, avec un banc d'optique « didactique » qui n'a rien, vraiment rien, de professionnel : le faisceau doit tomber à peu près au centre du miroir  $R_m$  ; on y parvient assez facilement ;
2. Plus difficile : en faisant tourner  $R_m$  à la main, amener le spot sur le miroir  $F_m$  posé sur une table à 13 m de là ; alors, l'arrêter pour régler l'orientation

<sup>5</sup> On peut placer une petite camera sur l'oculaire du microscope et renvoyer l'image sur un écran (sécurité laser !). Les « anciens », cependant, préfèrent l'observation directe à l'oculaire (on nous reconnaît à cela !).

de  $F_m$  ; pas facile car le mouvement est très fortement démultiplié ; si les niveaux sont mal ajustés, revenir en 1) ;

3. encore plus difficile : le faisceau renvoyé par le miroir  $F_m$  doit tomber pile sur le petit miroir  $R_m$ , sans toucher les bords ; ajuster l'orientation de  $F_m$  à 13 m de distance pour qu'il en soit ainsi : à cet effet,  $F_m$  est muni de deux vis micrométriques d'orientation en inclinaison et en azimut. Mais l'opérateur, situé derrière  $F_m$ , ne voit pas grand-chose à cette distance. Un aide placé près du petit miroir  $R_m$  est bienvenu. Avec de l'entraînement, on finit par y arriver seul, mais sportif ! Si ce réglage est mal fait, même de peu, on aura une tache très déformée et inutilisable. Ensuite, surtout ne toucher à rien !

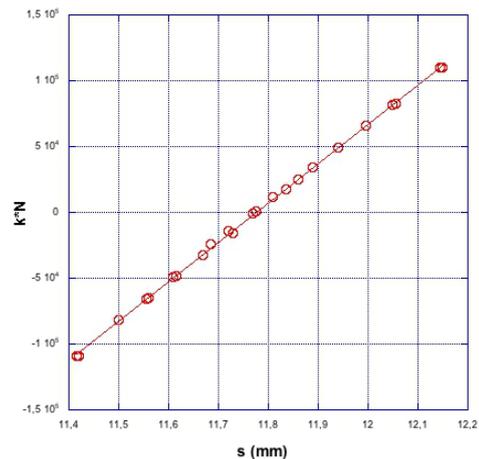
## Conduite et exploitation des mesures

Voir l'encadré pour le passage à la vitesse de la lumière :

$$c \text{ (km} \cdot \text{s}^{-1}\text{)} = 81,2 \Delta N / \Delta s$$

où  $N$  est la fréquence de rotation en Hz et  $\Delta s$  le déplacement de l'image en mm.

Au lieu d'une seule mesure, on fait varier  $N$  de - 1 300 Hz à + 1 300 Hz par paliers de 100 Hz environ, on relève à chaque fois la position  $s$  du spot indiquée par le palmer, et on trace le graphe (figure 3) représentant  $k \cdot N$  ( $k = 81,2$ ) en fonction de  $s$  : la pente de la droite de régression obtenue est la vitesse de la lumière en km/s. Dans la série représentée, on a obtenu  $c = 298\,400$  km/s avec un écart-standard de 0,4 %, (soit +/- 2 400 km/s à 2 écarts-standards). La multiplication des mesures permet ainsi d'aller au-delà des limitations du palmer.



**Fig.3.** Exemple de résultats. Le graphe représente la fréquence de rotation du miroir, multipliée par le facteur géométrique  $k$  (avec  $k = 81,2 \text{ m}^2$ ), en fonction de la position de l'image  $s$  en mm, relevée sur le palmer. La pente de la droite de régression linéaire obtenue donne directement la vitesse de la lumière en km/s : ici, 298 400 km/s avec un écart-standard de 0,4 %.

Cependant, la proximité avec la valeur « officielle » ne doit pas faire illusion : les résultats varient de quelques pourcents, avec quelques « pointes » jusqu'à 290 000 ou plus de 310 000, et parfois des séries systématiquement décalées vers le haut (entre 300 000 et 310 000). Le doigté dans la manipulation du palmer est important (toujours tourner dans le même sens, pas de retours arrière !). L'étalonnage de l'affichage de fréquences du moteur mériterait un contrôle. Une petite erreur sur le positionnement de  $L_2$  joue aussi son rôle. La dispersion des résultats d'un expérimentateur à l'autre est nettement supérieure à l'écart-standard obtenu chaque fois par régression linéaire (toujours très bon !), preuve d'erreurs systématiques liées à l'expérimentateur. La qualité du spot – qui est essentielle – dépend de la qualité de l'alignement et surtout de la finesse du réglage micrométrique du miroir  $F_m$  (à une dent près !), qui n'est pas toujours au top en conditions réelles d'enseignement. C'est une manip délicate, tout de même ! Mais chacun « sent » vraiment la vitesse de la lumière au bout de ses doigts, ce qui n'est pas rien.

## Conclusion

Ces expériences historiques de physique – dont la vitesse de la lumière – ont été proposées dans un cadre pédagogique ouvert, dans lequel les étudiants ont une large initiative<sup>6</sup>. Nous avons voulu réhabiliter des qualités, importantes pour leur formation mais souvent peu mises en valeur : l'observation, l'utilité en sciences d'une certaine habileté manuelle (cela se travaille), la patience, la rigueur, la persévérance, le facteur temps. La difficulté aussi : ces manip sont délicates ; mais pourquoi faire des études « supérieures » si ce n'est pour être confronté à des difficultés et apprendre à les surmonter<sup>7</sup> ? Nous avons voulu nous rapprocher des conditions réelles de travail en atelier ou en laboratoire : la science en marche n'est pas donnée d'avance – contrairement à une impression souvent ressentie par les élèves – et donc une expérience peut rater, cela arrive et ce n'est pas une catastrophe : l'échec est lui-même formateur. Nous refusons les montages de type « boîte noire » qui ont constitué un véritable fléau pédagogique dans un passé récent. Le montage doit être transparent,

<sup>6</sup> Nous avons bénéficié d'une liberté pédagogique totale dans le cadre d'une option « Mécanique expérimentale et historique », niveau  $L_2$ . Vincent Ezratti, technicien de formation, est vivement remercié pour son implication dans cet enseignement non conventionnel.

<sup>7</sup> Voir l'excellent billet de Didier Nordon : 'Le cheval-moteur d'orgueil', in *Pour la Science*, n° 208 (1995).

non seulement au regard de la physique, mais aussi au regard de l'histoire.

Enfin, par la référence à l'Histoire, nous favorisons l'acquisition du réflexe de replacer, pour chacun, son propre travail dans le contexte général scientifique, technique, philosophique, voire social, de son époque. C'est de la culture, tout simplement.

### Passage à la vitesse de la lumière

Le déplacement  $\Delta s$  de l'image est proportionnel à la vitesse de rotation du miroir  $R_m$  et au temps d'aller-retour de la lumière, donc inversement proportionnel à la vitesse  $c$  de la lumière.

La source  $S$  est positionnée de façon que  $S$  et  $F_m$  soient conjuguées par rapport à  $L_2$ . Soit  $D$  la distance entre les miroirs,  $f$  la distance focale de la lentille  $L_2$  et  $N$  la fréquence de rotation du miroir  $R_m$ .

Effectuons d'abord un calcul approximatif pour fixer les ordres de grandeur :

– soit  $\Delta t$  le temps mis par la lumière pour faire l'aller-retour entre les deux miroirs. La vitesse de la lumière est :  $c = 2D/\Delta t$ . Il faut déterminer  $\Delta t$ .

– déterminer  $\Delta t$  : soit  $\alpha$  l'angle dont a tourné  $R_m$  pendant l'aller-retour de la lumière :

$$\alpha = 2\pi N \Delta t \text{ ou } : \Delta t = \alpha / 2\pi N.$$

Il faut déterminer  $\alpha$ .

– déterminer  $\alpha$  : en première approximation, le miroir  $F_m$  étant « très loin », l'image finale se formera très près du plan focal de  $L_2$ . Le rayon réfléchi aura, lui, tourné de  $2\alpha$ . Si  $\Delta s$  est le déplacement observé,

$$\text{on a } : 2\alpha \approx \Delta s / f.$$

$$\text{D'où finalement } : c = k \Delta N / \Delta s$$

$$\text{avec } k \approx 8\pi f D$$

Avec  $D = 13$  m et  $f = 0,25$  m, le coefficient  $k$  est donc de l'ordre de 82. Cela suffit pour un ordre de grandeur. Si on exprime en  $\Delta s$  mm, on aura directement  $c$  en km/s.

Voyons voir : en faisant varier  $N$  de  $-1\ 000$  Hz à  $+1\ 000$  Hz, soit  $\Delta N = 2\ 000$  Hz, et sachant que l'on observe alors un  $\Delta s$  d'environ 0,55 mm, on obtient pour  $c$  un peu moins de 300 000 km/s. Tout va bien !

En tenant compte de la distance finie entre les miroirs pour le calcul de  $\alpha$  et en utilisant les relations de conjugaison, on obtient pour  $k$  la valeur plus précise 81,2.

C'est celle qui est utilisée :

$$c \text{ (km} \cdot \text{s}^{-1}\text{)} = 81,2 \Delta N / \Delta s$$

avec  $\Delta N$  en Hz et  $\Delta s$  en mm.

Sur le site du CLEA vous trouverez une réplique par la même équipe de l'expérience air-eau réalisée en 1850 par Foucault. ■

# HISTOIRE

## Mesurer la vitesse de la lumière « à la Foucault »

*Adaptation pédagogique d'une mesure historique*

Pierre Lauginie, Groupe d'Histoire et de Diffusion des Sciences d'Orsay

### **Et si on refaisait l'expérience air-eau de 1850 ? Nous l'avons fait !**

Bien entendu, nous avons en tête de refaire un jour, avec ce matériel, la comparaison des vitesses de la lumière dans l'air et dans l'eau, réalisée par Foucault en 1850. Une fois la mesure dans l'air bien rodée, il *suffisait* de recommencer en intercalant un tube d'eau entre les deux miroirs. Facile à dire !

L'expérience – très bricolée – a été tentée dans le cadre d'un enseignement optionnel avec deux étudiants et l'aide d'un technicien. Un tube de PVC qualité construction de 4 m de long et 10 cm de diamètre a été utilisé, après une tentative infructueuse avec un tube de 8 m. Le tube a été fermé aux deux extrémités par des lames à faces parallèles ajustées et collées dans des bouchons standards vissant de PVC évidés. Une culotte en Y permettait le remplissage. Quelles difficultés ?

– un tel tube de PVC de 4 m rempli d'eau, c'est lourd et extraordinairement mou ! Très difficile de l'aligner correctement – une vraie gageure – avec des supports de fortune, sans que le spot aille se perdre sur les parois.

– 4 mètres d'eau, c'est extraordinairement absorbant. Le spot est à peine décelable, parfois pas du tout. Il faut attendre (longtemps !) pour que le liquide soit parfaitement calme. Nous avons vérifié à cette occasion ce qu'avait signalé Foucault en 1850 : l'eau ordinaire (de source ou du robinet) est bien meilleure que l'eau distillée, propice au développement de bactéries et ferments divers !

– au bout du compte, on parvient, après de longs efforts, à renvoyer un spot très affaibli, quasi évanescent, sur le miroir tournant. Et on ne voit rien dans le microscope. Déception ! Les étudiants doivent partir, après une journée chargée.

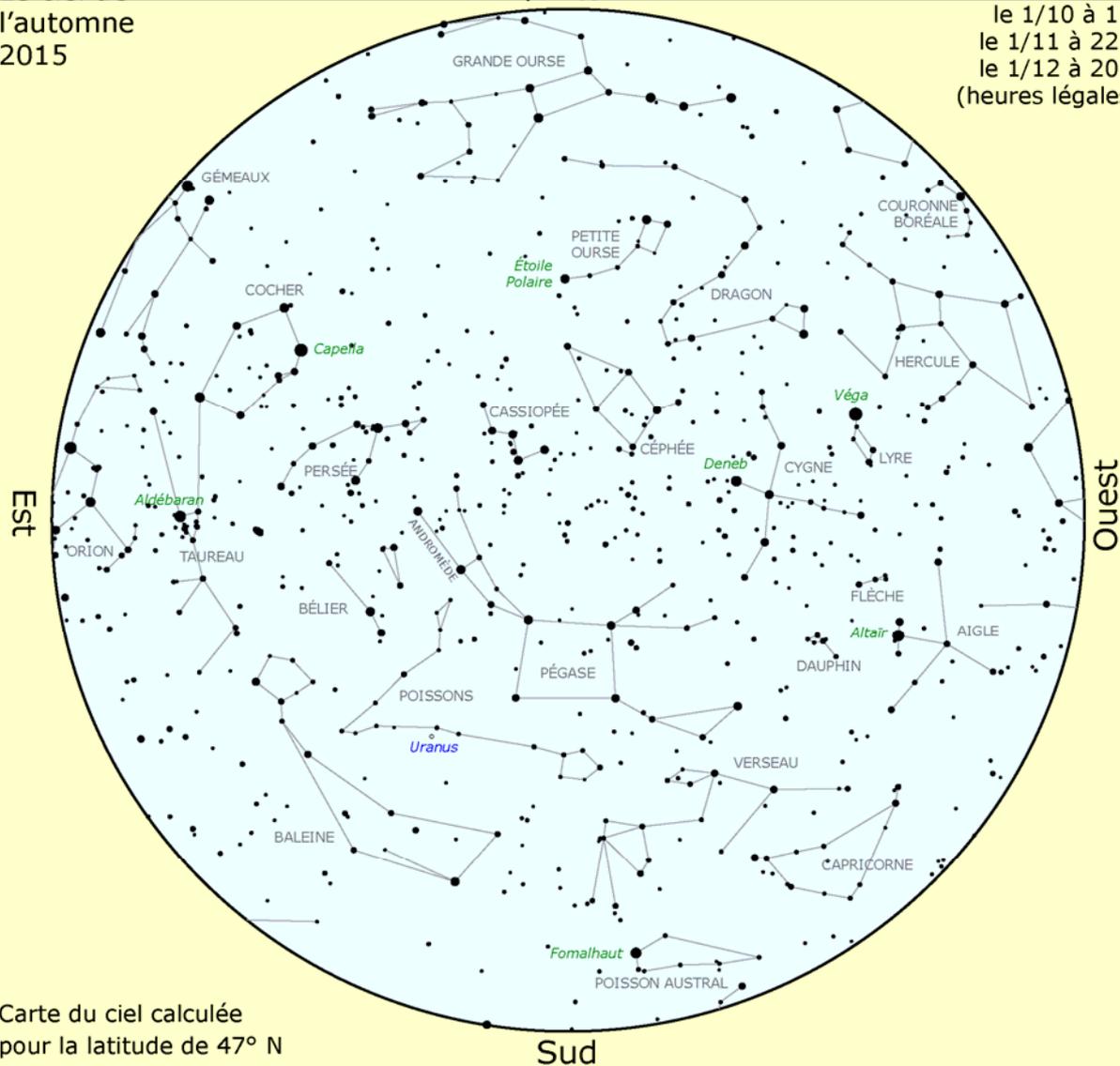
– bien après le départ de tout le monde, l'auteur (P.L.) réussit en utilisant une technique de détection synchrone. L'image cherchée est en réalité noyée dans le bruit de « speckles » dans le champ du microscope. Il interrompt alors périodiquement avec la main le faisceau incident. Et, miracle ! un petit point – nous dirions un « pixel » – clignote faiblement dans le champ du microscope en phase avec le mouvement de la main. C'est l'image cherchée ! La vitesse du miroir était de 1 000 tours par seconde, et le déplacement de l'image, effectivement plus grand que dans l'air à la même vitesse, était compatible en ordre de grandeur avec un indice de l'eau de 1,33.

C'était la fin de la session d'enseignement et l'expérience n'a pas été reprise ensuite, juste un premier essai « pour voir », mais un essai lourd ! Il faut dire que cette expérience se rapproche davantage d'une réplique que d'une adaptation pédagogique, et demanderait des moyens spécifiques. L'auteur-expérimentateur a été le seul témoin du résultat. Elle ne satisfait donc pas aux critères d'une expérience scientifique publiable (reproductibilité, contrôle des tiers). Néanmoins, nous avons plaisir à donner aux Cahiers Clairaut la primeur de cette histoire. Avis aux amateurs !

# LE CIEL DE L'AUTOMNE 2015

l'automne  
2015

le 1/10 à 1 h  
le 1/11 à 22 h  
le 1/12 à 20 h  
(heures légales)



Carte du ciel calculée  
pour la latitude de 47° N

## Visibilité des planètes

**Mercure** est visible le matin au milieu du mois d'octobre, à l'est (élongation maximale le 16).

**Mars, Jupiter et Vénus** sont toutes les trois visibles pendant tout l'automne, le matin à l'est. Il faudra suivre leur rapprochement tout au long du mois d'octobre.

**Vénus**, la plus brillante, apparaît dans un télescope en croissant en septembre et gibbeuse en décembre.

**Mars**, la moins brillante des trois, à l'éclat orangé, reste éloignée de la Terre puisque son diamètre apparent vaut entre 4 et 5' (contre 18,6' fin mai 2016).

**Jupiter** est, elle aussi, à observer le matin.

On peut encore apercevoir **Saturne** le soir au début de l'automne mais elle disparaît rapidement derrière le Soleil.

## Quelques événements (heures légales)

23/09 : équinoxe d'automne à 10 h 20 min.

28/09 (matin) : éclipse totale de Lune (voir CC n° 150).

12/10 : opposition d'Uranus, dans les Poissons.

17-18/10 (matin) : rapprochement Mars-Jupiter (0,4°).

21/10 : maximum des Orionides (étoiles filantes).

23/10 (matin) : alignement Mars-Jupiter-Vénus.

7/11 (matin) : rapprochement Mars-Vénus-Lune.

18/11 : maximum des Léonides (étoiles filantes).

7/12 (matin) : rapprochement Lune-Vénus-Comète C/2013 US10 Catalina.

22/12 : solstice d'hiver à 6 h 48 min.

## Lune

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

Pleine Lune : les 28/09, 27/10, 25/11.

# LE COIN DES PETITS CURIEUX

Dans cette rubrique nous continuons à répondre à des questions d'écopiers.

## Que de couleurs !

*ALEXIS* – Tu sais à la rentrée, j'ai raconté à mes copains ce que l'on avait fait avec le disque de couleurs.

*ÉMILIE* – Le disque de Newton.

*ALEXIS* – Oui.

*ÉMILIE* – Et que s'est-il passé ?

*ALEXIS* – Je leur ai dit que les couleurs se mélangeaient et qu'on voyait du blanc.

*ÉMILIE* – C'est ce que nous avons fait la dernière fois.

*ALEXIS* – Mais tu ne m'as pas dit que c'était faux.

*ÉMILIE* – Non ce n'est pas faux.

*ALEXIS* – Si, mes copains m'ont dit que s'ils mélangent des peintures bleue, rouge, verte, jaune, ils n'obtiennent pas du blanc mais un truc pas beau du tout. J'ai essayé et c'est vrai.

*ÉMILIE* – C'est bien d'avoir vérifié par toi-même, il ne faut pas toujours croire ce que disent les autres.

*ALEXIS* – C'est vrai, un jour tu m'as raconté des blagues sur une exoplanète sur laquelle il y avait soi-disant de la vie.

*ÉMILIE* – Revenons aux couleurs. L'expérience que tu fais avec le disque de Newton te donne bien du blanc et celle que tu fais avec les peintures ne te donne pas du blanc.

*ALEXIS* – Et pourquoi ?

*ÉMILIE* – En science il faut être précis sur le choix des mots. C'est l'interprétation que tu fais qui n'est pas bonne.

*ALEXIS* – Alors explique moi.

*ÉMILIE* – Viens, passons à l'intérieur pour avoir un peu d'obscurité.

*ALEXIS* – Tu veux faire de la lumière dans le noir ?

*ÉMILIE* – Presque. Attends que je retrouve le matériel et que je branche.

*ALEXIS* – Elle est jolie ta boîte.

*ÉMILIE* – Tu vois, je peux envoyer de la lumière rouge sur cette feuille blanche. De quelle couleur vois-tu cette zone éclairée par la lanterne ?

*ALEXIS* – Rouge.

*ÉMILIE* – Sais-tu pourquoi tu vois du rouge ?

*ALEXIS* – Non.

*ÉMILIE* – Parce que la feuille renvoie de la lumière rouge vers ton œil. À côté j'envoie de la lumière verte.

*ALEXIS* – Là, la feuille renvoie de la lumière verte vers mon œil.

*ÉMILIE* – Oui. Regarde, maintenant je déplace la zone verte pour qu'elle arrive sur le rouge ...

*ALEXIS* – Oh ! C'est jaune !

*ÉMILIE* – Ton œil reçoit en même temps du rouge et du vert et tu as la sensation de voir du jaune. Le rouge et le vert se sont superposés, se sont additionnés dans ton œil.

*ALEXIS* – Et si tu mets d'autres couleurs ?

*ÉMILIE* – Je fais arriver du bleu sur le vert.

*ALEXIS* – Oui, le bleu et le vert donnent un bleu-vert.

*ÉMILIE* – C'est du cyan. De la même façon le bleu et le rouge donnent du magenta. Et si je superpose les trois lumières ?

*ALEXIS* – Oh ! C'est du blanc.

*ÉMILIE* – C'est ce que tu fais avec le disque de Newton. Quand il tourne, les couleurs se superposent, s'additionnent et tu vois du blanc.

*ALEXIS* – Ah oui !

*ÉMILIE* – Le rouge, le vert, le bleu sont appelées lumières primaires. À partir de ces trois lumières colorées tu peux avoir toutes les autres.

Tu essaieras de regarder avec une loupe l'écran d'un téléviseur allumé. Tu verras qu'en chaque point il y a trois couleurs : rouge, vert, bleu. Grâce à ces trois couleurs, on crée toutes les autres sur l'écran.

*ALEXIS* – ... Tu sais pourtant il me semble que le maître nous a dit un jour que les couleurs primaires c'était le jaune, le bleu-vert et le rouge. Il a tout faux alors ?

*ÉMILIE* – Non, il parlait sûrement de peintures. Les peintures c'est un peu comme des filtres.

*ALEXIS* – Les filtres à café ?

*ÉMILIE* – Non. Les filtres colorés. Regarde, j'envoie de la lumière blanche sur la feuille, la feuille blanche nous renvoie cette lumière. Voyons si tu as de la mémoire. Quelles sont les lumières colorées présentes dans cette lumière blanche ?

*ALEXIS* – Les lumières rouge, verte, bleue, jaune, cyan, ...

*ÉMILIE* – C'est-à-dire toutes les couleurs avec différentes nuances.

Si devant la lampe je place un filtre vert ...

*ALEXIS* – La feuille est verte.

*ÉMILIE* – Cela veut dire que le filtre arrête toutes lumières colorées qui étaient dans la lumière blanche et ne laisse passer que la lumière verte.

*ALEXIS* – D'accord.

*ÉMILIE* – Si maintenant je remplace le filtre vert par un filtre jaune ...

*ALEXIS* – La feuille est jaune.

*ÉMILIE* – Mais souviens-toi tout à l'heure on a obtenu du jaune avec quelles couleurs ?

*ALEXIS* – Du rouge et du vert.

*ÉMILIE* – Donc le filtre jaune laisse passer le rouge et le vert. Quelles couleurs laisse passer un filtre cyan ?

*ALEXIS* – Du bleu et du vert.

*ÉMILIE* – Et si je superpose ces deux filtres ?

*ALEXIS* – Eh Oui ! À travers les deux, il ne va passer que du vert.

*ÉMILIE* – Essayons ... Tu as raison.

*ALEXIS* – Oui, à l'école c'est ce que l'on fait quand avec les peintures on mélange le jaune et le ... cyan.

*ÉMILIE* – Et oui. Une peinture rouge, quand elle reçoit de la lumière blanche, ne va renvoyer que du rouge. Une peinture jaune ne renvoie que du jaune (rouge et vert), une peinture cyan du bleu et du vert et une peinture magenta du bleu et du rouge.

*ALEXIS* – C'est facile !

*ÉMILIE* – Et si tu mélanges les trois couleurs : jaune, cyan et magenta.

*ALEXIS* – C'est compliqué !

*ÉMILIE* – Non, réfléchis. Le jaune renvoie le rouge et le vert ; le magenta renvoie le rouge et le bleu. Si on mélange les deux peintures, quelle couleur est renvoyée ?

*ALEXIS* – Le rouge.

*ÉMILIE* – Et si maintenant on rajoute du cyan qui ne renvoie que le vert et le bleu ...

*ALEXIS* – Il n'y a plus rien qui passe.

*ÉMILIE* – Et on obtient une sorte de noir.

*ALEXIS* – C'est ce que j'ai eu en mélangeant les peintures.

*ÉMILIE* – Tu vois la différence. Avec les lumières que l'on superpose, on ajoute les couleurs alors qu'avec les peintures on enlève des couleurs, à la fin il n'y en a plus, c'est du « noir ».

*ALEXIS* – Il faut que j'en reparle avec mes copains.

*ÉMILIE* – Tu sais, au lieu de leur en parler, tu ferais mieux de leur montrer l'expérience et de leur demander de l'interpréter.

*ALEXIS* – Oui, tu as raison.

*ÉMILIE* – C'est la meilleure façon de comprendre et de retenir.

*ALEXIS* – OK.

*ÉMILIE* – Dis moi, quand tu es au soleil, tu as déjà vu ton ombre au sol. Est-elle colorée ?

*ALEXIS* – Non, bien sûr.

*ÉMILIE* – Et bien, je peux te montrer des ombres colorées.

*ALEXIS* – Comment fais-tu ?

*ÉMILIE* – Regarde, je reprends l'expérience du début avec de la lumière rouge et de la lumière verte.

Dans la zone de superposition des deux lumières, la couleur observée est jaune.

*ALEXIS* – C'est ce que l'on a fait tout à l'heure.

*ÉMILIE* – Place ce crayon devant la feuille au niveau de la zone jaune.

*ALEXIS* – Comme ça ?

*ÉMILIE* – Non éloigne-le un peu de la feuille.

*ALEXIS* – Ouah ! Il y a une ombre verte et une ombre rouge !

*ÉMILIE* – Peux-tu expliquer pourquoi ?

*ALEXIS* – Non.

*ÉMILIE* – Tu dis non, mais tu n'as même pas réfléchi.

*ALEXIS* – C'est vrai.

*ÉMILIE* – Pourquoi la feuille paraît-elle jaune ?

*ALEXIS* – Car elle reçoit du vert et du rouge.

*ÉMILIE* – Si tu places le crayon dans le faisceau de lumière rouge que se passe-t-il ?

*ALEXIS* – On empêche la lumière rouge d'arriver sur la feuille et il ne reste que le vert.

*ÉMILIE* – C'est pour cela que l'ombre est verte.

*ALEXIS* – Alors ça c'est super !

*ÉMILIE* – On peut faire encore mieux.

*ALEXIS* – Et comment ?

*ÉMILIE* – Dis moi, comment faire pour obtenir une lumière blanche avec ma lanterne.

*ALEXIS* – Il faut superposer les trois lumières : rouge, verte et bleue.

*ÉMILIE* – Voilà j'envoie un troisième faisceau bleu et on obtient un « blanc ». Place ta main dans les faisceaux.

*ALEXIS* – Oh ! Il y a des ombres de toutes les couleurs, jaune, cyan, rouge, vert. C'est de la magie.

*ÉMILIE* – Non, c'est de la physique.

*ALEXIS* – Tu pourras un jour me prêter ta lanterne magique pour que je la montre à mes parents ?

*ÉMILIE* – Oui, avec plaisir, mais avant on s'entraînera.

*ALEXIS* – C'est chouette !

*ÉMILIE* – Nous n'en avons pas parlé, mais j'espère que tu as fait une bonne rentrée.

*ALEXIS* – Oui, j'ai retrouvé mes meilleurs copains et le maître est très gentil. En plus il a dit que nous ferons des sciences.

*ÉMILIE* – Et cette année au programme tu auras aussi de l'astronomie.

*ALEXIS* – Est-ce que l'on parlera des exoplanètes ?

*ÉMILIE* – Peut-être, mais vous parlerez surtout de la Terre, du Soleil, de la Lune et des planètes du système solaire.

*ALEXIS* – Alors ça j'adore. À bientôt. N'oublie pas de me prêter ta lanterne.

**Jean Ripert** ■

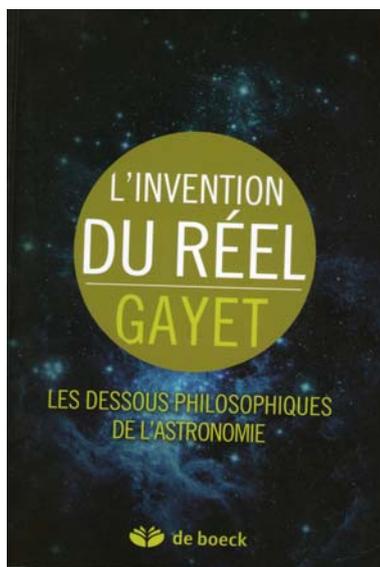
# LECTURE POUR LA MARQUISE

## L'invention du réel

(Les dessous philosophiques de l'astronomie)

**Damien Gayet** ; de Boeck 2014

Pour tous ceux qui s'intéressent à l'épistémologie des sciences ce livre est passionnant. Poser la question de savoir si les théories physiques décrivent le réel ou si le réel est produit par ces théories est une question philosophique qui préoccupe le physicien. La réalité sur laquelle on expérimente est-elle créée par le physicien ?



Pour un physicien le monde est structuré par les mathématiques, mais quel est leur véritable statut ? Existente-elles depuis toujours indépendamment de toute présence humaine ou bien sont-elles une création de l'esprit humain ?

En d'autres termes les mathématiciens découvrent-ils des mathématiques préexistantes ou sont-ils leurs créateurs ? Ce débat est loin d'être tranché.

L'auteur mène l'enquête à travers les siècles mais la logique de présentation n'est pas chronologique. Il montre comment des théories émergent logiquement en réponse aux questions que suscite l'étude de notre univers. Chaque théorie apporte des réponses satisfaisantes avant d'être remplacée par une autre dont l'étendue est souvent plus vaste.

On trouvera ci-dessous quelques éléments et questions extraits de ce livre passionnant, pour donner envie de lire la suite en essayant de clarifier ses idées sur le « réel ».

« *Au commencement fut le cercle* », base de la mathématique du Ciel (épicycles et sphères). Les hommes ont très tôt opposé l'étonnante harmonie du mouvement des astres dans le ciel et le désordre régnant sur la Terre. Mais les astres décrivent-ils réellement ces assemblages de cercles, ou ces

assemblages ne sont-ils qu'une image produite par l'esprit ? Quel lien entre la théorie et le réel ?

Pour Pythagore, « *tout est nombre* » et parmi ces nombres la Tétractys (autrement dit, le nombre dix) joue un rôle particulier. En effet le nombre 10 est la somme des quatre premiers nombres (d'où le terme Tétractys). En effet  $10 = 1 + 2 + 3 + 4$ . Le 1 représente le point, le 2 représente la ligne, le 3 le triangle et le 4 la pyramide, c'est-à-dire toutes les dimensions de l'espace physique.

Neuf astres errants ayant été identifiés en comptant le Soleil, la Lune et la sphère des fixes en plus des 6 planètes alors connues, la prédominance du nombre dix conduit à penser qu'il manque un astre, que l'on nomme Anti-Terre, et qu'il faut découvrir. Mais s'il n'existe pas d'Anti-Terre il faudrait admettre que le réel ne repose pas sur une structure mathématique ? Le Soleil « *se lève* » chaque matin avec une régularité étonnante mais en sera-t-il toujours de même ? Le futur sera-t-il toujours égal au passé ? De nos jours, après les travaux de Jacques Laskar, on sait que sur le très long terme rien n'est moins sûr, et que même des collisions entre les planètes du système solaire sont possibles.

Pourtant, la pertinence des mathématiques pour prévoir le monde se vérifia brillamment en 1846 lorsque Le Verrier découvre Neptune en trouvant sa position « *au bout de sa plume* » comme Arago l'écrivit.

Au XVII<sup>e</sup> siècle Descartes (1596 – 1650) opte pour le seul rationalisme tandis qu'au XVIII<sup>e</sup> pour David Hume (1711-1776) nos sens sont la source de nos connaissances. Pour ce dernier, les relations causales sont une illusion ; ces relations sont induites par l'habitude des récurrences constatées entre les phénomènes ; elles sont le fruit de notre imagination.

Un chapitre est consacré à l'un des plus grands philosophes (astronome et mathématicien dans sa jeunesse), Emmanuel Kant. Il pense que la physique ne peut pas prétendre décrire le monde lui-même mais le mettre en forme par la raison à partir des informations fournies par l'expérience. Pour Emmanuel Kant, l'espace et le temps sont des connaissances a priori, l'information est issue de l'expérience, l'universalité provient de la raison.

La physique moderne nécessite l'utilisation de nouvelles géométries (Lobatchevski, Gauss, Riemann), créées en dehors de toute expérience

sensible et de tout lien avec la physique mais qui trouvent là un champ d'application. L'établissement par Albert Einstein de la théorie de la Relativité Générale en est un bel exemple.

À travers les siècles deux courants majeurs apparaissent : les empiristes et les réalistes. Pour les empiristes nos connaissances dérivent directement de l'observation et de l'expérience. Pour les empiristes-logiques du Cercle de Vienne, dans les années 1930, une théorie physique est par nature indémontrable. Avec Karl Popper, délibérément réaliste, ne sont scientifiques que les théories

falsifiables, c'est-à-dire que l'on peut mettre en défaut par une expérience réalisable. Pour les réalistes il existe un monde objectif indépendant des sens.

Une lecture approfondie permet d'une part de comprendre les questions qui traversent cet ouvrage et d'autre part de s'interroger sur nos habitudes de penser le monde...

L'ouvrage est superbement illustré à l'aide de documents astronomiques ou métaphoriques. Un livre incontournable dans le genre.

**Christian Larcher** ■

# VIE ASSOCIATIVE

## École d'été Gap 2015

Cette année, la traditionnelle école d'été du CLEA se déroulait du 17 au 24 août au centre d'oxygénation du col Bayard situé sur les hauteurs de Gap.

Une quarantaine de stagiaires et de formateurs s'étaient donné rendez-vous pour une semaine d'apprentissage sous le signe de la bonne humeur, de la convivialité et de la gastronomie !

Cette année encore, les participants pouvaient assister à des conférences/cours sur des thématiques variées : les aurores polaires, l'observation radiométrique, et en lien avec l'actualité scientifique : les exoplanètes, le système solaire, et bien évidemment la lumière puisque 2015 est l'année internationale de la lumière. Le CLEA était également heureux d'accueillir Soren Frappart, universitaire de Toulouse, venue nous parler de son travail de thèse sur l'acquisition des connaissances en sciences chez l'enfant et l'adolescent pendant la scolarité.

Chaque après-midi, deux ateliers de deux heures permettaient aux stagiaires de s'exercer : calcul de la courbe de la lumière, étude de la conjonction de Vénus et de Jupiter, travail sur la détection des exoplanètes, ou encore analyse de spectres. Que de réjouissances au programme !

Les participants ont réalisé de nombreuses maquettes : spectroscopie, carte du ciel, cadran du zodiaque, système solaire, théodolite, planétaire qu'ils pourront faire construire à leurs élèves ou simplement utiliser en classe. L'école proposait aussi des ateliers sur l'histoire des sciences, les sciences en littérature ou encore la zététique, le géocentrisme et l'héliocentrisme, l'astronomie au temps de Copernic, l'astronomie en langue arabe, les mots du ciel. Enfin, tout le monde a pu revivre

avec émotion l'atterrissage de Curiosity sur Mars grâce à un atelier sur les logiciels d'observation du ciel et du Système solaire, avec lesquels on peut visiter la Lune ou Saturne depuis la maison !

### Ateliers du soir et observation

Une nouveauté à l'école d'été : la mise en place d'ateliers du soir. À la demande des anciens stagiaires les formateurs ont développé des ateliers liés à l'observation nocturne.

Tous les soirs, le beau temps nous a permis de voir parfaitement les constellations mais aussi la Lune et les merveilleux anneaux de Saturne. Les participants ont pu apprendre la mise en station pour pouvoir observer avec une lunette ou un télescope mais également faire de très beaux clichés du ciel, utilisés en Time lapse. Un *time-lapse* est une animation vidéo réalisée par une série de photographies prises à des moments différents pour présenter en un laps de temps court l'évolution de l'objet photographié sur une période longue.

Quoi de mieux qu'une marche nocturne pour apprendre les constellations ? C'est donc le temps d'une balade, que tout le monde a pu écouter les légendes mythologiques sur les constellations contées par deux formateurs.

### Journée de visite

Pendant une journée, l'école s'est déplacée pour visiter la très jolie ville de Sisteron. Sous le soleil, l'équipe a suivi, pendant la matinée, un parcours au cœur de la ville sur la thématique du temps. Baignades, siestes et éclats de rire étaient au programme du pique-nique organisé au bord de l'eau avant la visite de l'après-midi, consacrée au Musée de la Terre et du temps.

Rendez-vous l'année prochaine !

**Camille Esquerré**



Photo Pierre Causeret

Et comme toujours, l'EEA se finit en chanson .... Sur la musique de « Trompettes de la renommée »

Si ma vieille guitare est souvent de la fête,  
Chaque année au mois d'août quand l'école s'arrête,  
Les cours, les ateliers et les observations  
Se retrouvent en vrac au cœur de mes chansons.

Désigné volontaire pour conter l'expérience  
Que fut cette semaine consacrée à la science,  
Je plaque des paroles nouvelles chaque fois  
Et tente de décrire les passions et les joies.

Ô muses de l'astronomie,  
Quel plaisir de revoir les amis !

Même si le brouillard au grand Soleil résiste,  
Au matin des sportifs se lançant sur les pistes  
Et traversant les bois et les champs embrumés,  
Puis reviennent engloutir le petit déjeuner.

Mais foin de fantaisies, les choses sérieuses  
Commencent aussitôt dans une ambiance sérieuse,  
Deux exposés savants captent les attentions  
Chacun y trouve alors les fleurs de sa passion ;

Ô muses de l'astronomie,  
Chantez de neuf heures à midi !

Dans la suite du jour le groupe se divise  
En petits comités aux envies bien comprises,  
Groupés en ateliers, ils découpent et assemblent  
Du carton du plastique sans que leurs gestes tremblent.

Dire tout ce qu'ils font serait long à décrire,  
Des objets qui parfois font penser aux délires  
De ces artistes fous, surréalistes, abstraits  
Qui mêlent à foison couleurs et traits.

Ô muses de l'astronomie,  
Le bonheur tous les après-midi !

Les rêves les plus fous naissent à la nuit noire,  
Quand les aros télescopes montrent alors dans leur gloire

Planètes, galaxies, nébuleuses ou étoiles  
Et même notre Lune qu'on observe sans voile.

Ainsi passent les jours et les soirs des stagiaires,  
Venus chercher ici, loin des villes austères,  
Les bouquets du savoir sous le ciel de la nuit  
Avant de repartir, satisfaits d'être instruits.

Ô muses de l'astronomie,  
Rêvons dans un bel infini !

Mais avant de poursuivre, il faut que je vous dise  
Ce qui fut pour nous tous une jolie surprise,  
Un stagiaire de Digne (c'était il y a longtemps)  
A voulu retrouver des souvenirs d'antan.

À Bayard il a fait une arrivée sublime  
Apportant son humour et du vin (pour la rime),  
Dans l'équipe aussitôt il a su s'intégrer  
Parmi nous désormais souhaitons lui de rester.

Ô muses de l'astronomie,  
Accueillez ce nouvel ami !

Généreux donateurs de divines bouteilles  
Vous nous avez comblés de saveurs sans pareilles  
Juste avant le repas, ces moments délicieux  
Ont ajouté du charme à l'étude des cieux.

Songez en repartant avec tous vos bagages  
Que vous allez transmettre vos apprentissages,  
Aux élèves attentifs, désireux de clarté  
Car la science du ciel donne la liberté.

Ô muses de l'astronomie,  
Ne restez jamais endormies,  
Car le travail n'est jamais fini.

(merci Georges pour les Trompettes)

Daniel Bardin



### Solutions des mots croisés de la page 14

#### Horizontalement

1. Excentricité ; 2. Lie. Uranus (les calculs d'Adams pour découvrir Neptune précèdent ceux de Le Verrier) ; 3. Nœuds. OTN (Objet Trans-Neptunien) ; 4. Intr. Tonus ; 5. Périhélie. St (stère) ; 6. EEA (École d'Été d'Astronomie du CLEA). Otiv ; 7. Io. Nini. Liai ; 8. Quatre. RBN ; 9. Ursa. Vierge ; 10. ESA (European Space Agency). Parabole.

#### Verticalement

1. Elliptique ; 2. XI (11). Né. Ours ; 3. Centre. ASA ; 4. Orienta ; 5. Nue. Hair ; 6. Truie. Neva ; 7. Rad. Loi. IR (hier) ; 8. Instit. CEA ; 9. Cu (cuivre). Œil. RB ; 10. ISON. Virgo ; 11. Tus. Abel ; 12. Einstein.

## École d'Été d'Astronomie



Vous souhaitez débiter ou vous perfectionner en astronomie ?

Vous avez envie de développer vos savoir-faire pédagogiques au contact de collègues expérimentés ?

Venez participer au col Bayard, à une école d'été d'astronomie, dans un cadre majestueux.



Exposés accessibles à tous, ateliers pratiques et observations du ciel : toutes les activités sont encadrées par des astronomes professionnels et des animateurs chevronnés.

Renseignements et vidéo sur :  
[accs.ens-lyon.fr/clea/aLaUne/EEA-clea](http://accs.ens-lyon.fr/clea/aLaUne/EEA-clea)

## Les productions du CLEA

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

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

### Fiches pédagogiques

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

### Fascicules thématiques de la formation des maîtres, en astronomie

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

### Matériel

Filtres colorés et réseaux de diffraction.

### DVD

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

*Vous pouvez retrouver ces productions sur le site de vente : <http://ventes.clea-astro.eu/>*

Le formulaire de commande est sur le site.

## Le site internet

**Une information toujours actualisée**

[www.clea-astro.eu](http://www.clea-astro.eu)



# LES CAHIERS CLAIRAUT



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

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

# COMMENT NOUS JOINDRE ?

**Informations générales :**

[www.clea-astro.eu](http://www.clea-astro.eu)

OU

[www.ac-nice.fr/clea](http://www.ac-nice.fr/clea)

**Siège social :**

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

**École d'Été d'Astronomie :**

[daniele.imbault@cea.fr](mailto:daniele.imbault@cea.fr)

**Cahiers Clairaut :**

[christianlarcher3@gmail.com](mailto:christianlarcher3@gmail.com)

**Ventes des productions :**

<http://ventes.clea-astro.eu/>

**Site internet :**

[berthomi@ac-nice.fr](mailto:berthomi@ac-nice.fr)  
[charles-henri.eyraud@ens-lyon.fr](mailto:charles-henri.eyraud@ens-lyon.fr)

**Adhésion / Abonnement :**

Adhésion CLEA pour 2015 :	<b>10 €</b>
Abonnement CC pour 2015 :	<b>25 €</b>
Adhésion + abonnement CC :	<b>35 €</b>
Adhésion + abonnement CC + abonnement numérique :	<b>40 €</b>

**Les adhésions, abonnements et achats peuvent se faire directement en ligne sur le site : <http://ventes.clea-astro.eu/>**

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

Premier dépôt légal : 1er trimestre 1979  
Numéro CPPAP : 0315 G 89368

Prix au numéro : 9 €

Revue trimestrielle : numéro 151 septembre 2015