LES CAHIERS CLAIRAUT

N° 145 - Mars 2014 7 €

Bulletin du Comité de Liaison Enseignants et Astronomes

Numéro 145 - printemps 2014

ISSN 0758-234X

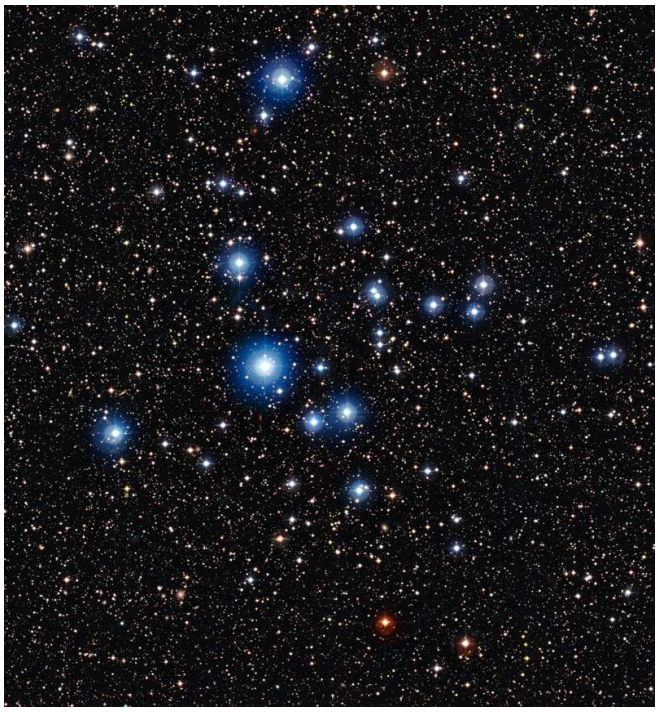
Comité de Liaison Enseignants et Astronomes

Le **CLEA**, Comité de Liaison Enseignants et Astronomes, est une association déclarée à but non lucratif (loi de 1901), fondée en 1977. Elle réunit des enseignants et des astronomes professionnels qui veulent ensemble promouvoir l'enseignement de l'astronomie à tous les niveaux de l'enseignement et dans les organismes de culture populaire.
Le **CLEA** organise des stages nationaux (Écoles d'Été) et régionaux. Ces stages sont ouverts aux enseignants de l'école, du collège et du lycée et, de manière générale, à tous les formateurs. On s'efforce d'y conjuguer information théorique et travaux pratiques (observations, travaux sur documents, mise au point de matériels didactiques et recherche du meilleur usage de ces matériels, etc.). Le **CLEA** favorise les échanges directs entre enseignants et astronomes, hors de toute contrainte hiérarchique.
L'organe de liaison du **CLEA**, les **CAHIERS CLAIRAUT**, est une revue trimestrielle. On y trouve des articles de fond (astrophysique, histoire, philosophie, enseignement…), des comptes rendus d'expériences pédagogiques, des notes critiques de livres récents, des innovations en matière d'activités pratiques.
Le **CLEA** a mis en place une liste de diffusion afin de permettre des échanges rapides entre les abonnés.

Présidents d'honneur :
Jean-Claude Pecker
Lucienne Gouguenheim
Georges Paturel

Bureau du CLEA pour 2013
Présidente : Cécile Ferrari
Trésorière : Roseline Jamet
Trésorière adjointe : Sylvie Thiault
Secrétaire : Jean-Luc Fouquet
Secrétaire adjoint : Christian Larcher

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



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

Jérôme Ballot, Francis Berthomieu, Francine Billard, Nathalie Cartier, Pierre Causeret, Vincent Deparis, Jean-Luc Fouquet, Éric Josselin, Jean-Pierre Kahane, Christian Larcher, Chantal Lecoutre, Georges Lecoutre, Lionel Muller, Georges Paturel, Frédéric Pitout, Jean Ripert, Béatrice Sandré, Roland Trotignon et Edgar Soulié.

Les auteurs recevront plusieurs numéros 145, afin de faire connaître la revue autour d'eux.

Image de couverture :
Cette image acquise par l'imageur champ large installé sur le télescope MPG/ESO de 2,2 mètres qui équipe l'Observatoire de l'ESO à La Silla au Chili, montre l'amas ouvert et brillant NGC 2547.
L'âge de ces étoiles est estimé à une trentaine de millions d'années, ce qui est peu, moins de 1% de l'âge du Soleil. Les 4 branches des étoiles les plus brillantes sont un artefact qui provient de l'instrument. Malgré tous les dessins d'enfants, les étoiles du ciel n'ont pas de branches dans la réalité …

Les Cahiers Clairaut

Printemps n° 145

Éditorial

Dans ce numéro nous vous invitons à un grand voyage dans l'espace, sur Terre, dans l'immensité du cosmos, et dans le temps.

Dans le temps, partons retrouver Alexis Clairaut qui se demandait comment exposer, d'une manière attrayante, la géométrie élémentaire. Il suggérait dans ses « Éléments de géométrie » en 1741 de reprendre la méthode décrite par Platon dans « Ménon » (partie II, question n°16) : demander à un esclave de (re)découvrir comment construire un carré double d'un autre (p. 2).

Avant de parcourir le monde, déterminons précisément notre position ; pour cela il n'y a rien de plus simple qu'un bon sextant (p. 6). Puis dirigeons nous vers l'est, ce qui en quelque sorte nous fait aussi remonter le temps, jusqu'à « l'Empire du milieu » à l'époque où l'Empereur incarnait le «fils du ciel». À cette époque, on estimait que la survie du peuple dépendait de sa capacité à suivre les directives venues du ciel. Les astrologues avaient pour rôle de vérifier l'adéquation entre la structure de la Cour Impériale et l'image qu'en donnait le ciel. Pour eux la Terre était plate et carrée, recouverte par un ciel bombé (p. 33).

De retour en Europe de nos jours, sous ce même ciel, pourtant si différent, vous pourrez étudier les étoiles doubles (p. 29), ou, si vous êtes mélomane, « écouter » la musique des étoiles (p. 23), vibrant comme la peau d'immenses tambours sous l'effet de la pluie, et découvrir avec les enfants une des planètes du « Petit Prince » de Saint-Exupéry, celle où un businessman s'enrichit en comptant méthodiquement toutes les étoiles (p. 15).

Vous pourrez aussi repérer des étoiles variables comme « delta Céphée » dans la Voie lactée. Vous ne la trouvez pas? Alors un conseil : chercher d'abord la *« maison rouge »* puis *« le parachute »* (p. 17). Ensuite pour déterminer sa distance utiliser la relation *« période luminosité »*. Encore des difficultés ? Alors n'hésitez pas, inscrivez-vous à l'école d'été du CLEA, à Gap en août. Au cours du stage vous démystifierez cette relation en étudiant les battements… d'une série de pendules simples (p. 21). Un conseil, avant de venir à Gap renseignez-vous sur la physique stellaire (p. 10) et écoutez *« ce que disent les étoiles » (p. 38).*

En 2014 toute l'équipe vous souhaite un beau ciel étoilé.

Christian Larcher, pour l'équipe.

Histoire
Clairaut mathématicien, un aperçu
Jean-Pierre Kahane p 2

Avec nos élèves
Détermination de la latitude d'un lieu terrestre à l'aide d'un sextant
Vincent Deparis p 6

Thème : LES ÉTOILES p 10

Article de fond
Introduction à la physique stellaire
Éric Josselin p 10

Instrument
Compteur d'étoiles
Jean-Luc Fouquet p 15

Article de fond
Delta Céphée, une étoile inconstante
Georges Paturel p 17

Avec nos élèves
Simulation de la relation Période-Luminosité des Céphéïdes
Georges Paturel p 21

Article de fond
Sonder les étoiles
Jérôme Ballot p 23

Coin des petits curieux
Qu'est-ce qu'une étoile ?
Jean Ripert p 28

Histoire
Les étoiles doubles
Edgar Soulié p 29

Jeux
Mots croisés
Pierre Causeret p 31

Ciel de printemps
Pierre Causeret p 32

Avec nos élèves
Les constellations chinoises
Roland Trotignon p 33

Réponses des mots croisés p 37

Lecture pour la marquise
Ce que disent les étoiles
La physique des infinis
Christian Larcher p 38

Courrier des lecteurs
Commentaires sur l'article « Quand le LP2I surfe sur Jupiter »
Frédéric Pitout p 39

HISTOIRE

Clairaut mathématicien, un aperçu

Jean-Pierre Kahane, Laboratoire de Mathématiques Université Paris-Sud à Orsay, membre de l'Académie des sciences

Avec cet article se termine notre célébration du tricentenaire de la naissance d'Alexis Clairaut. Jean-Pierre Kahane nous fait découvrir l'apport d'Alexis Clairaut en mathématiques, travail souvent ignoré du public. Les membres du CLEA comprendront mieux pourquoi Gilbert Walusinski, ancien président le l'APMEP avait choisi « Les Cahiers Clairaut » comme titre de notre revue. Alexis Clairaut liait astronomie et mathématiques.

Clairaut est un très grand mathématicien, et il est méconnu. Ce n'est pas exceptionnel pour un mathématicien, mais dans le cas d'Alexis Clairaut, cette méconnaissance me paraît particulièrement choquante.

Le nom de Clairaut apparaît bien dans les cours de mathématiques sous deux formes : le théorème de Clairaut et l'équation de Clairaut. Je montrerai comment ces deux sujets se présentent dans son œuvre. Dans ces deux cas, le contexte et la démarche sont instructifs et nous ménagent des surprises. Je passerai ensuite à la théorie des perturbations sous la forme la plus achevée qu'il a donnée en 1757, et à la découverte qu'il a faite à partir de là de ce que nous appelons aujourd'hui la transformation de Fourier discrète. Mais je commencerai avec l'examen des Éléments de géométrie, le produit de ses entretiens avec la marquise du Châtelet, qui ont été célèbres et qui méritent de le redevenir. Ce ne sera qu'un aperçu sur Clairaut mathématicien.

Les Éléments de géométrie

La petite histoire dit qu'ils sont issus des entretiens de Clairaut avec la marquise du Châtelet quand elle venait le voir et l'écouter dans la retraite qu'il partageait avec Maupertuis au Mont Valérien. Ces éléments de géométrie ont été pour moi une découverte, et cela témoigne seulement de mon ignorance. Ils ont été célèbres immédiatement, en France et dans toute l'Europe. Édités en 1741, il y eut 11 éditions en France jusqu'en 1920, et l'édition de 1920, en deux volumes, dans la collection « Les maîtres de la pensée scientifique », contient une courte et excellente notice sur Clairaut par Maurice Solovine. Entre 1744 et 1772, ils ont été traduits en suédois, en italien, en néerlandais, en polonais et en portugais ; plus tard, en allemand, en anglais et en russe. Ils ont été tout récemment réédités par Jacques Gabay (2006).

Il y a d'autres façons d'exposer la géométrie élémentaire, mais je n'en connais pas de plus attrayante. Clairaut explique dans sa préface pourquoi il veut rompre avec la manière classique d'enseigner les mathématiques, définitions, axiomes, théorèmes, démonstrations. Un très bon résumé en a été fait par Grandjean de Fouchy, Secrétaire perpétuel de l'Académie Royale des Sciences, dans son Éloge funèbre de Clairaut :

« Cet ouvrage est d'une espèce singulière ; il y remonte partout des usages de la Géométrie aux Problèmes, aux Théorèmes et enfin aux Axiomes ; il suit en un mot la marche que les hommes ont suivie dans l'invention de cette Science et il l'enseigne moins à ses lecteurs qu'il ne la leur fait inventer ».

Le livre contient quatre parties :

I. Des moyens qu'il était le plus naturel d'employer pour parvenir à la mesure des terrains

II. De la méthode géométrique de comparer des figures rectilignes

III. De la mesure de figures circulaires et de leurs propriétés

IV. De la manière de mesurer les solides et leurs surfaces.

J'en extrais quelques passages pour tenter d'en faire goûter la saveur.

En prologue à la partie I.

« Ce qu'il me semble qu'on a dû mesurer d'abord, ce sont les longueurs et les distances »,

puis, au n° 3, pour introduire l'orthogonalité

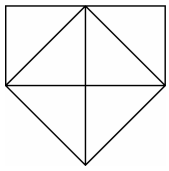
« Une ligne qui tombe sur une autre, sans pencher sur elle d'aucun côté, est perpendiculaire à cette ligne ».

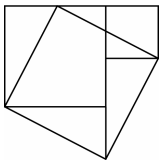
Le cercle est introduit au n° 6 :

« Le cercle est la trace entière que décrit la pointe mobile d'un compas pendant qu'elle tourne autour de l'autre pointe ».

Suivent la manière d'abaisser une perpendiculaire (n° 7) et de couper une ligne en deux parties égales (n° 8).

Une série de questions pratiques mène à ce que nous appelons le théorème de Thalès, puis (n° 25), revenant à la mesure des terrains, Clairaut montre la nécessité de figures semblables. La mesure des angles arrive à ce moment.
« En quoi consiste la ressemblance de deux figures ? » (n° 34) est la question qui termine la première partie.
De la partie II, j'extrais seulement deux questions, deux constructions et deux figures :
« Faire un carré double d'un autre » (n° 16)
« Faire un carré égal à deux autres pris ensemble » (n° 17)
Les constructions sont claires par examen des figures.





Le théorème de Pythagore découle de la construction du n° 17, et cette construction en est une très élégante démonstration.
C'est assez, je crois, pour dire tout le charme des Éléments de géométrie.

Le théorème de Clairaut

Ce que l'on appelle théorème de Clairaut est la formule

(1) $$\frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} = \frac{\partial^2 f}{\partial y \partial x}$$

et ses conditions de validité. L'approche usuelle actuellement est de partir de l'égalité

$$(f(x + h, y + k) - f(x, y + k)) - (f(x + h, y) - f(x, y))$$
$$= (f(x + h, y + k) - f(x + h, y)) - (f(x, y + k) - f(x, y))$$

et de donner des conditions de dérivabilité sur f pour passer de là à la formule (1). Elle est correcte, élémentaire et ennuyeuse. Clairaut (1740) est plus rapide. Il observe que (1) est valable quand

$$f(x, y) = x^m y^n$$

et il ajoute : « Malgré la simplicité de cet exemple, il est aisé de faire voir que tous les autres, quelque composés qu'ils soient, peuvent s'y réduire ». Il poursuit : « car quelle que soit la quantité ou fonction de *x* et de *y* qu'on aura, il est évident qu'elle pourra être réduite à une infinité de termes, comme $ax^m y^n + bx^p y^q + cx^r y^s$ + etc ». C'est expéditif, littéralement incorrect, et néanmoins excellent comme approche. L'« évidence » doit être remplacée par un programme : définir des classes de fonctions approchables par des polynômes ainsi que leurs dérivées du premier et du second ordre. C'est une bonne introduction aux espaces fonctionnels ; l'espace désigné aujourd'hui par $C^2(\mathbb{R}^2, \mathbb{R})$ fait l'affaire.
La motivation de Clairaut était l'intégration des équations différentielles du premier ordre. Le cas le plus simple est celui de l'équation :

(2) $$Adx + Bdy = 0$$

quand le premier membre est une différentielle exacte. Et le théorème de Clairaut s'énonce ainsi (1739, 1740) :
« Si *Adx+Bdy* représente la différentielle d'une fonction composée de *x*, de *y* et de constantes, je dis que la différence de *A*, en supposant seulement *y* variable et en ôtant les *dy*, est égale à la différence de *B*, *x* seulement étant variable, et en ôtant les *dx*, ce que j'exprime ainsi :

$$\frac{dA}{dy} = \frac{dB}{dx} \cdot »$$

La suite est la mise en évidence d'équations qui se ramènent à la forme (2).
On notera que l'usage des ∂ pour les dérivations partielles n'était pas encore introduit.
Clairaut énonce ce théorème, sous la même forme, dans les deux articles (1739) et (1740). Dans le second, il signale que Fontaine et Euler l'avaient obtenu indépendamment, et il en donne aussi une autre démonstration, illustrée par une figure, qui est celle que j'ai indiquée au début. Ce théorème était dans l'air. Clairaut lui a donné une forme précise, deux démonstrations, et des applications aux équations différentielles.
Quid de « l'équation de Clairaut » ? Pour nous, c'est une équation différentielle de la forme

$$y(x) = x\frac{dy}{dx} + f\left(\frac{dy}{dx}\right)$$

Les courbes intégrales sont les droites

$$y = ax + f(a)$$

et leur enveloppe, définie par

$$\begin{cases} x = -f'(a) \\ y = f(a) - af'(a) \end{cases}$$

Outre leur simplicité, leur intérêt est de mettre en évidence qu'aux points de l'enveloppe il passe deux courbes intégrales et non une seule.
C'est un phénomène découvert par Clairaut à propos d'un problème que je vais indiquer tout à l'heure, et voici comment il l'exprime (1734, p. 213) :

« C'est une digression dans le problème que nous traitons dans ce mémoire, mais j'ai été bien aise de montrer cette singularité de calcul qui s'est présentée d'elle-même ; on pourrait l'énoncer, indépendamment du problème présent, de cette manière. Il y a des équations différentielles capables d'avoir deux solutions différentes l'une de l'autre, dont l'une

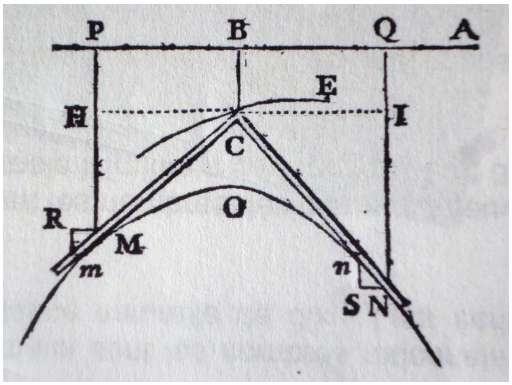
(et même dans ce cas-ci la plus générale) n'a pas besoin du calcul intégral ; telles sont les équations précédentes $xdydx - dy^2 = ydx^2 - dydx$ à laquelle $4y = xx+2x+1$ et $2ax - 2x = -4y+1 - aa$ satisfont également, et $ady^2 + xdy^2 - ydydx = xdxdy - ydx^2$, qui donne pour solutions

$$\frac{x}{\sqrt{y}} - \sqrt{y} = \sqrt{4a} \text{ et } bby - 2bx + 2by = -4a$$

En général, $\frac{d\Phi(x,y)}{\Phi(x,y)}$= fonction quelconque de *x, y, dx, dy* serait de cette nature ; intégrée, elle donnerait une équation, et sans aucune intégration, l'autre ».

Dans l'article (1734), « il s'agit de trouver des courbes dont la propriété consiste dans une certaine relation entre leurs branches » (1734, p. 196). Voici le problème dont sont issues les « équations de Clairaut » :

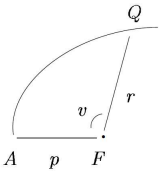
« Trouver les courbes MON autour desquelles, faisant glisser l'équerre MCN, le sommet C de cette équerre soit toujours dans la courbe donnée EC » (1734, p. 206). Un dessin explique le problème et les notations. On donne une courbe par son équation cartésienne $y = \Phi(u)$, et on cherche la courbe parcourue par le point de rencontre de deux tangentes perpendiculaires (le sommet et les branches de l'équerre) quand on les fait glisser le long de la courbe donnée. La solution n'est pas immédiate, et elle s'exprime par une représentation paramétrique $x = f(u)$, $y = g(u)$. Pour cela, on n'a pas besoin d'une équation différentielle liant *x, y, dx, dy*. Si cependant on introduit cette équation différentielle, la « solution générale » est une solution parasite, à savoir celle des branches de l'équerre. D'où la « digression » de Clairaut, bien plus importante que le problème.



Clairaut et les perturbations

Dans sa jeunesse, Alexis Clairaut était avant tout mathématicien, soucieux des courbes sous tous leurs aspects, y compris les équations différentielles comme nous venons de le voir. La figure de la Terre apparaît aussi dans ses premières recherches. Ensuite c'est l'astronomie qui alimente ses principaux travaux. Faut-il ou non, modifier la loi de la gravitation universelle pour expliquer le mouvement de la lune ? Ce n'est pas ici le lieu de raconter l'histoire du problème et des ses approches. La réponse finale, négative (la loi de Newton tient bon !) se trouve dans l'article (1748) : « De l'orbite de la lune en ne négligeant pas les quarrés des quantités de même ordre que les perturbations ». Le terme de « perturbations » revient dans le gros article (1754) : « Sur l'orbite apparente du Soleil autour de la Terre, en ayant égard aux perturbations produites par les actions de la Lune et des Planètes principales ». C'est dans cet article que se trouve l'exposé systématique de la « théorie des perturbations » (pp. 525-534) avant les données numériques et les tables (pp. 535-544).

Le point de départ de la théorie des perturbations est la correction à apporter à l'équation de l'ellipse que décrirait une planète *Q* sous l'action d'un corps fixe *F* s'il n'y avait pas de force perturbatrice. Cette équation, en coordonnées polaires, est



$$\frac{1}{r} = \frac{1}{p} - \frac{c\ \cos v}{p}.$$

L'équation de l'orbite « troublée » est

$$\frac{p}{r} = 1 - c\ \cos v + \sin v \int \Omega \cos v dv - \cos v \int \Omega \sin v dv$$

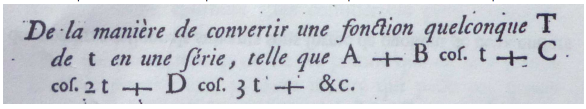
où la quantité Ω exprime les perturbations dues aux autres planètes. Un lemme, qui est « d'une ressource infinie dans la théorie des planètes », explicite la correction lorsque Ω est une combinaison linéaire de cosinus de multiples de l'angle *v* :

$$\Omega = A\ \cos qv + B\ \cos nv + etc.\ ,$$

avec *n, q* etc. entiers > 1 (1 exclu). Dans la suite, on ne peut se borner au cas où le corps F est fixe, et cela mène à des calculs compliqués.

On voit tout de suite le lien possible entre la théorie des perturbations et les sommes ou séries trigonométriques. Ce lien est explicité de manière remarquable dans les pages 545 à 551 sous le titre « De la manière de convertir une fonction *T* de *t* en une série telle que

$$A + B\ \cos t + C\ \cos 2t + D\ \cos 3t + etc.\ »$$

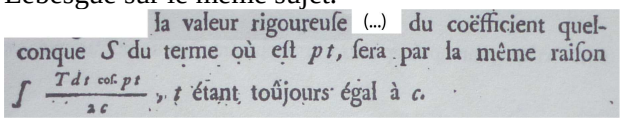

De la manière de convertir une fonction quelconque T de t en une série, telle que A + B cos. t + C cos. 2 t + D cos. 3 t + &c.

Sur cette question, Clairaut se réfère à Euler (1748) et à d'Alembert (1754) ; mais d'Alembert n'a pas pensé la méthode praticable et l'a abandonnée, tandis que, dit Clairaut, « le chemin que j'ai suivi dans la même recherche m'a paru devoir être celui que l'inventeur, M. Euler, a caché ; j'ai vu qu'on me saurait gré d'avoir donné mes réflexions sur toute

cette question, que j'ai considérée d'ailleurs d'une manière très générale, ce qui pourra être utile en plusieurs rencontres » (pp. 545-546).

Ce qui suit est un exposé parfait de la transformation de Fourier discrète dans le cas des fonctions paires ; il s'agit de la transformation de Fourier sur un groupe cyclique au lieu du cercle, et toutes les formules s'expriment par des sommes finies. La transformation de Fourier discrète est donc bien antérieure à Fourier, et elle est de grand intérêt actuellement puisqu'elle est à la base de la transformation de Fourier rapide (pp. 546-549).

En une ligne p. 549, Clairaut donne la formule de Fourier pour le calcul des coefficients d'une fonction définie sur le cercle, ce qui répond formellement au titre « De la manière de convertir une fonction *T* de *t* en une série etc. ». On sait que sur la possibilité de représenter une fonction par une série trigonométrique une controverse a opposé Daniel Bernoulli, qui l'affirmait, et Euler, d'Alembert et Lagrange, qui la niaient. C'est Fourier qui a éclairci la question. L'histoire du sujet est parfaitement décrite dans la thèse de Riemann sur les séries trigonométriques et dans le livre de Lebesgue sur le même sujet.


la valeur rigoureuſe (...) du coëfficient quelconque S du terme où eſt pt, ſera par la même raiſon $\int \frac{T\,dt \cos pt}{2c}$, t étant toûjours égal à c.

Ainsi Clairaut mathématicien, et pionnier en mathématiques, apparaît aussi bien lorsqu'il s'occupe d'astronomie que dans ses travaux de géomètre ou d'analyste. Ses digressions s'avèrent un moyen d'aller à l'essentiel. La largeur et la profondeur de ses vues s'alimentent d'un goût très sûr.

Conclusion

L'œuvre de Clairaut est considérable, et je n'en ai effleuré ici qu'une petite partie. Je n'ai parlé ni des courbes gauches (« courbes à double courbure »), son premier sujet d'étude, ni des oscillations du pendule, ni de la figure de la Terre, ni des mathématiques requises par ses travaux sur les lunettes et la réfringence, ni de celles à l'œuvre dans son mémoire sur la comète de 1759 (la comète de Halley) ni de son traité d'algèbre. Clairaut mathématicien apparaît dans toute son œuvre.

Clairaut appartient à une époque de grande création en mathématiques, et il s'inscrit dans le grand mouvement des sciences et des arts du 18e siècle. C'est aussi une époque d'erreurs, de débats et de controverses. Clairaut se distingue par la profondeur et la justesse de ses vues, et par un goût très sûr qui lui fait découvrir l'essentiel dans la nouveauté comme dans la tradition. Si cela est visible dans les quelques exemples présentés ici, le but de cet article sera atteint.

Références

Alexis Clairaut (1739) Recherches générales sur le calcul intégral, Mémoires de l'Académie des sciences 1739, pp. 425-436.

(1740) Sur l'intégration ou la construction des équations différentielles du premier ordre, ibid. 1740, pp. 293-323.

(1734) Solution de plusieurs problèmes où il s'agit de trouver des courbes dont la propriété consiste dans une certaine relation entre leurs branches, exprimée par une équation donnée, ibid. 1734, pp. 196-215.

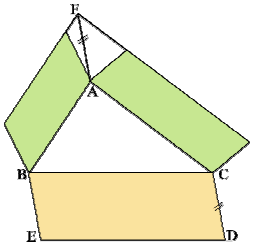
(1754) Sur l'orbite apparente du Soleil autour de la Terre, en ayant égard aux perturbations produites par les actions de la Lune et des Planètes principales, ibid. 1754, pp. 521-564.

(1741) Éléments de géométrie, Paris. ■

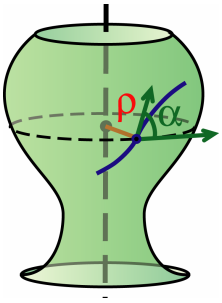
NDLR : voir sur le site du CLEA la liste des mathématiciens contemporains d'Alexis Clairaut

Quelques pistes pour des lecteurs souhaitant apercevoir d'autres facettes de Clairaut mathématicien
(et elles sont nombreuses comme le dit dans sa conclusion J-P. Kahane)

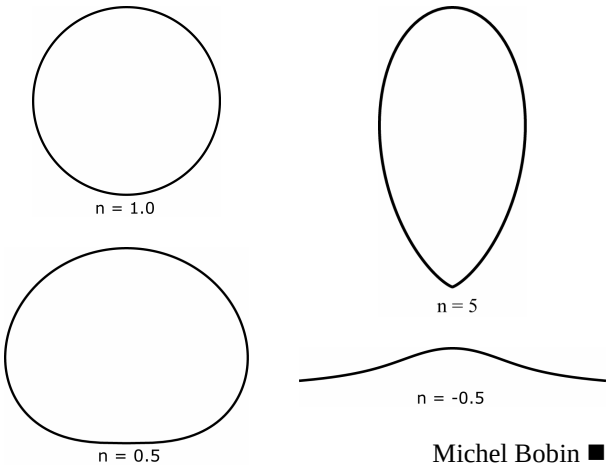
1. Le théorème de Clairaut en géométrie plane euclidienne : Le parallélogramme orange a pour aire la somme des aires des deux parallélogrammes verts, (AF) étant parallèle à (CD).



2. Un autre théorème, en géométrie différentielle des courbes gauches : « Excepté dans le cas des parallèles, les géodésiques d'une surface de révolution sont les courbes *C* telles que le produit de la distance ρ à l'axe d'un point M par le cosinus de l'angle entre *C* et le parallèle passant par M est constant : ρ × cos α = c = constante de Clairaut de la géodésique *C* ».



3. Les courbes de Clairaut d'indice n réel ayant pour équation polaire $\rho = a \times \sin^n \vartheta$ ou pour équation cartésienne $(x^2+y^2)^{\frac{n+1}{2}} = ay^n$



Michel Bobin ■

Mathématiciens contemporains d'Alexis Clairaut

Série 1 : décédés entre du vivant de Clairaut1716 et 1765

Série 2 : dont la vie englobe celle de Clairaut

Série 3 : nés du vivant de Clairaut

Série 4 : nés après le décès de Clairaut, mais en rapport avec ses travaux

46	LEIBNIZ	16	
40	LA HIRE	18	
52	ROLLE	19	
54	VARIGNON	22	
95	Nicolas II BERNOULLI	26	
42	NEWTON	27	
85	B. TAYLOR	31	
67	SACCHERI	33	
48	CEVA	34	
56	HALLEY	42	
98	MACLAURIN	46	
67	Jean Ier. BERNOULLI	48	
04	CRAMER	52	
67	De MOIVRE	54	
76	RICCATI	54	
77	Jacques CASSINI II	56	
98	BOUGUER	58	
87	Nicolas I BERNOULLI	59	
98	MAUPERTUIS	59	
90	GOLDBACH	64	
13	ALEXIS CLAIRAUT	65	
92	STIRLING	70	
00	Daniel BERNOULLI	82	
07	EULER	83	
07	BUFFON	88	
10	Jean II BERNOULLI	90	

17	d'ALEMBERT	83	
18	Maria Gaetana AGNESI	99	
28	LAMBERT	77	
30	BÉZOUT	83	
34	WARING	93	
35	VANDERMONDE	96	
36	LAGRANGE	13	
43	CONDORCET	94	
44	Jean III BERNOULLI	07	
46	MONGE	18	
52	LEGENDRE	33	
53	CARNOT	23	
68	FOURIER	30	
77	GAUSS	55	
81	POISSON	40	
84	BESSEL	46	
89	CAUCHY	57	
02	ABEL	29	
09	LIOUVILLE	82	
11	GALOIS	32	
15	WEIERSTRASS	97	
26	RIEMANN	66	
43	ASCOLI	96	
45	CANTOR et DINI	18	
43	H. A. SCHWARZ	21	
59	CESARO	06	

AVEC NOS ÉLÈVES

Détermination de la latitude d'un lieu terrestre à l'aide d'un sextant

Vincent Deparis, Lycée Jean Monnet, Annemasse (vincent.deparis@neuf.fr)

La détermination de la latitude d'un lieu est toujours une activité intéressante réalisable avec des élèves, du collège au lycée. Ici, Vincent Deparis nous propose d'atteindre une précision de l'ordre de la minute d'angle à l'aide d'un sextant, à la manière des anciens marins.

Il existe de très nombreuses méthodes astronomiques pour déterminer la latitude d'un lieu. Certaines utilisent la course du Soleil dans le Ciel, d'autres, la course des étoiles. Ces méthodes sont bien sûr devenues désuètes depuis l'avènement du GPS, elles n'en restent pas moins très intéressantes. Nous exposons ici le procédé classique de la détermination de la latitude grâce à la hauteur du Soleil à midi, mesurée à l'aide d'un sextant. Le travail présenté a été réalisé par un groupe d'élèves (Eva Josse, Victor Schaller et Amandine Villeneuve) du lycée Jean Monnet d'Annemasse, dans le cadre de leur participation aux Olympiades de physique. Il sert de préalable à une deuxième étude concernant la mesure du rayon terrestre.

Principe de la détermination de la latitude d'un lieu

Le principe de la détermination de la latitude fait intervenir 3 angles. D'abord, bien entendu, la latitude φ du lieu d'observation, qui est l'angle entre la verticale du lieu et le plan de l'équateur. Ensuite, deux angles qui permettent de repérer la position du Soleil dans le Ciel lorsqu'il culmine, c'est-à-dire lorsqu'il passe au méridien du lieu et qu'il indique la direction du sud (figure 1).

1. La hauteur h du Soleil : c'est l'angle entre la direction du Soleil et le plan horizontal. La hauteur du Soleil varie au cours de la journée, en fonction de la rotation journalière de la Terre. Elle est nulle lorsque le Soleil est à l'horizon (au moment de son lever et de son coucher) et elle croît jusqu'à son passage au méridien. Elle vaut 90° si le Soleil passe au zénith du lieu (ce qui n'arrive jamais sous nos latitudes).

2. La déclinaison δ du Soleil : c'est l'angle entre la direction du Soleil et le plan de l'équateur. La déclinaison δ varie au cours de l'année, en fonction de la révolution de la Terre autour du Soleil. Elle varie de -23,43° lors du solstice d'hiver à +23,43° lors du solstice d'été. Les astronomes peuvent calculer sa valeur pour n'importe quelle date de l'année. C'est donc un angle connu.

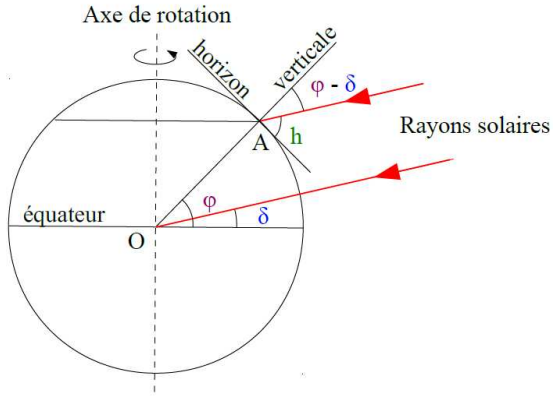


***Fig.1**. Relation entre la hauteur h du Soleil, sa déclinaison δ et la latitude φ du lieu d'observation A.*

La figure 1 permet de trouver la relation suivante entre les trois angles : 90 = φ – δ + h et donc :
φ = 90 + δ -h. Si on mesure *h* et si on connaît la déclinaison δ, alors on peut calculer la latitude φ. La clé du problème réside dans la mesure de la hauteur du Soleil au moment de sa culmination.

Mesure de la hauteur du Soleil à l'aide d'un sextant en mer et sur terre

Le sextant a été inventé vers 1730 indépendamment par John Hadley, un mathématicien anglais et par Thomas Godfrey, un inventeur américain. Il a joué un grand rôle dans la navigation astronomique. Il est en effet spécialement adapté à la mesure de la hauteur des astres sur l'horizon, ce qui a permis aux marins de connaître facilement leur latitude. Il permet également de mesurer l'angle entre deux étoiles ou entre deux amers près d'une côte.

Fig.2. *Les différentes parties d'un sextant. Le petit miroir (semi réfléchissant), la lunette et le limbe sont fixes. Le grand miroir est mobile et se déplace avec l'alidade. Les filtres colorés permettent d'observer le Soleil sans danger.*

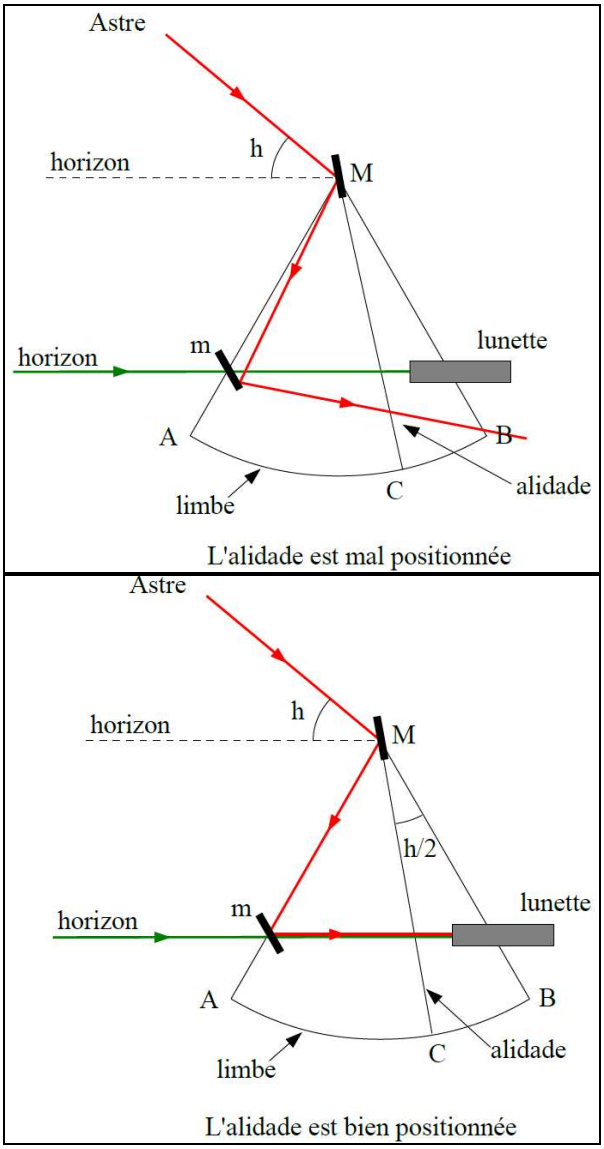


Fig.3. *Lorsque les rayons lumineux provenant de l'astre et de l'horizon coïncident, la hauteur h de l'astre visé se lit directement sur le limbe.*

Le principe du sextant est à la fois simple et génial (figures 2 et 3). L'instrument étant tenu verticalement à la main, l'observateur dirige la lunette vers l'horizon qui, en mer, est donné par la surface de l'océan au loin. L'horizon est donc aperçu directement à travers le petit miroir *m* semi réfléchissant. L'observateur manœuvre ensuite l'alidade *MC* de façon à apercevoir, par double réflexion sur le grand miroir *M* et sur la partie réfléchissante du petit miroir *m*, l'astre dont il veut mesurer la hauteur (Soleil, Lune, étoiles). Lorsque la coïncidence des deux images est réalisée, c'est-à-dire lorsque l'on voit dans la lunette à la fois l'horizon et l'astre observé, il suffit de lire sur le limbe *AB* l'angle *h* cherché. En mer, plutôt que de faire coïncider le centre du Soleil avec l'horizon, il est plus facile d'amener son bord inférieur sur l'horizon : on fait tangenter le Soleil sur l'horizon. La mesure doit alors être corrigée du demi diamètre du Soleil (qui vaut 16').

Lorsque l'astre a une hauteur *h* au dessus de l'horizon, son image est amenée dans le plan horizontal en faisant pivoter l'alidade d'un angle égal à *h/2* (figure 4). La graduation du limbe tient compte de ce phénomène. Le limbe est un arc de cercle de 60° (un sixième de la circonférence d'où le nom de sextant) mais il est gradué de 0° à 120° : l'échelle de la graduation est doublée, c'est-à-dire que les degrés gravés sur le limbe sont en réalité des demi degrés. La multiplication par 2 est ainsi évitée.

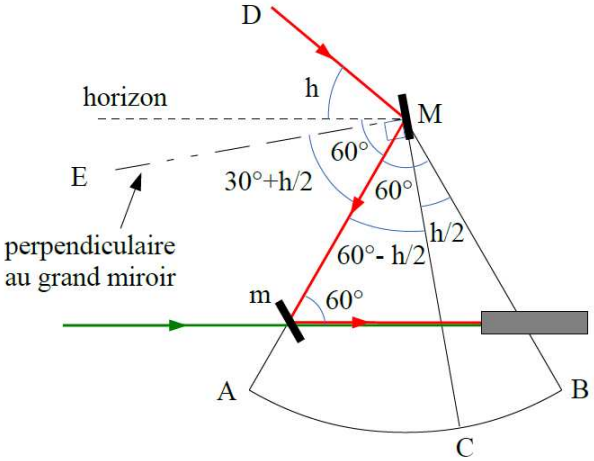


Fig.4. *L'angle DMA est égal à h + 60°. Donc l'angle EMA, qui est la moitié du précédent, est égal à 30° + h/2. Puisque l'angle EMC est droit, l'angle AMC vaut 60° - h/2. Et finalement l'angle CMB est égal à h/2. L'alidade doit pivoter d'un angle égal à h/2 pour que l'image de l'astre soit dans le plan horizontal.*

Lorsqu'on ne se trouve pas à proximité d'un océan, on ne peut pas viser la surface de l'océan pour avoir la référence de l'horizon. L'astuce consiste à utiliser un horizon artificiel constitué par la surface d'un étang ou d'un petit bac rempli d'eau (muni de vitres

pour éviter que le vent fasse frissonner la surface de l'eau). À travers la lunette, on vise le reflet du Soleil dans l'eau. Puis, on ajuste l'alidade pour apercevoir également l'image du Soleil par double réflexion sur les deux miroirs. La mesure est effectuée lorsque les deux images du Soleil coïncident parfaitement. L'angle mesuré est alors égal au double de la hauteur du Soleil.

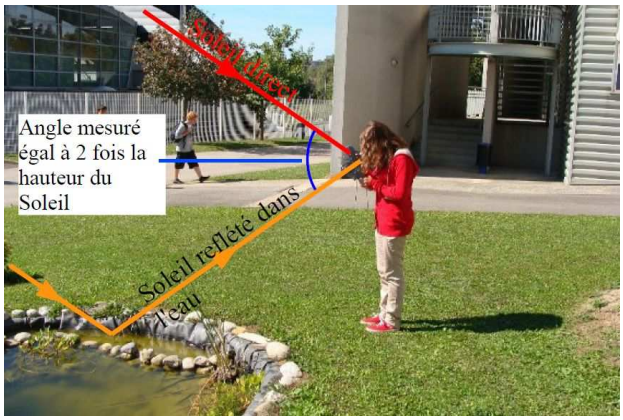


Fig.5. *Sur Terre, on vise à la fois le reflet du Soleil dans l'eau et, grâce aux réflexions sur les miroirs du sextant, le Soleil lui-même.*

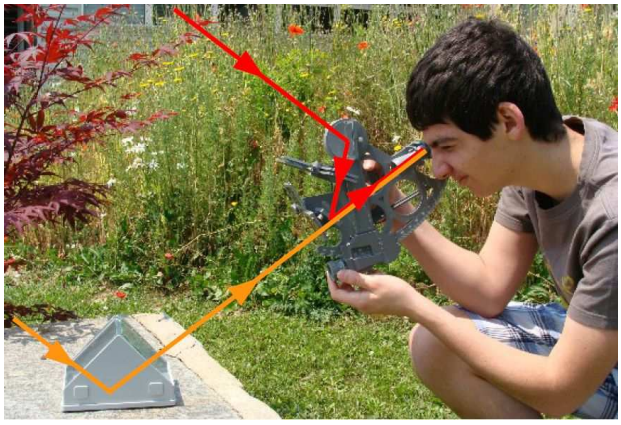


Fig.6. *Utilisation d'un horizon artificiel : un petit récipient rempli d'eau.*

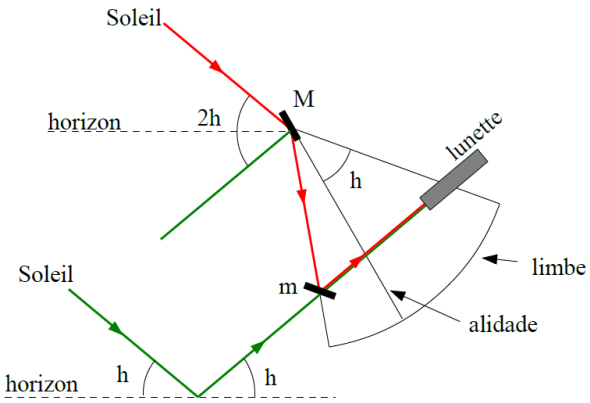


Fig.7. *En pointant la lunette du sextant vers le Soleil reflété dans le récipient rempli d'eau, on mesure un angle égal à 2h.*

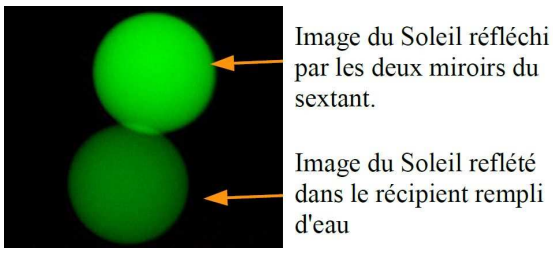


Fig.8. *Ce que l'on voit dans un sextant. Grâce à la vis micrométrique, on arrive à superposer parfaitement les deux images.*

Le réglage du sextant

Avant de se lancer dans les mesures, il reste à vérifier l'étalonnage du sextant. L'opération s'effectue en visant une étoile bien brillante en plaçant l'alidade à la graduation 0. Si le sextant est bien réglé, on ne doit voir qu'une seule étoile : l'image directe et l'image réfléchie de l'étoile sont confondues. Si ce n'est pas le cas, des petites vis situées à l'arrière des miroirs permettent de retrouver la superposition parfaite des deux images.

Le problème de la réfraction atmosphérique

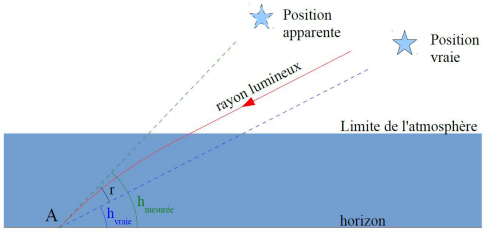


Fig.8. *La réfraction atmosphérique.*

Une mesure de hauteur est perturbée par la réfraction atmosphérique. En effet, l'atmosphère qui environne notre planète n'est pas un milieu homogène. Au fur et à mesure que l'on s'élève, la densité et la température de l'air baissent, ce qui fait diminuer l'indice de réfraction. Un rayon lumineux qui traverse l'atmosphère ne se propage pas en ligne droite mais suit une ligne courbe (figure 9). La direction apparente de l'astre est celle de la tangente au rayon lumineux à son arrivée au sol. Comme la réfraction relève les astres, la hauteur mesurée est plus grande que la hauteur vraie, la différence entre les deux angles étant l'angle r, appelé réfraction atmosphérique. Les mesures de hauteur réalisées au sextant doivent donc être corrigées selon la formule suivante : $h_{vraie} = h_{mesurée} - r$. La réfraction est nulle au zénith et maximale à l'horizon. Elle est de l'ordre de 1' pour une hauteur de 45° (tableau 1). Dans les conditions normales de température et de pression (T = 0° et P = 1013 hPa), la valeur de la réfraction r (exprimée en seconde d'arc) est donnée par la formule suivante :

$$r = 60{,}08'' \cot h_{mesurée} - 0{,}07'' \cot^3 h_{mesurée}$$

Hauteur (°)	20	30	40	50	60	70	80	90
Réfraction (')	2,7	1,7	1,2	0,8	0,6	0,4	0,2	0

***Tableau 1**. Valeur de la réfraction pour différentes hauteurs.*

La valeur de la déclinaison du Soleil

La détermination de la latitude d'un lieu demande de connaître la déclinaison du Soleil au moment de l'observation. Le site internet de l'IMCCE (Institut de Mécanique Céleste et de Calculs des Éphémérides) met à disposition un générateur d'éphémérides, appelé « Éphémérides générales de position des corps du système solaire » qui calcule la déclinaison du Soleil pour toute date : http://www.imcce.fr/fr/ephemerides/formulaire/form_ephepos.php.

La procédure est la suivante : il faut choisir le corps d'étude (le Soleil), le plan de référence (l'équateur), le type de coordonnées (sphériques), le type d'éphémérides (apparente), indiquer la date et l'heure UTC de l'observation, puis demander le calcul. Dans une nouvelle fenêtre, on obtient, parmi d'autres grandeurs, la valeur de la déclinaison du Soleil au moment demandé.

***Fig.9.** Générateur d'éphémérides sur le site de l'IMCCE.*

La précision de la mesure

Lorsque le Soleil culmine au méridien, sa trajectoire dans le ciel est pratiquement horizontale pendant quelques instants. Entre le moment où il finit de monter et le moment où il commence à descendre, il se passe dix bonnes minutes sans que sa hauteur varie sensiblement. Cela a deux avantages. Le premier est qu'on n'a pas besoin de connaître précisément l'heure du passage au méridien. Pour la déterminer, on peut soit la calculer en utilisant la longitude du lieu d'observation et l'équation du temps, soit la veille déterminer le méridien par un autre procédé astronomique (ombre d'un gnomon la plus courte ou plutôt bissection de l'angle formé par deux ombres, l'une le matin et l'autre l'après midi, d'égales longueurs). Le jour de l'observation, on commence les mesures un peu avant le passage au méridien et on mesure la hauteur jusqu'au moment où celle-ci ne varie plus. Pour plus de sûreté, on peut aussi utiliser l'heure donnée par un autre générateur d'éphéméride de l'IMCCE : "Levers, couchers et passages au méridien des corps du système solaire". Il faut choisir le corps d'étude (le Soleil), entrer la date de l'observation et les coordonnées géographiques du lieu d'observation. Le deuxième avantage est qu'on a le temps d'effectuer plusieurs mesures et de comparer les résultats.

Lors des premiers essais, les mesures peuvent être assez divergentes. Puis, au fur et à mesure de l'entraînement, les mesures sont plus cohérentes : la différence entre elles sont au plus de 1 à 2'. Ce léger écart est malheureusement inévitable. Il provient de la difficulté à bien superposer les deux images du Soleil dans la lunette du sextant.

Jour		6 sep	13 sep	25 sep	27 sep	2 oct
Mesure sextant	(°)	100	94	85	84	80
	(')	10	54	36	2	8
Hauteur mesurée	(°)	50,083	47,450	42,800	42,017	40,067
Hauteur vraie	(°)	50,069	47,435	42,782	41,998	40,047
Déclinaison δ	(°)	6,277	3,628	- 1,018	- 1,797	- 3,768
Latitude φ	(°)	46,208	46,193	46,200	46,205	46,215
erreur	(°)	0,026	0,011	0,018	0,023	0,033

***Tableau 2** : Détermination de la latitude du lycée.*

On peut bien entendu réaliser plusieurs mesures de la hauteur du Soleil lors de sa culmination plusieurs jours de suite depuis un lieu fixe (la cour du lycée) et comparer les calculs de la latitude avec une valeur théorique donnée par l'IGN (Institut Géographique National) : $\varphi_{lycée}$ = 46,182°. Le tableau 2 liste pour les 5 calculs, la mesure effectuée au sextant, la hauteur mesurée du Soleil (égale à la moitié de la valeur du sextant), la hauteur vraie du Soleil (corrigée de la réfraction atmosphérique), la déclinaison du Soleil au moment de l'observation (donnée par le site de l'IMCCE), la latitude (calculée à partir de la formule : $\varphi = 90 + \delta - h$) et l'erreur (différence entre la latitude calculée et la latitude de référence donnée par l'IGN).

L'erreur moyenne est de 0,022°, soit 1,3'. Mais on remarque que toutes les erreurs sont positives. Elles contiennent donc une composante systématique, qui peut provenir de notre manière de procéder ou d'un mauvais réglage du sextant. Quoiqu'il en soit, la précision reste excellente : une erreur de 1,3' dans la latitude occasionnant une erreur de 2,4 km dans le positionnement à la surface de la Terre.

Un sextant est donc un instrument simple d'utilisation, qui permet une détermination précise de la latitude d'un lieu, aussi bien en mer que sur terre. Dans un prochain article, nous l'utiliserons pour effectuer une mesure du rayon de la Terre. ■

THÈME : LES ÉTOILES

ARTICLE DE FOND

Introduction à la physique stellaire

Éric Josselin, Université Montpellier II

Les principes de base de la classification spectrale et de la structure interne des étoiles sont exposés, ainsi que des rudiments sur l'évolution stellaire.

Observer les étoiles pour en comprendre la nature

Bref historique

La compréhension de la nature des étoiles est intimement liée à celle de leur composition et de leur source d'énergie. Concernant le Soleil, Anaxagore (Ve s. av. J.-C.) y voit « une pierre incandescente plus grande que le Péloponnèse ». E. Kant (XVIIIe s.) considère que nul ne peut objecter qu'il est constitué en partie d'oxygène, puisqu'il brûle. Au XIXe siècle, A. Comte et les philosophes positivistes considèrent, à propos des astres, que « nous ne saurions jamais étudier par aucun moyen leur composition »…

Le XIXe siècle est (heureusement) aussi celui de l'invention de la spectroscopie. W. Wollaston observe des raies sombres dans le spectre du Soleil, J. von Fraunhofer (1814) enregistre ce spectre et établit un premier catalogue de raies. À partir de 1860, G. Kirchhoff et R. Bunsen énoncent les trois lois de base de la spectroscopie :

1. un gaz « dense » et « chaud » produit un rayonnement continu ;
2. un gaz « chaud » et « diffus » produit des raies spectrales brillantes (raies d'émission) ;
3. un gaz « froid » et « diffus » devant une source de rayonnement continu produit des raies spectrales sombres (raies d'absorption) dans le spectre continu.

Ces raies sont progressivement associées à différents éléments chimiques. On peut citer en particulier le cas de l'hélium, alors inconnu sur Terre, et identifié via une raie dans la chromosphère du Soleil (N. Lockyer, 1872). A. Ångström identifie les raies associées à l'hydrogène en 1868.

Vient alors le temps de l'observation des spectres d'étoiles autres que le Soleil, la découverte de leur diversité… et les tentatives de classification. De 1866 à 1877, P. A. Secchi propose 3, puis 4 et enfin 5 classes de spectres. H. Draper affine cette classification et aboutit à … 17 classes de spectres !

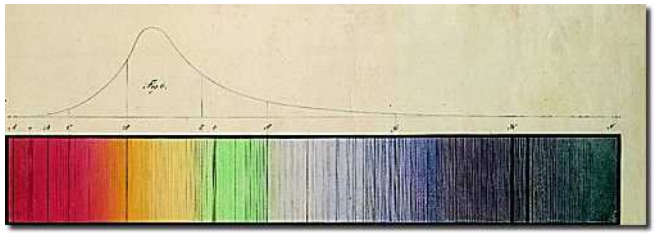


Fig.1. *Dessin du spectre solaire de J. von Fraunhofer.*

Il faut attendre le début du XXe siècle et les travaux de A. Cannon et C. Payne (deux « Harvard computers », appellation des femmes auxquelles on confiait les travaux longs et fastidieux de traitement des données et de classification…) pour trouver une interprétation physique à ces différents types, ramenés à 7.

Principes de la classification spectrale

L'interprétation de la classification repose essentiellement sur deux lois : l'équilibre statistique d'excitation et l'équilibre statistique d'ionisation. En effet, l'énergie d'un système lié (électron attaché à un atome, mais aussi rotation et vibration d'une molécule) est quantifiée. À l'équilibre thermo-dynamique, la probabilité de rencontrer un électron dans un état d'excitation donné est fixée par la loi de Boltzmann, qui dépend essentiellement du rapport entre l'énergie thermique et l'énergie d'excitation de ce niveau. Plus précisément, le

rapport des populations de deux niveaux *i* et *j*, d'énergies d'excitation E_i et E_j est donné par :

$$\frac{n_i}{n_j} = \frac{g_i}{g_j} e^{-\frac{E_i - E_j}{kT}}$$

où *g* est un facteur de dégénérescence du niveau, *T* la température du milieu et *k* la constante de Boltzmann (l'énergie thermique est de l'ordre de *kT*). De même, la probabilité qu'une espèce chimique soit dans un état d'ionisation donné se déduit d'une loi similaire, la loi de Saha (qui fait naturellement intervenir l'énergie d'ionisation à la place de l'énergie d'excitation). Si on prend le cas concret de la raie d'absorption de l'hydrogène Hα dans une atmosphère stellaire, à 656 nm, qui correspond à l'absorption depuis le premier niveau excité (nombre quantique principal n = 2) vers le deuxième niveau excité (n = 3), cette raie sera intense si : (1) l'hydrogène est majoritairement neutre ; (2) une fraction significative de l'hydrogène dans cette atmosphère est effectivement dans l'état n = 2. D'après la loi de Saha, la première condition n'est plus remplie pour des étoiles au-delà de 10 000 K environ, tandis que la deuxième impose des étoiles d'au moins 8 000 K.

Ainsi, le type spectral A défini par H. Draper sur la base de l'intensité de cette raie correspond à des étoiles de températures comprises dans cet intervalle relativement étroit (Véga = α Lyr en est un prototype).

De proche en proche, tous les types spectraux, basés empiriquement sur l'intensité de diverses raies, et qui correspondent en fait à des absorptions par des espèces chimiques de différentes énergies d'ionisation dans des états d'excitation différents, sont ainsi rattachés à des domaines de températures différents. Ces caractéristiques sont résumées dans la table suivante :

Type spectral	Domaine de température (K)	Quelques indicateurs spectraux dans le visible
O	28000 – 50000	raies de He^+
B	10000 – 28000	raies de He
A	7500 – 10000	raies fortes de H
F	6000 – 7500	raies de Ca^+
G	5000 – 6000	raies fortes de Ca^+
K	3500 – 5000	raies de métaux, bandes de CH
M	2500 – 3500	bandes de TiO

Ces types sont divisés en 10 sous-classes, numérotées de 0 à 9, du plus chaud au plus froid.

Les classes de luminosité

La deuxième caractéristique essentielle déductible des spectres est une indication de luminosité. La luminosité peut s'exprimer comme étant le produit entre la surface émettrice (donc d'une sphère d'aire $4\pi R_*^2$) et le flux surfacique. Ce flux s'exprime en fonction de la température effective, c'est à dire la température d'un rayonnement thermique à l'équilibre (dit rayonnement de corps noir) équivalent, produisant le même le flux intégré sur l'ensemble du domaine électromagnétique. En pratique, cette température correspond à une température sub-photosphérique. Un corps noir de température T_{eff} émet un flux σT_{eff}. La luminosité d'une étoile est donc (loi de Stefan-Boltzmann) :

$$L = 4\pi R_*^2 \sigma T_{eff}^4$$

À une température donnée, une étoile est donc d'autant plus lumineuse qu'elle a un grand rayon. Pour une masse donnée (puisque, comme on le verra par la suite, les classes de luminosité correspondent principalement à des stades évolutifs), la gravité de surface ($g = GM/R^2$) sera alors plus faible et la densité du gaz atmosphérique sera réduite. Il y aura donc moins de collisions entre atomes. Or, deux processus gouvernent principalement l'élargissement des raies : l'agitation thermique (qui produit un profil gaussien) et les collisions (profil lorentzien). En mesurant l'importance relative de ces deux processus d'élargissement sur certaines raies, on peut donc en déduire la gravité de surface de l'étoile, et y associer une classe de luminosité, dont le nom fait avant tout référence à la taille de l'étoile. Celle-ci est notée avec un chiffre romain comme suit :

I	Supergéantes
II	Géantes brillantes
III	Géantes
IV	Sous géantes
V	Naines (étoiles de Séquence Principale)

Le Soleil, une étoile naine de température effective de 5780 K, est donc une étoile de type G2 V.

Et les abondances ?

Les raies sont associées à des éléments chimiques et, historiquement, il a tout d'abord été naturel de penser qu'elles véhiculaient une information relative à l'abondance de ces éléments. Une fois l'interprétation en termes de paramètres physiques (température et densité du gaz), A. Unsöld (1969) propose une méthode de détermination des abondances, maintenant connue sous le nom de couche d'inversion, et qui est une expression

analytique de la 3e loi de Kirchhoff & Bunsen. Une source de rayonnement continu traverse l'atmosphère, modélisée comme une coquille de gaz froid, produisant des raies en absorption. En appliquant cette méthode à un grand échantillon, il constate que, « au cours de l'essentiel de l'histoire de notre Galaxie, la matière interstellaire, dont sont issues les étoiles, a quasiment eu la même composition chimique ». Il existe en fait des étoiles pauvres en « métaux » (terme par lequel les astrophysiciens désignent l'ensemble des éléments autres que l'hydrogène et l'hélium), mais elles s'avèrent relativement rares, et leur quête est un domaine de recherche très actif, puisqu'il permet de reconstituer l'évolution chimique de notre Galaxie, et même de l'Univers dans son ensemble.
Il est donc essentiel de garder à l'esprit que la diversité des spectres reflète avant tout la variété des conditions physiques, la majorité des étoiles de notre Galaxie ayant une composition chimique dite « cosmique », c'est à dire semblable à celle du Soleil : 73,8 % d'hydrogène (en masse, soit près de 90 % en nombre de particules), 24,9 % d'hélium, et 1,3 % de métaux (selon les déterminations les plus récentes).

Le diagramme HR

La température effective et la luminosité sont donc les deux premiers paramètres fondamentaux des étoiles. Une détermination plus précise de la luminosité peut être faite pour les étoiles proches en combinant la mesure de leur éclat et celle de leur distance, via la méthode des parallaxes. E. Hertzsprung (1911) et H. Russell (1913) proposent indépendamment un diagramme permettant de classer les étoiles, dans lequel la température est portée en abscisse (décroissante de gauche à droite !) et la luminosité en ordonnée.

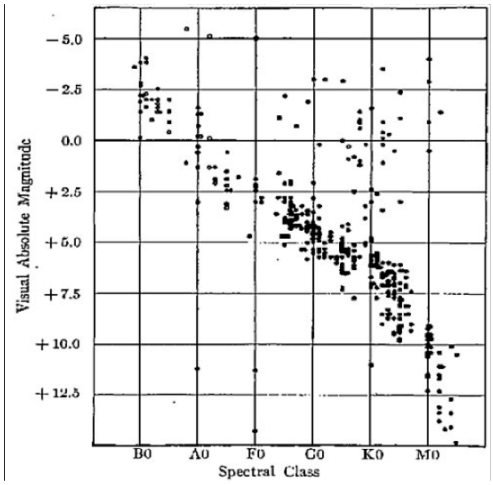


***Fig.2**. Diagramme de E. Hertzsprung. On y notera la séquence principale, la région des géantes rouges … et une naine blanche (Sirius B).*

Il apparaît alors très clairement que les étoiles ne sont pas distribuées aléatoirement dans ce diagramme, qui maintenant porte leurs initiales (HR). Environ 90 % des étoiles se situent en effet sur une bande allant des étoiles chaudes et très lumineuses aux étoiles froides et peu lumineuses : c'est la séquence principale (ou séquence des naines, donc les étoiles de classe de luminosité V).

On a très vite pressenti que cette répartition contenait une information relative à l'évolution des étoiles. Les premières interprétations se basaient sur l'idée que les étoiles « descendaient » le long de cette bande au cours de leur vie. De cette erreur, on a conservé l'appellation de type précoce pour les premiers types spectraux (O, B) et types tardifs pour les derniers (K, M). Il faudra attendre les années 1950 pour voir émerger la théorie maintenant validée, tant par les observations que par les modèles.

Structure d'une étoile
Paramètres fondamentaux

Selon le théorème de Vogt-Russell (énoncé dans les années 1920, et qui porte mal son nom, puisqu'il n'est pas démontré), la structure interne d'une étoile est déterminée de façon univoque par sa masse et sa composition chimique.
En fait, d'autres paramètres jouent un rôle clé dans la structure et l'évolution des étoiles : la rotation, le champ magnétique et la binarité. De plus, en pratique, d'autres phénomènes sont actuellement inclus de façon paramétrique dans les codes numériques de structure et d'évolution, tel que la perte de masse (vent stellaire).
La liste des paramètres « fondamentaux » peut s'avérer donc longue si l'on veut décrire précisément une étoile !

Principes de bases d'un modèle standard

Dans un modèle standard, on néglige en général les effets de la rotation, du champ magnétique et de la binarité. Une étoile peut alors être décrite (au moins sur la séquence principale) comme une boule de gaz parfait en équilibre hydrostatique.
La validité de l'hypothèse du gaz parfait peut paraître surprenante, en particulier au cœur d'une étoile comme le Soleil où la masse volumique atteint environ 10^5 kg/m^3. En effet, un gaz est supposé parfait si les interactions à courte portée entre ses constituants sont négligeables, autrement, dit, les particules peuvent être considérées comme ponctuelles. Or, la température y étant d'environ

12×10^6 K, le gaz est entièrement ionisé. La taille typique des particules est donc celle du proton, soit 1 fm (= 10^{-15} m). Un calcul simple permet de montrer qu'avec la masse volumique ci-dessus, la distance moyenne entre les particules est de l'ordre de 10^{-10} m. L'hypothèse est donc bien valide (à noter que ce ne sera pas le cas des géantes rouges, pour lesquelles le cœur est dégénéré électroniquement ; cf. ci après).

En ce qui concerne l'équilibre hydrostatique, si une perturbation venait le rompre, l'information se propageant à la vitesse du son, l'équilibre serait rétabli en un temps d'au plus 1 jour dans le cas du Soleil, ce qui est très en deçà de toutes les échelles de temps (ces perturbations sont cependant observables et mesurables, c'est le principe de base de l'héliosismologie, décrite dans l'article de J. Ballot page 23).

L'équilibre suppose naturellement au moins deux forces qui se compensent. Ces deux forces sont la gravitation et les forces de pression. Le gradient de pression interne impose un gradient de température, et donc une perte d'énergie par rayonnement. L'équilibre ne peut être maintenu que s'il y a une source d'énergie interne. Celle-ci résulte des réactions de fusion nucléaire. Pour le Soleil et toutes les étoiles de la séquence principale, les noyaux d'hydrogène fusionnent pour former de l'hélium. Le bilan net des réactions est :

$$4\ {}^1\mathrm{H} \rightarrow {}^4\mathrm{He} + e^+ + \nu + \gamma$$

(Les réactions comportent en particulier la désintégration de protons en neutrons, via l'interaction nucléaire faible, qui s'accompagne de l'émission de positrons e^+ et de neutrinos ν ; les photons γ représentent l'énergie libérée). Cette réaction est exothermique parce qu'une partie de la masse est convertie en énergie de liaison. En effet, la masse du noyau d'hélium est plus faible que la somme des masses de ses constituants ! L'énergie récupérée se calcule grâce à la fameuse formule :

$$E = \Delta m\, c^2 = 0{,}007\ m_p\, c^2$$

(m_p désigne la masse du proton). Autrement dit, il se produit environ 10^{38} réactions par seconde au cœur du Soleil, chacune libérant environ 4×10^{-12} joule !

Rudiments d'évolution stellaire

Une étoile se forme par effondrement gravitationnel d'un nuage de gaz interstellaire. Si la rotation et le champ magnétique jouent un rôle important, les études récentes ont montré que la turbulence est un paramètre clé. C'est elle qui régule la formation stellaire. Sans turbulence, la quasi-totalité du gaz interstellaire aurait été converti en étoiles en quelques dizaines de millions d'années ! Elle est en fait toujours à l'œuvre dans notre Galaxie (âgée d'environ 12 milliards d'années !), au rythme d'environ 1 masse solaire formée par an (taux mesuré dans le voisinage solaire).

L'effondrement est stoppé quand la température du cœur atteint la valeur critique permettant la fusion de l'hydrogène. La réaction décrite ci-dessus ayant un très bon rendement (près de 1 % de la masse convertie en énergie !), cette phase, la séquence principale susmentionnée, dure très longtemps : près de 90 % de la vie d'une étoile, soit environ 10 milliards d'années pour le Soleil. Cette durée de vie dépend fortement de la masse. En effet, on observe que la luminosité le long de la séquence principale est à peu près proportionnelle au cube de la masse.

La durée de vie est proportionnelle à la quantité de combustible disponible (donc la masse) et inversement proportionnelle à la vitesse de consommation de l'énergie, soit la luminosité. Au final, la durée de vie est donc inversement proportionnelle au carré de la masse : une étoile de 10 masses solaires à une durée de vie de « seulement » 100 millions d'années !

Une fois l'hydrogène du cœur épuisé, l'étoile se contracte. La température et la densité augmentent alors dans une couche périphérique au cœur, qui amorce à son tour les réactions de fusion. L'enveloppe de l'étoile se dilate, on a alors une évolution rapide à luminosité quasi constante (le rayon augmente, la température de surface diminue) : l'étoile devient une géante rouge. Une fois cette couche à son tour épuisée, le cœur se contracte à nouveau jusqu'à amorcer la fusion de l'hélium, qui produira du carbone et de l'oxygène.

Après la fusion de l'hélium, l'évolution des étoiles de petite masse (moins de 10 masses solaires) et celle des étoiles massives diffère significativement. Pour les étoiles de petite masse, le cœur atteint alors une densité critique, qui le conduit à un état quantique particulier, dit de dégénérescence électronique. Ce cœur est donc inerte, et le restera. Des réactions de fusion de l'hélium et de l'hydrogène dans des couches autour de ce cœur assurent en alternance la production d'énergie de l'étoile. Mais l'enveloppe est instable. L'étoile subit alors des cycles de pulsations, qui entrainent la lévitation des couches externes au-dessus de l'étoile. Le gaz de ces couches se refroidit donc, jusqu'à environ 100 K, température à laquelle des grains de poussière se forment. La pression de radiation s'exerce sur ces grains, et les couches sont définitivement expulsées. Le cœur est ainsi progressivement « mis à nu ». Vu sa température, il émet un rayonnement très ionisant. Le gaz éjecté

devient visible sous la forme d'une nébuleuse planétaire. Le cœur stellaire deviendra progressivement une naine blanche.

En ce qui concerne les étoiles plus massives, la densité au cœur étant plus faible, l´état de dégénérescence n'est jamais atteint. Il s'établit donc un cycle : chauffage du cœur → fusion nucléaire →[?] contraction du cœur … Successivement, on a ainsi la fusion du carbone, puis du néon, et enfin le silicium. Ces réactions ayant un rendement de plus en plus faible, elles sont de plus en plus rapides. Pour une étoile de 25 masses solaires, la fusion du carbone dure environ 170 ans, celle du néon, 1 an, celle de l'oxygène, 6 mois, et celle du silicium, 1 jour ! La fusion du silicium produit du fer, qui ne peut fusionner, vu sa stabilité. Le cœur va alors s'effondrer, les noyaux de fer se dissocier puis les protons se combiner aux électrons pour former des neutrons. Le cœur de l'étoile devient donc une étoile à neutrons. L'étoile, elle, explose, c'est une supernova : avec seulement 0,01 % de l'énergie libérée sous forme de lumière, cette explosion est aussi lumineuse qu'une galaxie entière ! Le processus d'explosion reste cependant incompris. Le rebond de l'onde de choc dû à l'implosion du cœur est trop vite amorti pour expliquer cette explosion. C'est l'une des nombreuses questions qui restent en suspens en physique stellaire … ■

Les étoiles ont-elles des branches ?

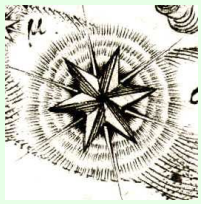
Demandez à un enfant de vous dessiner une étoile, il y a de forte chance pour qu'il dessine des branches, très souvent 5 d'ailleurs. On peut se demander d'où vient cette habitude.

Il est vrai que les télescopes ont aussi cette curieuse manie d'ajouter des branches aux étoiles à cause de la fixation du miroir secondaire (l'araignée) qui crée des aigrettes de diffraction. Avec une araignée à 4 branches, on obtient des étoiles à 4 branches.

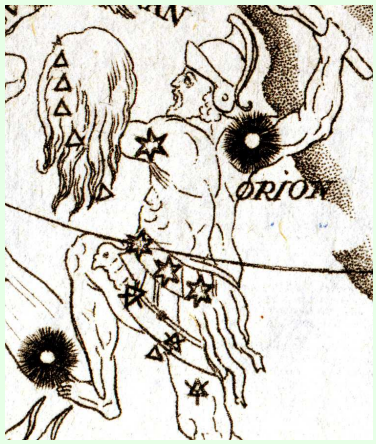
Les lunettes astronomiques ne posent pas ce genre de problème. Par contre, on retrouve des branches sur des photos d'étoiles prises avec un objectif photo à cause des lamelles métalliques du diaphragme.

Étoile à 10 branches, photographiée avec un objectif photo dont le diaphragme dispose de 5 lamelles.

On pourrait donc penser que les enfants font des branches aux étoiles parce qu'ils en ont vues sur les photos d'étoiles (ou parce que les adultes qui ont vu des branches sur les photos leur ont dit que les étoiles en avaient).
Mais si on regarde les dessins d'étoiles réalisés avant l'invention de la photographie, on découvre que, déjà, on dessinait des branches aux étoiles comme sur les dessins des atlas de Bayer ou d'Hévélius.



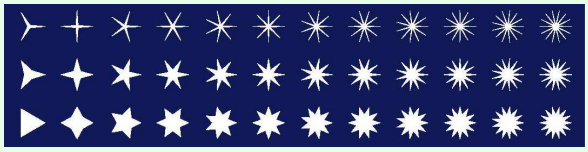
Bételgeuse chez Bayer (1661)



Sur cette représentation d'Orion extraite d'un livre de 1803, les étoiles de 1ère grandeur comme Bételgeuse et Rigel possèdent une multitude de rayons, celles de 2e grandeur comme dans le baudrier d'Orion au centre ont six branches. On a ensuite des étoiles de 3e grandeur représentées par un triangle équilatéral agrémenté de trois petits traits (comme l'étoile sur la cuisse d'Orion) et celles de 4e grandeur n'ont que trois branches (sur la peau de bête).

Pour certains l'origine de ces branches semble être simplement physiologique et proviendrait de la structure de notre œil. Observez une source lumineuse brillante, vous risquez de voir des rayons, encore plus si vous plissez les yeux. Pour d'autres, il ne s'agit que d'un problème de diffraction par l'atmosphère.

Quoi qu'il en soit, le mot étoile désigne tout autant une sphère (ou un ellipsoïde) émettant de la lumière par réaction de fusion qu'une figure géométrique difficile à définir, en général un polygone dont les côtés ont la même longueur et dont les angles peuvent prendre deux valeurs. Quelques étoiles géométriques



Pierre Causeret

INSTRUMENT

Compteur d'étoiles

Jean-Luc Fouquet, muséum de La Rochelle

Combien peut-on voir d'étoiles dans le ciel, cent, mille ? Cette activité simple permet de répondre à la question mais aussi de s'initier à une méthode de comptage.

Compter les étoiles, c'est pour la plupart des gens à qui on propose cette folle entreprise, s'atteler à une tâche vouée à l'échec. L'expression prend sa source dans la Bible, à propos des enfants d'Abraham : « Tu seras le père d'une grande nation, ta descendance sera comme la poussière de la terre, si quelqu'un peut compter les étoiles du ciel, il pourra alors compter ta descendance ».

Et effectivement, lorsque l'on considère le nombre d'étoiles contenues dans la Voie Lactée, on peut avoir le vertige et considérer que **compter les étoiles,** c'est entreprendre une action impossible. Notre galaxie contient entre 100 et 300 milliards de soleils, et s'il nous fallait les dénombrer un à un sans s'interrompre, il nous faudrait plus de trente siècles ! Mais nos yeux sont des récepteurs bien imparfaits qui ne peuvent distinguer que les étoiles principales, jusqu'à la sixième grandeur dans le meilleur des cas. À l'œil nu et pour la plupart d'entre nous, il est aussi possible de distinguer quelques nébuleuses (dans le Sagittaire, dans Orion, …) ou quelques amas d'étoiles (les Pléiades dans le Taureau, le double amas de Persée, …). Mise à part Andromède, la seule galaxie à portée de vue, les autres objets que nous pouvons voir sont dans la Voie Lactée[1].

Alors, **compter les étoiles,** est-ce demander la Lune ? Par une belle nuit bien claire, en l'absence de Lune ou de lumière parasite, on peut espérer observer en un lieu donné au-dessus d'un plan horizontal bien dégagé, un peu moins de 3 000 étoiles. Les compter toutes, une par une, serait bien fastidieux, et leur mouvement apparent dû à la rotation de la Terre rendrait la chose impossible à cause du lever ou du coucher de certaines d'entre elles.

Le comptage devient possible avec une maquette simple à préparer et à utiliser : le **compteur d'étoiles.** Cet appareil nous permet de dénombrer les astres visibles sur un centième du ciel disponible sur le lieu d'observation. Il suffirait de multiplier par 100 le nombre d'étoiles comptées sans bouger au travers de l'ouverture de l'appareil pour avoir une bonne idée de leur nombre total visible au-dessus de l'horizon. Mais comme on procède au cours d'un recensement de population, on obtient une meilleure estimation en opérant divers sondages dans différentes portions du ciel, et une moyenne des résultats obtenus nous permettra d'obtenir un résultat plus significatif.

Construction du compteur d'étoiles

Dans une feuille de carton, on découpe un disque de 10 centimètres de rayon, puis à partir de son centre, on dégage une ouverture circulaire de 6 centimètres de rayon. Une ficelle tendue entre notre œil et le disque nous permettra de tenir l'ouverture à 42 centimètres du visage. Une extrémité de la ficelle est nouée juste derrière un trou percé dans le disque, et l'autre extrémité porte un nœud qui sera posé sur le nez ou la joue de l'observateur.

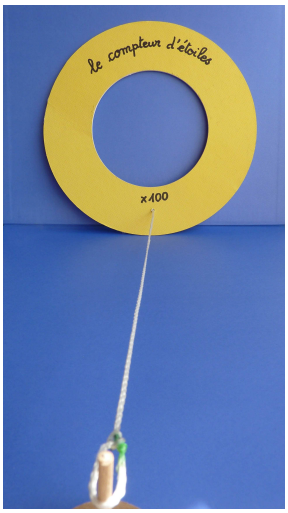


Fig.1. *Le compteur d'étoiles.*

Ainsi, la ficelle étant bien tendue, le disque tenu immobile quelques minutes vers une région du ciel nocturne, le nombre d'étoiles perçues dans l'ouverture est à multiplier par 100 pour obtenir le nombre total d'étoiles visibles à l'œil nu depuis cet endroit.

Quel résultat espérer ?

On peut voir, dans les conditions optimales d'observation, 6 000 étoiles réparties sur les deux hémisphères. À la campagne, en tenant compte des obstacles modulant l'horizon, le nombre d'étoiles accessibles est de 2 000 en moyenne. Ce nombre peut diminuer sensiblement à cause de la pollution lumineuse, de la présence de la Lune, de l'humidité de l'atmosphère… Un exemple est donné ici avec la

[1] Depuis l'Europe (les nuages de Magellan sont visibles dans l'hémisphère sud).

même région céleste de Cassiopée, avec deux photos prises d'une part près d'une grande ville et d'autre part dans un endroit plus protégé.

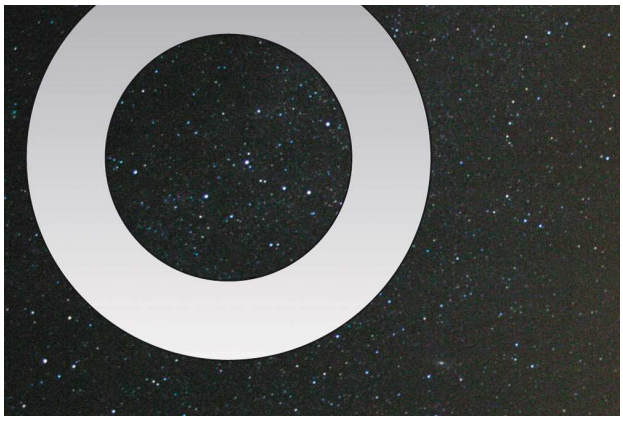


Fig.2. *Deux photos de Cassiopée prises avec le même appareil et des réglages proches mais des conditions d'observation différentes (photos PC).*

D'autres façons de compter les étoiles

Des livres d'astronomie du XVIIIe siècle, faisant référence à des manuscrits bien plus anciens des XIIIe et XIVe siècles, semblent attester que du temps d'Hipparque ou de Ptolémée, les astronomes utilisaient de longs tubes pour **compter les étoiles,** ou observer certains amas tels les Pléiades en se protégeant ainsi des lumières parasites. Le catalogue des étoiles contenu dans l'Almageste ne comptait qu'un peu plus de 1 000 étoiles, alors que dans le même temps d'autres civilisations en chiffraient davantage, jusqu'à 2 500 pour les Chinois. Les méthodes pour déchiffrer le ciel étaient bien différentes d'un lieu à l'autre. Un peu plus tard, au Moyen Âge, ces longs tubes pour observer étaient attachés à des « armilles équatoriales » pour suivre le mouvement journalier des astres. On pourrait imaginer, pour **compter les étoiles** aujourd'hui, utiliser un tube de diamètre intérieur assez large et dont la longueur en proportion de l'ouverture, permet de retrouver cette portion du centième du ciel accessible. Pour un diamètre de 4 cm par exemple, on utilisera un tube de 14 cm de longueur.[2]

Compter les étoiles, est-ce un métier ?

Donc les Anciens comptaient les étoiles pour dresser des catalogues. Lorsqu'à l'école, on demande combien d'étoiles sont visibles par une belle nuit sans nuages, on obtient des réponses tellement disparates, de quelques dizaines à plusieurs millions, que l'on a besoin et envie de les pousser à faire la mesure. Et ensuite, avec les plus petits, pourquoi ne pas revenir à leurs livres de contes, avec par exemple « le Petit Prince » de Saint-Exupéry, avec l'épisode du businessman, un compteur d'étoiles qui sait s'enrichir …

Je n'ai pas le temps de flâner. Je suis sérieux, moi. La troisième fois… la voici ! Je disais donc cinq cent un millions…
– Millions de quoi ?
Le businessman comprit qu'il n'était point d'espoir de paix :
– Millions de ces petites choses que l'on voit quelquefois dans le ciel.
– Des mouches ?
– Mais non, des petites choses qui brillent.
– Des abeilles ?
– Mais non. Des petites choses dorées qui font rêvasser les fainéants. Mais je suis sérieux, moi !
Je n'ai pas le temps de rêvasser.
– Ah ! des étoiles ?
– C'est bien ça. Des étoiles.
– Et que fais-tu de cinq cents millions d'étoiles ?
– Cinq cent un millions six cent vingt-deux mille sept cent trente et un.
Je suis sérieux, moi, je suis précis.
– Et que fais-tu de ces étoiles ?
– Ce que j'en fais ?
– Oui.
– Rien. Je les possède.

Extrait du chapitre XIII du Petit Prince d'Antoine de Saint-Exupéry.

■

[2] Calcul de la longueur de la ficelle L pour un rayon intérieur de la couronne r :
On considère que les étoiles visibles se trouvent sur la demi-sphère de rayon L, d'aire $4\times\pi\times L^2/2$ ou $2\times\pi\times L^2$.
On assimile la partie de la sphère visible dans la couronne à un disque d'aire πr^2.
On trouve $\pi r^2 = 2\times\pi\times L^2/100$, *ce qui donne* $r = L\times\sqrt{2}/10$

ARTICLE DE FOND

Delta de Céphée, une étoile inconstante

Georges Paturel, observatoire de Lyon

Cet article présente une étoile dont l'inconstance, longtemps mystérieuse, a été comprise et largement utilisée. Nous allons parler de cette étoile emblématique, au point de donner naissance à une classe d'étoiles variables : les variables céphéides.

Quelques mots d'histoire

Vous savez que les Anciens croyaient à un ciel immuable. Ne parlait-on pas de la « sphère des fixes », par opposition aux mobiles planètes ? Il en allait de même de l'éclat des étoiles. Les étoiles brillaient toujours, et toujours de la même façon. La première surprise vint des découvertes des "novae" (à prononcer nové, comme "rosa rosam rosae" ; je crois qu'il est admis aujourd'hui de parler de nova avec un s s'il y en a plus d'une). Après cette parenthèse de vocabulaire, je poursuis. Une nova n'était pas dans l'esprit des gens une étoile variable mais une étoile nouvelle (d'où le nom). Après tout, comme le faisait dire Soljenitsyne à un de ses personnages, il fallait bien recréer des étoiles nouvelles, puisque certaines disparaissaient en étoiles filantes !

Tycho Brahe fut un découvreur chanceux. Il écrivit en substance : « *un jour ordinaire, le 11 novembre*[1] *1572, je sortis dehors et constatait immédiatement qu'une étoile occupait une place inhabituelle. Ce n'était pas une planète. Il s'agissait d'une étoile nouvelle* ». Nous savons aujourd'hui que ce n'était pas seulement une nova, mais une supernova, une étoile qui explose et devient aussi lumineuse qu'un noyau de galaxie.

Dans un passé très lointain, qui se perd dans les ténèbres de l'histoire, une véritable étoile variable fut découverte : Algol. On sait aujourd'hui que ce n'est pas à proprement parler une étoile variable. Certes, on voit son éclat changer, mais simplement parce qu'un compagnon sombre passe régulièrement dans la ligne de visée. Quand il est derrière Algol, l'ensemble perd un peu de son éclat. Quand il est devant, l'ensemble perd encore plus d'éclat puisque c'est une partie de l'étoile, très chaude, qui est masquée.

Et puis ce fut la découverte d'une étoile admirable dans la constellation de la Baleine : Mira Ceti. Les astronomes avaient eu le temps de se faire à l'idée que des étoiles pouvaient être variables. Mais, ils ne connaissaient pas les causes de la variabilité. Avec Mira Ceti, c'était une nouvelle catégorie, celle des étoiles réellement pulsantes, comme celle découverte en 1784 par John Goodricke, un astronome amateur. On pense qu'il recherchait les étoiles variables, car son mentor lui avait parlé d'Algol et de Mira Ceti. Évidemment, John Goodricke ignorait le mécanisme responsable de cette variation régulière. Il faut dire que pendant très longtemps certains astronomes refusaient l'idée qu'une étoile puisse varier. Je me souviens avoir retrouvé une thèse ancienne, où l'auteur, dont j'ai oublié le nom, analysait la possibilité que la variation fût due à la présence d'un compagnon.

Avant de poursuivre l'étude de delta Céphée, je vais vous raconter une anecdote. L'"astro-dame" Antoinette de Vaucouleurs avait analysé des mesures d'éclat de galaxies. Elle conclut que l'éclat semblait variable pour certaines. Elle en parla à Gérard, son mari, astronome célèbre dans le monde des galaxies. Il sourit en déclarant "s'il y a une chose constante, c'est bien l'éclat d'une galaxie". Eh bien, ce jour-là, Gérard et Antoinette ratèrent l'occasion de découvrir, ce qu'on appelle aujourd'hui, les galaxies à noyaux actifs de Seyfert, du nom du découvreur de ce phénomène.

Tout bouge et tout tourne dans l'univers. Telle devrait être la moralité de ce bref examen historique.

Peut-on l'observer ?

Revenons à notre étoile delta Céphée. Peut-on observer par nous-mêmes cette variabilité, sans grand moyen ? La réponse est oui, sinon je n'aurais pas posé la question. Bien. Mais :

1. *Où est cette étoile ?*
2. *Comment l'identifier ?*
3. *Comment voir sa variation d'éclat ?*

[1] Un onze novembre n'est pas un jour ordinaire ; c'est un jour férié (G. Walusinski :-)

Pour répondre à la première question je vais utiliser une carte annotée par Daniel Bardin.

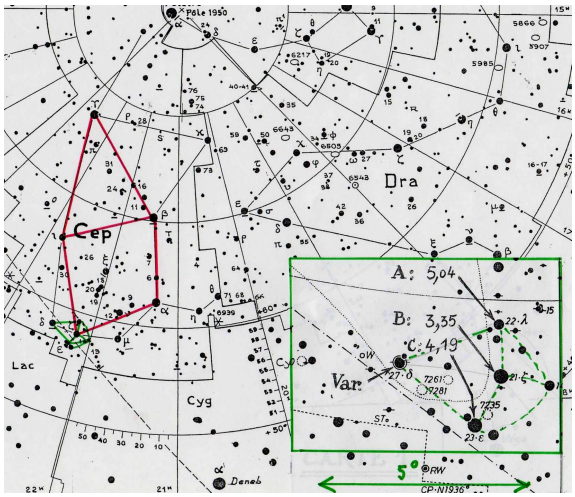


Fig.a. *La région de Céphée (la "maison en rouge") selon D. Bardin. Dans l'angle, en bas à gauche de la maison, vous voyez le "parachute".*
Fig.b. *région du parachute agrandie.*

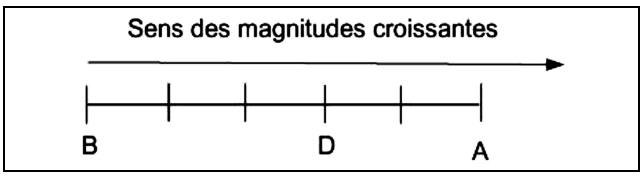
Si vous avez lu la légende de la carte, vous avez repéré le parachute. Pour voir un parachute il faut tourner le cadre vert de 90° sur la gauche. Delta Céphée est l'étoile qui se balance au bout des suspentes. Si vous pointez cette région avec des jumelles bien calées, vous verrez sans peine ce "parachute". Je vous montre une photo prise derrière des jumelles avec une pose de 10 secondes, le 20 octobre 2008. Exercez-vous à reconnaître delta Céphée. C'est très facile, le parachute est dans le sens habituel d'un parachute. Nous avons répondu à la deuxième question.

Amusez-vous à reconnaître le parachute. Delta Céphée est l'étoile brillante au bas de la photo. Notez aussi que cette étoile peut-être pointée en été comme en hiver. C'est pratique pour pouvoir la suivre longtemps !

Répondons à notre troisième question. Deux méthodes s'offrent à nous : l'une simple et l'autre compliquée. Commençons par la plus simple, la méthode d'Argelander.

La méthode d'Argelander

Avant d'expliquer la méthode, éliminons un problème, celui de l'extinction atmosphérique. Plus une étoile est haute dans le ciel, plus son éclat est grand. Cette variation est due à la traversée de l'atmosphère terrestre. Au zénith, la longueur traversée est moindre. L'éclat de l'étoile est plus grand. Près de l'horizon, la longueur est plus grande. L'éclat est faible. Il ne faudra pas confondre les variations intrinsèques de l'étoile avec cette variation géométrique. La méthode d'Argelander va nous affranchir de ce problème. En effet, toutes les magnitudes d'une même région du ciel seront affectées de la même quantité car la variation d'éclat dépend de l'éclat lui-même (pour vous en convaincre voir l'encadré ci-dessous). Même si la transparence du ciel varie doucement, les différences des magnitudes entre étoiles voisines resteront les mêmes. Il suffit donc de comparer delta Céphée aux étoiles voisines, par exemple les étoiles A, B et C (revoir le cadre vert), qui ont respectivement les magnitudes $m_A = 5{,}04$; $m_B = 3{,}35$; $m_C = 4{,}19$.
Le principe consiste à interpoler *visuellement* la magnitude de delta Céphée (que nous désignerons par D) entre celles de deux étoiles (par exemple A et B). Si visuellement on pense pouvoir distinguer 5 gradations entre A et B, on donne la valeur estimée pour D en notant à quelle fraction elle se trouve de l'une et de l'autre. Par exemple, si D est plus proche de A d'une gradation sur cinq, on notera sur son carnet d'observation : B3D2A. Graphiquement cela se visualise ainsi :



Visualisation graphique de la méthode d'Argelander

Une gradation a pour valeur : $(m_A - m_B)/5$

La magnitude de D se calculera alors par l'une des deux relations linéaires suivantes :

$$m_D = m_A - 2(m_A - m_B)/5$$
$$m_D = m_B - 3(m_A - m_B)/5$$

En utilisant les deux relations, vous pouvez vérifier que vous obtenez le même résultat. Si ce n'est pas le cas, il y a une erreur de calcul. Avec l'expérience, un bon observateur parvient à estimer une magnitude au dixième près. Avec une méthode artisanale[2] basée sur l'emploi de jumelles et d'un

[2] Cette méthode photométrique requérait de nombreux calculs.

appareil photo numérique, nous avons péniblement atteint une précision de 0.2 magnitude.
Voici le résultat d'une série d'observations de delta Céphée.

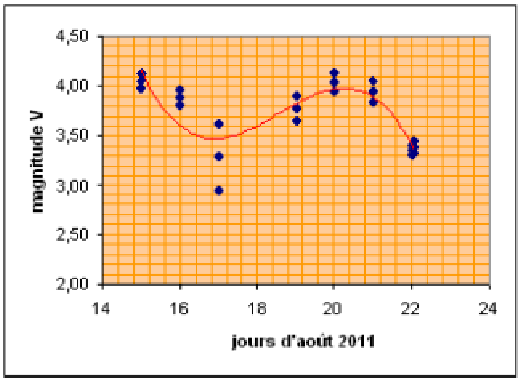


Fig.2. *La variation de delta Céphée est visible. On voit que trois mesures ont été faites chaque nuit.*

La période trouvée est de l'ordre de 6 jours (la valeur admise est de 5,4 jours), avec une magnitude variant de 3,5 à 4,2 (la variation admise est entre 3,6 à 4,3).

ENCADRÉ 1 : Une variation relative d'éclat est une variation de magnitude !

Éclat et magnitude apparente sont reliés par la relation : $m = -2{,}5 \log(E) + cte$. La variation de magnitude m est (en approximant, pour de petites variations, ΔLnE par $\Delta E / E$) :

$$\Delta m = -2{,}5\, \Delta \log_{10} E$$

$$\Delta m = -\frac{2{,}5}{Ln10}\frac{\Delta E}{E} = -1.086\,\frac{\Delta E}{E} \approx -\frac{\Delta E}{E}$$

C'est bien ce que je disais…à peu près.

Que se passe-t-il ?

Aujourd'hui, on parvient à mesurer le diamètre apparent de certaines étoiles et de quelques étoiles céphéides. On a donc la certitude que delta Céphée est une étoile qui pulse, qui respire, pour parler en termes imagés. Son diamètre croît et décroît lentement. Sa luminosité fait de même. Le diamètre de delta Céphée varie entre 45 et 50 millions de kilomètres en un peu plus de cinq jours. Il a fallu beaucoup de temps pour en arriver à cette conclusion. Maintenant que nous savons cela, expliquons ce qui se passe, à la lumière des avancées théoriques et expérimentales.

Le κ-mécanisme[3]

Quand les étoiles ont évolué, elles contiennent de l'hélium. On sait en effet que l'hydrogène fusionne en hélium, au terme de processus nucléaires complexes libérant l'énergie qui permet aux étoiles de résister à l'inexorable effondrement gravitationnel. Elles occupent, à cette phase de leur évolution, une zone particulière du diagramme Hertzsprung-Russell dans lequel se représente le chemin évolutif des étoiles. Cette zone s'appelle la *bande d'instabilité*, car, à ce stade de leur évolution, toutes les étoiles sont variables. L'origine de cette instabilité est la suivante : Si, par suite d'une perturbation – et on sait que les étoiles ne sont plus les objets tranquilles, que les anciens imaginaient – l'étoile se contracte, les couches intermédiaires s'échauffent. L'augmentation de température, qui devrait faire augmenter la pression et arrêter la contraction est utilisée pour ioniser l'hélium. La contraction ne s'arrête donc pas immédiatement. Mais l'hélium ionisé est moins transparent, plus opaque (l'opacité κ augmente). L'énergie interne de l'étoile ne peut plus s'évacuer. La pression interne devient alors plus forte et la contraction initiale fait place à une expansion. L'énergie d'ionisation accumulée est restituée. L'étoile se dilate encore, en allant au-delà du rayon d'équilibre. Arrivé à un certain rayon, l'hélium sera redevenu transparent. La dilatation s'arrêtera et une nouvelle contraction pourra commencer.

Peut-on prédire la période d'oscillation pour trouver les facteurs dont elle dépend ? C'est ce que nous allons voir.

La relation Période-luminosité-Couleur

Vous avez sans doute déjà entendu parler de la fameuse relation Période-Luminosité (PL en abrégé) des céphéides. Une belle découverte de Miss Henrietta Leavitt, dans les années 1912-1913 ! Nous allons voir que la relation physique est une relation Période-Luminosité-Température. La température étant corrélée à un indice de couleur, on parle plutôt de Relation Période-Luminosité-Couleur (PLC, en abrégé).
On peut montrer[4] que la période P est proportionnelle à la racine carrée de la masse volumique. On peut alors écrire :

$$P \propto \left(\frac{M}{R^3}\right)^{1/2}$$

où, M est la masse totale de l'étoile et R son rayon.

[3] Ce nom vient de la variable κ (kappa en grec) utilisée par les théoriciens pour désigner l'opacité de la matière, fonction de la longueur d'onde

[4] On peut le montrer soit par la loi de Kepler en considérant le déplacement de matière, soit par la loi de propagation d'une onde dans un milieu de densité donné.

$$\text{d'où} \quad : \; P \propto \left(\frac{M}{R^3}\right)^{1/2}$$

Or la masse est approximativement proportionnelle à une certaine puissance de la luminosité (plus une étoile est massive, plus elle est lumineuse). Certes cette relation n'est pas absolue, mais pour une classe d'objets similaires, cette relation est bien vérifiée.
De plus, la luminosité est proportionnelle à la puissance quatrième de la température (loi de Stephan) et à la surface rayonnante (donc au carré du rayon). En combinant ces relations, on déduit assez facilement[5] que la période dépend de la luminosité et de la température.
Par ailleurs, nous l'avons dit, il y a une relation entre la température et l'indice de couleur. Donc la véritable relation utile pour l'observation est une relation PLC. Elle se représente bien par l'équation d'un plan quand Période et Luminosité sont remplacées par leur expression logarithmique.

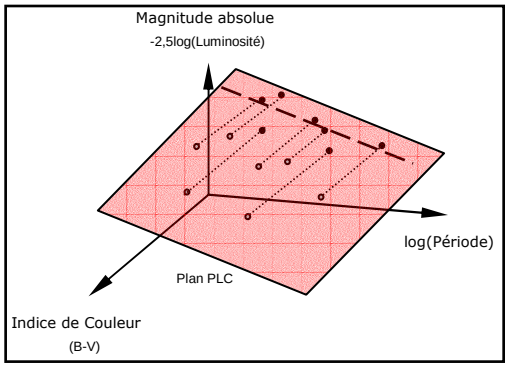


Fig.3. *Le plan représentant la relation PLC "linéarisée".*

Notons que la luminosité est donc remplacée par la magnitude absolue. Quant à l'indice de couleur, qui n'est autre que la différence entre deux magnitudes de longueurs d'onde différentes, c'est déjà, par définition une expression logarithmique. On utilisait autrefois l'indice de couleur B–V (différence des magnitudes bleue et "visible" – c'est-à-dire le jaune), aujourd'hui on utilise plus volontiers l'indice de couleur V–I (différence de magnitude entre le "visible" et le proche infrarouge)

L'expression de la relation PLC est donc :

$$M_0 = \alpha \log P + \beta\, C + \gamma \qquad (1)$$

où α, β et γ sont des constantes numériques.
Moyennant quelques hypothèses simples, on trouve les valeurs approximatives de α et β (– 4 et 4 respectivement). Mais en pratique, on préfère des déterminations expérimentales. Pour la constante γ, il faut avoir recours à une calibration de distance d'au moins une étoile céphéide. Cette calibration se fait par parallaxes trigonométriques depuis des satellites (Hipparcos ou Gaia).

[5] Voir le n° 121 des Cahiers Clairaut, page 2.

Comment utiliser la relation PLC

Si vous avez lu quelques livres de vulgarisation, vous avez compris que c'est la relation Période-Luminosité (PL) qui est utilisée pour déterminer la distance d'étoiles céphéides lointaines et non pas la relation PLC.
Deux questions se posent alors :
1. Pourquoi ne pas utiliser la bonne relation ?
2. Quels en sont les inconvénients ?

Quand on veut calculer la distance d'objets lointains (typiquement des galaxies dans lesquelles on observe des étoiles céphéides), on calibre la relation avec quelques céphéides proches membres de notre Galaxie. On suppose naturellement que les lois de la Nature sont les mêmes sur Terre et dans les galaxies étudiées. Cette hypothèse implicite est le credo universel de la science.
Les céphéides de notre Galaxie sont baignées dans la poussière interstellaire. La lumière que nous recevons est affectée par la traversée de cette poussière. Par exemple, les magnitudes B, V et I utilisées pour calculer les indices de couleur B–V ou V–I sont altérées par le fait que l'absorption n'est pas la même pour chaque étoile et, pire, que l'absorption n'est pas la même selon les longueurs d'onde. Les petites longueurs d'onde sont plus affectées que les grandes. On dit que les magnitudes sont rougies, car les étoiles nous paraissent plus rouges qu'elles ne le sont en réalité. C'est un peu comme quand on voit le Soleil à travers un nuage de fumée.
Ce rougissement (qu'on appelle l'excès de couleur) permet de mesurer l'absorption dont nous avons besoin pour corriger la magnitude apparente. Le calcul complet montre qu'il apparaît une dégénérescence qui rend la distance très imprécise. Que faire ?
Si on suppose que, en moyenne, la valeur de la couleur C de notre échantillon de céphéides est constante, le terme $(\beta\, C + \gamma)$ de la relation (1) devient une constante et la relation PLC devient une relation PL. Le calcul se simplifie et la dégénérescence diminue. On en tire l'expression correcte de la distance (cf. l'article cité à la note 5).
Mais attention, on reste toujours avec l'hypothèse forte que la couleur intrinsèque des échantillons considérés est constante, quelle que soit leur distance. Cette hypothèse est potentiellement source de biais statistiques. En effet, notre échantillon de calibration, en moyenne moins lumineux intrinsèquement que l'échantillon distant, a une couleur moyenne différente. Donc la calibration est faussée.
Ah ! Si nous avions une parfaite compréhension théorique de la relation PLC, ce serait plus facile ! Il faut toujours que la théorie et la pratique avancent ensemble. « *En théorie, il n'y a pas de différence entre la théorie et la pratique, en pratique si !* ». ■

AVEC NOS ÉLÈVES

Simulation de la relation Période-Luminosité des céphéides

Georges Paturel, observatoire de Lyon

Le but est de montrer que l'on peut déterminer la distance d'un objet inaccessible en utilisant une relation physique. Pour cela nous simulons des céphéides (étoiles dont l'éclat varie avec une période fonction de leurs propriétés intrinsèques) par des pendules simples de longueurs quelconques (et dont la période d'oscillation varie en fonction de leurs longueurs, comme on le sait).

Le principe

On place quelques pendules simples à des distances connues, mais assez petites pour pouvoir être déterminées par la méthode des parallaxes. Ce seront les "Céphéides" de notre Galaxie. D'autres pendules seront placés à plus grande distance. Ce seront les céphéides de galaxies plus lointaines dont nous cherchons à déterminer les distances. Au début de l'exercice, nous ne connaissons pas ces distances.

Nous nous mettrons dans la peau de l'astronome, qui ne peut pas approcher les objets qu'il étudie. Cependant les distances des céphéides galactiques seront connues, car comme elles sont proches, on peut avoir leurs distances par triangulation.

Une photographie nous donnera la possibilité de mesurer la longueur apparente des pendules (il faut une même photo ou plusieurs photos prises exactement dans les mêmes conditions). Les périodes d'oscillation peuvent être mesurées sans s'approcher des pendules.

Les mesures

Céphéides galactiques

(Pendules dont on connaît la distance D).

nom	P	distance D connue	E*
G1	0,6 s	3365 mm	20,0
G2	0,8	2085	64,0
G3	0,9	3950	40,8
G4	0,9	3105	48,5
G5	0,9	3580	43,3
G6	1,1	2640	86,0

Céphéides extragalactiques

(Pendules dont on cherche la distance).

nom	P	E*	D à trouver !
E1	0.94s	19.5	8900 mm
E2	1.03	25.5	8170
E3	1.11	26.3	9260
E4	1.09	29.8	7700

* E désigne les longueurs apparentes des pendules en unités arbitraires (mesure sur la photo).

Transposition des définitions

Nous appellerons "*magnitude apparente*" m le logarithme de la longueur apparente E du pendule dans une unité arbitraire (par exemple la longueur sur la photo en mm). **M = logE**. La longueur apparente varie comme l'inverse de la distance :
$E = E_o/D$ (D en mm).
Donc : $m = \log E = \log E_o - \log D$.

Nous définirons la "*magnitude absolue*" M comme étant la magnitude apparente à une distance de 1 mm. $\mathbf{M = \log E_o - \log(1) = \log E_o}$
M correspond à la longueur vraie du pendule.

Nous avons donc la relation : $m = M - \log D$. Nous pourrons poser $\mu = -\log D$ et désigner cette quantité comme étant le "*module de distance*", car sa connaissance nous donne la distance D. Nous avons donc la relation simple : $\mu = m - M$ **(1)**

Application

Nous mesurons les longueurs apparentes E de tous les pendules, sur la photo. Nous les avons mesurées en mm (l'unité importe peu ; nous aurions pu les mesurer en inch, ou en pieds !) ; l'échelle de la

photo n'a pas d'importance. Nous mesurons, de loin, les périodes P en secondes. Nous calculons pour les "céphéides galactiques" les magnitudes absolues M à partir de m et D. Nous calculons avec un tableur la régression linéaire en logarithmes, comme le laisse supposer la théorie du pendule simple (voir figure 1) :

$$M = 1{,}99 \ \log P + 5{,}28. \qquad (2)$$

Notons que la pente est à peu près conforme à la théorie (on attendait 2).
Ensuite pour les "céphéides extra-galactiques", nous supposons implicitement l'uniformité des lois de la nature en calculant M par la relation (2) avec les périodes mesurées. Avec m et M nous trouvons alors la distance D.
Nous comparons alors les distances trouvées à celles qu'il fallait trouver (aimablement communiquées par le "Créateur"). L'accord est à peu près satisfaisant.

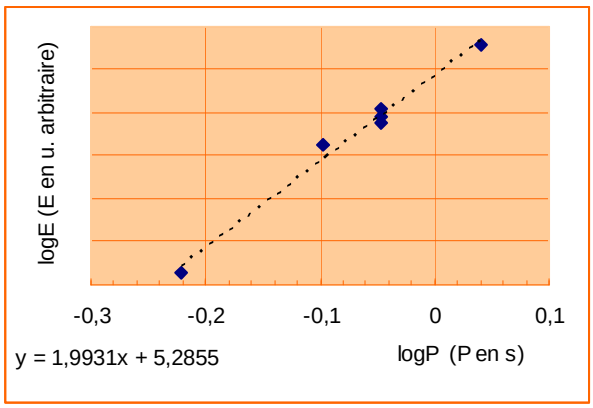


Fig.1. *Droite de régression donnant les longueurs vraies des pendules "galactiques" en fonction de leurs périodes en échelle logarithmique.*

Dommage que dans la nature nous ne puissions pas demander au créateur si nos résultats sont corrects !
Autres remarques, si la loi exacte du pendule simple est connue, un seul pendule de calibration suffit. Enfin, la loi exacte cherchée peut se trouver en observant des objets situés à une même distance inconnue (par exemple dans un amas).

Tableau 1 : *Les résultats : En rouge les mesures. En vert les distances à trouver pour les Céphéides extragalactiques. En bleu, les distances qu'il fallait trouver pour ces mêmes Céphéides extragalactiques.*

nom	E	m = logE	logP (P en s)	D connue (mm)	M = m + logD		
G1	20,0	1,301	- 0,222	3365	4,828		
G2	64,0	1,806	- 0,097	2085	5,125		
G3	40,8	1,611	- 0,046	3950	5,207		
G4	48,5	1,686	- 0,046	3105	5,178		
G5	43,3	1,636	- 0,046	3580	5,190		
G6	86,0	1,934	0,041	2640	5,356		
nom	**E**	**m = logE**	**logP (P en s)**	**M = a logP + b**	**logD = M-m**	**D (en mm)**	**D vraie (mm)**
E1	19,5	1,290	- 0,027	5,232	3,942	8743	8900
E2	25,5	1,407	0,013	5,311	3,905	8033	8170
E3	26,3	1,420	0,045	5,375	3,955	9021	9260
E4	29,8	1,474	0,037	5,359	3,885	7674	7700

Fig.2*. Le terrain expérimental (les pendules sont difficiles à voir).*

■

ARTICLE DE FOND

Sonder les étoiles

Jérôme Ballot, astrophysicien
à l'Institut de Recherche en Astrophysique et Planétologie (Toulouse)

La principale, pour ne pas dire l'unique, information qu'on reçoit des étoiles provient de la lumière qu'elles émettent. Ces photons sont émis dans une mince couche à leur surface appelée la photosphère. En effet, un peu plus profondément, la matière est trop opaque pour que les photons puissent circuler librement. Malgré cela, nous avons une bonne connaissance de ce qui se passe à l'intérieur des étoiles. Nous en connaissons la structure, et nous en comprenons de mieux en mieux la dynamique interne.

La structure des étoiles

Modéliser la structure interne des étoiles est un des grands succès de l'astro*physique* du XXe siècle. En effet, à partir de nos connaissances en physique fondamentale, nous sommes capables de calculer la structure des étoiles et leur évolution : pour cela, il suffit de prendre en compte les lois de la mécanique, de la gravitation, nos connaissances sur les propriétés de la matière (en particulier les interactions entre lumière et matière d'une part et les réactions nucléaires d'autre part). Nous pouvons donc par exemple calculer la structure du Soleil aujourd'hui : en son cœur, la température atteint 15 millions de degrés et plus de la moitié de l'hydrogène y a été transformé en hélium par fusion nucléaire. Bien que la matière soit très opaque, l'énergie est évacuée grâce aux photons depuis le centre vers la surface jusqu'à 71 % du rayon (on parle de région « radiative ») ; au-delà, la matière devient trop opaque au rayonnement et l'énergie est transportée par la convection, c'est-à-dire par de grands mouvements ascendants et descendants de matière (on parle de région « convective »). Les étoiles naines de masse semblable au Soleil ont toutes une structure similaire.

Pour tester, valider, mettre en défaut et améliorer les modèles, il faut pouvoir sonder les intérieurs stellaires. C'est ce que permet la sismologie stellaire, ou *astérosismologie* (lorsqu'on s'intéresse spécifiquement au Soleil, on parle alors d'*héliosismologie*).

On connaît depuis des siècles des étoiles variables, c'est-à-dire des étoiles dont la luminosité varie au cours du temps. L'origine de ces fluctuations peut être extrinsèque, ce qui est le cas par exemple d'une binaire à éclipse (c'est-à-dire une étoile qui possède un compagnon stellaire qui l'occulte partiellement à chaque révolution), ou intrinsèque. Dans ce second cas, la variabilité peut être due à des oscillations de l'étoile. En effet, la plupart des étoiles oscillent. On serait même tenté de dire que presque toutes les étoiles oscillent : à chaque fois que la sensibilité de nos instruments s'améliorent de nouvelles classes d'étoiles pulsantes sont découvertes.

Certaines présentent des oscillations avec de grandes amplitudes, telles les céphéides dont la luminosité peut varier du simple au double, d'autres ont des oscillations de très faibles amplitudes, comme le Soleil où elles n'excèdent pas quelques parties par million (ppm). Il existe également une grande diversité dans les périodes des oscillations : par exemple, les oscillations du Soleil ont des périodes voisines de 5 minutes alors qu'elles peuvent atteindre la centaine de jours pour les céphéides.

Comprendre les oscillations

L'étude des oscillations stellaires nous permet littéralement d'ausculter un grand nombre d'étoiles. Pour comprendre les principes de la sismologie, nous pouvons nous ramener à d'autres objets oscillants qui nous entourent : les instruments de musique. Par exemple, prenons pour simplifier les vibrations d'une corde. On considère une corde tendue, fixée à ses deux extrémités. Si on frappe la corde, celle-ci va osciller autour de sa position d'équilibre sous l'effet des forces de tension qui s'exercent dessus. On dit alors que la tension est la *force de rappel*. La corde ne va pas osciller n'importe comment, mais selon ses *modes*. Certains de ces modes sont représentés sur la figure 1a.

Chaque mode est caractérisé de façon univoque par un nombre n de nœuds qui sont des points qui restent immobiles lorsque la corde vibre selon ce mode précis. À l'inverse, on appelle ventres les endroits où l'amplitude de l'oscillation est maximale. Sur la figure 1a, sont représentés le mode appelé fondamental, sans nœud (n = 0), le premier harmonique qui possède un nœud (n = 1) et le second harmonique (n = 2). On pourrait continuer ainsi pour des n de plus en plus grands. Lorsqu'une

corde oscille, elle le fait selon une superposition de ses différents modes.

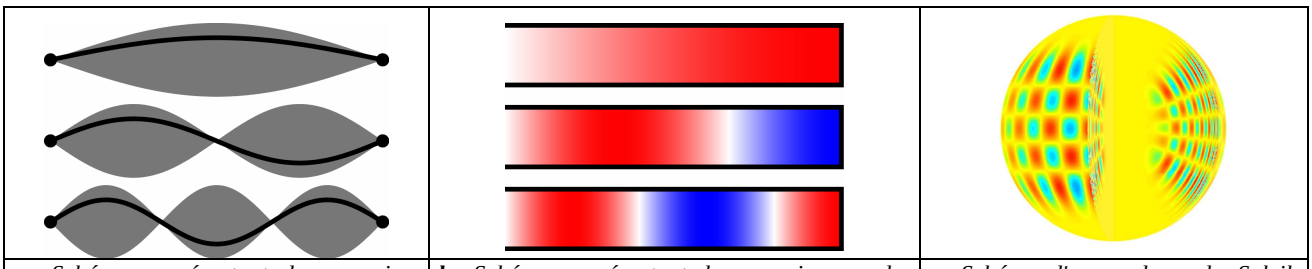
Chaque mode est associé à une fréquence d'oscillation spécifique qu'on note f_n. La fréquence de chaque mode suit la relation suivante $f_n = D\times(n + 1)$ où D est une constante qui dépend de la corde. La fréquence du fondamental est donc $f_0 = D$, celle du premier harmonique $f_1 = 2D$, celle du second, $f_2 = 3D$, etc. La constante D s'exprime à partir de la vitesse *v* de propagation des vibrations dans la corde (elle est d'autant plus élevée que la corde est tendue et/ou fine) et de la longueur L de la corde à travers la formule $D = v/(2L)$. Ainsi, lorsqu'on augmente la tension de la corde – et donc *v* –, on augmente la fréquence du fondamental et de ses harmoniques. Si cette corde est une corde de piano par exemple, le son produit sera donc plus aigu. En revanche, si on a une corde plus longue, les fréquences sont plus petites et le son produit est plus grave. Ainsi même sans voir la corde, en identifiant ses fréquences de vibration, nous sommes capable de trouver D et donc certaines des caractéristiques de la corde.

De façon très similaire, si on considère maintenant un tuyau (par exemple d'orgue), l'air qu'il contient va pouvoir vibrer sous l'effet des forces de pression : il s'agit d'onde acoustique. De la même manière, ces oscillations vont se faire selon les modes du tuyau, encore une fois caractérisés par le nombre de nœuds *n*. Sur la figure 1b, on a représenté les trois premiers modes acoustiques (n = 0, 1 et 2) d'un tuyau fermé à une extrémité et ouvert à l'autre : les zones blanches sont des nœuds de pression (la pression n'y varie pas), les zones rouges et bleues sont des ventres, alternativement comprimés et dilatés. Par rapport à l'exemple précédent, la force à l'origine de l'oscillation change, mais le principe reste le même. Les fréquences d'oscillation des modes s'expriment alors sous la forme $f_n = D\,(n + 1/2)$ avec $D = c/(2L)$ où L est la longueur du tube et c la vitesse du son dans l'air. Cette fois encore, en identifiant les fréquences de vibration du tuyau, on est capable de remonter à la quantité D.

Les oscillations des étoiles

Le principe est exactement le même lorsqu'on étudie les oscillations des étoiles. On va distinguer deux types de mode d'oscillation selon la force de rappel en œuvre. Nous avons tout d'abord les modes acoustiques ou de pression (ou *modes p*) dont la force de rappel est la force de pression : il s'agit du même genre d'ondes que celles que nous venons de voir dans un tuyau. Nous avons ensuite les modes de gravité (ou *modes g*) dont la force de rappel est la combinaison des forces d'Archimède et de gravité. La nature de ces ondes est très proche de celles à l'origine des ronds se propageant à la surface de l'eau.

Les modes, aussi bien p que g, vont aussi être caractérisés par leur nombre de nœuds. À la différence de la corde ou du tube qui peuvent être considérés comme des objets à une dimension, les étoiles sont des objets à trois dimensions et il va falloir trois entiers pour caractériser un mode : l'ordre radial *n*, le degré *l*, et l'ordre azimutal *m*. Le premier, *n*, compte le nombre de nœuds le long d'un rayon, le second, *l*, compte le nombre de lignes de nœuds à la surface et *m* le nombre de ces lignes qui passent par les pôles. Pour illustrer cela, un mode p du Soleil est représenté à la figure 1c : il s'agit du mode caractérisé par le triplet d'entiers (n = 14, l = 20, m = 16). En effet, on compte 14 nœuds du centre à la surface (n = 14), 20 lignes de nœuds à la surface (l = 20) dont 16 sont des méridiens (m = 16) et 4 sont des parallèles. Les lignes de nœuds parallèles à l'équateur sont fixes, en revanche les lignes de nœuds méridiennes se déplacent : un mode peut se propager dans le même sens que la rotation, ou dans le sens inverse ; dans le premier cas on donnera par convention un signe négatif à *m*, et un signe positif dans le second cas. Ainsi l'ordre azimutal *m* est un entier compris entre -*l* et *l*.



a. *Schéma représentant les premiers modes d'oscillation d'une corde. Les zones grisées correspondent à la zone d'excursion de la corde pendant l'oscillation.*

b. *Schéma représentant les premiers modes d'oscillation d'un tuyau rempli d'air. La pression ne varie pas au niveau des traits blancs, quand les zones bleues se dilatent les zones rouges sont comprimées, et vice-versa..*

c. *Schéma d'un mode p du Soleil, représenté à la fois à l'intérieur et à la surface du soleil. Les lignes de nœuds sont indiquées en jaune.*

Fig.1. *Quelques modes d'oscillation d'une corde, d'un tuyau et du Soleil*

On peut faire un calcul approché des fréquences des modes d'une étoile. On obtient alors des relations très similaires à celles trouvées pour la corde et le tuyau. Pour un mode p, la fréquence d'un mode dépend de l et n et vaut $f_{n,l} \approx \Delta\ (n + l/2 + \varepsilon)$ où ε est une constante voisine de l'unité et Δ, appelé *grande séparation*, dépend du rayon de l'étoile et la vitesse du son à l'intérieur de celle-ci (encore une fois, notons l'analogie forte avec les instruments de musique). Il est important de noter que la vitesse du son, dépendant de la température, varie fortement dans l'étoile entre le cœur et la surface. On peut montrer que Δ varie comme la racine carrée de la masse volumique moyenne de l'étoile, ρ. Mesurer Δ permet donc de mesurer ρ !

Pour les modes g, il existe une relation similaire, mais elles concernent les périodes, et non les fréquences. Les modes g ont donc un espacement quasiment constant en période, P_0, qui dépend de la structure des zones radiatives. Nous en reparlerons à la fin de cet article.
On remarque que ces relations ne font pas intervenir m. Ainsi tous les modes ayant les mêmes valeurs pour n et l, mais des valeurs pour m différentes ont la même fréquence $f_{n,l}$. Ceci serait vrai si les étoiles ne tournaient pas. Sous l'effet de la rotation, les fréquences des modes vont être très légèrement modifiées d'autant plus que $|m|$ est grand et que la rotation est rapide. Cette propriété des modes nous permet de mesurer la rotation interne des étoiles.

Les approximations pour les fréquences données précédemment sont très utiles pour avoir une vision globale d'une étoile, mais on va beaucoup apprendre sur sa structure interne en calculant précisément les fréquences de ses modes.
On remarque sur la figure c que pour un mode donné, certaines régions de l'étoile n'oscillent quasiment pas. Par exemple, pour le mode p (n = 14, l = 20, m = 16) montré, la région la plus interne n'oscille pas (ou peu). On parle de *cavité* pour décrire la zone où un mode se propage. Ainsi, pour les modes p, plus le degré l est faible, plus le mode rentre profondément dans l'étoile. Les modes de plus bas degré, les modes l = 0, dits modes *radiaux*, pénètrent jusqu'au cœur de l'étoile ; à l'inverse, les modes de haut degré, ne vont explorer que les régions les plus superficielles des étoiles. Les modes g, eux, ont la particularité de ne pas se propager dans les régions convectives. Ainsi, dans le Soleil (ou toute autre étoile similaire), les modes g sont confinés dans la région radiative et ont des amplitudes extrêmement faibles en surface (on dit qu'ils sont *évanescents*). Du fait de ces faibles amplitudes, la détection des modes g solaires reste aujourd'hui un sujet controversé.

Chaque mode est ainsi sensible à ce qui se passe dans la cavité qu'il explore et sa fréquence en dépend directement. Un des buts de la sismologie va être de comparer les fréquences observées des modes à des prédictions théoriques et d'interpréter les écarts. En effet, puisque chaque mode possède une cavité légèrement différente, on va être capable de localiser l'origine de ces écarts en constatant qu'un mode est plus affecté qu'un autre.

Pourquoi les étoiles oscillent-elles ?

Dans la section précédente, nous avons décrit comment les étoiles oscillent, il nous reste à comprendre pourquoi. On peut distinguer deux catégories d'étoiles. La première catégorie est celle des étoiles pulsantes. Dans ce cas, l'étoile se met naturellement à osciller selon certains modes spécifiques qui sont instables et les oscillations s'auto-entretiennent. C'est le cas par exemple des céphéides et de nombreuses classes d'étoiles pulsantes comme les δ Scuti, ou les β Cephei. Dans des étoiles comme le Soleil, tous les modes sont stables et les oscillations devraient s'amortirent très rapidement. Ces étoiles sont comme d'immenses tambours : sans musicien, ils ne peuvent vibrer. Or, on observe des oscillations. Pour expliquer cela, il faut trouver un mécanisme qui joue le rôle de musicien et excite en permanence les modes. Le coupable est la convection. En effet, le Soleil a une zone convective externe. Les grands mouvements de matière qui l'agitent agissent comme la pluie qui tombe sur la peau d'un tambour.

Ce mécanisme est à l'œuvre dans toutes les étoiles avec une enveloppe convective, c'est-à-dire les étoiles assez « froides » comme le Soleil, qu'elles soient naines ou géantes. On parle alors d'*oscillations de type solaire*.

Ce phénomène excite tous les modes qui ont une fréquence proche d'une fréquence f_{max} qui dépend des propriétés de la convection. On peut montrer que f_{max} dépend de l'intensité de la gravité g à la surface de l'étoile.
En mesurant à la fois f_{max} et la grande séparation Δ on peut déterminer ρ et g et, en les combinant, on mesure la masse et le rayon d'une étoile très précisément (à quelques pourcents).

Observer les oscillations

Nous pouvons observer les oscillations des étoiles de deux manières. On peut tout d'abord mesurer les vitesses des déplacements induits par les oscillations à la surface des étoiles en utilisant l'effet Doppler-Fizeau. On peut également mesurer les oscillations en observant la luminosité des étoiles. En effet, lorsqu'une région à la surface se comprime, elle se réchauffe et devient plus lumineuse, et lorsqu'elle se dilate, elle se refroidit et sa luminosité baisse.

À ce stade, il nous faut mentionner une différence notable entre le Soleil et les autres étoiles : on peut résoudre la surface du Soleil et donc en faire des images, alors que la surface des autres étoiles est réduite à un seul point dans lequel est moyennée toute leur surface[1]. Cela a pour conséquence de rendre invisibles les modes de degré l trop élevé. Si le mode est radial (l = 0), toute la surface devient plus lumineuse ou plus sombre en même temps, l'oscillation est parfaitement visible. Si le mode possède une seule ligne de nœud à la surface (l = 1), à chaque moment, une partie de la surface visible de l'étoile devient plus lumineuse et l'autre plus sombre, mais, sauf configuration particulière, les deux parties ne recouvrent pas la même proportion du disque visible, et il y a un résidu à la somme des contributions. En revanche, si un mode a beaucoup de lignes de nœuds en surface, les régions visibles qui contribuent à augmenter la luminosité de l'étoile vont être compensées par celles qui, au contraire, diminuent la luminosité. En pratique, on n'observe que des modes de degré l = 0, 1, 2 et parfois 3.

Pour mener des études sismiques, il faut être capable de mesurer des oscillations souvent de très faibles amplitudes et pouvoir déterminer très précisément les fréquences d'oscillation. Pour obtenir une précision suffisante sur les fréquences, il faut observer longtemps et continûment les étoiles : idéalement des semaines, des mois ou des années. Pour s'affranchir de l'alternance jour/nuit qui détériore grandement les observations il existe 3 possibilités : observer depuis l'Antarctique pendant l'hiver austral (cela a été fait pour le Soleil pendant l'été austral 1979), installer autour du globe un réseau d'instruments qui se relaient en continu, ou effectuer les observations depuis l'espace.

[1] Il existe en fait des techniques de spectroimagerie qui dépassent de loin le cadre de cet article.

La révolution CoRoT et Kepler

La force des diagnostics sismiques ayant été prouvée sur le Soleil, on a naturellement cherché à sonder d'autres étoiles. Faute de pouvoir être exhaustif sur les observations des diverses classes d'étoiles oscillantes, nous allons nous concentrer sur l'étude des oscillations de type solaire qui ont fourni des résultats marquants ces dernières années. Les premières observations non controversées d'oscillations de type solaire – hormis celles du Soleil – ont été faites en 2000, depuis le sol, sur l'étoile α Centauri A. Mais la véritable révolution est arrivée avec les satellites européen CoRoT (Convection, Rotation et Transits planétaires) et américain Kepler, lancés respectivement en 2006 et 2009. Ces deux instruments ont permis d'observer très précisément les fluctuations de luminosité de dizaines de milliers d'étoiles, pendant plusieurs mois consécutifs, voire plusieurs années pour Kepler.

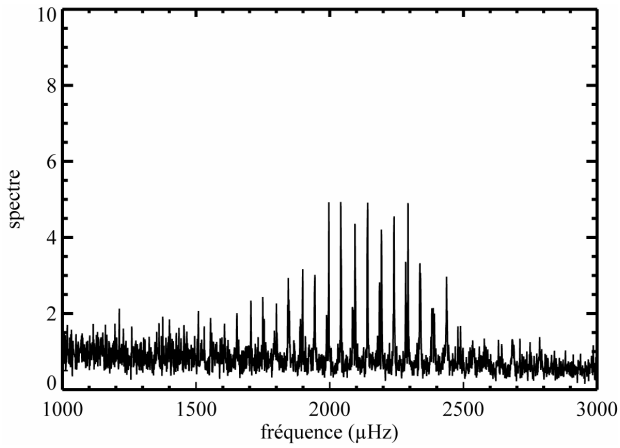


Fig.2. *Spectre d'une étoile de type solaire observé par CoRoT.*

Une étoile observée par CoRoT est représentée figure 2. Il s'agit de l'analyse spectrale des fluctuations de luminosité mesurées pendant 120 jours. Les pics correspondent à des modes. On voit alternativement des modes p l = 0 et l = 1 (les modes l = 2 sont très proches des modes l = 0, et ne sont pas discernables à cette échelle). On reconnaît une structure en peigne due à la formule $f_{n,l} \approx \Delta\,(n + l/2 + \varepsilon)$. L'écart moyen entre les pics vaut donc $\Delta/2$. Sur cet exemple, on mesure une grande séparation Δ = 98 μHz. On constate également que les modes visibles ont des fréquences autour de f_{max} = 2090 μHz. À l'aide de quelques relations simples, nous en déduisons que cette étoile est 20 % plus massive que le Soleil pour un rayon 30 % plus grand. Outre ces quantités, l'étude détaillée des fréquences – même limitée à celles de modes de bas degrés – nous permet de déterminer la profondeur de l'enveloppe convective,

l'abondance en hélium et la vitesse de rotation interne moyenne. La sismologie nous permet également de voir si une étoile possède un cœur convectif ou non. En effet, les modèles nous montrent que pour les étoiles un peu plus massives que le Soleil, un cœur convectif se développe. La sismologie permet d'affiner les modèles en mesurant la taille du cœur convectif quand il existe.

Pour terminer, il nous faut évoquer un des plus grands succès de la sismologie moderne et une des plus grandes surprises : la sismologie des géantes rouges. Lorsque les étoiles ont épuisé leur réserve d'hydrogène dans leur cœur, elles évoluent pour devenir des géantes rouges : leur cœur se contracte et leur enveloppe, qui est ou devient convective, se dilate. Ces étoiles présentent donc des oscillations de type solaire. Mais il existe une petite différence. Dans une étoile naine comme le Soleil, nous l'avons déjà mentionné, les modes p ont des périodes de quelques minutes. En revanche, les modes g, piégés dans la région radiative, invisibles à la surface, ont des périodes de plusieurs heures. Quand une étoile évolue pour devenir géante rouge, les fréquences des modes p diminuent de plus en plus alors que celles des modes g augmentent. Ainsi, dans les géantes, les modes p et g ne sont pas dans des régimes séparés mais cohabitent aux mêmes fréquences. Cela a une conséquence notable : certains modes d'oscillation ne sont plus de simples modes p ou g mais sont des modes *mixtes* présentant des caractéristiques des deux familles de modes. Ils sont donc visibles en surface (comme les modes p) et très sensibles à l'intérieur radiatif (comme les modes g).

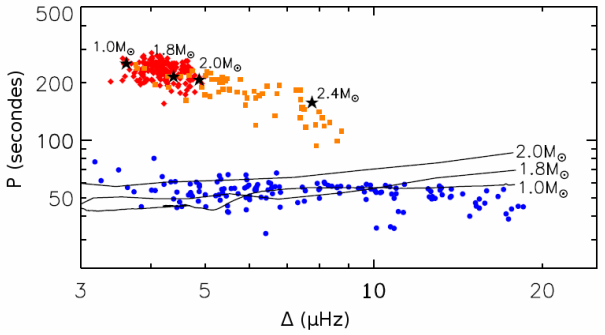


Fig.3. *Espacement en période des modes g en fonction de la grande séparation des modes p pour des étoiles géantes rouges. On distingue nettement deux types de géantes (points bleus et points rouges/oranges). Les lignes et étoiles noires sont des modèles (d'après T. Bedding).*

En étudiant les modes des géantes rouges avec Kepler, il a été possible en 2011 de mesurer à la fois les grandes séparations Δ des modes p et les espacements en période P_0 des modes g. La figure montre les résultats pour une centaine d'étoiles. Deux familles de géantes apparaissent : un groupe d'étoiles avec $P_0 \approx 50$ s et un second pour lesquelles $P_0 \approx 200$ s. Le premier correspond aux géantes dont le cœur d'hélium continue à s'effondrer sur lui-même. Le second groupe correspond à des géantes plus évoluées dans lesquelles le cœur d'hélium est devenu suffisamment chaud et dense pour que la fusion de l'hélium en éléments plus lourds soit possible.
Ces mesures sismiques permettent donc clairement de voir si la fusion de l'hélium a commencé dans une géante, chose impossible avec les observations usuelles.

L'étude des modes mixtes dans les étoiles géantes permet également de mesurer la rotation de leur cœur. Puisque le cœur se contracte, par conservation du moment cinétique, il accélère (comme le patineur qui accélère sa rotation en rapprochant les bras de son corps), alors que l'enveloppe, se dilatant, ralentit. Des études sismiques récentes (en 2012 et 2013) ont donné des résultats surprenants. En effet, le cœur des géantes tourne plus vite que leur enveloppe ; mais il tourne beaucoup plus lentement que prévu, des centaines de fois plus lentement que toutes les théories actuelles ne le prédisent ! On se doutait que les théories pour décrire l'évolution de la rotation interne des étoiles étaient incomplètes, preuve en est faite. Les théoriciens cherchent donc aujourd'hui les mécanismes qui pourraient être capables d'extraire et évacuer efficacement une partie du moment cinétique depuis le cœur vers l'extérieur.
Cette question est devenue une question clé pour comprendre l'évolution des étoiles. En effet, la rotation peut induire du mélange dans les étoiles et ainsi transporter des éléments (hydrogène, hélium...) d'une région où ils ne fusionnent pas à une zone où ils peuvent fusionner, ce qui peut modifier notablement l'évolution des étoiles.

L'astérosismologie a connu un véritable essor avec l'avènement de CoRoT puis de Kepler. Les résultats obtenus sur les géantes rouges apportent des contraintes observationnelles qui font progresser notre compréhension de l'évolution stellaire. Dans les années 20, Sir Arthur Eddington se demandait quel instrument allait permettre de voir l'intérieur des étoiles. Cet instrument, nous l'avons aujourd'hui : c'est la sismologie. Pour lever le voile, il suffit de regarder la musique des étoiles. ■

LE COIN DES PETITS CURIEUX

Les étoiles sont-elles loin ?

ALEXIS – À l'école, la maîtresse a demandé si le Soleil était une planète. J'ai répondu que c'était une étoile. Heureusement que tu m'en avais parlé l'autre fois.

ÉMILIE – Tu t'es souvenu de tout ?

ALEXIS – Presque ! Mais tu sais dans la classe, il y a des élèves qui veulent toujours tout savoir.

ÉMILIE – C'est bien d'être curieux.

ALEXIS – Oui, mais des fois c'est énervant. Ils m'ont dit « et c'est quoi une étoile ? »

ÉMILIE – Mais je te l'ai déjà expliqué quand nous avons parlé du Soleil.

ALEXIS – Oui, mais ils ont aussi demandé si elles étaient loin de nous. Je n'ai pas trop su.

ÉMILIE – Est-ce que tu as déjà vu des étoiles ?

ALEXIS – Eh bien oui ! Il y en a plein dans le ciel.

ÉMILIE – Est-ce qu'elles sont toutes à la même distance ?

ALEXIS – Non, le Soleil est près de nous, mais les autres sont peut-être à la même distance.

ÉMILIE – C'est vrai qu'on a l'impression que toutes les étoiles que l'on voit à l'œil nu sont à la même distance.

ALEXIS – J'avais raison !

ÉMILIE – Et non, certaines sont très éloignées et d'autres sont plus proches du Soleil.

ALEXIS – Oui, les plus brillantes.

ÉMILIE – Les plus brillantes sont soit proches de nous, soit loin mais très lumineuses.

ALEXIS – Il y en a donc qui sont proches du Soleil.

ÉMILIE – Dans l'univers, proche ne veut pas dire à côté. La distance de la Terre au Soleil est déjà très grande : cent cinquante millions de kilomètres. Eh bien l'étoile la plus proche est, environ, 270 000 fois plus loin. Tu imagines ?

ALEXIS – Non.

ÉMILIE – Si le Soleil était une petite bille placée à un mètre de la Terre, l'étoile la plus proche serait une autre bille placée à 270 km !

ALEXIS – Que c'est loin ! Et comment s'appelle-t-elle ?

ÉMILIE – C'est Proxima du Centaure. Oui, mais c'est la plus proche. Connais-tu la constellation de Cassiopée ?

ALEXIS – Oui, c'est le W.

ÉMILIE – Dans cette constellation, il y a une étoile que l'on appelle rhô Cassiopée qui est 2 000 fois plus loin que Proxima du Centaure. Tu te rends compte, si le Soleil est une bille placée à un mètre de la Terre, cette étoile serait plus loin que la Lune.

ALEXIS – Oui, mais celle-ci n'est pas visible.

ÉMILIE – Si ! Elle est visible à l'œil nu.

ALEXIS – Comment cela est-il possible ? Si le Soleil est une bille, je ne pourrais pas en voir une autre si elle était plus loin que la Lune.

ÉMILIE – Mais cette étoile est un million de fois plus lumineuse que le Soleil et son diamètre est environ 450 fois celui du Soleil.

ALEXIS – Ouah ! Si le Soleil est une bille de un centimètre, cette étoile ferait 450 cm de diamètre !

ÉMILIE – Oui, une boule de 4,5 mètres.

ALEXIS – Je ne savais pas qu'il y avait des étoiles beaucoup plus grosses que le Soleil.

ÉMILIE – Tout à l'heure je te donnerai l'adresse d'un site où tu pourras voir la comparaison des tailles des planètes et aussi de certaines étoiles.

ALEXIS – ah ! Oui, je veux bien. Cette étoile de Cassiopée doit être très brillante dans le ciel ?

ÉMILIE – Non, elle est bien moins brillante que les principales étoiles de la Grande Ourse.

ALEXIS – Comment ça se fait puisqu'elle brille un million de fois plus que le Soleil ?

ÉMILIE – La nuit, avec une lampe de poche placée devant tes yeux, est-ce que je peux t'éblouir ?

ALEXIS – Eh bien oui !

ÉMILIE – Et si je remplace la lampe de poche par les phares d'une voiture ?

ALEXIS – C'est aveuglant.

ÉMILIE – Et si la voiture est à un kilomètre ?

ALEXIS – Dans ce cas ce n'est pas gênant.

ÉMILIE – C'est la même chose avec rhô Cassiopée, elle brille beaucoup, mais elle est très loin. Les étoiles de la Grande Ourse sont moins lumineuses, mais sont plus proches de nous.

ALEXIS – OK, j'ai compris. N'oublie pas de me donner l'adresse

ÉMILIE – La voici ci-dessous. Et à bientôt !

Jean Ripert ■

http://www.dailymotion.com/video/x3llx1_l-echelle-des-etoiles-et-planetes_travel

HISTOIRE

Les étoiles doubles : curiosités célestes puis clefs d'accès à la connaissance de (certaines) masses stellaires

Edgar Soulié, président de la commission des étoiles doubles de la SAF, *edgar.soulie@cea.fr*

L'article ci-dessous décrit l'historique de la découverte puis de l'étude des étoiles doubles. Il précise ce qui distingue un « couple visuel » d'un « couple physique » puis plus tardivement d'un « couple spectroscopique ». En étudiant la trajectoire des deux étoiles et leur distance on peut en déduire la somme de leur masse par application les lois de la gravitation de Newton. Dans les cas des étoiles doubles à éclipses une étude fine des variations de flux lumineux permet parfois d'accéder aux rayons et aux masses de ces étoiles.

Les étoiles doubles du ciel sont-elles fixes ou bougent-elles les unes par rapport aux autres ? Puisque les constellations inventées par les astronomes - astrologues de l'Antiquité restaient apparemment inchangées depuis des siècles, les mouvements relatifs éventuels des étoiles devaient être très petits. Aucun moyen connu ne permettait de déterminer les distances des étoiles. La seule mesure possible était celle des angles entre les directions des étoiles sur la voûte céleste. Pour répondre à la question posée des mouvements relatifs, il fallait concevoir une observation qui permettrait de mesurer une très petite variation de l'angle entre les directions de deux étoiles.

Galilée proposa que cette variation fût recherchée pour deux étoiles dont les directions sont très voisines. Leur ensemble constitue une « étoile double » (une expression créée par le Grec Claude Ptolémée au IIe siècle après J.-C.) et les deux étoiles sont appelées ses « composantes ». Lorsqu'une composante est plus brillante que l'autre, on l'appelle la composante principale et l'autre est appelée « le compagnon ». La mise en évidence d'une variation minime serait un peu moins difficile sur un angle très petit. Au cours des XVIIe et XVIIIe siècles, des astronomes découvrirent des étoiles doubles et d'autres astronomes cataloguèrent les étoiles doubles connues, qui apparaissaient comme des « curiosités célestes ».

De 1778 à 1803, le Britannique William Herschel (1738-1822), musicien à la chapelle de Bath et astronome amateur, mit en œuvre la suggestion de Galilée ; avec sa sœur Caroline, il observa des étoiles doubles de façon répétée pour déceler des mouvements relatifs de leurs composantes. Après un quart de siècle au cours duquel il avait fait des mesures des mêmes couples stellaires, il fut certain d'avoir observé deux comportements différents selon l'étoile double observée :

1. Le mouvement rectiligne d'une composante par rapport à l'autre. Les deux étoiles sont indépendantes l'une de l'autre et situées à des distances très différentes de la Terre. De nos jours, ces étoiles doubles sont appelées « couples optiques ».
2. Pour certaines étoiles doubles, chaque composante a, par rapport à l'autre, une trajectoire incurvée ; la concavité de cette trajectoire est tournée vers l'autre composante.

William Herschel fut étonné par ce second comportement et l'attribua à l'attraction que chacune des deux composantes de l'étoile double exerce sur l'autre. En cela, il suivait la théorie de l'attraction universelle qu'Isaac Newton (1687) avait élaborée pour expliquer d'une part les mouvements de la Terre et des autres planètes connues autour du Soleil, d'autre part le mouvement de la Lune autour de la Terre. Pour que l'attraction gravitationnelle s'exerce de façon significative entre les deux composantes de l'étoile double, il faut que celles-ci soient relativement proches l'une de l'autre, donc pratiquement à la même distance de la Terre ; elles constituent un couple physique.

Les observations successives de la position relative d'une composante d'un couple physique par rapport à l'autre devraient permettre de déterminer l'orbite de l'étoile double, c'est-à-dire les sept paramètres qui définissent la trajectoire elliptique d'une composante autour de l'autre. Parmi ces paramètres, deux contribuent à la détermination de la somme des masses M_1 et M_2 des deux étoiles : la période de révolution P, qui est le temps que chaque composante met à faire (apparemment) un tour

autour de l'autre et le demi-grand axe A de l'ellipse. Si l'on prend pour unité de temps l'année, pour unité de longueur le demi-grand axe de l'orbite que la Terre décrit autour du Soleil et pour unité de masse la masse du Soleil, la somme des masses des composantes est égale au rapport du cube du demi-grand axe au carré de la période de révolution :
$M_1 + M_2 = A^3 / P^2$.

Cette relation est une conséquence mathématique de la loi de l'attraction universelle ; elle est aussi une généralisation de la troisième loi découverte par l'astronome Johannes Kepler.
Dans un article publié en 1803, William Herschel exposa sa découverte qui créait un nouveau domaine de l'astronomie. Les mesures répétées d'une étoile double connue de la catégorie « couple physique » pourraient à terme déboucher sur la détermination de la somme des masses. Mais la détermination de la masse (analogue pour les étoiles à la pesée d'un petit objet posé sur l'un des plateaux d'une balance) ne serait possible que pour les étoiles doubles et non pour les étoiles simples. Et elle exigerait des efforts considérables, portant d'une part sur la détermination des orbites et d'autre part sur la mesure de la distance des étoiles doubles. Il faudrait des mesures répétées au cours du temps, faites lorsque l'agitation atmosphérique est assez faible pour que l'observateur voit les deux composantes séparées et puisse les mesurer.
Sur six à sept générations, dans différents pays, des astronomes ont consacré leurs vies aux mesures des étoiles doubles, plus précisément à la mesure de la position relative d'une composante par rapport à l'autre.

Persévérant et talentueux, Friedrich Wilhelm Struve entreprit méthodiquement la recherche de nouvelles étoiles doubles et la mesure des étoiles doubles connues. Pour mener à bien son programme, il demanda et obtint du recteur de l'Université de Dorpat (aujourd'hui Tartu en Estonie) les crédits nécessaires à l'achat d'une lunette astronomique dotée à la fois d'une excellente optique et d'une excellente mécanique adaptée au suivi des étoiles sur le ciel. Dans les deux années qui suivirent la mise en service de la lunette de 24 cm d'ouverture (diamètre de l'objectif par lequel la lumière passe avant d'atteindre l'oculaire) installée à Dorpat, Wilhelm Struve découvrit et observa environ trois mille étoiles doubles. La publication (en latin) de son catalogue d'étoiles doubles en 1827 lui valut la notoriété. Une décennie plus tard, le tsar de Russie Nicolas Ier (1825-1855) lui proposa de créer un observatoire astronomique à Poulkovo près de Saint-Pétersbourg ; cet observatoire fut équipé d'une lunette astronomique de 38 cm d'ouverture, la plus grande de son temps. L'œuvre de Wilhelm Struve fut poursuivie par son fils Otto. En 1827 aussi, le Français Félix Savary calcula la première orbite d'une étoile double, sans qu'il fût possible de déterminer une masse, parce que les distances des étoiles restaient inconnues. Dans l'hémisphère austral, John Herschel, fils de William, découvrit et mesura d'autres étoiles doubles. Une compétition s'instaura entre des observatoires pour la possession et l'utilisation d'une lunette ayant l'objectif de la plus grande ouverture. Cette compétition fut favorable à la découverte du compagnon jusqu'alors invisible de l'étoile Sirius par l'opticien américain Alvan Clark avec un objectif de 62 cm d'ouverture. En 1897, la plus grande lunette fut construite et installée à Yerkes au bord du lac Geneva dans l'état américain du Wisconsin. Des astronomes réputés du XXe siècle, notamment Aitken, Van Biesbroeck et van den Bos y firent de nombreuses mesures. Cependant, le nombre des orbites d'étoiles doubles calculées progressa lentement. En effet, il fallait qu'une étoile double ait parcouru une fraction significative de son orbite avant qu'un calcul fût entrepris. Or les « périodes de révolution » des couples découverts par Struve atteignent ou dépassent un siècle. En utilisant le fait que la direction d'une étoile « proche » change très légèrement au cours de l'année parce que la Terre se déplace autour du Soleil, Friedrich Bessel fit la première détermi-nation de distance d'une étoile. Les premières masses stellaires furent déterminées.

De nos jours, une orbite et la somme des masses des composantes ont été déterminées pour environ mille six cents étoiles doubles. Ce nombre est dérisoire par rapport à celui des étoiles doubles répertoriées, environ cent quarante mille car : (i) de nombreuses étoiles doubles sont des « couples optiques » ; (ii) des « couples physiques » ont des périodes de révolution qui se comptent en siècles ou en millénaires ; (iii) de nombreuses étoiles doubles ont de faibles luminosités. La découverte et la mesure des étoiles doubles très serrées paraissaient indiquées pour déterminer des orbites avec un délai moins long que précédemment. À la fin du XIXe siècle, une autre catégorie d'étoiles doubles fut découverte : les étoiles doubles spectroscopiques, qui produisent des spectres prouvant la présence de deux étoiles, produisant chacune un spectre, bien que ces étoiles apparaissent simples à l'oculaire d'une lunette ou d'un télescope. Les deux spectres se déplacent périodiquement l'un par rapport à l'autre et par rapport à un spectre de référence

obtenu au laboratoire. Ce déplacement du spectre au cours du temps résulte de la variation de l'effet Doppler-Fizeau, un éloignement ou rapprochement d'une composante de l'observateur, de façon périodique. Dans les années 1970, le Français Antoine Labeyrie mit au point une technique optique raffinée et délicate, l'interférométrie des tavelures, qui permit alors la mesure de couples physiques dont les composantes n'étaient pas séparées à l'œil même avec un grand télescope. Un nombre significatif d'étoiles doubles furent alors détectées à la fois comme « visuelles » par interférométrie et comme spectroscopiques. Il devint alors possible de déterminer les masses individuelles des étoiles.

Il existe encore la catégorie des étoiles doubles à éclipses, qui sont observées par la photométrie ou mesure précise du flux lumineux reçu par un télescope. L'étude précise de la variation temporelle du flux lumineux reçu permet assez souvent de déterminer les rayons et les masses stellaires et parfois de mettre en évidence la déformation d'une étoile sous l'influence gravitationnelle de l'autre étoile du couple.

Bibliographie :

« L'observation des étoiles doubles visuelles » par Paul COUTEAU, Éditions Flammarion, Paris, 1978.

« Ces astronomes fous du ciel ou l'histoire de l'observation des étoiles doubles » par Paul COUTEAU, Édisud, Aix-en-Provence, 1988 (épuisé ; une réédition est en préparation).

« Les étoiles doubles » par Pierre DURAND, chapitre XII du Guide de l'Observateur, publié sous la direction de Patrick MARTINEZ, ADAGIO, 1987.

« Les étoiles doubles spectroscopiques » par Charles FEHRENBACH dans le volume Astronomie, Encyclopédie de la Pléiade, Éditions Gallimard, Paris, 1962 (épuisé).

« Doppelsterne » par Wullf Dieter HEINTZ, Goldmann Verlag, Munich, 1971.

« Double stars » par Wullf Dieter HEINTZ, Reidel, Dordrecht, 1978.

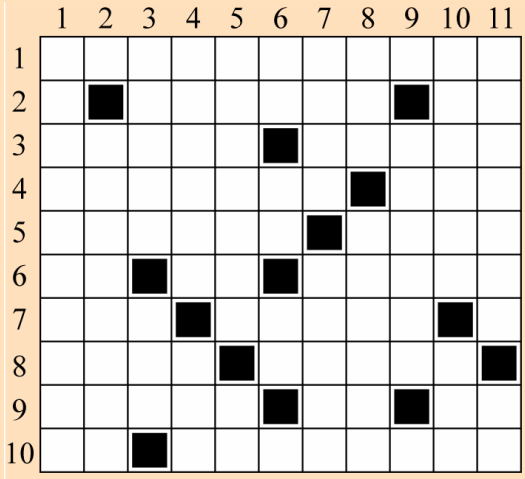
Nombreux articles publiés sur les étoiles doubles dans les revues « L'Astronomie » et « Observations & Travaux » de la Société Astronomique de France.
Site Internet de la Commission des Étoiles Doubles : http://saf.etoilesdoubles.free.fr

■

Mots croisés les étoiles

Horizontalement

1. Bételgeuse ou Rigel.
2. Soleil. Émis par certaines binaires.
3. On y a cherché l'aplatissement de la Terre. Balance.
4. Se voit avec Algol. Étoile.
5. Remet en poste. Il devrait voir les toutes premières étoiles.
6. Au cœur du CNRS. Dans Céphée ou Cassiopée. Étudie des populations pas toujours très stellaires.
7. Proche de l'ellipsoïde. Un peu plus de 18 ans.
8. Étoile. Abrite des galaxies.
9. Étoile. Complément du New General Catalogue. Nombre de satellites naturels de la Terre.
10. Direction du lever de Fomalhaut. Abrite l'étoile la plus proche.

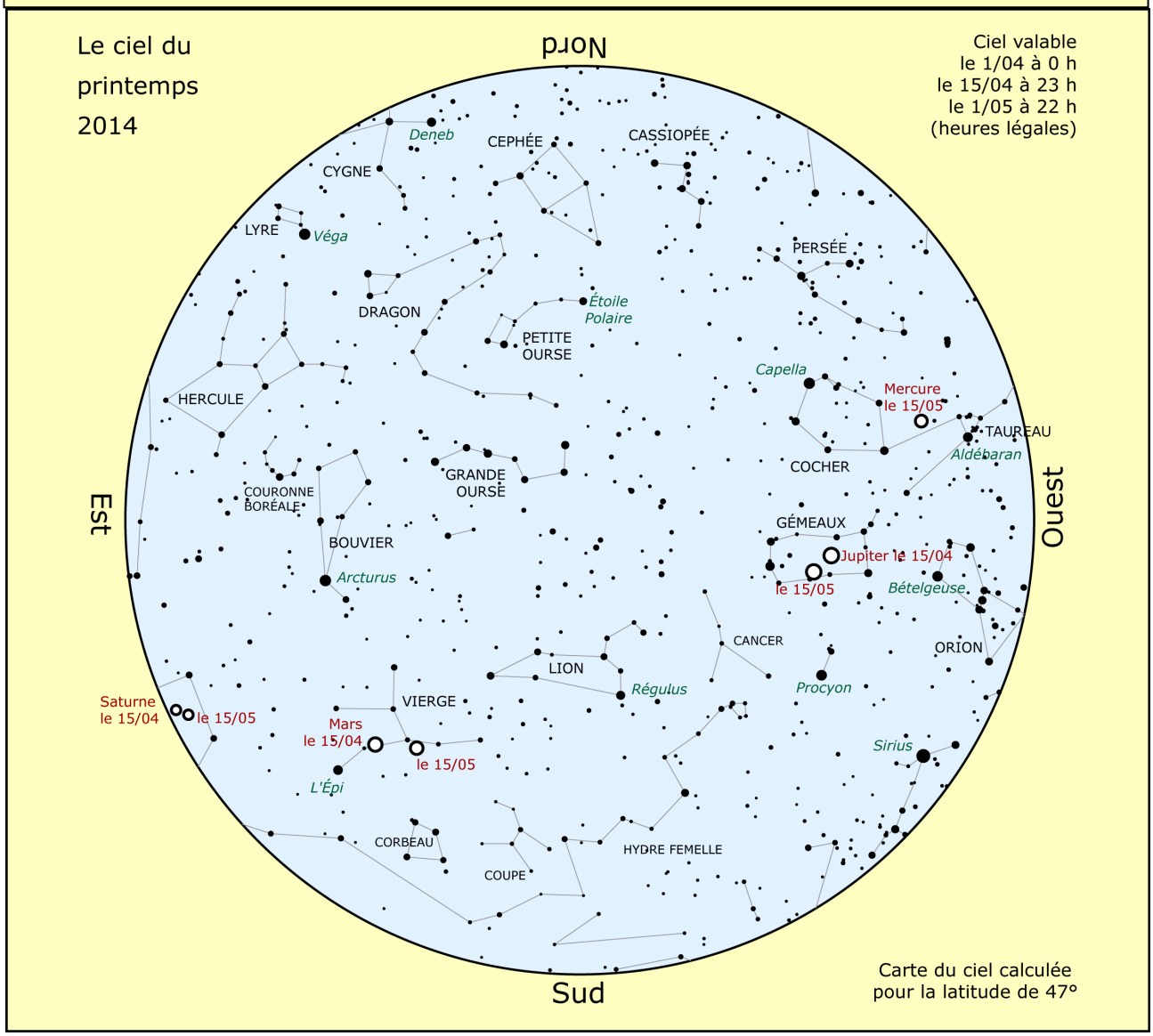


Verticalement

1. Fins d'étoiles.
2. Tel Épiméthée.
3. Étoile de la Couronne. Se sert au breakfast.
4. Siège de réactions de fusion. On sait d'où il vient.
5. Blés indiens. Article.
6. Il n'a pas débarqué sur la Lune. Sur le calendrier. Précède Nice sur un des sites du CLEA.
7. Prénom. Siérait.
8. Elle aime la fusion. Émit.
9. Comme Vénus.
10. Comme l'étoile Polaire. Certain.
11. Tels les atomes d'une étoile. Négation.

Réponses page 37

Le ciel du printemps 2014



Visibilité des planètes

On peut trouver **Mercure** la deuxième quinzaine de mai et début juin, dans le ciel du soir à l'ouest.

Vénus est encore bien visible le matin surtout au début du printemps. Au télescope, elle apparaît en quartier fin mars puis gibbeuse.

Mars est à l'opposition le 8 avril. Elle passe alors à un peu plus de 90 millions de km de la Terre. C'est la bonne période pour observer.

Jupiter continue à s'éloigner mais reste visible le soir à l'ouest tout le printemps.

Saturne passe à l'opposition le 10 mai. Son inclinaison fait que ses anneaux sont bien visibles actuellement. À observer sans modération.

Les **astéroïdes** Vesta et Cérès sont visibles dans la Vierge et passent à l'opposition en avril, comme Mars (opposition les 13 et 15/04, magnitudes 5,7 et 7).

Quelques événements (heures légales)

20/03 : équinoxe de printemps à 17 h 56.

30/03 : début de l'heure d'été (TU + 2 h). À midi solaire moyen de Greenwich, il sera 14 h en heure légale.

14/04 : Mars au plus loin de la Terre, à 92 386 500 km du centre de la Terre (6 jours après l'opposition).

15/04 : éclipse totale de Lune visible depuis le Pacifique et l'Amérique (invisible en Europe).

22/04 : maximum des Lyrides (étoiles filantes).

29/04 : éclipse de Soleil (partielle depuis l'Australie).

24/05 (matin) : une grosse tempête d'étoiles filantes est possible, due aux poussières de la comète 209P Linear.

21/06 : solstice d'été à 12 h 51.

Lune

Nouvelle Lune : les 30/03, 29/04, 28/05.

Pleine Lune : les 15/04, 14/05, 13/06.

HISTOIRE

LES CONSTELLATIONS CHINOISES

Roland Trotignon, Société Astronomique Populaire de Toulouse
Ingénieur de l'École Centrale, diplômé de l'Institut National des Langues et Civilisations Orientales

Comment l'étude d'un même ciel peut conduire à des interprétations très différentes selon les civilisations : grecque en occident ou chinoise en orient.

Une vision du ciel originale

Une des premières civilisations agricoles du monde, la Chine a développé un rapport particulier avec les phénomènes célestes. La survie même de la société dépendait de la capacité des hommes à s'adapter aux rythmes imposés par le ciel, ensoleillement, saisons… Ce n'est pas pour rien que l'Empereur fut perçu comme le « Fils du Ciel », garant de l'accord entre le ciel et la société des hommes. Cette civilisation qui s'est développée de façon relativement indépendante a gardé pendant plusieurs millénaires une vision du ciel originale. Parmi les différentes explications de la nature du ciel, la plus répandue fut la théorie du « ciel comme couvercle » (*gaitian* –盖天). La Terre, carrée et plate, était surmontée d'un ciel circulaire légèrement bombé qui reflétait les activités terrestres. Le ciel était considéré comme une véritable image de l'Empire et des régions voisines, image qu'il fallait interpréter dans l'intérêt du pouvoir impérial. La divination par le ciel était une astrologie d'état opérée par un bureau spécialisé qui rendait compte directement à l'Empereur et l'observation du ciel était donc interdite au peuple.

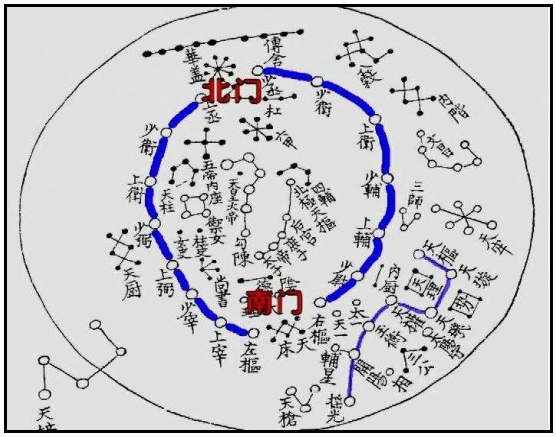
Constellations ou astérismes ?

Chaque groupe d'étoiles était lié à une activité terrestre. La multiplicité de ces activités explique pourquoi les Chinois regroupèrent les étoiles dans des constellations beaucoup plus petites et donc beaucoup plus nombreuses que les nôtres. Ces regroupements portent le nom d'astérismes. Certains astérismes ne sont même constitués que d'une seule étoile. Le catalogue ancien le plus complet (Chen Zhuo – 陈卓au 3e siècle après J.-C.) réalisé à partir de documents antérieurs de plusieurs siècles recense 1 464 étoiles regroupées en 283 astérismes. Ces regroupements d'étoiles et leur dénomination sont restés relativement stables au cours de l'Histoire. Les étoiles circumpolaires tournant inlassablement autour du pôle nord céleste étaient l'image du Palais Impérial. Il se devait de posséder tout ce qu'un Palais Impérial possède : dans une enceinte percée de deux portes, Porte du Nord et Porte du Sud, se pressaient mandarins et conseillers, ministres et lieutenants.

À l'extérieur des murs, ce sont les installations de service du Palais Impérial : cuisine, dortoirs et prison. Cet astérisme si remarquable de notre constellation de la Grande Ourse que nous appelons « chariot » était aussi interprété par les Anciens Chinois comme un char céleste tournant inlassablement dans une éternelle tournée d'inspection.

Le chariot de la Grande Ourse : char impérial ou boisseau ?

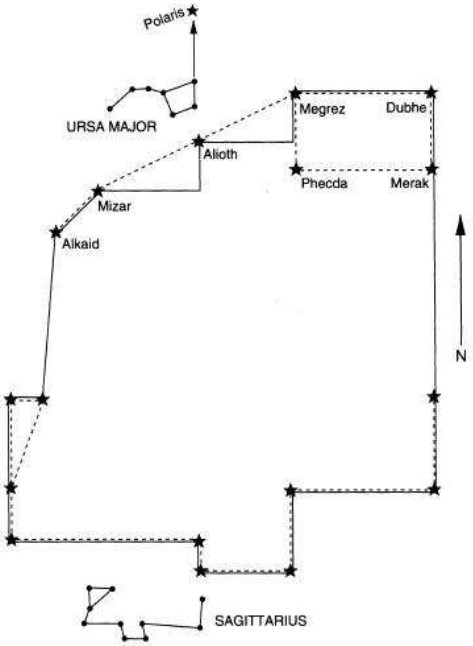
Toutes les civilisations furent impressionnées par la forme si reconnaissable de ces sept étoiles. Beaucoup d'Européens y virent une ourse et l'on sait que les Romains, grands défricheurs et grands cultivateurs, y virent sept bœufs de labour (d'où notre « *septentrion* » pour désigner le nord). Les Chinois, eux, qui comme beaucoup y voyaient un véhicule, y aperçurent aussi comme l'attestent certaines légendes un cochon, animal plus commun en Chine que le bœuf. Mais la dénomination la plus courante était le Boisseau du Nord « *Bei Dou* » (北斗). Le boisseau, instrument muni d'un manche et destiné à la mesure des céréales, était un objet très courant dont la forme est tout à fait similaire à cet astérisme.



En traits bleus gras, la muraille enserre la résidence de l'Empereur. En rouge, la Porte Nord et la Porte Sud. En traits bleus minces, à l'extérieur du Palais, le Char Impérial (le chariot de la Grande Ourse).

À la recherche de l'accord complet avec le ciel

Il y avait dans la partie du ciel que nous appelons



maintenant constellation du Sagittaire un groupement d'étoiles de forme semblable que les Chinois appelaient le Boisseau du Sud « *Nan Dou* » (南斗) et qui comprend les étoiles ζSgr, τSgr, σSgr, φSgr, λSgr et μSgr. Les deux astérismes Boisseau du Nord et Boisseau du Sud, possédaient sans doute aux yeux des anciens Chinois une telle force évocatrice qu'ils donnèrent leur forme à la muraille qui entourait la capitale de la dynastie des Han en 190 avant J.-C.

Une ancienne chronique décrit la forme des murailles dans les termes suivants : « *La muraille du nord a la forme du Boisseau du Nord et celle du sud a la forme du Boisseau du Sud. C'est pour cette raison que l'on parle de la muraille de la capitale comme de la muraille aux deux boisseaux* ». Il semble que ce soit la plus grande représentation d'une constellation jamais réalisée par l'homme.

Non seulement le ciel était le reflet de la Terre, mais l'on s'efforçait de faire en sorte que l'œuvre des hommes épouse la forme de l'œuvre du ciel.

Les grandes divisions du ciel

La région centrale autour du pôle nord céleste comprenait trois enceintes :

Enceinte du palais pourpre (*Zi wei yuan* – 紫微垣 ou *Zi gong yuan* – 紫宫垣) regroupant 37 astérismes ;

Enceinte de la subtilité suprême (*Tai wei yuan* – 太微垣) regroupant 20 astérismes ;

Enceinte du marché céleste (Tian shi yuan – 天市垣) regroupant 19 astérismes.

Ces nombreux astérismes ne comprennent parfois qu'une seule étoile.

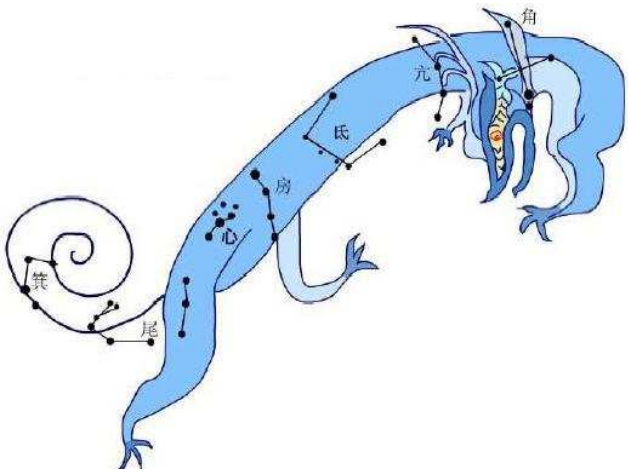
Le reste du ciel, extérieur au Palais Impérial, était divisé en 28 secteurs, les « *xiu* » (宿), terme que l'on traduit souvent par « loge lunaire » car la Lune parcourant le ciel en un mois lunaire logeait chaque jour dans un nouveau « *xiu* ». De fait, les noms de ces loges lunaires ont été utilisés à certaines époques dans le décompte des jours du mois. Les loges étaient regroupées en 4 groupes de 7 auxquels on liait symboliquement un animal mythique, une saison et un point cardinal.

Chaque loge lunaire possédait un astérisme de base qui donnait son nom à la loge ainsi qu'un nombre variable d'autres astérismes. L'astérisme de base possédait une étoile déterminatrice. Curieusement cette étoile n'était pas toujours l'étoile la plus brillante de l'astérisme ; les raisons de ce choix sont maintenant oubliées. Un autre fait curieux qui n'a pas reçu d'explication définitive est la grande inégalité entre les secteurs qui définissent ces loges lunaires.

LES 28 LOGES LUNAIRES

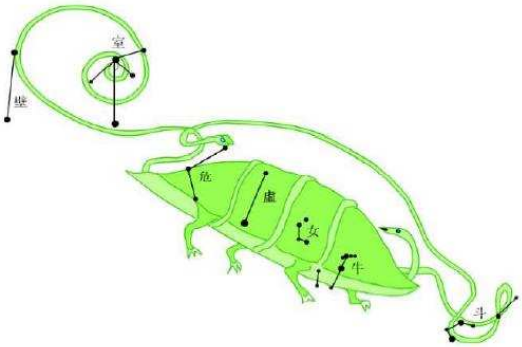
Le dragon d'azur Cang long (苍龙) - Palais oriental lié au printemps

Loge	Nom	Traduction	Étoile déterminatrice	extension en degré
1	角 (Jiǎo)	La corne	α Vir (Spica)	12°
2	亢 (Kàng)	Le cou	κ Vir	9°
3	氐 (Dī)	Le fond	α Lib	15°
4	房 (Fáng)	La chambre	π Sco	5°
5	心 (Xīn)	Le Cœur	σ Sco	5°
6	尾 (Wěi)	La queue	μ Sco	18°
7	箕(Jī)	Le van	γ Sgr	11°



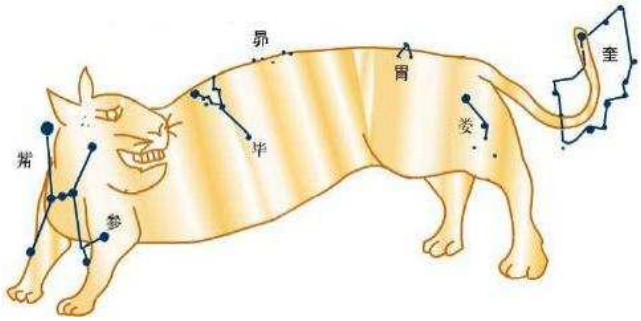
La tortue noire Xuan wu (玄武) – Palais boréal lié à l'hiver

8	斗 (Dǒu)	Le boisseau	φ Sgr	26°
9	牛 (Niú)	Le bœuf	β Cap	8°
10	女 (Nǚ)	La servante	ε Aqr	12°
11	虚 (Xū)	Le vide	β Aqr	10°
12	危 (Wēi)	Le toit	α Aqr	17°
13	室 (Shì)	La maison	α Peg	16°
14	壁 (Bì)	Le mur	γ Peg	9°



Le tigre blanc Bai hu (白虎) – Palais occidental lié à l'automne.

15	奎 (Kuí)	L'enfourchure	η And	16°
16	婁 (Lóu)	La traîne	β Ari	12°
17	胃 (Wèi)	L'estomac	35 Ari	14°
18	昴 (Mǎo)	La chevelure	17 Tau (Pléiades)	11°
19	畢 (Bì)	Le filet	ε Tau	17°
20	觜 (Zī)	La tortue	λ Ori	1°
21	參 (Shēn)	Le ginseng	ζ Ori	10°



L'oiseau rouge Zhu que(朱雀) – Palais méridional lié à l'été.

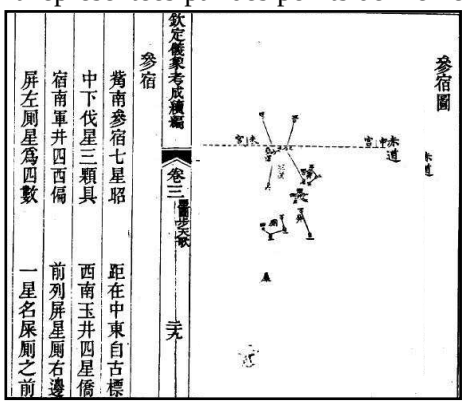
22	井 (Jǐng)	Le puits	μ Gem	33°
23	鬼 (Guǐ)	Le lutin	θ Cnc	3°
24	柳 (Liǔ)	Le saule	δ Hya	15°
25	星 (Xīng)	L'astre	α Hya	7°
26	張 (Zhāng)	La tenture	υ¹ Hya	18°
27	翼 (Yì)	Les ailes	α Crt	18°
28	軫 (Zhěn)	Le chassis	γ Crv	17°

Régions frontalières et divination militaire

Le ciel étant en quelque sorte une carte de l'Empire et des régions frontalières, les parties les plus éloignées du centre sont les images des zones de combats menés aux frontières de l'Empire. Les noms de nombreux astérismes sont liés aux activités militaires. Officiers, hommes de troupe, armes et intendance, tout était représenté par des astérismes ; dans un surprenant souci de réalisme, il y avait même des toilettes célestes (*tiance* – 天厕) et un astérisme pour les excréments (*shi* – 屎) !

La représentation des astérismes sur les cartes du ciel

Les cartes du ciel étaient courantes depuis au moins 2 000 ans. La plupart des cartes anciennes ont disparu à l'exception de la carte retrouvée dans les grottes de Mogao près de la ville de Dunhuang. Présentant la position de 1 339 étoiles regroupées en 257 astérismes, c'est la plus ancienne carte du ciel connue (7e siècle de notre ère). Comme dans la plupart des cartes chinoises ultérieures, les astérismes y sont représentés en joignant les étoiles de chaque astérisme par un fin segment de droite, exactement comme dans nos cartes célestes usuelles. Le plus souvent, sur les cartes chinoises, les étoiles sont représentées par des points de même grosseur quelle que soit leur magnitude. Sur la figure ci-contre, on reconnaît sans peine la forme caractéristique



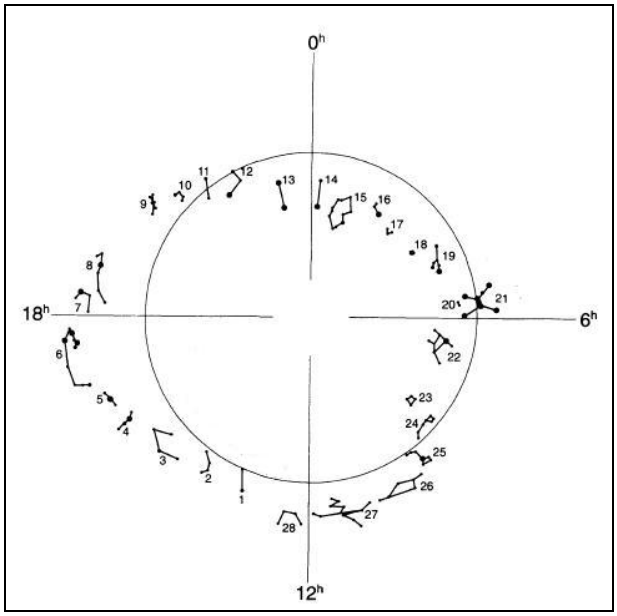
d'Orion. L'atlas céleste d'où est tirée cette carte, le Traité des Instruments Astro-nomiques (*Yi xiang kao cheng* - 仪象考成) fut publié en 1757. C'est souvent lui qui est pris comme référence pour la définition des astérismes chinois.

Une légende connue dans toute la Chine

Véga (αLyr) et Altaïr (αAqu) sont à l'origine d'une des légendes les plus connues de Chine. Un simple bouvier (Altaïr) était amoureux de la Fée Céleste, la Tisserande (Véga). Ils furent séparés après leur union et il leur est désormais interdit de se fréquenter ; ils se tiennent de part et d'autre de la Rivière Céleste, c'est-à-dire la Voie lactée ou, comme l'appellent les Chinois, la Rivière d'Argent (*Yinhe* – 银河).

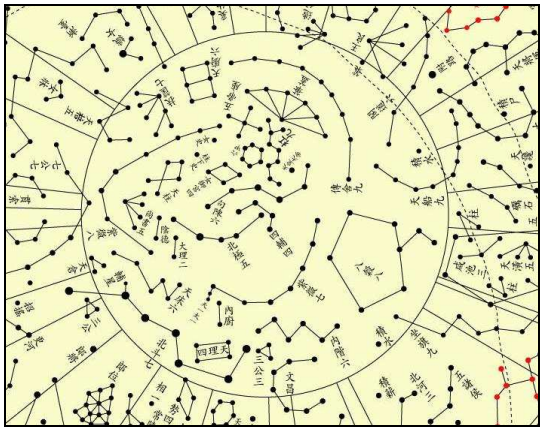
Les astérismes et l'Histoire

La position des astérismes est un précieux indicateur historique de la période à laquelle fut formalisé ce système. Les astérismes, repères de chaque loge lunaire, étaient proches de l'équateur céleste ; or celui-ci voit sa position changer progressivement. La figure ci-contre montre en projection polaire centrée sur le pôle nord céleste le cercle de l'équateur céleste actuel et la position des astérismes des loges lunaires. Malgré la position très approximative des étoiles déterminatrices par rapport à l'ancien équateur, il a été possible d'évaluer la date à laquelle fut conçu le système des loges lunaires ; les études réalisées par plusieurs historiens des sciences conduisent à la période du milieu du 3e millénaire avant notre ère.

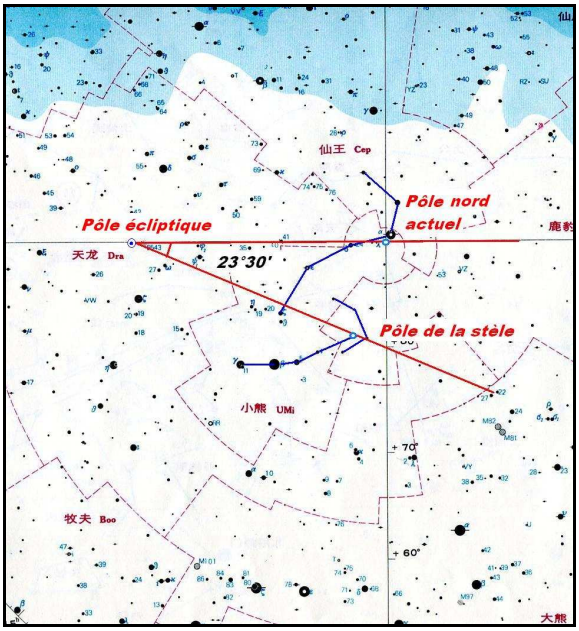


La datation des cartes célestes

Le même phénomène de la précession des équinoxes permet de dater les planisphères célestes. La position ancienne du pôle reportée sur une carte récente (date 2000) permet d'évaluer la date des coordonnées stellaires utilisées par le créateur de la carte.



Sur la reproduction de cette stèle coréenne, on peut identifier le pôle nord céleste qui, reporté sur une carte moderne, permet d'évaluer l'angle duquel il a tourné autour du pôle écliptique. À raison d'un tour en 26 000 ans, on peut en conclure que les positions de la stèle datent d'environ 1 700 ans. Calcul très approximatif puisque la carte peut comporter des erreurs de plusieurs degrés… La position du point vernal est aussi une autre indication. Les historiens recoupent ces indications avec les chroniques mentionnant cette stèle pour affiner le travail de datation. Dans le cas précis de cette stèle, les historiens ont pu affirmer que les documents astronomiques utilisés, cartes ou catalogues, remontaient à l'année 100 avant notre ère.



L'époque moderne

La représentation chinoise du ciel ne fut guère influencée par les contacts avec les civilisations d'Asie occidentale et d'Asie centrale. Le Bureau d'astronomie comprenait bien un département musulman mais sa tâche fut surtout de participer à l'élaboration du calendrier.

La véritable révolution astronomique fut l'œuvre des Jésuites. Durant le 17e siècle, ils surent se rendre indispensables pour l'élaboration du calendrier luni-solaire. Habilement, ils se gardèrent bien de modifier de fond en comble les divisions traditionnelles du ciel. Ils reprirent les noms chinois, ajoutant simplement les constellations proches du pôle sud céleste qui ne figuraient pas sur les cartes du ciel chinoises. Les contacts entre les deux civilisations furent l'occasion de dresser des tableaux d'équivalence entre les dénominations chinoises et occidentales. Si pour les étoiles les plus brillantes, l'équivalence allait de soi, la correspondance des étoiles les plus faibles est toujours l'objet de discussions entre spécialistes car les cartes chinoises, de précision souvent médiocre, ne donnent aucun renseignement sur la magnitude des étoiles.

L'utilisation moderne des anciennes descriptions chinoises du ciel

Les innombrables documents historiques légués par l'histoire multimillénaire de la Chine relatent de nombreux évènements astronomiques (éclipses, novae, passages de comètes etc.). Leur description en est suffisamment précise pour pouvoir être utilisée par les astronomes modernes.

La figure ci-contre, extraite des travaux des astronomes chinois actuels, nous montre la trajectoire de la comète de l'année 1337 de notre ère.

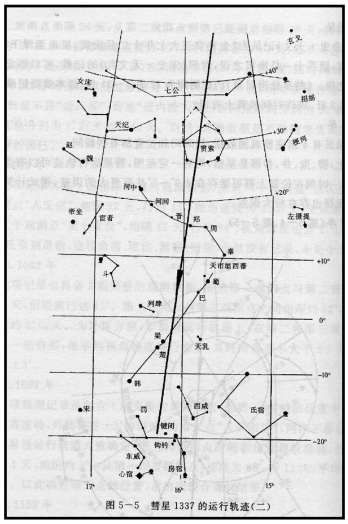


图 5－5　彗星 1337 的运行轨迹(二)

Les textes anciens décrivent le passage de cette comète à travers les astérismes chinois, ce qui permet de déterminer la trajectoire de la comète dans le ciel avec une précision parfois meilleure que le degré d'arc. C'est suffisant pour la détermination de l'orbite. Dans le cas de la comète de Halley, comète périodique qui nous rend visite à peu près tous les 76 ans, les documents chinois ont permis d'établir les dates de passage depuis plus de 3 000 ans avec dans certains cas la position jour par jour de la comète dans le ciel. L'étude de la variation de la périodicité et de la valeur du périhélie a permis de tirer des conclusions sur la nature des comètes.

On utilise maintenant en Chine les constellations et les dénominations d'étoiles usitées internationalement. Seules les étoiles les plus brillantes sont encore parfois appelées par leurs noms chinois, par exemple le Loup du Ciel (*Tian lang* – 天狼) pour Sirius ou le Vieil Homme (*Lao ren* – 老人) pour Canope. Ce sont les musées qui exposent maintenant cartes, stèles et atlas traditionnels, témoins d'une tradition de l'observation du ciel qui connut ses heures de gloire et qui s'est éteinte il n'y a pas si longtemps.

■

Solutions des mots croisés de la page 31

Horizontalement :
1. Supergéante ; **2.** Étoile. RX ; **3.** Pérou. Indic ; **4.** Éclipse (Algol est une étoile binaire à éclipse). Épi ; **5.** Réélit. E-ELT (european extremely large telescope) ; **6.** NR. EE. INSEE ; **7.** Ove. Saros (période de 223 lunaisons où les éclipses se répètent à peu près dans le même ordre) ; **8.** Véga. Canes (La constellation des Chiens de Chasse, Canes Venatici, abrite de nombreuses galaxies) ; **9.** Algol. IC (Index Catalogue). Un ; **10.** SE. Centaure.

Verticalement :
1. Supernovas (les deux pluriels, supernovae et supernovas existent) ; **2.** Écervelé ; **3.** Perle (alpha de la Couronne Boréale est appelée Gemma ou la perle). Egg ; **4.** Étoile. AOC ; **5.** Roupies. Le ; **6.** GI. St. ac (ac-nice.fr) ; **7.** Élie. Irait ; **8.** AEN (Agence pour l'Énergie Nucléaire). Énonça ; **9.** Déesse ; **10.** Triple (la Polaire a deux compagnons plus petits). Sûr ; **11.** Excités. Ne.

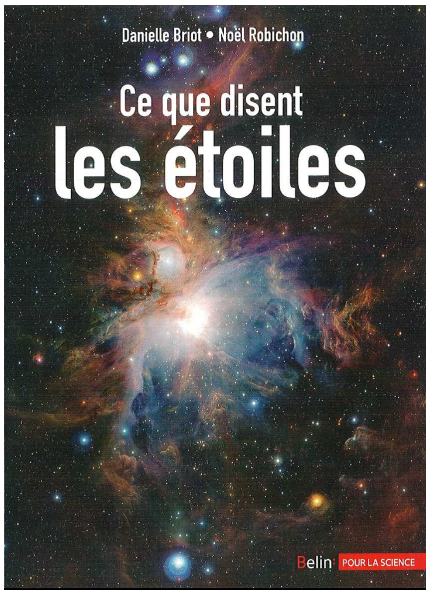
LECTURE POUR LA MARQUISE

Ce que disent les étoiles

Danielle Briot et Noël Robichon

Avec ce nouveau livre les éditions *« Belin Pour la Science »* complètent les ouvrages de la collection consacrés à l'astronomie sur un thème non encore couvert. Dans ce nouveau livre intitulé *« Ce que disent les étoiles »*, D. Briot (astronome à l'observatoire de Paris) et N. Robichon (maître de conférence à l'observatoire de Paris) posent les quatre questions suivantes :

Étoile, qui es-tu ? Étoile, comment vis-tu ? Étoile, comment et pourquoi varies-tu ? Étoile, quel est ton voisinage ?



Les 34 chapitres sont courts, ils font exactement quatre pages chacun. Cecii oblige les auteurs à n'indiquer que l'essentiel mais dans un langage scientifique à la fois clair et concis.

L'illustration est de qualité avec de nombreuses photos en couleur et parfois quelques schémas ou des encadrés apportant des précisions mais en s'abstenant d'introduire des expressions mathématiques.

Un langage sérieux n'exclut pas un brin de fantaisie en particulier dans les titres des chapitres. Par exemple *« Grandeurs et magnitudes » « Les couleurs du corps noir » « Recette pour fabriquer une étoile » avec les sous rubriques : Ingrédients, Accessoires, Temps de préparation, Temps de cuisson »…ou « Souvent étoile varie » suivi de « Bien fol est qui s'y fie »*.

Un des chapitres consacré au Soleil parodie le célèbre questionnement du Petit Prince de Saint Exupéry. *« Bonjour monsieur le Soleil. Vous êtes très célèbre (…) Qui êtes-vous en réalité ? Vous êtes vraiment une étoile comme les autres ? Quelle est votre taille ? Une question qui peut paraître indiscrète, quel est votre poids ? »* (une occasion de préciser la différence entre poids et masse) etc.

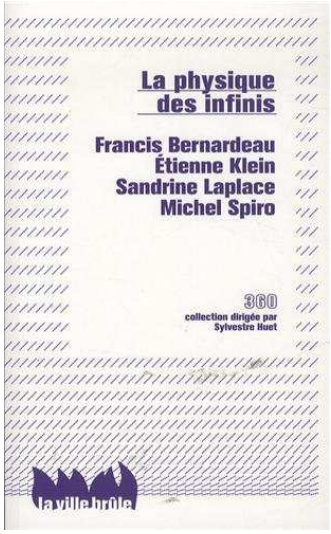
Par ses qualités didactiques, cet ouvrage devrait trouver une place naturelle dans les clubs d'astronomie, les bibliothèques et les centres de documentation des lycées et collèges.

Christian Larcher

La physique des infinis

F. Bernardeau, É. Klein, S. Laplace, M. Spiro ; Éditions « La ville brûle 2013 » ; 207 p.

Ce livre publié par les éditions « La ville brûle » appartient à la série *« collection 360 »*, une collection tous azimuts dont l'objectif est d'apporter un regard pluriel, un regard tous azimuts, sur un sujet à partir d'une confrontation directe entre plusieurs personnes qualifiées.



Ce dialogue réel permet de mieux faire ressortir les articulations et les questionnements de leurs auteurs. Dans le livre *« La physique des infinis »*, il s'agit de Francis Bernadeau (chercheur au CEA et professeur à l'École polytechnique), Étienne Klein

(directeur de recherche au CEA et docteur en philosophie des sciences), Sandrine Laplace (chargée de recherche en physique nucléaire, membre de l'expérience ATLAS au LHC) et Michel Spiro conseiller scientifique au CEA, ancien président du Conseil du CERN.

L'ouvrage est divisé en trois grandes parties. Dans la première partie *« Les enjeux scientifiques de la physique des infinis »* les auteurs se livrent à une brève histoire de l'infiniment petit puis de l'infiniment grand, pour aboutir à une convergence des deux infinis et sur la « finitude de la physique » en une seule et unique discipline. Au cours de ce périple historique on apprend comment le bestiaire des particules élémentaires est passé de près de 450 particules, supposés élémentaires au début des années 50, à seulement 12 aujourd'hui ; en particulier en réglant la question de *« l'argument dentifrice »* (1) : il s'agissait de contrer l'argument simpliste *« si des électrons sortent du noyau c'est bien qu'il y a des électrons dans le noyau »*.

La seconde partie a pour titre *« La super science en questions » ;* on y aborde les défis technologiques en physique des particules et en cosmologie, mais également le modèle sociétal du CERN : comment peut-on faire collaborer des milliers de personnes venant de nombreux pays très différents à une seule et même tâche…

La dernière partie traite de *« l'Homme dans sa quête de l'infini »* et aborde la question du hasard, du principe anthropique, des multivers. Existe-t-il une *« théorie du tout »* qui expliquerait les valeurs des constantes fondamentales ? L'Univers a-t-il été créé pour que la vie puis l'homme y apparaissent ? Serions-nous seuls dans « le » bon univers ?

Le livre s'achève sur le mystère de la question des origines. Il se lit très facilement et intéressera tous ceux qui sont attentifs à l'épistémologie des sciences et au rapport de la science et de la société.

(1) Allusion à une célèbre marque de dentifrice dont la pâte sortait du tube avec des rayures rouges.

Christian Larcher ■

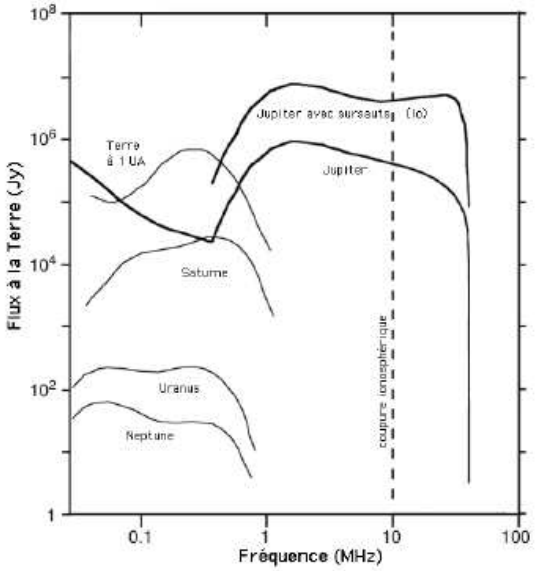
COURRIER DES LECTEURS

Commentaires sur l'article « Quand le LP2I surfe sur Jupiter »

J'ai lu avec un grand intérêt l'article « Quand le LP2I surfe sur Jupiter » sur la détection des émissions radio de Jupiter et les interactions Jupiter-Io paru dans le CC n° 144. Il traite d'une science qui m'est chère et démontre qu'avec un peu de matériel et de bonnes idées, on peut réaliser de très belles expériences. Je me permets d'apporter sur certains points abordés des précisions et compléments qui me paraissent utiles.

Les émissions radio planétaires

Jupiter, comme toutes les planètes qui possèdent une magnétosphère, émet des ondes radio. Ces ondes radio sont émises, comme expliqué dans l'article, dans les zones aurorales où sont accélérés les électrons qui, guidés par les lignes de champ magnétique, se dirigent vers la planète. La figure ci-contre montre le flux des émissions radio planétaires vues de la Terre en fonction de la fréquence. Nous voyons que dans le cas de Jupiter, l'interaction avec Io contribue à ces émissions radio mais n'en constitue pas l'unique source comme pourrait le suggérer l'article. Il est toutefois à noter que dans le domaine radio détectable du sol terrestre (les fréquences inférieures à la fréquence de coupure ne peuvent pas traverser l'ionosphère), l'interaction Jupiter-Io constitue probablement une condition à la détection avec un petit radiotélescope. En effet, c'est précisément aux alentours de 20-40 Mhz, que l'écart est le plus grand entre les émissions radio sans et avec la contribution de Io.



Sources d'ionisation

L'orbite de Io se trouve à l'intérieur de la magnétosphère de Jupiter et comme le montre la figure 2 de l'article, cette magnétosphère dévie le vent solaire comme un bouclier (voir aussi Cahiers Clairaut 141 et 142). Io n'est donc jamais en contact avec le vent solaire ; par conséquent ce dernier ne constitue pas une source d'ionisation d'un atome ou molécule issu du volcanisme de Io. Les processus sont autres :

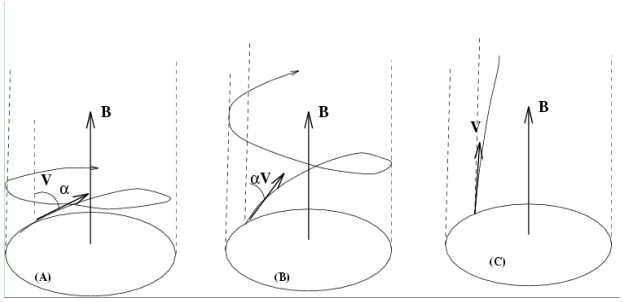
- photo-ionisation par les photons UV et X solaires ;
- échange de charge avec des ions déjà présents ;
- impact de particules énergétiques.

Plans orbitaux

Il me paraît intéressant de préciser que l'orbite de Io et le tore de plasma ne se trouvent pas dans le même plan. Le plan orbital de Io est régi par la seule gravitation et se trouve donc dans le plan équatorial géographique, cependant que le tore de plasma subit lui les forces magnétiques et se trouve donc dans le plan équatorial magnétique. Ces deux plans sont inclinés d'environ 10° l'un par rapport à l'autre, (en fait, les particules chargées qui composent le tore sont aussi soumises à la force centrifuge donc en toute rigueur, le tore se trouve dans un plan intermédiaire entre les plans équatoriaux magnétique et géographique).

Angle d'attaque et miroir magnétique

La notion d'angle d'attaque est importante pour décrire le mouvement des particules chargées dans un champ magnétique. C'est l'angle θ entre le vecteur champ magnétique local B et le vecteur vitesse V de la particule considérée.



Il est dit dans l'article que les électrons « qui sont déviés de telle sorte que leur direction est quasi perpendiculaire aux lignes de champ magnétique de Jupiter vont réussir à atteindre les pôles ». Ce doit être un lapsus car c'est précisément le contraire : le franchissement des miroirs magnétiques ne peut se faire que si les particules considérées ont un faible angle d'attaque, c'est-à-dire si leur vecteur vitesse a une composante PARALLÈLE au champ magnétique suffisamment grande ; sinon, elles rebondiront avant d'atteindre les pôles.

En effet, une grandeur μ nommée moment magnétique se conserve lors du mouvement. Elle est de la forme :

$$\mu = \frac{mv_{\perp}}{2B} = constante$$

Avec m la masse de la particule, $v_{\perp}$ la composante perpendiculaire au champ magnétique de la vitesse de la particule et B l'intensité du champ magnétique.

La conséquence de la conservation de cette grandeur est que plus un électron va se rapprocher de la planète et être soumis à un champ B de plus en plus intense, plus $v_{\perp}$ va aussi augmenter. Étant donné que l'énergie cinétique se conserve, la vitesse totale se conserve aussi. Si la norme du vecteur vitesse se conserve et sa composante perpendiculaire augmente alors fatalement, la composante parallèle à B diminue (en d'autres termes, l'angle d'attaque augmente). Si cette composante parallèle diminue jusqu'à s'annuler (angle d'attaque vaut alors θ =90°), la particule arrête sa progression le long de B et rebrousse chemin, c'est le phénomène de miroir magnétique. Pour atteindre les plus basses couches de l'atmosphère et créer des aurores polaires, les électrons doivent donc avoir initialement une composante parallèle à B suffisamment grande, donc un angle d'attaque suffisamment petit.

Pour voir le comportement d'une particule chargée dans une bouteille magnétique en fonction de son angle d'attaque θ initial, on pourra se reporter à la page suivante (en anglais) :
http://www.windows2universe.org/earth/Magnetosphere/tour/tour_earth_magnetosphere_04.html

Pour en savoir plus sur les interactions Jupiter-Io, le lecteur averti pourra se référer à la thèse de doctorat de Sébastien Hesse intitulée *Processus d'accélération et émissions radio dans le circuit Io-Jupiter* :
http://arena.obspm.fr/~luthier/mottez/stages/these_Sebastien_Hess.pdf

Frédéric Pitout (OMP – IRAP) ■

Écoles d'Été d'Astronomie

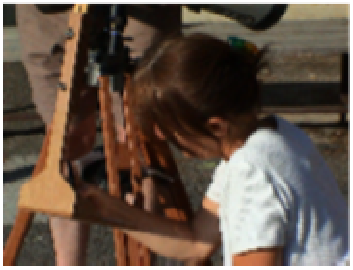
Vous souhaitez débuter en astronomie ?

Vous souhaitez vous perfectionner ?

Vous avez le projet d'animer un club ?

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

Des exposés accessibles à tous



Des ateliers pratiques et des observations

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

Renseignements sur le site du CLEA

Voir la vidéo à l'adresse :

acces.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).

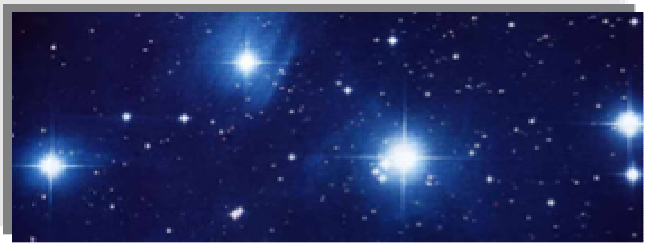
Vous pouvez retrouver ces productions sur le site de vente : **http://ventes.clea-astro.eu/**

Le formulaire de commande est sur le site

Le site internet

Une information toujours actualisée

www.clea-astro.eu



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
Réalisations d'instruments et de maquettes
Observations
Informatique
Les Potins de la Voie Lactée

COMMENT NOUS JOINDRE ?

Informations générales :

www.clea-astro.eu
ou
www.ac-nice.fr/clea

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

École d'Été d'Astronomie :
daniele.imbault@cea.fr

Cahiers Clairaut :
christianlarcher3@gmail.com

Ventes des productions :
http://ventes.clea-astro.eu/

Site internet :
berthomi@ac-nice.fr
charles-henri.eyraud@ens-lyon.fr

Adhésion / Abonnement :

Adhésion CLEA pour 2014 :	**5 €**
Abonnement CC pour 2014 :	**25 €**
Adhésion + abonnement CC :	**30 €**
Adhésion + abonnement CC + abonnement numérique :	**35 €**

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 : 7 €
Revue trimestrielle : numéro 145 mars 2014