

Bulletin du comité de liaison enseignants et astronomes

Les Cahiers Clairaut



numéro 113 - PRINTEMPS 2006

ISSN 0758-234X

Comité de liaison enseignants astronomes

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

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

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

Le **CLEA** a mis en place une liste de diffusion afin de permettre des échanges rapides entre les abonnés. L'adresse est la suivante : C-L-E-A@yahogroupes.fr

Bureau du CLEA pour 2006

Présidents d'honneurs : Lucienne Gouguenheim,
Jean-Claude Pecker
Evry Schatzman

Président : Georges Paturel

Trésorier : Jean Ripert

Trésorier Adjoint : Jacky Dupré

Rédacteur des Cahiers : Georges Paturel

Secrétaire : Lucette Mayer

Secrétaire Adjoint : Eric Josselin

Responsable du site web : Francis Berthomieu

Rédacteurs Adjoins des Cahiers Clairaut

Daniel Bardin, Francis Berthomieu, Michel Bobin, Pierre Causeret, Frédéric Dahringer, Charles-Henri Eyraud, Marie-Agnès Lahellec, Christian Larcher, Chantal Petit, Jean Ripert, Jean-Noël Terry, Daniel Toussaint

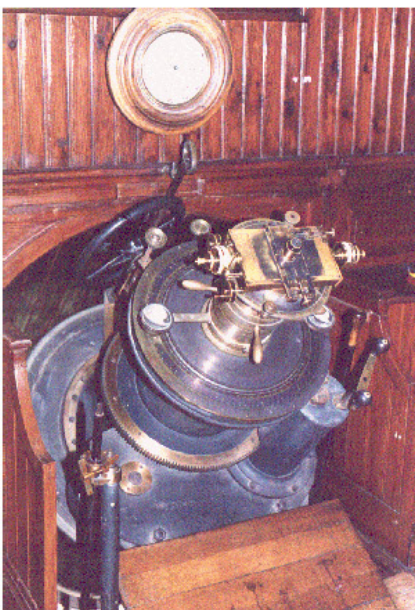
Associés de rédaction

Lucette Bottinelli, Jacky Dupré, Jean-Luc Fouquet, Michèle Gerbaldi, Lucienne Gouguenheim, Colette Le Lay, Lucette Mayer, Philippe Merlin, Josée Sert

A PROPOS DE LA COUVERTURE

Lunette coudée de l'observatoire de Lyon.

Cette lunette, fabriquée par les établissements Gautier de Paris, a été mise en service en 1887. Elle a un objectif constitué d'une lentille de 35 cm de diamètre (diaphragmée à 32 cm) et de 7,80 m de distance focale. Cet instrument est unique. Parmi les six autres instruments semblables, il est le seul encore utilisable dans son état d'origine. La caractéristique principale d'une telle lunette est que, par un jeu de miroirs plans, l'image se forme toujours au même endroit (photo ci-contre), dans un local situé au sommet du bâtiment. C'est de ce local d'observation que s'effectuent toutes les opérations de pointage, à l'aide de commandes mécaniques. L'entraînement est assuré par un mécanisme d'horlogerie à poids.



G. Paturel

Photographies : Ph. Merlin

Les Cahiers Clairaut

Printemps 2006 n° 113

EDITORIAL

Ce numéro est tout entier imprégné de Gilbert Walusinski. Aurait-il aimé cet hommage posthume ? Ce n'est pas sûr, mais pourtant nous ne pouvions pas renoncer à partager quelques souvenirs de cet homme si attachant pour sa culture, sa finesse, son humour, son dynamisme. Nul doute que Gilbert marquera pour toujours la mémoire de ceux qui l'ont connu.

Les quelques photos ci-contre le présentent, à l'école d'été de 1982, à une Assemblée Générale, lors de la remise du prix de l'Académie des Sciences qu'il partagea avec Lucienne Gouguenheim et peu de temps avant l'accident de santé qui l'a emporté après une longue agonie.

Le CLEA présente à la famille de Gilbert ses condoléances très émues.

Adieu Gilbert !

La Rédaction
 patu@obs.univ-lyon1.fr

Cours

Cours élémentaire d'astrophysique IX- Les étoiles vivent
 G. Paturel p. 2

Article de fond

Exoplanètes et exobiologie
 E. Josselin p. 8

Histoire

La ruse de Descartes
 P. Lerich p.14

Avec nos Elèves

Eclipse de Soleil vue par des enfants
 J. Berthomieu p.17

Histoire

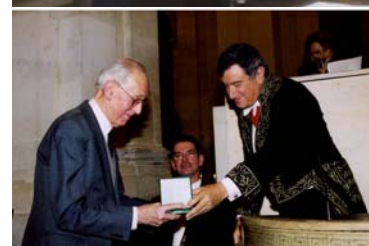
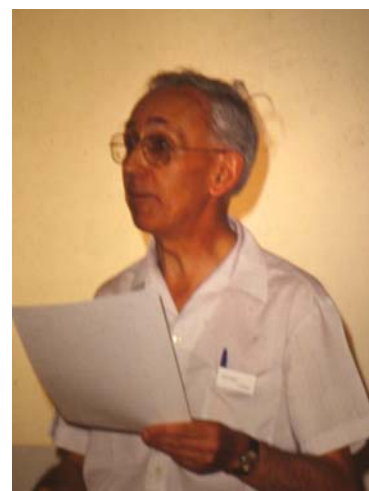
Jean-Bernard Léon Foucault : I La théorie corpusculaire de la lumière
 J.-N. Terry p.20

Avec nos élèves

Mesure de distances : Commençons par la Terre
 G. Paturel p.25

Rubriques fixes p.29

- *Remue-méninges*
- *Lecture pour la Marquise*
- *Les potins de la Voie Lactée*
- *La vie associative*
- *Courrier des lecteurs*



Photos :
 D. Bardin, L. Gouguenheim, J. Dupré

COURS

Cours élémentaire d'astronomie et d'astrophysique : IX- Les étoiles vivent

Georges Paturel, Observatoire de Lyon

Résumé: *Comment a-t-on pu comprendre l'évolution des étoiles, cette évolution qui s'échelonne sur des millions, voire des milliards d'années ? Les astronomes ne vivent pas assez vieux pour suivre la vie d'une étoile, mais les lois universelles de la physique permettent de combler cette impossibilité physique.*

Introduction

Dans le cours précédent nous avons vu que la seule source d'énergie possible pour expliquer le rayonnement des étoiles était la fusion nucléaire. Mais en ayant compris cela nous n'avons pas compris, dans le détail, le fonctionnement d'une étoile, car la réalité est très complexe. Il a fallu attendre l'avènement des premiers ordinateurs pour commencer à reproduire la complexité de la vie d'une étoile.

Dans ce cours nous allons essayer de comprendre les grandes lignes de l'évolution stellaire, avec un peu de physique.

Qu'y avait-il précisément à comprendre ? Vers les années 1912, deux astronomes, Hertzsprung et Russel, construisirent, indépendamment l'un de l'autre, un diagramme en portant, indirectement¹, la couleur des étoiles sur l'axe horizontal et la magnitude absolue sur l'axe vertical. Qu'est-ce donc que la magnitude d'une étoile et qu'est-ce donc que la couleur d'une étoile ?

¹ La vérité historique est un peu plus compliquée. L'astronome danois Hertzsprung s'était amusé à comparer la magnitude apparente des étoiles d'amas à leur couleur, alors que l'astronome américain Russell avait comparé, pour les étoiles du voisinage solaire, leur magnitude absolue à leur type spectral (une classification basée sur l'aspect des spectres).

Magnitude et magnitude

Commençons par définir la magnitude d'une étoile. Si vous ne savez pas ce qu'est une magnitude vous ne pouvez pas l'inventer, car il s'agit d'une définition : la magnitude apparente d'une étoile est une mesure de son éclat apparent dans une échelle logarithmique. L'éclat apparent est l'énergie que vous envoie l'étoile par unité de temps (on appelle ça une puissance) et par unité de surface. En prenant le logarithme de cet éclat apparent on définit une échelle logarithmique. Pour retrouver la classification ancienne, classification dans laquelle les étoiles les plus brillantes étaient dites de grandeur 1 et les étoiles faibles de grandeur 6 (ou plus), il fut proposé en 1856 par N.R. Pogson, que la magnitude apparente soit définie comme :

$$m = -2.5 \log E + C$$

E est l'éclat apparent mesuré et C une constante arbitraire adoptée une fois pour toute, selon les unités adoptées pour E. Le signe moins est fait, vous l'avez compris, pour que les étoiles d'éclat le plus important correspondent à la plus petite grandeur, car le logarithme est une fonction monotone croissante, comme disent les mathématiciens, plus x est grand plus $\log x$ l'est aussi.

Il est important de remarquer que cette magnitude apparente ne nous renseigne pas sur la luminosité intrinsèque d'une étoile, car deux étoiles peuvent avoir la même magnitude

apparente et ne pas avoir la même luminosité si leurs distances sont différentes. Les astronomes ont inventé une nouvelle définition pour mesurer la luminosité intrinsèque d'une étoile. C'est la magnitude absolue M , qui, par définition, est la magnitude apparente qu'aurait l'étoile si elle était à une distance fixe de 10 parsecs (31,26 années de lumière). Comme l'éclat E varie comme l'inverse du carré de la distance, il est facile de montrer que :

$$m - M = 5 \log d - 5$$

d est la distance mesurée en parsec (1 pc=3,26 a.l.). Vous voyez donc que, quand on connaît $m - M$, on connaît la distance. Cette quantité est appelée le *module de distance* et on la note souvent par la lettre grecque μ .

Nous avons supposé implicitement que m et M étaient définies sur l'ensemble du spectre lumineux (toutes les longueurs d'onde). En pratique, les mesures ne sont effectuées que sur un domaine du spectre. On caractérise ce domaine par une longueur effective λ . On définit donc une magnitude m_λ (ou M_λ) pour un domaine de longueur d'onde donné. Vous allez voir que ceci est important pour définir une couleur d'étoile.

Indice de couleur d'une étoile

L'indice de couleur (ou plus brièvement, la couleur) est définie en astrophysique comme la différence des magnitudes à deux longueurs d'onde différentes. Par exemple, les astronomes utilisent la couleur notée $B - V$, différence entre la magnitude apparente en "bleu" à la longueur d'onde approximative de 450nm et la magnitude apparente dans le domaine "visible" à 550nm. Mais on peut définir une infinité de couleurs. On utilise souvent la couleur $U - B$, différence des magnitudes en ultraviolet (350 nm) et en bleu (550nm). En allant vers l'infrarouge on rencontre aussi l'indice de couleur $V - I$ (visible à 550 nm moins infrarouge à 800 nm), etc.

Remarquons qu'une couleur est invariante avec la distance puisque l'effet de distance affecte les deux magnitudes de la même façon. La couleur est une propriété intrinsèque de l'étoile (après correction éventuellement de l'effet d'absorption par de la poussière

interstellaire qui affecte plus un domaine de longueur d'onde qu'un autre).

Couleur et température effective

On peut assimiler les étoiles à des corps noirs parfaits et calculer la couleur $B - V$ pour différentes températures en utilisant l'équation du corps noir donnée par la relation de Planck. Exprimée en magnitude à la longueur d'onde effective λ elle s'écrit (à une constante près):

$$m = -2,5 \log \left[\frac{1}{\lambda^5} \left(\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1 \right)^{-1} \right]$$

Avec $h=6,6626 \cdot 10^{-34}$, $k=1,38 \cdot 10^{-23}$, $c=2,99792 \cdot 10^8$, en unités S.I.. On fera le calcul pour T entre 2000 K et 10000K, pour 450 nm (B) et 550 nm (V). Bien que la relation ne soit pas linéaire, elle est bien approximée par :

$$\log T = 3,79 - 0,43(B - V)$$

La couleur $B - V$ est approximativement une mesure de température effective.

Retour sur le diagramme HR

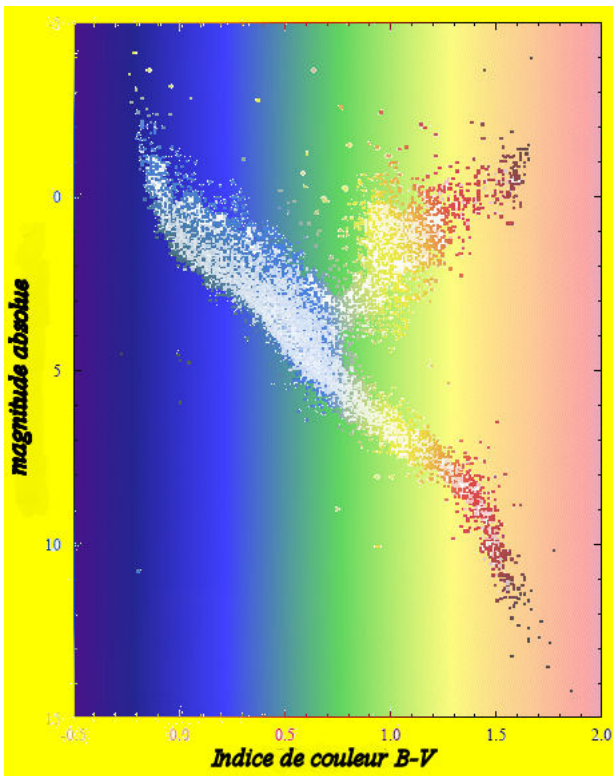
Maintenant que les bases ont été définies, revenons sur le diagramme de nos deux astronomes Hertzsprung et Russel. On parle généralement de diagramme HR, c'est plus simple à dire.

Tout d'abord, éclaircissons le point historique. Hertzsprung, le premier, avait tracé un diagramme en prenant la magnitude apparente des étoiles d'un amas en fonction de leur couleur. Comme, toutes les étoiles d'un amas sont à la même distance (vu de Lyon, tous les habitants de Paris sont à la même distance), la magnitude apparente est, à un terme constant près, une mesure de la magnitude absolue. Donc pour un amas, le diagramme était bien un diagramme magnitude absolue - couleur, à un décalage en ordonnée près.

Russel, lui, avait considéré les étoiles du voisinage solaire de magnitude absolue connue (par les estimations de distance et la magnitude apparente). Ces mêmes étoiles avaient été classées d'après les caractéristiques de leur spectre. Cette classification spectrale s'est révélée être une classification de température, donc de couleur $B - V$ (voir encadré).

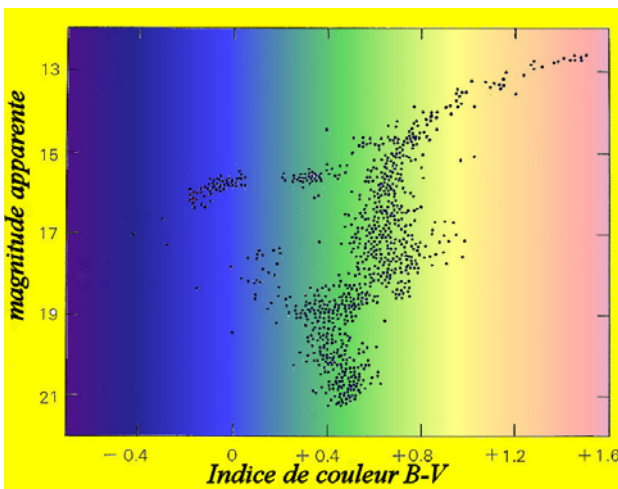
Finalement le diagramme HR est bien un diagramme Magnitude absolue - Couleur (ou Luminosité - Température).

Le problème se posait alors ainsi : Pourquoi les étoiles du voisinage solaire ne se situent qu'en certaines régions du diagramme et pourquoi les étoiles d'amas obéissent à des distributions différentes ?



D'après ESA- HIPPARCOS

Diagramme HR pour les étoiles du voisinage solaire mesurées par le relevé HIPPARCOS.



D'après un diagramme de H. Arp

Diagramme HR typique pour les étoiles d'un amas.

Température intérieure

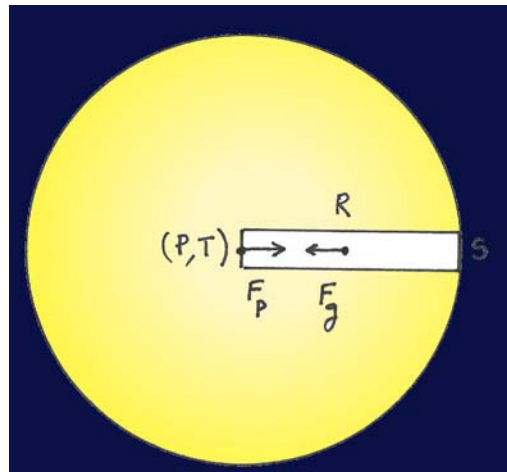
La première chose à vérifier est que la température intérieure d'une étoile est assez élevée pour permettre la fusion nucléaire des noyaux d'hydrogène. Vous vous rappelez en effet que c'est la seule source d'énergie capable d'expliquer la longévité d'une étoile.

Nous empruntons la démonstration très simple à Martin. Schwarzschild². Quand je dis très simple, il faut normalement utiliser le calcul différentiel. Mais nous allons simplifier encore en essayant de ne pas trop dénaturer le calcul.

Nous allons considérer un volume cylindrique de section S et de masse m , qui s'étend du cœur de l'étoile à la périphérie (voir le schéma). Ce tube a pour longueur le rayon de l'étoile et son volume est $v=S.R$. Il est poussé vers l'extérieur de l'étoile par une force

$$F_p = PS,$$

où P désigne la pression au centre de l'étoile. La pression sur l'autre face du cylindre est nulle.



Mais, chaque section du cylindre est attirée par toute la masse M qui est en direction du centre de l'étoile. En moyenne nous pourrions considérer que le cylindre est attiré par la moitié de la masse de l'étoile, $M/2$ (c'est une approximation simpliste, justifiée par le fait que la masse volumique doit être plus importante au centre qu'en surface). Nous allons désigner par ρ la masse volumique moyenne de l'étoile (masse divisée par volume) :

² Fils de Karl Schwarzschild qui trouva la solution des équations d'Einstein dans le cas d'une symétrie centrale (cas applicable au Soleil).

$$\rho = \frac{M}{(4/3)\pi R^3} \approx \frac{M}{4R^3}$$

. Donc le cylindre est attiré vers le centre par une force gravitationnelle :

$$F_g = \frac{GMm}{(R/2)^2} = G \frac{(M/2)(SR\rho)}{(R/2)^2} = \frac{GSM^2}{2R^4}$$

L'étoile étant stable, cela signifie que les deux forces antagonistes sont égales en module ($F_p = F_g$). On trouve alors immédiatement :

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

Nous pouvons estimer l'ordre de grandeur de la pression au centre d'une étoile. En prenant l'exemple du Soleil³ ($M=2 \times 10^{30}$ kg $R=7 \times 10^8$ m). On trouve que la pression au centre du Soleil est de $P=6 \times 10^{14}$ N/m². Sur chaque mètre carré du centre du Soleil s'exerce une force de 600 000 milliards de Newton. C'est comme si, sur Terre, vous aviez une masse de 60 milliards de tonnes par mètre carré.

Bon, alors, et la température ! Il y a une loi de la physique, loi des gaz parfaits, qui dit que le produit de la pression par le volume d'une quantité de matière est proportionnel à la température absolue T de cette quantité de matière (la température absolue est celle de votre thermomètre, augmentée de 273 degrés. On la mesure en degrés Kelvin, abrégés en K). On peut déduire de cette formulation une expression qui relie la pression, la masse volumique de la matière considérée et la masse μ_p d'une particule qui compose cette matière. Cette relation très classique en physique s'écrit (voir l'encadré) :

$$P = \frac{k}{\mu_p} \rho T$$

La constante de Boltzmann $k \approx 1,4 \times 10^{-23}$ dans le même système d'unité standard que précédemment μ_p est à peu près la masse d'un noyau d'hydrogène (un proton) mais il faut diviser par deux car il y a aussi des électrons, en nombre égal, et qui ont une masse négligeable. En remplaçant dans l'expression précédente, la pression centrale et la masse

³ La constante de la gravitation universelle $G \approx 7 \times 10^{-11}$ dans le système des unités standards (m,kg,s).

volumique par leurs expressions vues plus haut, on tire l'expression de la température centrale :

$$T = 2P \frac{\mu_p R^3}{k M}$$

En appliquant cette relation au Soleil et avec $\mu_p = 1,7 \times 10^{-27}$ kg, on trouve $T = 25 \times 10^6$ K. C'est chaud, 25 millions de degrés. A cette température là, il n'y a pas de problème pour réussir la fusion de l'Hydrogène en Hélium. C'est ainsi qu'on récupère une belle énergie, fort agréable sur la plage...

La loi des gaz parfaits

Expérimentalement on peut constater que le produit PV/T reste constant pour un gaz à la température T, à la pression P et de volume V. On sait par ailleurs (loi d'Avogadro) qu'un paquet de $N_o = 6 \times 10^{23}$ particules (ce qu'on appelle une mole) occupe un volume de 0,0224m³ à la pression de 101000 N.m⁻² (les N.m⁻² sont des Pascal - abréviation Pa) et à la température de 0°C = 273 K. On a donc pour les N_o particules (1 mole) :

$$\frac{PV}{T} = \frac{101000 \times 0.0224}{273} = 8,3 \text{ N.m.K}^{-1} \cdot \text{mole}^{-1}$$

Notons que les "Newton×mètre" = N.m sont des Joules (abréviation J).

Par ailleurs, la masse de n moles de particules ayant une masse individuelle de μ_p est $n \cdot N_o \mu_p$. Cette masse, divisée par le volume, définit la masse volumique :

$$\rho = \frac{n N_o \mu_p}{V}$$

En reportant cette expression dans notre première relation écrite pour n moles on trouve alors :

$$P = \frac{8,3}{N_o \mu_p} \rho T$$

La valeur $8,3/N_o = 1,38 \times 10^{-23}$ J.K⁻¹ se note k. C'est la constante de Boltzmann. Nous retrouvons bien l'expression utilisée dans le cours.

Ce n'est pas croyable où ça mène l'astro !

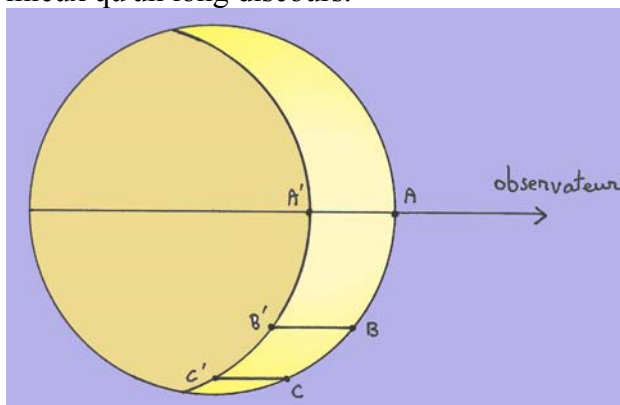
Preuve expérimentale

Nous avons trouvé que l'intérieur du Soleil est très chaud. La partie extérieure est bien plus froide, quelques milliers de degrés seulement ! On sait d'ailleurs mesurer cette température extérieure (voir CC6 page 3). On en conclut que la température augmente quand on

s'enfonce dans les couches profondes. Peut-on le prouver expérimentalement ? Eh bien oui, et c'est très simple, même si on ne peut pas aller mesurer la température sur place. C'est l'observation de l'assombrissement du bord du Soleil.

L'astronome Foucault et son camarade d'étude Fizeau furent les premiers à photographier le Soleil en 1845 (voir l'article de J.N Terry dans ce numéro). Il apparut clairement que le bord du Soleil était plus sombre. Quelle était l'origine de cet assombrissement ?

Le schéma ci-dessous vous fera comprendre mieux qu'un long discours.



La profondeur optique d'où nous provient la lumière est à peu près constante $AA'=BB'=CC'$. Mais vous voyez sur le schéma que A' est plus profond que B', lui-même plus profond que C'. La lumière que nous observons au centre du Soleil provient, en moyenne, de régions plus chaudes, comme nous l'observons.



Photo D. Bardin

Sur cette magnifique photo prise par Daniel Bardin lors du dernier passage de Vénus devant le Soleil, on devine bien l'assombrissement centre bord.

Formation des éléments

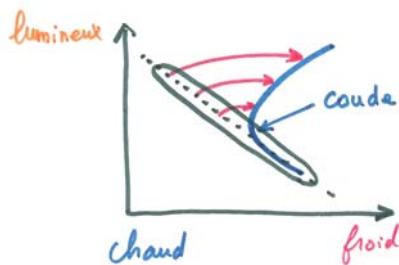
Nous sommes rassurés car nous avons compris la source d'énergie des étoiles. Cette source est inépuisable... pas exactement.

A partir de quatre atomes d'hydrogène nous pouvons former un atome d'hélium. Cette réaction n'est pas directe. Elle passe par des étapes intermédiaires que nous ne détaillerons pas ici. Mais le résultat est que nous récupérons de l'énergie, des petites particules (neutrinos) et bien sûr de l'hélium. Quand le cœur de l'étoile ne sera composé que d'hélium les réactions se poursuivront vers la périphérie de l'étoile. Mais on peut imaginer que l'hélium à son tour puisse fusionner pour donner du carbone, que le carbone puisse fusionner pour donner de l'oxygène, etc. En principe ces mécanismes sont possibles mais sous certaines conditions qui ne sont pas toujours satisfaites, selon la masse de l'étoile.

Peut-on tout calculer ? En principe oui. Les lois de la physique qui gouvernent la production d'énergie, son acheminement par rayonnement, par convection (brassage des différentes couches) ou conduction, ces lois sont connues, ou au moins bien représentées. Il n'y a pas moins de cinq équations différentielles à résoudre simultanément pour décrire l'évolution d'une étoile de masse et de composition chimique initiale données. Pour une description fine il faut prendre en compte aussi les mouvements mécaniques et la perte de masse des étoiles. Vous concevez la complexité du problème. Avec l'avènement des ordinateurs il a été possible de s'attaquer à ce gigantesque problème.

On découvre ainsi qu'une étoile comme le Soleil ne peut pas démarrer immédiatement les réactions nucléaires de fusion de l'hélium. Il faut d'abord que le cœur d'hélium se contracte pour augmenter la température à un niveau suffisant. Ce faisant, les couches externes seront soufflées et l'étoile va enfler pour devenir une étoile géante rouge (extérieur plus froid). Le point représentatif du Soleil, dans le diagramme HR dont nous parlions au début de l'article, se déplacera vers la droite (vers les étoiles froides) et vers le haut (vers les étoiles

plus lumineuses). On découvre aussi que plus une étoile est massive plus tôt se fera ce passage de la zone principale du diagramme vers la zone des étoiles géantes.



L'âge des étoiles

On commence à comprendre un peu le diagramme HR pour les étoiles du voisinage solaire. Toutes ces étoiles se sont formées par contraction d'un nuage primordial mais elles n'ont pas commencé leur vie au même moment. Mais cependant, elles sont toutes arrivées dans la zone principale du diagramme HR pour y brûler leur hydrogène. Cette zone s'appelle la *séquence principale*. Là, elles y restent le temps d'épuiser leur combustible nucléaire. Pour les étoiles de faible masse, comme le Soleil, cette phase est très longue (quelques milliards d'années). Pour les étoiles massives c'est plus court (enfin... quelques centaines de millions d'années tout de même). Pour les étoiles les plus massives, c'est très court, quelques millions d'années seulement.

Quand les étoiles quittent la séquence principale pour aller rejoindre la séquence des étoiles géantes, le processus est très rapide. C'est le cœur d'hélium qui se contracte d'abord (et nous avons vu dans le dernier cours que ce processus était rapide). Arrive ensuite la combustion de l'hélium, un second souffle pour les étoiles et une seconde pose dans le diagramme HR. On comprend donc pourquoi on n'observe pas d'étoiles sur toute la surface du diagramme. On n'observe les étoiles que là où elles demeurent assez longtemps.

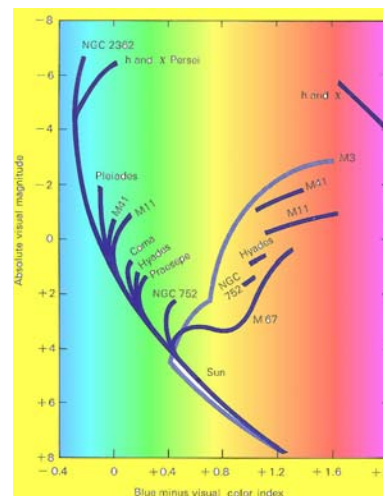
Qu'en est-il du diagramme HR des amas d'étoiles. Pourquoi un aspect différent du diagramme HR général.

La différence essentielle tient à ce que toutes les étoiles d'un amas naissent à peu près en même temps. Les étoiles demeurent

physiquement proches les une des autres. Si nous observons un diagramme d'amas qui vient juste de naître et qui n'a que quelques millions d'années, les étoiles sont toutes encore sur la séquence principale. C'est ce qu'on observe avec un amas jeune comme l'amas des Pléiades.

Si on prend un amas plus vieux, les étoiles massives auront déjà quitté la séquence principale, mais pas encore les étoiles peu massives. La séquence principale sera incurvée vers le haut. Si enfin on prend un amas très vieux, la courbure sera bien plus prononcée, seules les étoiles très peu massives seront encore sur la séquence principale. Nous venons de comprendre la diversité des diagrammes HR pour les amas stellaires.

Une conséquence importante est que la position du coude (voir le graphique) est un indicateur d'âge. On parvient, en comparant les diagrammes observés aux prévisions théoriques, à dater les amas. On trouve que les vieux amas ont plus de dix milliards d'années. Retenez bien ce résultat. Il aura une importance pour la suite de notre exploration.



D'après G. Abell, 1969

Diagramme HR pour différents amas stellaires

Nous parlerons bientôt de la fin de la vie d'une étoile, fin calme ou catastrophique.

Bibliographie :

Schwarzschild M., 1958, Structure and Evolution of the stars, Dover

Bottinelli L., 1986, L'univers des étoiles, Gammaprim

ARTICLE DE FOND

Exoplanètes et exobiologie

Eric Josselin

Groupe de Recherche en Astronomie et Astrophysique du Languedoc, Université Montpellier II

Résumé : *La première découverte d'une planète orbitant autour d'une étoile autre que le Soleil a été réalisée en 1995. Depuis, plus d'une centaine de systèmes planétaires ont été observés. Ils ont apporté un nouvel éclairage sur notre compréhension de la formation et de l'évolution de ces systèmes, et donc du Système Solaire. Ils ont par ailleurs apporté de nouvelles contraintes sur la possibilité de trouver une forme de vie hors de notre Système. Cet article est largement inspiré de l'exposé que j'ai présenté à l'école d'été du CLEA en 2005.*

Introduction

« *If we are alone in the Universe, then it is an awful waste of space* »¹. Cette phrase de Carl Sagan, astrophysicien célèbre entre autres pour sa quête d'une éventuelle intelligence extraterrestre, résume assez bien une idée ancienne, mais qui a longtemps manqué d'arguments scientifiques. L'hypothèse selon laquelle il pourrait exister une infinité de mondes, semblables ou non au nôtre, avait déjà été mentionnée par Epicure (341-270 av. J.-C.). Mais cette idée étant en contradiction avec la physique d'Aristote, elle est longtemps restée minoritaire, voire condamnée. Il faut attendre la fin du XVII^e siècle pour que la première tentative de détection d'une planète extrasolaire soit menée (C. Huygens, 1698) ... et la fin du XX^e siècle pour que cette quête porte ses fruits !

Comment détecter les planètes extrasolaires ?

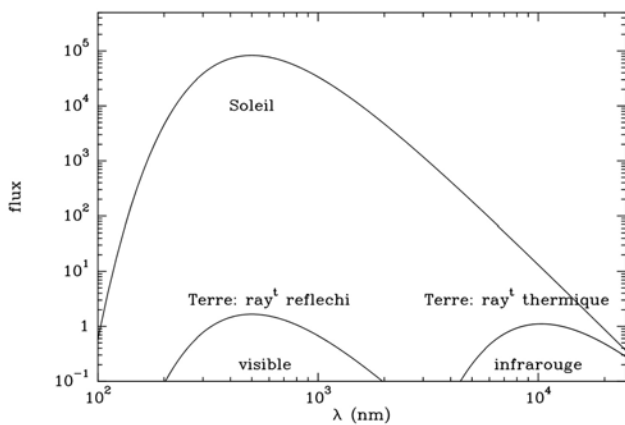
L'imagerie directe

La première technique qui vient à l'esprit est l'imagerie directe. Mais cette méthode s'avère quasiment impossible à mettre en œuvre actuellement, du fait de l'éblouissement par l'étoile. Si on considère le Système Solaire comme référence, Jupiter, la planète intrinsèquement la plus lumineuse, reste malgré tout un milliard de fois moins lumineuse que le Soleil ! En plus de ce contraste extrêmement défavorable, plusieurs

facteurs s'opposent à une éventuelle détection. Tout d'abord, pour un observateur lointain, une étoile n'apparaît pas ponctuelle, mais forme une tache (la tache de diffraction), qui est susceptible de « noyer » le rayonnement de la planète. De plus, dans le cas de l'observation d'un système lointain intervient une « fonction de phase », qui prend en compte les effets d'inclinaison du plan orbital de la planète par rapport à l'observateur, de la position de la planète sur son orbite (pensez aux phases de Vénus !). Cette fonction est toujours inférieure à 1, c'est-à-dire que le rapport *observé* des luminosités de la planète et de l'étoile est toujours inférieur au rapport *intrinsèque*.

Il existe cependant des moyens de rendre envisageable une telle observation. Tout d'abord, le rapport de luminosité n'est pas le même à toutes les longueurs d'onde. Ainsi, dans l'infrarouge (autour de 10 μm pour la Terre), le rayonnement thermique propre de la planète atteint son maximum, alors que le rayonnement d'une étoile de type solaire chute rapidement (voir figure). Malheureusement, une grande partie du rayonnement infrarouge est inobservable depuis le sol, du fait de l'absorption par l'atmosphère terrestre. Ce type d'observations ne peut donc être réalisé qu'avec un télescope spatial. Par ailleurs, la combinaison de plusieurs télescopes (principe de l'interférométrie) permet de réaliser un télescope équivalent à un télescope géant, pour lequel la tache de diffraction sera réduite. Dans tous les cas, la mise en œuvre de ces techniques s'avérant extrêmement lourde, elle ne le sera que pour l'étude de planètes pré-identifiées plutôt que pour la détection de nouveaux systèmes.

¹ "Si nous sommes seuls dans l'Univers, c'est alors un terrible gaspillage d'espace"



L'année 2005 a vu l'acquisition de la première « image » d'une planète extrasolaire. Cette image a été obtenue dans l'infrarouge proche (2 μm) avec l'un des télescopes du *Very Large Telescope* (VLT) de l'Observatoire Européen Austral (ESO) équipé d'un coronographe et d'un système d'optique adaptative, qui permet de corriger les déformations de l'image par la turbulence atmosphérique. Il faut noter toutefois que cette planète orbite autour d'une naine brune, c'est-à-dire une étoile « ratée », 500 fois moins lumineuse que le Soleil. Il faudra encore patienter quelques années avant de pouvoir obtenir une image d'une planète de type terrestre orbitant autour d'une étoile de type solaire ...

Les perturbations dynamiques

L'observation directe de ces planètes extrasolaires restant alors inenvisageable, on s'attache donc à rechercher le mouvement d'une étoile autour de laquelle orbiterait une planète. En effet, du fait de l'interaction gravitationnelle entre une étoile et une planète, ces deux corps orbitent autour de leur centre de gravité. Celui-ci reste cependant très proche du centre de l'étoile : le centre de gravité du système Soleil – Jupiter est ainsi à 740 000 km du centre du Soleil (soit approximativement un rayon solaire), et celui du système Soleil – Terre à 450 km du centre du Soleil seulement² ! Le mouvement de l'étoile qui en résulte est donc faible (et d'autant plus faible que la planète est peu massive) mais est parfois détectable. Ce mouvement peut potentiellement s'observer de trois manières : l'astrométrie, le chronométrage et les variations de vitesses.

L'astrométrie consiste à observer les variations de position de l'étoile sur la voûte céleste. Pour un système de type Soleil – Jupiter situé à 10 parsecs (1 pc $\approx 3 \times 10^{16}$ m), et correspond à la distance typique entre

² On peut donc continuer à prétendre que la Terre gravite autour du Soleil ...

les étoiles dans notre Galaxie), le déplacement observé serait de 5 mas (millièmes de seconde d'arc), soit à la limite de précision des mesures actuellement réalisables. Cette technique n'a actuellement conduit à aucune nouvelle détection.

Le chronométrage consiste à mesurer une variation dans le temps d'arrivée d'un signal régulier émis par l'étoile, du fait de la variation de distance à l'observateur (distance moyenne \pm distance au centre de gravité du système étoile – planète), et de la vitesse finie de propagation de la lumière. Cette technique est à comparer avec la technique employée par Ole Römer pour mettre en évidence la finitude de la vitesse de la lumière (cf. CC N°83, p. 28). Malheureusement, les étoiles « normales » n'émettent pas un signal suffisamment régulier pour que l'on puisse appliquer cette méthode. Une exception notable est le cas des pulsars, ces étoiles à neutrons ayant un fort champ magnétique et une rotation extrêmement stable. Le chronométrage de l'un d'entre eux, PSR 1917+12, a mis en évidence des irrégularités dans la période d'arrivée de ses signaux, dues à la présence de trois planètes telluriques autour de ce pulsar (cf. CC N°60, p. 2). Les pulsars résultent de l'explosion d'une étoile massive (supernova de type II). Un tel phénomène a nécessairement volatilisé d'éventuelles planètes présentes avant l'explosion. Celles qui ont été détectées se sont donc probablement formées à partir des éjecta de l'étoile. Quoi qu'il en soit, les conditions régnant sur ces planètes sont certainement trop hostiles pour permettre l'apparition d'une quelconque forme de vie ...

Restent les variations de la vitesse de l'étoile. Celles-ci sont mesurables par effet Doppler. Plus précisément, on mesure le décalage des raies spectrales par rapport à leur position nominale, mesurée en laboratoire :

$$\frac{\lambda_{\text{observé}} - \lambda_{\text{lab.}}}{\lambda_{\text{lab.}}} = \frac{v_*}{c}$$

λ désigne la longueur d'onde d'une raie donnée, v_* la vitesse *radiale* (c'est-à-dire projetée sur la ligne de visée) par rapport à l'observateur et c la vitesse de la lumière. Si l'étoile est en mouvement autour d'un centre (de gravité) dû à la présence d'une planète en orbite, on mesurera donc une variation périodique de cette vitesse, la période T étant naturellement égale à la période orbitale de la planète. De cette mesure, on peut déduire :

- la distance a étoile – planète, en appliquant la 3^{ème} loi de Kepler :

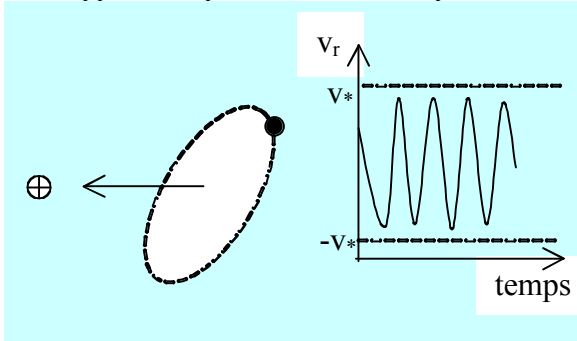
$$\frac{a^3}{T^2} = \frac{GM}{4\pi^2}$$

M étant la masse du système et G la constante de gravitation ;

- la distance d entre l'étoile et le centre d'inertie du système, à partir de l'amplitude de variation de la vitesse δv , et donc la masse de la planète M_p :

$$\frac{\delta v}{2} = \frac{2\pi d}{T} \quad \frac{d}{a} = \frac{M_p}{M_* + M_p} \approx \frac{M_p}{M_*}$$

En fait, comme on ne mesure qu'une vitesse projetée, et que l'angle de projection est a priori inconnu, on ne détermine qu'une *limite inférieure* à la masse de la planète (on détermine $M_p \times \sin i$, i étant l'angle entre l'axe de rotation et la ligne de visée). Pour un système de type Soleil – Jupiter, l'amplitude de variation de la vitesse serait de 25 m/s. Pour un système Soleil – Terre, elle ne serait que de 20 cm/s ... Étant donné la précision des spectrographes actuels, cette méthode n'est applicable qu'à la détection de planètes massives.

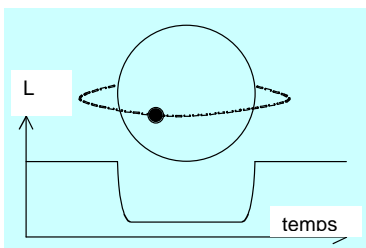


Les transits planétaires

Une autre technique intéressante pour l'étude des planètes extrasolaires est la méthode des transits. Si le système présente une inclinaison adéquate, soit un axe de rotation quasi perpendiculaire à la ligne de visée, chaque passage de la planète devant l'étoile entraînera une baisse de la luminosité L de l'étoile, d'autant plus importante que la taille relative de la planète par rapport à l'étoile est grande :

$$\frac{\Delta L}{L} = \left(\frac{R_p}{R_*} \right)^2$$

Étant donné le caractère aléatoire de l'inclinaison des systèmes par rapport à la Terre, ces transits sont extrêmement rares. Par contre, dans le cas où ils seraient observés, ils permettent donc de mesurer le rayon de la planète, donc sa densité, et de distinguer les planètes gazeuses des planètes solides.



Les premières détections

51 Pégase b

En août 1995, Michel Mayor et Didier Queloz, de l'Observatoire de Genève, annoncent la première découverte d'une planète extrasolaire, autour de l'étoile 51 Pégase, par la méthode de variation de la vitesse exposée ci-dessus. Les observations ont été réalisées avec le spectrographe ELODIE, monté sur le télescope de 193cm de l'Observatoire de Haute Provence. Cette découverte fait sensation, non seulement par sa nature, mais aussi par les caractéristiques de la planète. Elle a une masse de 0,45 fois la masse de Jupiter (au moins) mais sa distance à l'étoile n'est que de 0,05 u.a. (1 unité astronomique = distance Terre – Soleil ; Jupiter est à environ 5 u.a. du Soleil). Or, les théories de formation du Système Solaire nous avaient appris que les planètes géantes ne pouvaient se former que « loin » des étoiles !

Du coup, certains n'ont pas hésité à contester cette découverte, attribuant les variations de vitesses à des mouvements dans l'atmosphère de l'étoile. Mais la régularité de ces variations, et surtout la découverte depuis d'autres systèmes, ont mis fin à cette polémique.

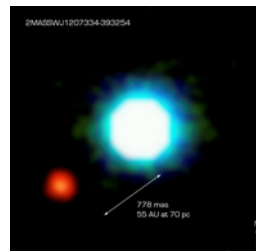


Photo ESO 14a/05 (30 avril 2005)

La naine brune 2M1207 et son compagnon planétaire

Premières leçons

À ce jour, 170 planètes ont été détectées, dont 23 dans des systèmes multiples. Leurs masses sont comprises entre 0,06 et 13 fois la masse de Jupiter, et ont des distances orbitales allant de 0,02 à 6 u.a. Ainsi, on constate que 5% au moins des étoiles sont accompagnées d'un cortège planétaire. La plupart de ces étoiles sont « riches en éléments lourds » (c'est-à-dire que l'abondance relative des éléments plus lourds que le carbone est plus grande que dans le Soleil). Ceci confirme l'hypothèse selon laquelle les planètes gazeuses se forment par accrétion de gaz autour d'un cœur rocheux (composé de ces éléments lourds).

Le premier transit fut observé en 2000, pour l'étoile HD 209458. On a pu ainsi mesurer la densité de sa planète, de l'ordre de 0,5 (soit moins dense encore que

Saturne, qui détient le record dans le Système Solaire !). On avait donc la première planète *géante gazeuse* clairement identifiée ! Mais sa proximité (elle n'est qu'à 0,045 u.a.), associée à cette faible densité, implique des relations tumultueuses. Avec une température de 1300 K, plus les effets des marées qu'elle ne manque pas de subir, cette planète est progressivement évaporée ...

Migrations

Reste à expliquer ces paramètres orbitaux surprenants. Comme mentionnée ci-dessus, la formation des planètes géantes gazeuses ne peut se faire qu'au-delà de la limite de condensation de l'eau, soit environ 5 u.a., par accréation lente de gaz autour d'un embryon de roches et de glaces, de 10 masses terrestres environ, puis par effondrement gravitationnel du gaz.

La seule façon d'expliquer les courtes distances étoile – planète observées est donc que ces planètes ont migré. Cette migration peut être provoquée par les forces de frictions entre la planète nouvellement formée et le disque proto-planétaire de débris, qui ralentissent la planète et donc la font « tomber » vers l'étoile. Mais la compréhension de ce phénomène a longtemps été un défi pour les théoriciens. Une fois la planète formée, le disque est en principe trop dispersé pour engendrer une friction suffisante. Les derniers modèles montrent en fait que la planète peut continuer à accrêter de la matière au cours de sa migration, et donc n'atteindre sa masse finale qu'une fois stabilisée sur une orbite proche de l'étoile.

Du coup, ces simulations semblent reproduire si facilement les orbites observées qu'on est amené à se demander pourquoi ces migrations n'ont pas eu lieu dans le Système Solaire ! En fait, il y a eu probablement migration. Les planètes géantes devant se former sur des orbites circulaires et coplanaires, les excentricités actuellement observées (6%, 9% et 8% pour Jupiter, Saturne et Uranus) s'expliquent si on considère une migration due non seulement aux frictions mais aussi aux interactions entre Jupiter et Saturne, dont les distances initiales auraient été dans un rapport de 2 initialement (phénomène de résonance). Les orbites auraient alors été chaotiques, se seraient croisées, avant de se stabiliser dans leur configuration actuelle. Cette hypothèse est très séduisante car elle permet d'expliquer non seulement les orbites actuelles des planètes géantes gazeuses, mais aussi la distribution des petits corps (astéroïdes, objets de Kuiper) et le pic de bombardement tardif de la lune, 700 millions d'années après sa formation. En résumé : il y a bien eu migrations dans le Système Solaire, mais elle est plus complexe car il y a plus de planètes géantes.

Une vie en dehors de la Terre ?

Combien de civilisations dans notre Galaxie ?

L'astrophysicien Drake tenta de répondre à cette question, en posant une équation devenue célèbre et qui porte son nom :

$$N_T = R_* f_p n_e f_l f_i f_t t_l$$

Les différents facteurs qui apparaissent sont :

- N_T : nombre de civilisations capables de communiquer ;
- R_* : taux de formation des « bonnes » étoiles (type ~ solaire) ;
- f_p : fraction des étoiles ayant un système planétaire ;
- n_e : nombre de planètes de type terrestre par système planétaire ;
- f_l : fraction de ces planètes sur lesquelles la vie apparaît ;
- f_i : fraction sur lesquelles l'intelligence se développe ;
- f_t : fraction des êtres intelligents développant une technologie ;
- t_l : durée de vie d'une civilisation capable de communiquer.

Le problème est que l'on n'a aucune estimation fiable de la plupart de ces paramètres, puisqu'on ne connaît qu'une seule planète tellurique habitée, et une seule civilisation, la nôtre (et encore, on ne connaît pas sa durée de vie ...). Seuls le taux de formation d'étoiles de type solaire (de l'ordre de 1 à 10 par an dans notre Galaxie), et, maintenant, la fraction d'étoiles ayant un système planétaire (au moins 5%) sont à peu près connus grâce aux observations astronomiques. Pour les autres paramètres, libre à chacun de se montrer optimiste ou pessimiste ... Drake était parvenu à environ 15 millions de civilisations intelligentes communicantes, ce qui justifie de les rechercher ! Mais les plus pessimistes parviennent à un nombre inférieur à 1 ...

Premier problème : savoir définir la vie ...

Avant de se lancer dans la recherche de vie extraterrestre, encore faut-il savoir ce que l'on cherche ... Et ce n'est pas aussi simple qu'il y paraît ! Il faut établir une définition suffisamment large pour inclure toute forme de vie terrestre (y compris les plus primitives) et extraterrestres (même très différentes des différentes vies terrestres), tout en restant suffisamment précise pour exclure des formes de « vie » artificielles comme les ordinateurs. Ce problème est loin de se limiter à une simple question de sémantique, mais peut conditionner notre capacité à interpréter une information, telle que la découverte de structures particulières sur la météorite martienne ALH 84001

(micro-organisme fossile, ou simple phénomène chimique ou minéralogique ?).

Pour A. Brack, l'un des pères de l'exobiologie en France, « *la vie est un système chimique, capable de se reproduire par autocatalyse et de faire des erreurs, qui augmentent progressivement l'efficacité de l'autocatalyse* ». On voit donc émerger la notion, floue, de complexité chimique sous-jacente à la notion de vie. Cette complexité va donner des pistes pour la recherche de vie extraterrestre.

Retour sur Terre ...

Essayons tout d'abord de voir comment la vie est apparue sur Terre. Selon le scénario standard, des petites molécules réactives (H₂O, HCN), d'origine interstellaire et/ou cométaire, ont réagi sur terre, pour former des bio-monomères (acides aminés, nucléotides), puis des bio-polymères (protéines, ARN), qui ont conduit à l'apparition des premiers systèmes autoreproducteurs, puis des premières cellules.

Ce principe d'émergence de structures biologiques à partir de processus purement chimiques dans une « soupe primordiale » doit son succès à la célèbre expérience de Miller et Urey, qui, en 1953, ont observé la formation d'acides aminés via la conversion d'énergie électrique en énergie biochimique dans une atmosphère primitive constituée de méthane, d'ammoniac, de vapeur d'eau et d'hydrogène. Depuis, on a réalisé que le carbone atmosphérique était plus probablement sous forme de dioxyde de carbone que de méthane. Une telle atmosphère, non réductrice, induirait un taux de production d'acides aminés très faible. De tels processus chimiques auraient par contre pu avoir lieu au voisinage des sources hydrothermales, plus riches en méthane.

À moins que ces acides aminés soient d'origine extraterrestre ... Les comètes et certaines météorites (les chondrites) sont en effet riches en molécules organiques, comme l'a montré en particulier l'analyse de la météorite de Murchinson.

Dans tous les cas, deux principes de base apparaissent. Tout d'abord, la complexité chimique est basée sur le carbone. Cet élément est en effet idéal, puisqu'il est très réactif et très abondant dans l'Univers. Des alternatives ont été envisagées, telle qu'une chimie basée sur le silicium. Toutefois, cet élément ne semble pas en mesure de s'assembler en macromolécules, étant donné la « rigidité » de ses liaisons chimiques.

Ensuite, il faut un solvant pour assurer le transport et la survie des molécules. L'eau apparaît comme le solvant idéal, étant donné ses propriétés électriques.

Ceci conduit à la définition d'une zone habitable, c'est-à-dire la zone autour d'une étoile dans

laquelle la température est compatible avec la présence d'eau liquide. Une planète aura en effet une température d'autant plus basse qu'elle sera éloignée de l'étoile. Une modélisation relativement simple, mais incluant des effets importants comme l'effet de serre, donne ainsi, pour une étoile de type solaire, une zone habitable allant de 0,6 à 1,1 u.a. Si on tient compte par ailleurs de l'évolution du Soleil, et en particulier de la croissance de sa luminosité, la zone habitable continue, compatible avec les échelles de temps des processus biologiques, se restreint à 0,95 à 1.01 u.a.

Ces considérations semblent suggérer que l'apparition de la vie ailleurs que sur Terre est très improbable. Cependant, on trouve sur Terre des organismes, dits extrémophiles, qui se sont adaptés à des conditions extrêmes en termes de température, pression, acidité. Tout reste donc envisageable !

Dans le Système Solaire ?

Si on retient le principe d'un solvant comme ingrédient nécessaire à une activité pré-biotique, trois sites dans le Système Solaire en dehors de la Terre sont à considérer.

Les nombreuses missions d'exploration de Mars ont montré de nombreuses traces de ruissellement à sa surface, attestant qu'un liquide non visqueux y a existé dans le passé. Étant donné la composition des calottes polaires et celle, supposée, du sous-sol martien, l'eau est le plus probable. Cependant, du fait du comportement chaotique de l'axe de rotation, le climat martien est extrêmement instable, rendant les conditions particulièrement hostiles. Dans tous les cas, les températures très basses actuelles et la très faible pression atmosphérique semblent incompatibles avec la survie d'une quelconque forme de vie primitive passée.

Le deuxième site intéressant est Europe, l'un des satellites de Jupiter. Europe est entièrement recouvert de glaces, mais ces glaces sont parcourues par de nombreuses failles, qui laissent supposer l'existence d'un océan d'eau liquide sous cette croûte. L'énergie nécessaire au maintien de cette eau liquide pourrait provenir des effets des marées joviennes. Des missions d'exploration de ce satellite sont actuellement envisagées.

Enfin, Titan, le plus gros satellite de Saturne, est particulièrement intéressant, puisque c'est le seul satellite d'une planète géante à avoir une atmosphère. Cette atmosphère est riche en azote, mais aussi en hydrocarbures, en particulier en méthane. Cette molécule étant relativement fragile, un réservoir de méthane liquide est probable. Les premiers résultats de la mission Cassini – Huygens laissent penser qu'il n'y a pas d'océans de méthane liquide, mais éventuellement des rivières et des lacs. À suivre ...

Hors du Système Solaire ?

Actuellement, aucun site habitable n'a été identifié en dehors du Système Solaire, puisque les techniques actuelles ne permettent pas de détecter d'éventuelles planètes telluriques. La question de la détectabilité d'une activité biologique a cependant déjà été étudiée.

Sur Terre, l'oxygène moléculaire (O_2) est entièrement produit par la biosphère, par photosynthèse. Avec les postulats de base énoncés ci-dessus (chimie du carbone + eau liquide), la production d'oxygène moléculaire est une conséquence naturelle d'une activité biologique. Sa détection serait donc un indice très intéressant ! On recherchera plutôt l'ozone (O_3), produit à partir de O_2 , et qui est observable dans l'infrarouge. C'est le principe à la base de plusieurs missions futures, comme le satellite DARWIN, de l'Agence Spatiale Européenne, qui devrait être lancé autour de 2015.

Il faut cependant être prudent. Une non-détection ne signifierait pas nécessairement l'absence de vie. Sur Terre, l'oxygénation de l'atmosphère a débuté il y a environ 2 milliards d'années, alors que la vie sous-marine a commencé 1,5 milliard d'années plus tôt. Par ailleurs, l'oxygène moléculaire peut être produit de façon purement abiotique, par photolyse de l'eau. Une bio-signature fiable serait donc la détection simultanée de l'ozone, la vapeur d'eau et le dioxyde de carbone.

Mais où sont-ils ???

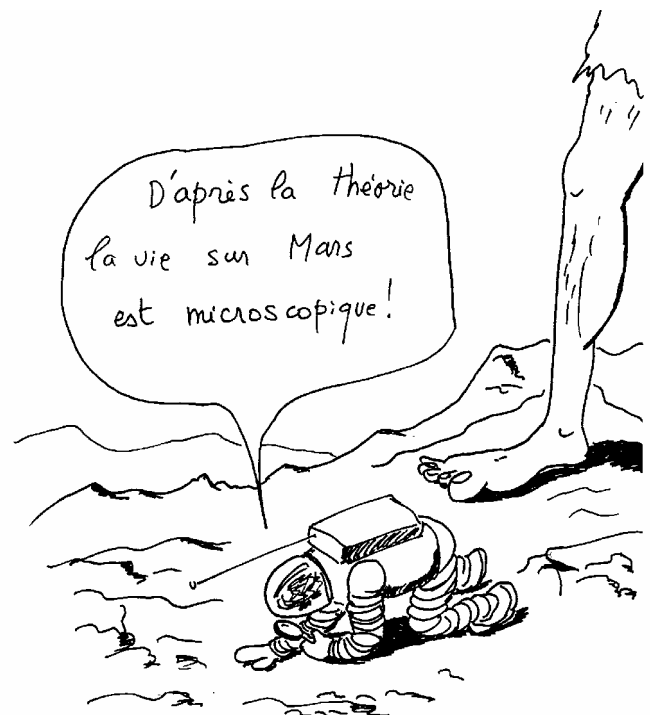
Enrico Fermi a énoncé ce fameux paradoxe. Étant donné la vitesse de développement technologique sur Terre, il semble probable que les humains seront en mesure de coloniser la Galaxie d'ici quelques millions d'années. Comparé aux échelles de temps cosmiques, ce délai est extrêmement court, et laisse donc supposer que des vies extraterrestres sont déjà parvenues à ce stade. On peut donc se demander pourquoi nous n'avons toujours pas été contactés. Deux explications (sérieuses) sont possibles. Soit l'apparition (ou le développement) de la vie est difficile et donc improbable, soit toute civilisation s'autodétruit inexorablement avant de pouvoir conquérir la Galaxie.

Cette vision est bien sûr très anthropomorphique, et probablement largement conditionnée par les remords de Fermi qui avait contribué à la mise au point de l'arme atomique. Au moins nous rappelle-t-elle notre fragilité ...

Conclusion provisoire : le futur de la recherche

La prochaine étape dans notre connaissance des planètes extrasolaires et de l'exobiologie sera la possibilité de détecter des planètes telluriques. Plusieurs missions futures devraient le permettre. Le satellite COROT (CNES), dont le lancement est prévu en 2007, observera entre autres des transits planétaires avec une précision jusque-là inégalée. Le satellite GAIA (ESA) sera un satellite astrométrique et vélocimétrique de très grande précision et devrait être lancé en 2010. Le James Webb Space Telescope, successeur du Hubble Space Telescope, aura un miroir de 6,5 m et observera dans l'infrarouge. Au sol, des instruments dédiés à la recherche de planètes telluriques sont envisagés sur les VLT de l'Observatoire Européen Austral.

L'avenir est donc riche de promesses !



gp

HISTOIRE

La ruse de Descartes

Pierre Lerich

Résumé : Dix ans après le désastreux procès de Galilée, Descartes a réussi cet exploit de nier le mouvement de la Terre, tout en déclarant son adhésion au système de Copernic. Comment un mathématicien et un philosophe de la dimension de Descartes a-t-il pu affirmer en même temps une chose et son contraire sans provoquer de scandale ?

Le premier ouvrage de Descartes exposant sa théorie des tourbillons était en préparation lorsque l'Europe apprit la condamnation de Galilée et l'interdiction d'enseigner le mouvement de la Terre. Or, les tourbillons n'étaient plausibles que dans le système de Copernic. La rotation du Soleil sur lui-même entraînait la « matière céleste » qui l'entourait, qui elle-même entraînait les planètes à des vitesses différentes suivant leur distance, comme dans tous les tourbillons. Si la Terre était immobile au centre du monde, le système élaboré par Descartes n'avait plus de sens : on ne pouvait pas imaginer un tourbillon céleste tournant autour d'une Terre immobile. Pour ne pas être entraînée en rotation par le tourbillon, il aurait fallu que la Terre soit accrochée à quelque chose, mais à quoi ? Descartes ne pouvait donc pas exposer sa théorie sans prendre position en faveur de Copernic, c'est-à-dire contre l'Eglise. Comme il n'avait pas l'intention d'affronter l'Eglise, il renonça à publier sa théorie.

Dix ans plus tard, en 1644, Descartes fait paraître un gros ouvrage : *Les Principes de la Philosophie*. Le mot « Philosophie » englobait alors ce que nous appelons ainsi aujourd'hui, c'est-à-dire la métaphysique, la logique, la morale etc, mais aussi la physique et en général toutes les sciences. C'était encore le sens de ce mot au XVIII^e siècle. L'ambition de Descartes

est immense : il voudrait faire tenir dans un seul livre toutes les connaissances humaines, depuis les preuves de l'existence de Dieu jusqu'aux rapports de l'âme et du corps, en passant par les différentes formes et états de la matière : pourquoi l'acier est flexible, pourquoi le verre est transparent, etc. Aujourd'hui, tout cela fait un peu bric-à-brac, mais au XVII^e siècle, il était encore concevable de parcourir ainsi l'ensemble des connaissances. Inutile de préciser que les explications proposées sont assez folkloriques, un peu comme la médecine dans les comédies de Molière.

La troisième partie de l'ouvrage traite de l'univers, du Soleil, des étoiles etc. On n'ose pas parler d'astronomie, car aucune notion technique n'est définie, aucun angle, aucune distance, aucune mesure. C'est plutôt une idée du ciel en général : Descartes n'était pas astronome et n'a jamais prétendu l'être. Il n'a pas changé d'opinion en dix ans : il rejette les systèmes de Ptolémée et de Tycho-Brahé, et adopte celui de Copernic, qui lui paraît « plus clair et plus simple ». Le calcul des positions planétaires est possible dans les trois systèmes. Il ne reste donc pour les départager que l'intuition personnelle, le sentiment de la vérité, « l'intime conviction » comme dans les procès sans preuve matérielle. La première preuve certaine du mouvement de la Terre n'apparaîtra

qu'un siècle plus tard (l'aberration de la lumière, découverte par Bradley en 1728). Mais alors se pose le problème de l'Eglise, qui interdit d'enseigner le mouvement de la Terre. La réponse de Descartes est apportée par la célèbre section 19 intitulée « que je nie le mouvement de la Terre ».

Les sections suivantes permettent de comprendre cette déclaration provocante. Pour contourner l'interdit ecclésiastique, il suffit de choisir adroitement le sens qu'on donne au mot « mouvement ». Pour Descartes, le mouvement est : « le transport d'un corps du voisinage de ceux qui le touchent immédiatement et que nous considérons comme en repos, vers le voisinage de quelques autres ». Il résulte de cette définition qu'un navire voiles repliées et rameurs au repos est immobile (dans l'eau qui le porte) même si cette eau se déplace par suite d'un courant et fait dériver le navire par rapport à la côte. Si l'équipage hisse les voiles ou agit sur les rames, on pourra dire alors que le navire sera en mouvement. On voit que Descartes a choisi un exemple de son temps : une galère à voiles et à rames. L'application à la Terre est évidente : la Terre est immobile (dans son tourbillon) puisqu'elle entraîne avec elle la couche d'air qui l'entoure et qui constitue la partie la plus basse et la plus dense de ce tourbillon. Celui-ci tourne sur lui-même (entraînant la Lune) et autour du Soleil, mais cela n'empêche pas la Terre d'être immobile. Tel est selon Descartes, le « vrai sens » du mot « mouvement ». L'autre sens, le bateau qui dérive par rapport à la côte, ou la Terre en mouvement par rapport aux étoiles, est un sens populaire, grossier, peu évolué.

Les inquisiteurs du Vatican ont dû se demander si Descartes se payait leur tête. Il n'était pas facile pour eux d'analyser cette argumentation. Galilée l'aurait peut-être appréciée, mais il était mort deux ans plus tôt. Cependant, le but de Descartes n'était pas de se moquer de l'Inquisition mais simplement d'exposer sa théorie des tourbillons à laquelle il tenait beaucoup. Il croyait avoir démontré a priori que le vide n'existe pas, quelques années avant que Pascal ne prouve le contraire par une

expérience incontestable. Si le vide n'existe pas et si tout mouvement doit avoir une cause mécanique, la théorie des tourbillons apporte une explication plausible de tout ce qui se passe dans le ciel. Les planètes autour du Soleil et les satellites autour des planètes se placent naturellement à la distance de leur astre central où leur densité est exactement équilibrée par la densité du milieu.

D'autre part les différents « anneaux » dont se composent les tourbillons ne sont pas exactement circulaires, ils peuvent être un peu ovales, pour tenir compte des distances variables, bien connues depuis l'antiquité. Bref, tout cela est assez cohérent, facile à exposer sans la moindre démonstration, et finalement cent fois plus convaincant que la gravitation universelle.

Descartes a-t-il eu conscience d'avoir employé à propos du mouvement de la Terre une « ruse philosophique », selon l'expression de Leibniz ? Etait-il de bonne foi dans sa distinction du « vrai sens » du mot « mouvement » par opposition au sens populaire de ce mot ? Il est évident que ce « vrai sens » est au cœur du problème. Pour le lecteur moderne, tous les repères sont également légitimes et il n'y a pas de « vrai sens » du mot « mouvement ». Par exemple, on peut déterminer le mouvement d'un avion par rapport à l'air, le mouvement de l'air par rapport au sol (le vent) et le mouvement résultant de l'avion par rapport au sol. Aucun de ces trois mouvements n'est plus « vrai » que les deux autres. Descartes a bien dû se rendre compte que sa démonstration n'était pas très honnête, le repère choisi pour définir (et nier) le mouvement de la Terre, c'est-à-dire son environnement immédiat, ayant été choisi arbitrairement. En fait de « vrai sens », Descartes a choisi le sens qui l'arrangeait. Dans ces conditions, le mot « ruse » employé par Leibniz était entièrement justifié.

Ce qui est critiquable dans cette stratégie, c'est que selon les historiens, Descartes avait bon espoir de faire adopter son ouvrage par les Jésuites, qui occupaient alors une grande place dans l'enseignement en France. Cela signifie

que pour s'introduire dans l'enseignement, Descartes était prêt à tricher un peu avec la vérité, ou du moins à la présenter d'une manière partielle, et même trompeuse. Bien sûr, il n'était pas responsable de cette triste situation, qui résultait directement de la condamnation de Galilée. D'un côté, on serait tenté de dire « bien joué ! ». D'un autre côté, on peut penser qu'il n'aurait pas dû entrer dans ce jeu ridicule : résidant habituellement en Hollande, il ne risquait rien contrairement à Galilée. Il risquait seulement de voir son livre rejeté par les Jésuites. Pascal était certainement mieux inspiré quand il déclarait que si vraiment la Terre tourne, ce n'est pas le jugement du Vatican qui l'en empêchera.

Descartes a légué à la postérité l'association des courbes et des équations (d'où les coordonnées cartésiennes) et le doute systématique à l'égard des idées admises et des doctrines officielles (d'où l'esprit cartésien et le *Discours de la Méthode*). Ces titres de gloire suffisent largement à faire oublier le fiasco de la théorie des tourbillons. Celle-ci connut pourtant un vif succès. On la trouve exposée avec enthousiasme dans les *Entretiens sur la pluralité des mondes*, où Fontenelle montre la Marquise charmée par une théorie si facile et si

agréable. Ce succès, amplifié par un effet de mode, se heurta pourtant à la critique brutale de Newton : l'existence des tourbillons était physiquement impossible, car ils ne pouvaient respecter à la fois la 2^e et la 3^e loi de Kepler. Quand ces critiques furent connues et discutées, Descartes était mort depuis longtemps mais ses nombreux partisans firent tout leur possible pour défendre la gloire du grand homme. Curieusement, la ruse qui avait permis à Descartes d'exposer sa théorie malgré le décret du Vatican n'est mentionnée par aucun de ceux qui ont écrit sur les tourbillons : ni Fontenelle, ni Voltaire, ni Laplace ne font la moindre allusion à cet épisode un peu désolant. Ils ont dû penser qu'il valait mieux l'oublier.

Ces vieilles controverses sont aujourd'hui enfouies sous des tonnes de poussière. Le texte de Descartes constitue le tome IX de ses œuvres complètes (volume 1 en Latin et volume 2 en Français). C'est une lecture assez plaisante pour les rats de bibliothèque les plus endurcis. On peut aussi consulter l'ouvrage passionnant de Michèle Grenet : *La Passion des astres au XVII^e siècle* (Hachette 1994) avec une belle préface de J.C. Pecker.

■

Une bonne "Méthode" de l'Administration postale pour rendre célèbre l'ouvrage de Descartes

Il s'agit en fait d'une erreur du graveur Henry Cheffer, ou d'une ruse subtile. Lors d'un premier tirage du timbre, censé commémorer en 1937 l'ouvrage de Descartes : "Discours de la Méthode", le graveur inscrivit "Discours sur la Méthode". Cette erreur, vite repérée par l'administration des postes, a été corrigée par un nouveau tirage. C'était en tous cas une bonne "Méthode" pour rendre célèbres le timbre et l'ouvrage.



Timbres de M. Bobin
(voir aussi <http://orochoir.club.fr/Timbres>)

AVEC NOS petits ELEVES

L'éclipse de Soleil vue par des enfants

Josette Berthomieu – Ecole maternelle de Montferrat (Var)

Résumé : À l'occasion de l'éclipse partielle de Soleil du 3 octobre, l'école maternelle de Montferrat (83), a « bravé » les directives officielles et mené son enquête sur ce phénomène astronomique. Voici un aperçu du travail réalisé en classe de Petits-Moyens.

La semaine précédant l'éclipse du 3 octobre 2005, les élèves de 3-4 ans se sont interrogés sur le Soleil :

*« C'est une boule et des rayons.
Il brille et il fait mal aux yeux ; il les fait gonfler.
Il réchauffe les gens, les chevaux, et ça fait du bien au corps.
Il sèche.
On ne peut pas aller sur le Soleil, il est très haut.
On peut aller en fusée jusqu'au Soleil ou sur la Lune.*

*Le jour, c'est le Soleil, et la nuit la Lune ...
Ah non !
Quand le Soleil se couche, il va derrière la montagne et la nuit, il va à Paris, ou à La Réunion. Il va réveiller d'autres gens. »*

Puis ils se sont familiarisés avec les lunettes « spéciales éclipse » pour faire leurs premières observations du Soleil.

Le 3 octobre, ils étaient prêts.



Après une série de 4 observations durant l'éclipse, voici leurs hypothèses :

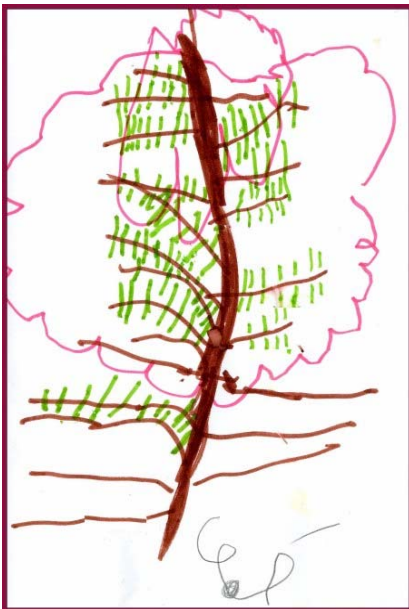
- *Le Soleil s'est déguisé en Lune et il y a plein de morceaux qui sont revenus après.*
- *C'est de la magie. Non ! Il n'y a pas de baguette.*
- *Peut-être qu'il y a un arbre là-haut dans le ciel et il a caché le Soleil.*
- *C'est peut-être des nuages ?*

De ces hypothèses est née l'histoire « Le Soleil ».

Le Soleil



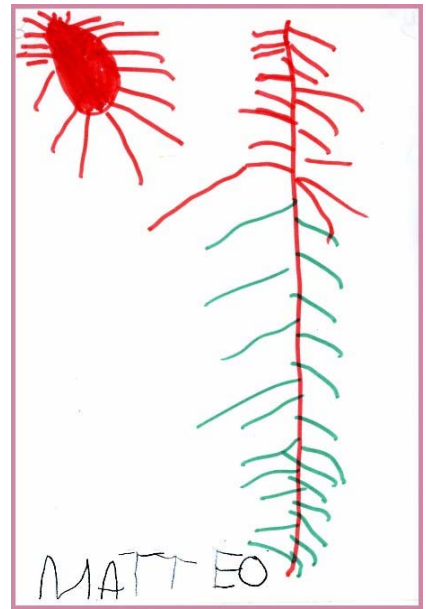
Une histoire inventée par les Moyens de l'école maternelle de Montferrat (Var).



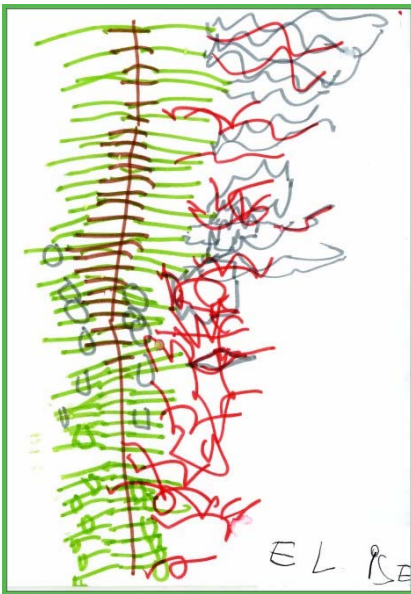
Il était une fois un nuage qui s'était transformé en arbre.



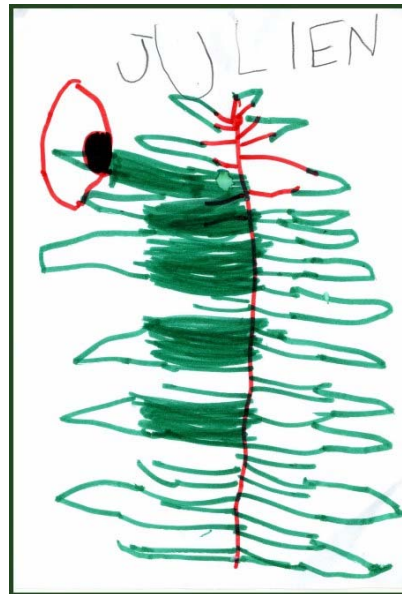
Cet arbre, c'était un sapin, un très grand sapin.



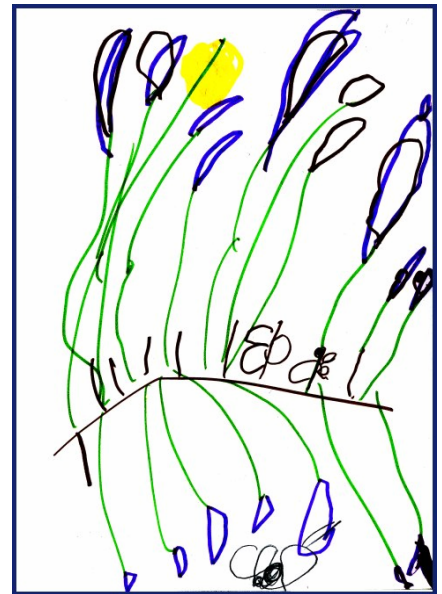
Il voulait casser le Soleil pour devenir le plus fort du monde tout entier.



Il transforme alors ses aiguilles en couteaux géants.



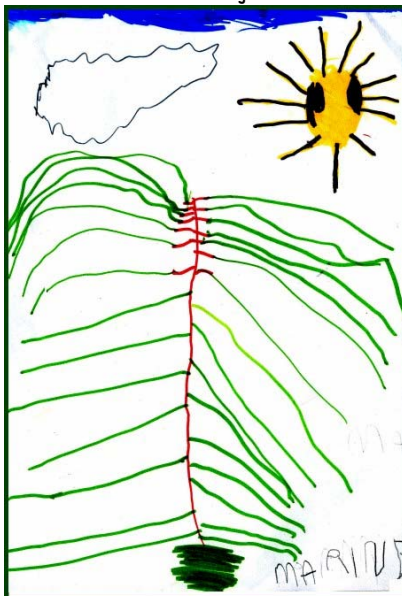
Il attrape le Soleil et le coupe comme ça !



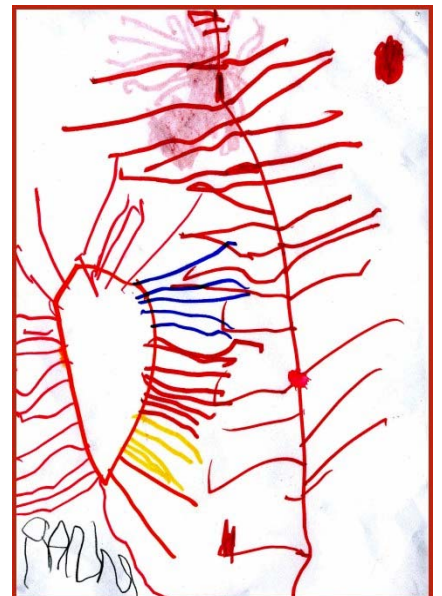
Mais le sapin se fatigue, il s'arrête et il s'endort



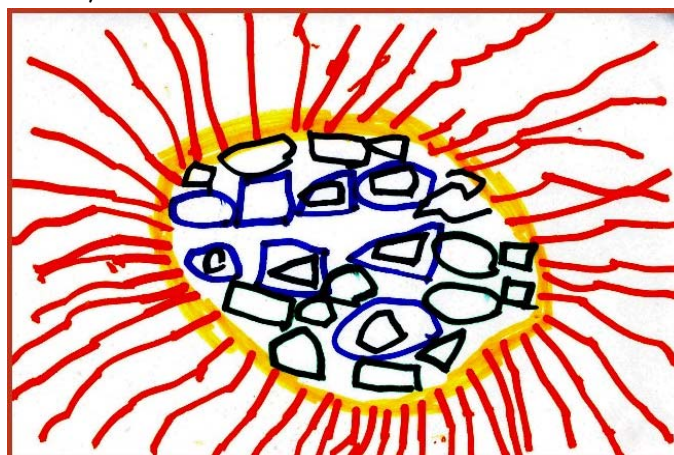
Alors ses aiguilles tombent pour ne plus faire mal au Soleil,



et le sapin s'effondre.



Le Soleil le brûle avec ses rayons de feu.



Puis il recolle ses morceaux et il redevient comme avant.

HISTOIRE

Jean Bernard Léon Foucault : I La théorie corpusculaire de la lumière

Jean-Noël Terry

Résumé : *Nous retraçons la vie de Léon Foucault à travers ses expériences. Dans cette première partie nous évoquons une expérience fameuse, pourtant assez mal connue : l'expérience de la comparaison de la vitesse de la lumière dans l'air et dans l'eau. Cette expérience préfigure son expérience de la mesure de la vitesse absolue de la lumière. Cet astronome "amateur" fut d'une habileté technique et d'une ingéniosité absolument étonnantes. Il fut un des premiers à réaliser des miroirs astronomiques de qualité, en verre métallisé.*

Les premières années

Foucault est né à Paris, le 18 septembre 1819, où il passa sa vie, à part quelques années d'enfance à Nantes, jusqu'à sa mort en 1868. Son père, éditeur libraire, connu pour avoir publié une série d'ouvrages consacrés à l'histoire de France, mourut en 1839 quand la famille était à Nantes, sans doute après avoir été interné pour aliénation mentale (une décision du tribunal de 1834 lui retire ses droits et en donne la gestion à Nicole Foucault). Le jeune Foucault aurait eu une sœur, Alexandrine Fortunée. Le milieu était aisé - possédant des immeubles à Paris et à Nantes - ce qui permit à sa mère de l'inscrire, de retour à Paris, au collège Stanislas et de lui payer un répétiteur pour son baccalauréat.

Les biographes le décrivent comme doux, timide, élève médiocre, mais très habile de ses mains. A l'âge de 13 ans, il avait réalisé des maquettes de bateau, du télégraphe de Saint-Sulpice qu'il voit de sa chambre, et de machines à vapeur.

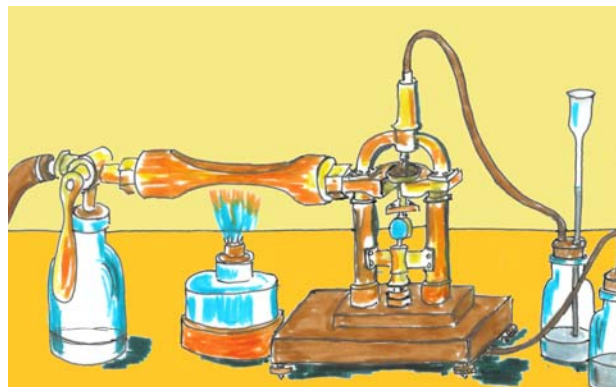
Est-ce cette habileté qui le conduit à s'inscrire en 1837 à la faculté de médecine de Paris pour devenir chirurgien ? En tout cas, il devient externe des hôpitaux mais renonce, car la vue du sang le rend malade. En 1839, il assiste aux démonstrations publiques de Daguerre : les images sont enregistrées sur des

plaques couvertes d'iodure d'argent, révélées à la vapeur de mercure. Mais il faut poser de 5 à 40 minutes, c'est trop long pour des portraits nets. Avec Hyppolite Fizeau (né le 23 septembre 1819), rencontré sur les bancs de la Faculté, il va améliorer le système : Fizeau découvre que le brome sensibilise les plaques, et Foucault trouve la technique pour appliquer la vapeur de brome. Le temps de pose peut être ramené à 20 secondes ! En 1845, suivant une suggestion d'Arago (1786-1853), ils prennent le premier daguerréotype du Soleil (la Lune avait été photographiée 5 ans auparavant par John Draper, professeur de chimie). Cette image montrera l'assombrissement centre-bord du Soleil.

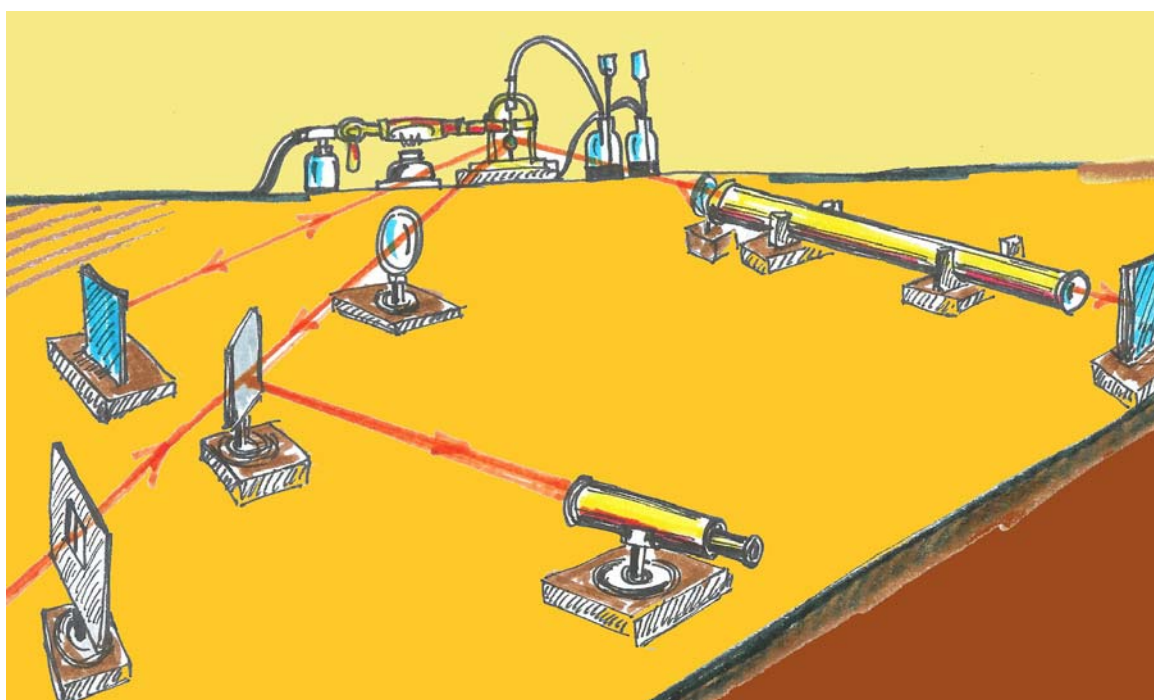
En 1845 aussi, Alfred Donné (1801-1878) confie à Foucault la préparation de ses plaques de microscope. Foucault améliore les conditions par un arc voltaïque où il remplace les charbons par du graphite et un système de rapprochement des pointes : la lumière est plus stable que celle du jour. Il créera un atlas de clichés médicaux de 80 photos. Donné lui confie aussi la rubrique scientifique du Journal des Débats. Foucault s'y montre scrupuleux et sans complaisance. Il le fera pendant 15 ans ! Remarquons qu'en 1850, Foucault sera chargé de photographier une éclipse totale de Soleil pour l'expédition française montée pour l'occasion.

Première expérience sur la lumière

En 1850 Foucault donne un coup sévère à la théorie corpusculaire en montrant que la lumière va plus vite dans l'air que dans l'eau, comme prévu par la théorie ondulatoire. C'est Arago qui en avait eu l'idée en calculant le rapport des deux trajets : l'un dans l'air, l'autre dans un tube de 3 m de long rempli d'eau. Le miroir en rotation rapide réfléchit la lumière vers deux trajets d'égale longueur dans l'air et dans l'eau. Des miroirs concaves renvoient les rayons qui repartent en arrière dans la même direction. Au retour, les rayons sont renvoyés vers un oculaire d'observation. L'image d'un fil situé à l'entrée apparaît dédoublée au retour, en raison de la rotation du miroir pendant la très petite différence de temps des deux trajets. Seule la lumière du Soleil était assez forte pour traverser l'eau. Une lentille placée devant le tube à eau permet de rétablir la focalisation. Le diamètre du miroir tournant est de 14 mm. Foucault fut contrarié par le temps nuageux. Le miroir tournait grâce à un petit moteur à vapeur : pas d'engrenage ou de roue.



Ce système utilisait une petite turbine à vapeur faite d'un disque percé d'une rangée de 24 trous inclinés, séparés de cloisons minces. Un triangle est fixé sur l'axe pour compenser l'hétérogénéité de la matière et éviter les vibrations. C'est un compensateur d'inertie. Foucault passa des heures à supprimer les vibrations. Des flacons règlent l'alimentation en huile des points de contact des axes : du mercure versé dans le tube vertical maintient l'huile sous une légère pression. Le miroir est protégé, mais un problème inattendu se pose : à 200 tours par seconde, l'étamure du miroir part vers les bords. Radiguet, le fournisseur, doit utiliser une argenture, plus solide. La vitesse de rotation est accordée "au son" à l'aide d'un diapason à ut_4 , soit une vitesse de 512 tours par seconde.



gp

Remarque musicale :

La fréquence d'un son est tirée, en hertz, de la loi de Savart, (physicien français 1791-1841) :

$N = N_{la} 10^{0,025M}$, où $N_{la} = 440$ Hz est la fréquence du la_3 de référence (dit *la normal* du milieu du clavier d'un orgue) et M l'écart (positif ou négatif) en nombre de demi-tons entre le *la normal* et la note de fréquence N. Avec un diapason do_4 , l'écart M avec le *la normal* est de trois demi-tons et la fréquence N obtenue est de 523 hertz. La valeur de 512 Hz donnée par Foucault montre que la fréquence du la_3 était de 431 Hz, valeur effectivement adoptée, à Paris en 1824.

Le 30 avril 1850, Foucault annonça son résultat, ce qui lui valut la Légion d'Honneur. Sept semaines plus tard, Fizeau confirma le résultat. La mesure de la vitesse de la lumière ne sera faite par Foucault qu'en 1862.

Foucault soutient sa thèse en avril 1853 "Sur la mesure relative de la lumière dans l'air et dans l'eau". Le jury est composé des chimistes Dumas et Baland et du physicien Despretz. Ce dernier relève une erreur (confusion entre déviation angulaire et déviation linéaire) que Foucault se révèle incapable de corriger. Ses réponses aux questions de chimie sont maladroitement et incomplètes. Chasles fait part d'une impression "très défavorable". Le jury lui accorde quand même la thèse.

C'est Urbain Le Verrier (1811-1877) qui, succédant à Arago, le fait entrer à

l'Observatoire de Paris comme physicien. Il le fait travailler à la conception d'instruments et lui demande une lunette de 74 cm de diamètre. Foucault conclut qu'il vaut mieux un télescope à miroir malgré l'opposition de Le Verrier.

Miroirs astronomiques en verre

C'était l'époque de William Parsons (Comte de Rosse). Celui-ci utilisait un miroir en bronze de 182 cm de diamètre, mais qui se ternissait. Foucault avait argenté la face avant de son petit miroir tournant pour son expérience de la comparaison de la vitesse de la lumière dans l'eau et dans l'air. Il se lança donc dans la fabrication de petits télescopes de 10 cm et 22 cm de diamètre.



Crédit- Observatoire de Paris

Un des premiers télescopes à miroir de verre réalisé par Foucault à l'Observatoire de Paris.

Mais les méthodes de polissage ne convenaient plus au-delà. Il échoua cinq fois avant de parvenir à réaliser un miroir de 42 cm. C'est alors qu'il développa les techniques de contrôle, dont la méthode du "couteau de Foucault" (voir encadré). Sa plus grande réalisation fut pour l'Observatoire de Marseille : un télescope de 80 cm de diamètre utilisé pendant plus de

100 ans et dont la monture en bois n'a jamais été remplacée. En 1859 Foucault rédigea un "Mémoire sur la construction des télescopes en verre argenté" (Aujourd'hui les miroirs en verre sont recouverts d'une fine couche d'aluminium par dépôt sous vide).



PHOTO Crédit M.Heller 1997 - Observatoire de Marseille

Le télescope à miroir de verre de 80 cm de diamètre, réalisé par Foucault pour l'Observatoire de Marseille. On remarque les similitudes avec les premières réalisations.

L'idée de réaliser des miroirs en verre remonte à Newton, mais se posait alors le problème de l'argenture du verre. Au début du 19^{ème} siècle, James Short réalisa les premiers miroirs acceptables mais Foucault obtient les premiers miroirs en verre d'excellente qualité, grâce à ses méthodes de contrôle. Foucault est reconnu comme l'inventeur des miroirs de télescope en verre. Dans son roman "De la Terre à la Lune" Jules Verne écrit :

Heureusement, quelques années auparavant, un savant de l'Institut de France, Léon Foucault, venait d'inventer un procédé qui

rendait très facile et très prompt le polissage des objectifs, en remplaçant le miroir métallique par des miroirs argentés. Il suffisait de couler un morceau de verre de la grandeur voulue et de le métalliser ensuite avec un sel d'argent. Ce fut ce procédé, dont les résultats sont excellents, qui fut suivi pour la fabrication de l'objectif.

Dans un prochain article nous parlerons des autres expériences célèbres de Foucault, et de sa fin prématurée. ■

La technique du "Couteau de Foucault"

A l'époque de la photographie astronomique les astronomes réalisaient la mise au point par la méthode du "Foucaultage". Un châssis photographique était utilisé, mais en lieu et place de la plaque photographique, on disposait d'une plaque métallique taillée en biseau (le couteau de Foucault), de telle manière que l'arête du couteau soit dans le plan qu'occupe normalement la surface sensible de la plaque photographique.

Ancien châssis photographique utilisé au télescope de 120 cm de l'OHP. On reconnaît le volet à droite, dont l'ouverture démarre la pose. La plaque métallique mise à la place de la plaque photographique est munie de trois couteaux de Foucault, pour réaliser la mise au point en divers points du champ.

A gauche le couvercle qui fermait le châssis.

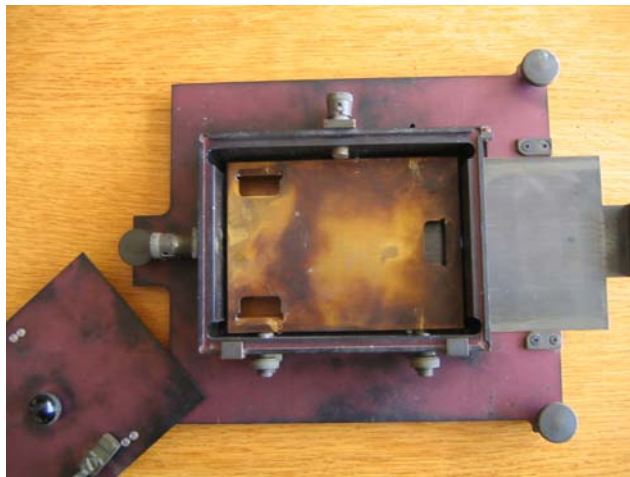
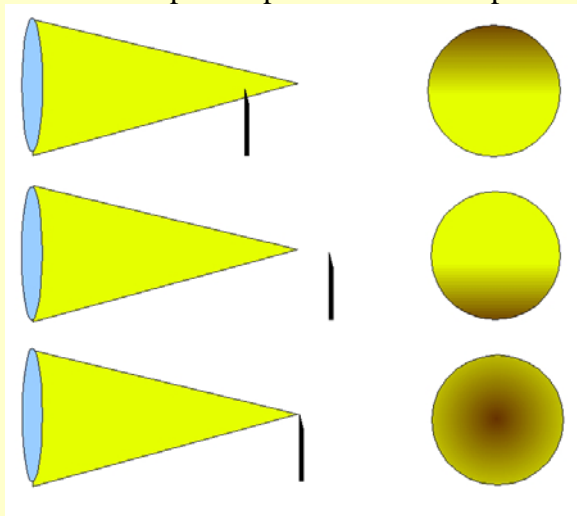


Photo G. Paturel

On pointait alors une étoile brillante, si possible proche de la région du ciel à étudier, afin que les flexions mécaniques ne viennent pas fausser la mise au point. On appliquait l'œil sur le bord tranchant. On voyait le miroir du télescope complètement éclairé par l'étoile.



On déplaçait alors doucement le télescope pour que le couteau vienne progressivement masquer l'image de l'étoile. Si on reculait trop la plaque, le miroir s'éteignait par un côté ; si au contraire on avançait trop la plaque, le miroir s'éteignait par l'autre côté. Quand le couteau était exactement dans le plan focal, le miroir s'éteignait rapidement, sur toute sa surface.

gp



AVEC NOS ELEVES

Mesures de distances : commençons par la Terre

G. Paturel, Observatoire de Lyon

Résumé : Le but de cette série d'articles est de présenter les méthodes de détermination des distances astronomiques pour qu'elles soient compréhensibles par des élèves de collège ou de lycésl. Des expériences simples sont proposées pour faciliter l'assimilation des principes et des explications approfondies sont données pour que l'enseignant puisse apporter des compléments aux élèves curieux.

La méthode de triangulation

Cette méthode est celle qui permet de mesurer avec précision une grande longueur, par exemple sur Terre, dans le cas où la longueur à mesurer est bien supérieure à l'étalon de longueur et où il n'est pas possible de réaliser une ligne droite entre les différents points. C'est la méthode utilisée en géodésie. C'est par cette méthode que la forme de la Terre a été déterminée avec une grande précision pour trancher entre le modèle de Newton et celui de Descartes. Nous allons appliquer la méthode à la mesure de la longueur sur une feuille de papier. Etablissons la relation à utiliser :

Dans un triangle quelconque, nous désignerons par a, b, c les longueurs des côtés opposés aux angles A, B et C . Etablissons que :

$$\frac{a}{\sin A} = \frac{b}{\sin B} = \frac{c}{\sin C}$$

C'est très facile. Il suffit d'écrire les hauteurs du triangle comme produit d'un côté par un sinus.

Nous supposons que c est la 'base' de longueur connue et que seuls les angles A et B sont mesurables. Nous montrerons alors que :

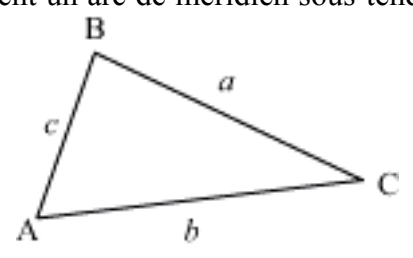
$$a = \frac{c \sin A}{\sin(A + B)}, \text{ et que : } b = \frac{c \sin B}{\sin(A + B)}$$

A partir de la figure 1 ci-dessous, calculons la longueur BF (supposée être un arc de méridien terrestre) en calculant successivement L1 et L2 à partir de la longueur c et des angles 1 et 2, puis L3 et L4 à partir de L2 et des angles 3 et 4 et ainsi de suite, puis en projetant L1, L5 et L7 sur la ligne de méridien à partir de leurs angles respectifs par rapport au méridien. Pour confirmation on projettera aussi $c, L4$ et $L8$. On mesure ainsi une longueur en ne mesurant que des angles. On vérifiera avec un double décimètre à la fin du calcul.

Cet exercice un peu fastidieux nous fait apprécier la précision des astronomes, Bouguer et La Condamine, qui dans les années 1735 à 1771 mesurèrent un arc de méridien sous-tendu par un angle

de un degré, près de l'équateur, au Pérou. La longueur était de 110

kilomètres et les astronomes firent la mesure avec une trentaine de triangles. Ils réussirent à obtenir une précision de l'ordre de 22 mètres sur la longueur totale, soit une précision relative de deux dix millièmes.



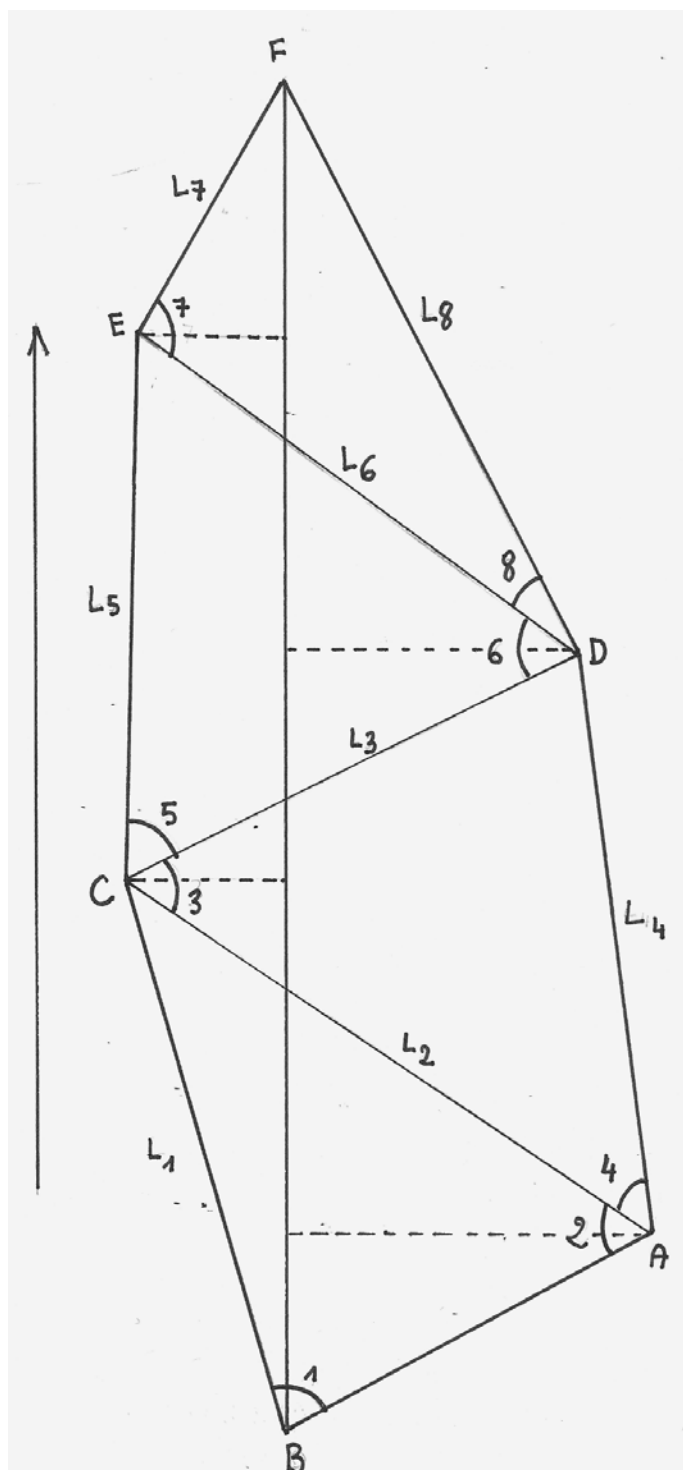


Figure 1 : Mesure d'une longueur avec un rapporteur !

Pour mesurer les angles, les astronomes utilisaient un instrument appelé un cercle répétiteur, dû à Borda. Il s'agissait de deux lunettes montées sur un cercle gradué. Les mesures d'angles étaient prises sur le cercle, simultanément, en différentes positions. Les défauts de construction du cercle : excentricité ou irrégularité, étaient ainsi compensés. La précision atteignait la seconde d'arc.

L'enjeu de la mesure de la forme de la Terre

Quel était l'enjeu d'une telle mesure ? Une autre expédition, conduite par Maupertuis, effectua le même travail près du pôle nord, en Laponie, à 70 degrés de latitude nord. Si la Terre était parfaitement sphérique, les deux expéditions devaient trouver la même longueur, aux erreurs

de mesures près. Si, du fait de sa rotation, la Terre était aplatie, comme Newton le suggérait, ou oblongue, comme Descartes le pensait, les mesures des deux expéditions devaient différer. De la comparaison des mesures il devait être possible de donner une meilleure description de la forme de la Terre. Voici les résultats des mesures historiques des deux expéditions :

Bouguer et La Condamine à l'équateur

(latitude=0°) : 56768 toises¹

Maupertuis et Clairaut en Laponie

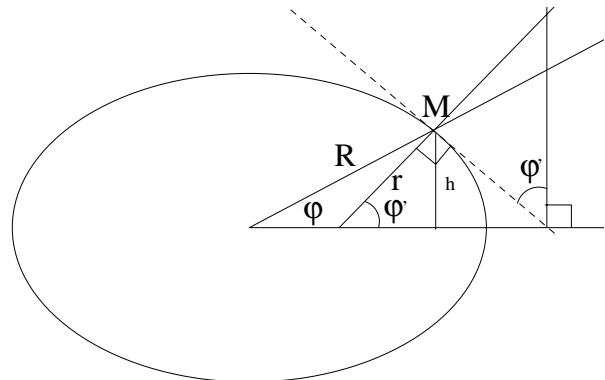
(latitude=70°) : 57437 toises

Selon vous, quelle forme de la Terre pourrait-on naïvement déduire de ces mesures ?

Nous savons maintenant que Newton avait raison : la Terre est aplatie, son rayon équatorial étant plus grand que son rayon polaire. Comment interprétez-vous alors les mesures des deux expéditions ? L'interprétation détaillée est donnée ci-dessous. Les calculs sont complexes. Les valeurs admises aujourd'hui sont : 6378 km pour le rayon équatorial et 6356 km pour le rayon polaire. L'aplatissement de la Terre est a/b=1,003. La Terre est donc presque sphérique mais la légère différence ne peut pas être négligée pour les calculs précis des parallaxes horizontales, que nous verrons bientôt.

Explication : On peut penser que si la Terre est aplatie à cause de sa rotation, la longueur d'un arc de méridien de un degré serait plus grande à l'équateur qu'au pôle, le rayon équatorial étant plus grand (or les mesures donnent le contraire). Mais ce raisonnement est incorrect, car l'angle de un degré n'est pas mesuré par rapport au centre de la Terre mais par rapport à la verticale du lieu. Démontrons la relation qui existe entre la latitude géocentrique φ et la latitude astronomique φ' . La figure ci-dessous définit les variables utilisées. On a représenté une section méridienne de l'ellipsoïde que forme la Terre. L'aplatissement

a été très exagéré pour que la figure soit plus claire. Cette section est une ellipse dont l'équation est : $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$



En différentiant cette équation on obtient :

$$\frac{dy}{dx} = -\frac{x b^2}{y a^2} = -\frac{1}{\tan \varphi} \frac{b^2}{a^2}$$

Or cette dérivée n'est autre que la pente de la droite tangente en M à l'ellipse (droite en tirets). On voit sur la figure que cette pente est égale à : $\tan(\frac{\pi}{2} + \varphi') = -\frac{1}{\tan \varphi'}$.

On obtient donc la relation importante suivante:

$$\tan \varphi' = \frac{a^2}{b^2} \tan \varphi$$

Calculons maintenant la longueur L mesurée sur le terrain et qui correspond à un arc $\delta\varphi' = 1^\circ$

$$L = r \delta\varphi' \quad (\delta\varphi' \text{ exprimé en radian}).$$

Puisque :

$$h = r \sin \varphi' = R \sin \varphi, \text{ on obtient :}$$

$$L = R \frac{\sin \varphi}{\sin \varphi'} \delta\varphi'$$

A partir de la relation liant φ et φ' on déduit que

$$\frac{\sin^2 \varphi'}{1 - \sin^2 \varphi'} = \frac{a^4}{b^4} \tan^2 \varphi = A$$

¹ Une toise= 1,94906 mètre

D'où l'on tire :

$$\sin^2 \varphi' = \frac{A}{1+A} = \frac{\sin^2 \varphi}{\frac{b^4}{a^4} \cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi}$$

Il suffit de reporter dans l'expression de L pour trouver que :

$$L = R \frac{b^2}{a^2} \sqrt{\cos^2 \varphi + \frac{a^4}{b^4} \sin^2 \varphi} \delta\varphi'$$

Ne prenez pas peur, cette expression va être employée dans deux cas extrêmes, au pôle ($\varphi=90^\circ$) et à l'équateur ($\varphi=0$), et elle va se simplifier énormément.

On trouve alors que $\frac{L_{\text{pôle}}}{L_{\text{équateur}}} = \frac{a}{b}$

Avec les mesures historiques on obtient:

$$\frac{a}{b} = \frac{57437}{56768} = 1,012.$$

La Terre est donc bien aplatie ($a > b$) comme l'avait dit Newton. Notons que la valeur exacte de cet aplatissement est 1,003, car la mesure de Maupertuis n'était pas effectuée rigoureusement au pôle mais en Laponie, à une latitude d'environ 70° .

Note : En adoptant la vraie valeur de l'aplatissement nous trouvons que la valeur du rayon équatorial, d'après les mesures de Bouguer et La Condamine est de :

$$R_{\text{équat.}} = \frac{1,94906 \times 56768}{\tan(1^\circ)} \times (1,003)^2 = 6376894 \text{ m}$$

(pour convertir 1° en radian, on en prend la tangente)

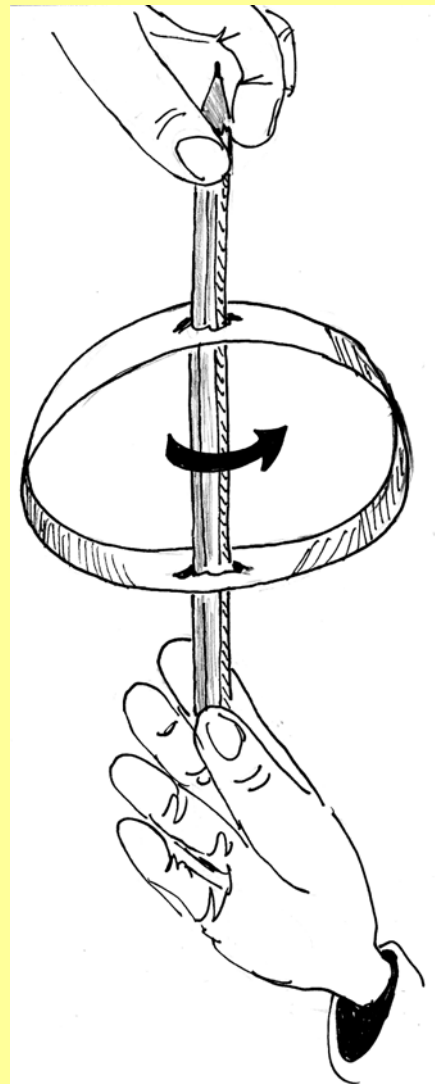
La valeur admise actuellement est de 6378 km.

Ce rayon équatorial va nous servir à définir la parallaxe horizontale, mais nous verrons cela dans un prochain numéro.

Récréation

Il est possible de se convaincre que la rotation de la Terre entraîne son aplatissement. Même si cela nous paraît évident aujourd'hui, il n'en a pas été toujours ainsi.

Prenons un ruban de papier et collons le en forme de cylindre. Piquons le sur un crayon, selon un diamètre. Donnons lui la forme oblongue ou circulaire, puis faisons tourner le crayon selon son axe. Le ruban prend une forme aplatie et, par suite des frottements sur le crayon, il garde cette position quand on arrête la rotation. Ainsi, on peut visualiser le phénomène.



REMUE-MENINGES

Nous vous proposons deux "colles". L'une sérieuse, l'autre moins (solutions p40).

Mouvement de la Terre. Il est possible de lire que Bradley a, le premier, mis en évidence un mouvement de la Terre (voir encadré) en observant le phénomène d'aberration de la lumière. On peut lire, dans le même temps, que le mouvement de la Terre ne peut pas, par principe, être mis en évidence par une expérience (principe de relativité d'Einstein). Effectivement, l'expérience de Michelson et Morley, n'y a pas réussi. Pourquoi Bradley a-t-il réussi ?

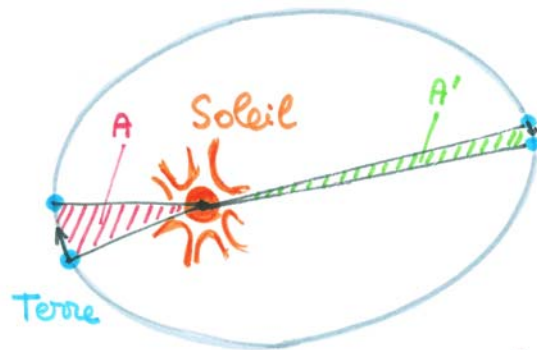
Un mouvement de la Terre

Il s'agit du mouvement de la Terre autour du Soleil, mais comme le note J.C. Pecker dans son livre : "L'univers observé, peu à peu expliqué", il aurait pu s'agir d'un mouvement autour d'un centre quelconque, autre que le Soleil. L'observation de Bradley ne constituait pas en elle-même la preuve de l'héliocentrisme. - nous aurons l'occasion de revenir sur cette question.

La seconde loi de Kepler dite la loi des aires. L'aire A parcourue en un temps donné par un rayon vecteur allant de la Terre au Soleil est égale à l'aire A' parcourue par ce même rayon vecteur pendant le même temps et ce, quelle que soit la position de la Terre sur sa trajectoire. Selon la loi rigoureuse de G. Walusinski, on a :

$$A = (-1)^p A'$$

Enoncez la condition supplémentaire sur l'entier p pour que les aires A et A' soient égales.

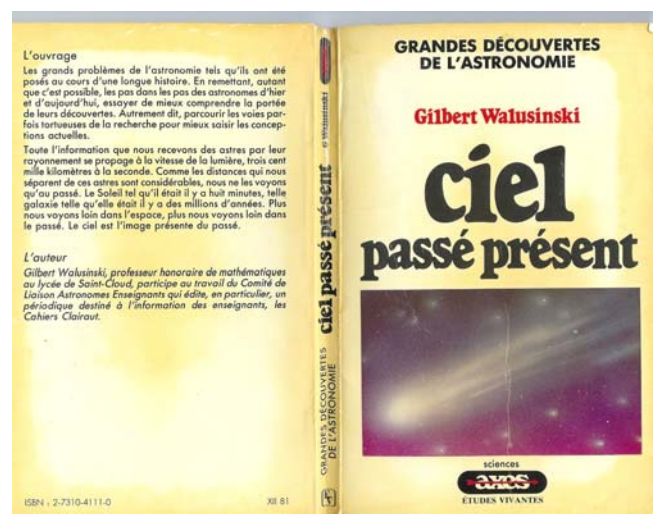


LECTURE POUR LA MARQUISE

Le ciel passé présent, signé de Gilbert Walusinski

Editions Etudes Vivantes, 1981 : ISBN 2-7310-4111-0

Je ne suis pas sûr que ce livre soit encore disponible dans les boutiques de livres neufs. Vous pourrez peut-être le trouver dans quelques boutiques d'occasions (encore que ceux qui ont la chance de l'avoir ne veulent certainement pas s'en défaire) et plus certainement dans quelques bibliothèques. Ce livre, je l'ai lu avec passion comme en témoigne la couverture jaunie de mon exemplaire. Tout y est et tout est présenté avec clarté. On y retrouve la finesse, la précision et l'humour de Gilbert.



Voici le sommaire :

Repérages, Calendriers, Horloges, Rayon de la Terre, Le grand siècle (1543-1686), la Lune et le beau temps, Les planètes ne sont plus ce qu'elles étaient, la vitesse de la lumière, le Soleil, 61 du Cygne, Mizar... et des milliards d'autres, le monde agité des fixes, Des nébuleuses aux étoiles et vice versa, La Voie Lactée, Les galaxies en amas et des amas d'amas, l'astronomie d'aujourd'hui.

On trouve en introduction une phrase que j'aime bien ; je cite: "Notre parti pris est donc de commencer par le commencement". Bien que publié en 1981, ce livre est toujours excellent pour débiter.

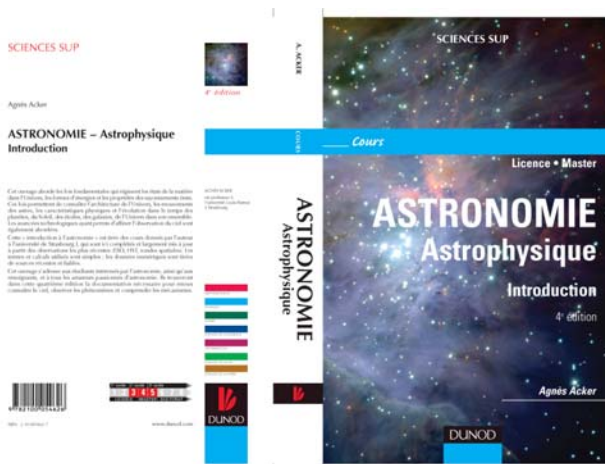
gp

Astronomie Astrophysique : Introduction

Dunod, 2005 - 450 pages, 334 figures, 16
planches couleurs

Agnès Acker, que vous connaissez tous et qui est membre du CLEA, vient d'écrire un nouvel ouvrage sur l'astronomie. Je ne l'ai pas encore lu puisqu'il vient de sortir des presses. En voici un aperçu.

Cet ouvrage s'adresse à tous ceux qui contemplent le ciel, et désirent mieux le connaître et le comprendre, aux amateurs d'astronomie motivés par une curiosité passionnée, aux étudiants des premiers et



seconds cycles universitaires, aux animateurs de Planétariums, aux professeurs des

enseignements primaires et secondaires trouvant dans l'astronomie une remarquable synthèse de toutes les sciences de la nature, et un fertile champ d'applications pour les programmes de physique, mathématiques, géographie, chimie.

Alors, avis aux amateurs et bonne lecture.

Jean Ripert

Jupiter et Saturne en direct

Guillaume Cannat et Didier Jamet, éd. Eyrolles,
ISBN 2-212-11691-8.

Dans le CC n°110, j'avais présenté l'ouvrage consacré à Mars par les mêmes auteurs. Le voyage continue donc avec Jupiter et Saturne, avec des images du regretté Galileo et de Cassini-Huygens.

Suivre l'actualité et les images via Internet, c'est bien. Mais les retrouver sur papier grand format a aussi son intérêt et sa magie (ainsi la vue des anneaux de Saturne sur 4 pages...).

C'est un ouvrage qui allie science et beauté. Donc, à nouveau, à savourer de différentes façons.

Découvrir la Lune

Jean Lacroux et Christian Legrand, Multiguides Larousse, ISBN 2-03-560433-8.

Observer la Lune en visuel, c'est accessible, spectaculaire (si vous vous adressez à des non-initiés, ne commencez pas par la tache blafarde d'une galaxie) et riche en découvertes. Mais il vaut mieux ne pas partir sans guide !

L'ouvrage propose donc 14 soirées d'observation, de la Nouvelle à la Pleine Lune. Les cratères, les mers sont répertoriés grâce à deux photographies proches de ce qu'on voit à l'oculaire, une vue réelle et une vue inversée, ce qui est bien utile au télescope. Les objets sont évidemment présentés. Des tables de correspondance entre noms latins et français et un index permettent aussi de programmer l'observation d'un site choisi.

Voilà donc un guide maniable, bien fait et pratique pour observer... malgré la pollution lumineuse... tant que nous pouvons voir encore la Lune, mais c'est une autre histoire !

JNT

LES POTINS DE LA VOIE LACTEE

Deep Impact

Le 4 juillet 2005 (devinez pourquoi cette date ...), la mission Deep Impact, de la NASA, a envoyé un projectile de 360 kg sur la comète 9P/Tempel 1, pour étudier la croûte et l'intérieur du noyau de cette comète. En plus de l'instrumentation embarquée sur cette sonde, une campagne d'observations au sol, mobilisant la plupart des observatoires, a permis de suivre en direct la formation du cratère d'impact et l'évolution du jet de gaz et de poussières. La taille du cratère n'a pour l'instant pas pu être déterminée, mais les premières données (en cours d'analyse !) semblent révéler que la surface de ce noyau, de 4 km sur 7 km, est très poreuse. Quant à la composition chimique, les éjecta se sont révélés plus riches en hydrocarbures (en particulier C_2H_6) que ce que l'on pensait. Le noyau contient également des molécules organiques complexes, d'un grand intérêt pour la recherche en astrobiologie. Enfin, contrairement au modèle classique de boule de neige « sale », ce noyau pourrait contenir plus de poussières que de gaz. Les

astrophysiciens doivent maintenant dépouiller cette riche moisson de données ...

Fin d'une étoile aux confins de l'Univers

Une équipe d'astronomes italiens a observé un « sursaut gamma », dont la distance est estimée à 12,7 milliards d'années. Il s'est donc produit alors que l'Univers avait 900 millions d'années seulement !

Les sursauts gamma sont des flashes très brefs d'émission très énergétique, d'une durée de moins d'une seconde à quelques minutes. On pense qu'ils sont associés à l'explosion d'étoiles très massives, qui s'effondrent ensuite pour former un trou noir. Étant donné la très grande luminosité de ces objets, ils permettent d'étudier les conditions régnant dans l'Univers primordial, à un âge où aucun autre objet n'est actuellement observable. Celui-ci détient actuellement le record de distance. À suivre ...

Eric Josselin

■

Au fil des perles des astronomes et des enseignants

Gilbert Walusinski se moquait gentiment des matheux trop érudits qui jonglent avec les définitions abscones. Il rappelait alors cette propriété remarquable : "Les normales à une quadrique forment une congruence extraite du complexe tétraédral défini comme l'ensemble des droites qui coupent les plans des coordonnées et le plan de l'infini selon un rapport anharmonique constant".

S'il y a des mathématiciens dans nos lecteurs ils pourront peut-être nous dire si cette propriété est correcte. Personnellement je l'ai recopiée, en voiture, sous la dictée de Gilbert, sans comprendre.

gp

LA VIE ASSOCIATIVE

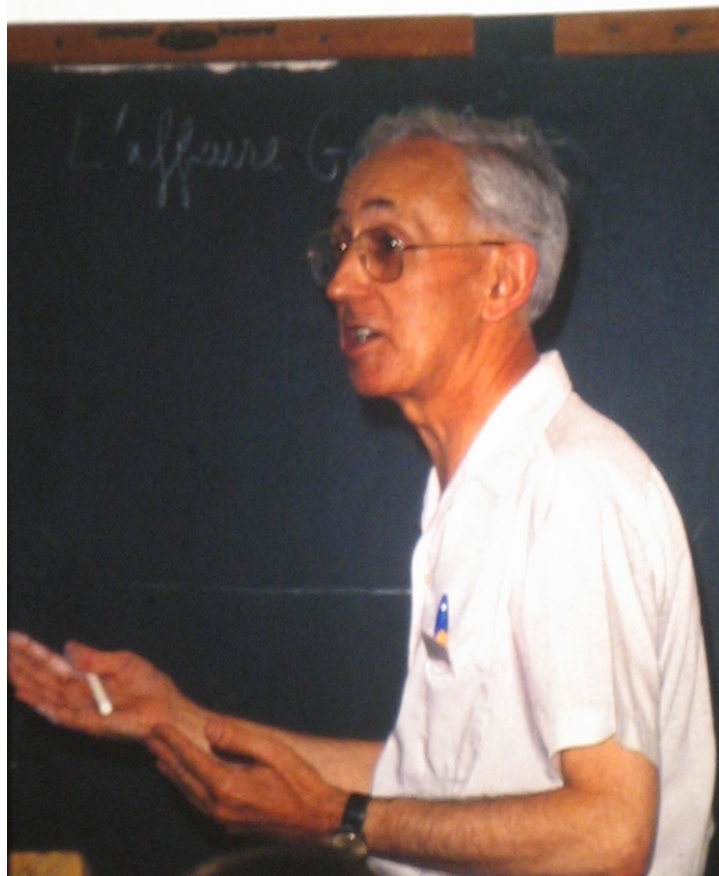


Photo D. Bardin 1982

Gilbert Walusinski

Voici quelques témoignages parmi tous ceux reçus, trop nombreux pour être publiés

Le CLEA est en deuil : Gilbert Walusinski, notre Président d'Honneur, est décédé le 13 janvier dernier. Gilbert a été tellement associé à l'histoire du CLEA et des Cahiers que, pour les plus anciens d'entre nous, sa figure en est indissociable. Gilbert a joué en effet un rôle déterminant dans la fondation puis le développement de notre association. Il a été l'initiateur et pendant de longues années un rédacteur infatigable des Cahiers Clairaut.

Professeur agrégé de mathématiques, Gilbert avait la passion de l'enseignement et suscitait l'admiration et l'amitié de nombreux élèves. Président de 1955 à 1958, puis Secrétaire Général et responsable des Publications de l'APMEP, il a été un intervenant majeur de la création des I.R.E.M. (Instituts de Recherche

sur l'Enseignement des Mathématiques). Son goût pour l'astronomie se manifesta très tôt, dans le cadre de son lycée, par l'animation d'un club d'astronomie dont fit partie par exemple l'astronome Pierre Léna.

C'est à l'astronomie qu'il devait consacrer la nouvelle étape de sa vie, à partir de sa retraite.

Nous nous sommes rencontrés en 1976, à l'occasion de cette journée mémorable, organisée dans le cadre de l'Assemblée Générale de l'Union Astronomique Internationale (UAI) qui se tenait à Grenoble. Correspondante pour la France de la Commission "Enseignement" de l'UAI, j'avais été chargée d'organiser cette journée. Avec mes collègues de l'Université Paris XI, Lucette

Bottinelli et Michèle Gerbaldi, nous avons contacté, par la voie des associations professionnelles (APMEP et Udp), une centaine d'enseignants. Gilbert fit partie du petit groupe qui a lancé l'aventure à partir de cette rencontre. Il contribua à en fixer les objectifs :

- promouvoir l'enseignement de l'Astronomie à tous les niveaux du parcours scolaire, " de la Maternelle à l'Université " ;

- participer activement à la formation des maîtres par la mise au point d'ouvrages de base destinés aux enseignants, l'élaboration et la diffusion de documents audiovisuels et la mise en place d'Universités d'Eté d'Astronomie et de stages régionaux ;

- élaborer un moyen d'information et d'échanges : les " Cahiers Clairaut ".

Gilbert a contribué avec enthousiasme à la concrétisation de tous ces engagements.

Il a participé activement, avec son épouse Janette, dont le souvenir est indissociable du sien, à l'animation des écoles d'été, à Lanslebourg en 1977, puis à Digne, puis au « Mas du Calme », à Grasse, jusqu'en 1983 : dans ses exposés, il enthousiasmait les participants, à la fois par sa présentation à la fois érudite, synthétique et émaillée d'anecdotes, et par son talent d'orateur. Daniel Bardin fit de lui une magnifique portrait, jonglant avec les polyèdres parfaits, pour illustrer la couverture d'un des comptes-rendus.

Pendant 20 ans, il a assuré la responsabilité de la rédaction des Cahiers Clairaut ; il y tenait un dialogue permanent, amical et riche avec les lecteurs ; il y écrivait de nombreux articles, souvent historiques, qu'il signant tantôt de son nom, tantôt de pseudonymes nés de son esprit facétieux, tel celui de K. Mizar. On peut les relire, avec beaucoup de plaisir, dans le cédérom édité par le CLEA, qui reprend l'ensemble des 108 premiers numéros des Cahiers Clairaut (www.ac-nice.fr/clea). Vous y trouverez particulièrement, dans le numéro 39-40, qui marquait les 10 ans des Cahiers, une description de ce qu'a été le travail de secrétariat (car il était aussi secrétaire ET trésorier du CLEA) assumé par Gilbert pendant toutes ces années. Le portrait de Gilbert

discutant avec son grand ami André Brahic, dû au crayon de Daniel Bardin, rappelle aussi les interviews que Gilbert allait réaliser auprès d'André chaque fois qu'une sonde spatiale apportait son nouveau lot d'informations sur le système solaire. Il en revenait avec des heures d'enregistrement sur son magnétophone, qu'il traduisait en un article passionnant pour les Cahiers.

Les Cahiers lui doivent aussi de jolis titres de rubriques comme les « Potins de la Voie Lactée » et surtout les « Lectures pour la Marquise » que l'on ne peut comprendre que si l'on connaît l'histoire des relations de Newton avec la Marquise du Châtelet...

Gilbert était un homme d'une très grande culture dont on découvrait, chaque fois qu'on le rencontrait, un peu plus l'ampleur. Il avait aussi un sens très fidèle et très délicat de l'amitié. Ce sont tous ces souvenirs là qui se bousculent dans nos cœurs aujourd'hui.

Lucienne Gouguenheim

Lucienne Gouguenheim nous annonce le décès de Gilbert Walusinski. J'indique pour ceux qui ont rejoint le CLEA récemment que Gilbert et Lucienne furent les fondateurs du CLEA. L'activité de Gilbert était considérable au sein de notre association. On peut s'en faire une pâle idée, en consultant l'ensemble des numéros des Cahiers Clairaut depuis le début et jusqu'à une date assez récente. Tous portent son empreinte.

Christian Larcher

Très affectée par l'annonce de la disparition de Gilbert qui, avec Janette, a éclairé 25 ans de ma vie, je voulais dire à tous ceux que j'ai rencontrés au CLEA grâce à lui que je pensais très fort à eux, particulièrement Lucienne, Lucette et Michèle. J'imagine le chagrin de tous les amis de Gilbert. Cela fait bien longtemps que je n'ai plus assisté aux réunions du CLEA, mais je reste une fidèle lectrice des CC.

Gilles Walusinski vient de me dire que selon le souhait de Gilbert, comme pour Janette, il n'y aura pas d'obsèques, pas d'adieu public, pas de réunion de ceux qui l'ont aimé. Je reste en pensée avec vous.

Eliane Legrand

J'ai beaucoup apprécié Gilbert Walusinski comme collègue au lycée Florent-Schmitt à St Cloud ; pour sa dernière année j'étais sa collègue de physique en classe de TC.

Marie-hélène Debost

Je suis bien triste du départ de Gilbert. Je ne l'avais pas rencontré très souvent, mais par contre j'avais eu affaire à lui il y a très longtemps ! Il avait, en 1953, créé avec plusieurs autres, une excellente petite revue destinée aux lycéens, "Le Facteur X". Je sortais du baccalauréat et j'ai été, pendant des années, un lecteur assidu, et un collaborateur occasionnel (une fois ou deux).

François Biraud

Nous étions fin août 1981, durant l'école d'été d'astronomie, sur la terrasse du mas du Calme à Grasse. La belle bâtisse de pierre se réveillait. Nous prenions le petit déjeuner sur la terrasse près des lauriers roses sur de petites tables qui, ensuite, débarrassées, serviraient de tables de travail. Il allait faire beau, comme d'habitude, les enfants commençaient à jouer à cache-cache sur les terrasses du parc.

Certains stagiaires arrivaient à toute allure, mal réveillés (le ciel avait été étoilé), d'autres prenaient leur temps. Jeannette et Gilbert étaient de ceux là : ils souriaient de tant d'agitation autour d'eux, bavardaient tranquillement et savaient savourer ces moments de bonheur au milieu de cette ruche bourdonnante.

Puis Gilbert, avec la maîtrise d'un professeur bien expérimenté, nous a parlé de Kepler. C'était son préféré, il parlait de lui avec affection, il décrivait avec force détails ses errements, ses efforts acharnés pour découvrir la trajectoire elliptique de Mars et en déduire ses lois.

Nous étions subjugués par cette belle histoire et chaque fois que j'ai étudié Kepler, j'ai pensé à ces heures magiques où nous étions si attentifs. Gilbert parlait calmement, son discours était émaillé d'anecdotes ironiques et sympathiques, il avait une culture immense.

Un jour, il a tracé un grand cercle à la craie au tableau, un beau cercle bien rond comme savent le faire les professeurs de maths.

Il nous a expliqué que la trajectoire elliptique des planètes était incluse dans ce cercle et affleurait les bords externes ou internes des traits.

Une autre fois, dans son appartement de Saint-Cloud, j'ai eu envie de rester chez lui très longtemps pour lire et bavarder avec lui ; pour me perdre dans tous ses livres, bien au chaud entre eux deux.

Jeannette prenait soin de Gilbert et Gilbert prenait soin de Jeannette.

Il l'a rejointe maintenant et cette époque reste dans nos cœurs.

Liliane Sarrazin-Vilas

Quelle triste nouvelle... Gilbert a enchanté deux écoles d'été des Vosges par son esprit brillant, son sourire merveilleux, sa culture si vaste, sa modestie, la chaleur de sa présence, sa générosité : une personnalité et un ami inoubliables.

Nous nous souvenons, entre une multitude de détails, de sa présentation des lois de Kepler sous le signe des "P pairs" et des "même aire" (Pour comprendre, voir la rubrique Remue-Méninges).

Agnès Acker

Gilbert était un fondateur. On l'a vu déjà à travers le témoignage de François Biraud. La lecture de l'hommage paru dans "le Monde" le prouve encore un peu plus : j'ai découvert que Gilbert était un des pionniers de l'APMEP, Association des Professeurs de Mathématiques de l'Enseignement Public, un des principaux instigateurs des IREM, Institut de recherche sur l'enseignement des mathématiques, et bien sûr le fondateur du CLEA, avec Lucienne Gouguenheim.

Gilbert était aussi une personne pleine de finesse et d'humour. Je voudrais rapporter quelques-uns de ses bons mots. Mais je ne sais par où commencer. Heureusement, j'ai le souvenir d'un exposé où, en introduction,

Gilbert disait : "Je vais commencer par le début, parce que c'est la méthode la plus naturelle, et je terminerai par la fin...". Cette expression me revient souvent à l'esprit et j'aime à faire la même plaisanterie, en pensant à Gilbert.

Gilbert savait être irrévérencieux envers ceux qui s'abritent derrière une fonction, un titre, un diplôme. Il disait : "c'est comme la rougeole, on ne l'a qu'une fois, mais ça vous protège pour toute votre vie".

Lors d'une école d'été (Formiguère) je lisais un passage d'un livre de Charles-André où il était dit que "Tycho-Brahé découvrit une étoile nouvelle, un jour ordinaire (sic), le 11 novembre 1572". Gilbert m'interrompit pour faire remarquer qu'un "11 novembre" n'était pas un jour ordinaire.

Georges Paturol

De tout coeur avec vous je partage votre peine mais ne doute point qu'une nouvelle Etoile brille bientôt dans le ciel, ce sera notre ami à tous.

Claudine Rollin

Suite au message de Claudine et en pensant à tout ce que Gilbert nous a apporté, je joins cette poésie de Théophile Gautier. La nuit étoilée est arrivée...

Théophile GAUTIER (1811-1872), Recueil :
Premières poésies : Soleil couchant

Notre-Dame, Que c'est beau !
Victor HUGO

*En passant sur le pont de la Tournelle, un soir,
Je me suis arrêté quelques instants pour voir
Le soleil se coucher derrière Notre-Dame.
Un nuage splendide à l'horizon de flamme,
Tel qu'un oiseau géant qui va prendre l'essor,
D'un bout du ciel à l'autre ouvrait ses ailes d'or,
- Et c'était des clartés à baisser la paupière.
Les tours au front orné de dentelles de pierre,
Le drapeau que le vent fouette, les minarets
Qui s'élèvent pareils aux sapins des forêts,
Les pignons tailladés que surmontent des anges
Aux corps roides et longs, aux figures étranges,
D'un fond clair ressortaient en noir ; l'Archevêché,
Comme au pied de sa mère un jeune enfant couché,
Se dessinait au pied de l'église, dont l'ombre
S'allongeait à l'entour mystérieuse et sombre.
- Plus loin, un rayon rouge allumait les carreaux
D'une maison du quai ; - l'air était doux ; les eaux
Se plaignaient contre l'arche à doux bruit, et la vague
De la vieille cité berçait l'image vague ;
Et moi, je regardais toujours, ne songeant pas
Que la nuit étoilée arrivait à grands pas.*

René Cavaroz

Le CLEA est toujours présent lors des réunions de l'APMEP. Quel meilleur témoignage de reconnaissance envers Gilbert. La photo ci-dessous, montrant nos amis René Cavaroz et Joël Gaudrain à l'APMEP de Caen en Octobre 2005, en témoigne.



Photo de Sophie Favrie

Ceux qui n'auraient pas eu entre les mains l'article sur G.W. de Jean Dhombres dans "Le Monde" (20/01/06), liront l'équivalent sous la plume de Christiane Zehren, (une ultérieure Présidente de l'APMEP) sur le site www.apmep.assoc.fr.

Gilbert tu as été avec Lucienne le catalyseur qui a permis au CLEA de naître, le titre de notre publication "les Cahiers Clairaut" c'est aussi toi..

Nous nous sommes rencontrés pour la première fois lors de l'Ecole d'Eté de Digne. Moi qui étais un jeune prof, je découvrais un monsieur, mince, l'air perpétuellement étonné. Tu nous emmenais souvent nous promener dans l'histoire de l'astronomie. Ainsi nous avons fait connaissance avec Aristarque, Eratosthène, Copernic, Tycho Brahe, Kepler, Galilée, Newton, Einstein.

Mais c'est vers le grand siècle, celui de l'aube de la science moderne que tu nous ramenait souvent. Il suffit de voir le nombre impressionnant d'articles que tu as publiés dans les Cahiers Clairaut pour comprendre que ce siècle te fascinait.

Tu souhaitais que l'histoire des sciences ait une place dans l'enseignement de celles-ci, non pas tant pour honorer d'illustres savants que pour mieux comprendre comment progresse la connaissance. "Ne pas juger Kepler du haut de nos connaissances actuelles, mais tenter de comprendre. Buter avec lui sur les obstacles qu'il a rencontrés, pour suivre ses raisonnements et pénétrer ainsi dans ses découvertes par la grande porte de la recherche scientifique". Cela fait du bien d'entendre cela quand on est jeune prof.

Pour moi tu étais un puits de connaissances, tu lisais beaucoup, les murs de ton bureau étaient couverts de livres. Quelle joie d'écouter un de tes exposés lors d'une école d'été ! Quel bonheur de rester près de toi pendant le repas pour continuer les discussions ! Je serais bien incapable de parler de tous les sujets abordés, mais je voudrais parler de ton humour. Je te revois parler de ton voyage à Londres "oui j'ai mis mes pieds dans les pas de Newton", tu mimais, et t'arrêtais pour dire "cela ne m'a rien fait".

Et ta présentation de la deuxième loi de Kepler. "Les secteurs balayés pendant le même temps ont même aire", tout l'auditoire (ou presque) le savait et alors avec l'œil vif, un petit sourire au coin des lèvres tu ajoutais "ils ont même si père ..." nous restions suspendus à ta phrase,

sans comprendre et ton regard nous disait que c'était évident. Alors tu allais vers le tableau pour écrire que les deux aires A et A' étaient égales puisque $A = A' (-1)^p$ et tu annonçais "ils ont même aire si p paire".

C'était tout cela ta personnalité, une grande culture que tu partageais avec modestie.

Merci Gilbert, tu as semé, ça a germé, il restera toujours un peu de toi au CLEA.

Jean Ripert

Je me souviens... Je me souviens de Gilbert à l'Université d'Eté (Formiguères, 1984) : " deux grands siècles en Astronomie". Je me souviens des IREM ; de l'APMEP et de son "Bulletin Vert" (découvert dès mon IPES en 1971) où fleurissaient ses interventions, souvent signées de nombreux pseudonymes, tribu de sa modestie à ses immenses compétences.

Je me souviens (AG du CLEA à Orsay) l'avoir vu sortir, comme un lapin d'un chapeau, le Théorème de Pascal-Brianchon. Je me souviens de son travail pour le CLEA, secrétariat, trésorerie, rédaction des CC, lectures pour la Marquise...Et d'une image de Professeur et d'Honnête Homme, présente en moi depuis plus de trente ans.

Je me souviens des goûters rue Bérengère, où nous ne parlions pas seulement, avec Jeannette et Martine, des Cahiers Clairaut, mais de nos métiers, nos lycées (Voltaire, Charlemagne, Saint-Cloud), nos lectures, nos vies, nos amis du CLEA..., de leurs fils et des nôtres, des petits enfants...; je me souviens que l'imprimeur des CC, Gérard Hauguel, n'a jamais manqué dans nos entrevues trimestrielles pendant six ans, de demander des nouvelles de Mr Walusinski.

Je me souviens, dans la chambre de Gilbert à Brou, je lui tenais la main pendant la canicule, de son regard, de son sourire... Je me souviens de la dernière phrase de "Ciel : passé, présent" : "je crois que c'est mieux ainsi : il faudra toujours chercher."

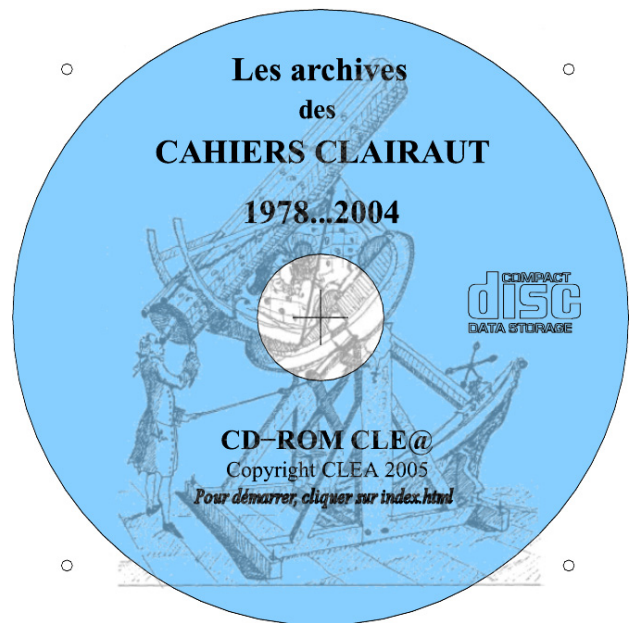
Je me souviens de Gilbert

Michel Bobin

Le CD des archives des Cahiers Clairaut

Si vous vous êtes abonnés cette année vous aurez le plaisir (nous l'espérons) de trouver, attaché à ce Cahier, le CD des archives des Cahiers Clairaut : plus de 100 Cahiers, depuis le premier numéro historique, publié en 1978, jusqu'aux plus récents. Des index par auteur, par numéro, par titre et par rubrique vous permettent d'ouvrir le Cahier en format pdf. Il suffit alors d'aller à la bonne page pour retrouver l'article qui vous intéresse.

Certes la présentation des premiers numéros était sobre, mais le contenu n'a pas vieilli (la science n'évolue pas si rapidement que cela).



COURRIER DES LECTEURS

En écho aux articles "Autour du mot Mars" de Jean-Luc Dewez et Olivier Dargent, et particulièrement à celui reçu dans les Cahiers Clairaut ces jours-ci (n°112 - Hiver 2005), je n'ai pas résisté et je suis allé faire un tour vers Mars... il m'a suffi d'une quinzaine de kilomètres !



Mars est un joli petit village du nord-est du département de la Loire, entouré de pâturages

vallonnés entrecoupés de haies vives et dédiés à l'élevage charolais.

Cette petite balade dans la verte ruralité de Mars n'avait rien d'un plaisir astronomique mais elle fut bien agréable par ce bel après-midi de dimanche hivernal, surtout si on la compare aux distances et aux conditions climatiques régnant sur la planète homonyme.

Et grand merci aux deux auteurs pour leur érudition et leurs articles !

Bien cordialement,
Charles-Henri Vigouroux
Mably (près de Roanne, Loire)

PS. Etant un fidèle des CC depuis presque le début, je suis attristé par la mort de Gilbert Walusinski et j'adresse d'amicales pensées à ses proches et à sa grande famille du CLEA.

Orientation du terminateur

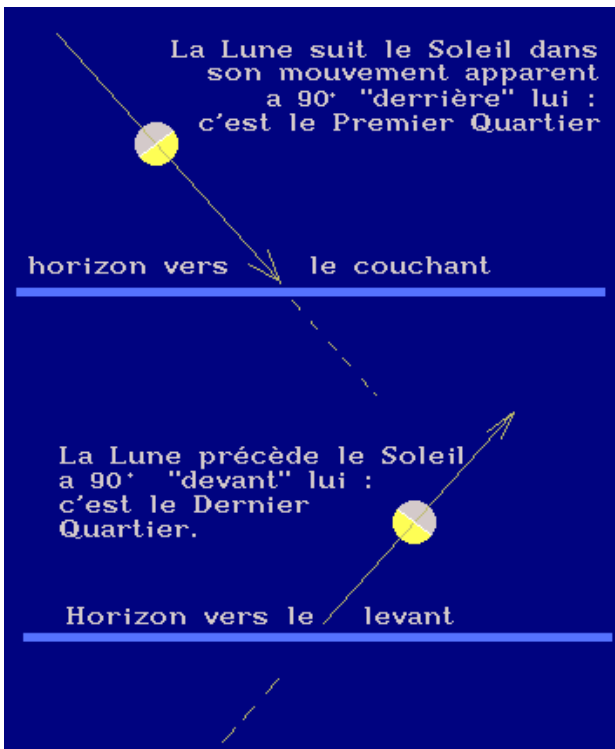
Voici une question posée sur la liste de diffusion par **E. Durand** :

Un petit problème pour les férus d'astronomie suite à une question d'élève.

Le terminateur de la lune est incliné.

1 Pourquoi ?

2 Pourquoi est-il incliné sur la droite lors du premier quartier et sur la gauche lors du dernier quartier ? Merci



Voici la réponse de **Francis Berthomieu** sous deux formes :

- un petit schéma ...

- et quelques questions, auxquelles on peut répondre par le raisonnement mais aussi, et c'est peut-être préférable dans un premier temps, par l'observation :

- Ne peut-on voir la Lune que pendant la NUIT ?
- A quel moment de la JOURNÉE peut on voir la Lune au Premier Quartier ?
- Reste-t-elle "inclinée" vers la droite pendant toute cette période d'observabilité ?
- Au moment où elle se couche, n'y a-t-il pas des endroits sur la Terre où l'on peut la voir inclinée ... vers la gauche ... ou carrément "couchée" ?

Mêmes questions à adapter pour le Dernier Quartier !

Bien amicalement,

Fr@ncis Berthomieu

Dialogue

- Francis, pourquoi quand on te pose une question tu réponds toujours par une autre question ?
- Et pourquoi pas ?

Solution du "remue-méninges"

La première colle. Selon le principe de relativité, on ne peut pas mettre en évidence un mouvement rectiligne uniforme. La Terre dans sa course autour du Soleil n'a pas un mouvement rectiligne uniforme. Si la Terre en avait eu un, l'aberration de la lumière aurait bel et bien agi en nous montrant les étoiles dans une position autre que leur position réelle, mais nous n'aurions jamais pu le savoir. Il suffisait que la Terre décrive une trajectoire fermée (ou au moins courbe), pour que le déplacement des étoiles soit perceptible.

La deuxième colle est un hommage à Gilbert et à son humour. La réponse est donnée dans les hommages signés de A. Acker et de J. Ripert.

gp

Articles à venir

Cours élémentaire VIII ; Pendule de Foucault en carton ; La distance de la galaxie M31 ; Les étoiles variables ; Les ondes gravitationnelles. Le chaos. Effet de parallaxe. La sismologie stellaire. Le Solarscope.
(Alors quoi ! Ce pendule de Foucault en carton... Ça vient !?)

Liste de diffusion, ou, Comment pouvoir poser des questions et recevoir des réponses, avoir accès à des images du CLEA etc., via le Web

Les adhérents qui souhaitent être inscrits peuvent envoyer un message à : jripert@ac-toulouse.fr. Ils recevront en retour un fichier d'aide pour ouvrir, *gratuitement*, un compte. N'hésitez pas, j'attends vos messages.

Jean Ripert, trésorier du CLEA

L'Ecole d'Eté d'Astronomie du CLEA en 2006 Du 18 au 25 août au col Bayard (Gap)



Le CLEA, Comité de Liaison Enseignants et Astronomes, organise, depuis 1977 des Ecoles d'Eté, animées par des astronomes professionnels et des enseignants, tous passionnés par l'astronomie et l'astrophysique.

Pendant une semaine, des ateliers par petits groupes vous permettront de **découvrir le ciel** à l'aide de lunettes et de télescopes, de **réaliser des applications concrètes** à partir de documents d'observation ou d'expériences, de comprendre les fondements des phénomènes qui régissent l'Univers à travers des **cours théoriques**. Les sujets des plus élémentaires aux plus pointus, sont toujours présentés avec un réel souci de clarté. Des "approfondissements" peuvent être mis en place à la demande.

Ces écoles se déroulent dans un lieu propice aux observations (le centre d'oxygénation du col Bayard près de Gap) et dans une ambiance amicale. Grâce à une subvention du CLEA, le prix du séjour restant à la charge du participant varie entre 150 et 200 euros, selon le confort. L'hébergement de sa famille est possible dans la limite des places disponibles.

Le nombre de places est limité à 40, les inscriptions sont prises dans l'ordre d'arrivée. Une fiche d'inscription définitive, avec demande d'un versement de 100 euros de réservation, sera adressée aux candidats retenus.

Pour plus de détails sur les activités et sur leur contenu, vous pouvez vous reporter au site du CLEA : www.ac-nice.fr/clea.

Fiche de pré inscription à renvoyer avant le 31 mai 2006 :

Nom et Prénom : sexe : F-M

Adresse :
.....
.....

Téléphone :

Adresse électronique :

Etablissement (Ecole, Collège, Lycée, Association, Autre) :

Classes : Matières enseignées :

Type d'hébergement souhaité :

Chambre à 2 lits avec lavabo, douche et WC

Chambre à 2 lits avec lavabo et douche

Chambre à 3 lits avec lavabo et douche

Chambre pour famille avec enfants (demander les conditions)

A renvoyer

Soit par courrier à :
Françoise DELMAS,
Institut d'Astrophysique de Paris
98 bis Bd. Arago
75014 PARIS

Soit par fax au numéro : 01 44 32 80 01

Soit par courrier électronique : delmas@iap.fr

Les excuses de la rédaction

Le précédent numéro (CC112) a été distribué avec un retard très important (certains lecteurs n'auraient reçu leur exemplaire qu'en février alors qu'ils auraient dû le recevoir fin décembre). Il semble que le problème ait eu une double origine : un retard dans le passage de l'imprimeur à la société de routage et la période des vacances de Noël. La rédaction présente ses excuses pour n'avoir pas réagi assez promptement.

Pour l'instant (fin février) la rédaction est en train de se dépêcher de boucler le CC113 pour ne pas être à l'origine d'un nouveau retard (février n'a que 28 jours !)

Remerciements: Nous remercions M. Bobin, C. Petit, J.N. Terry, Marie-Agnès Terry et Anne-Marie Paturel pour la relecture de ce Cahier.

Les Ecoles d'Été d'Astronomie



Au col Bayard, dans un cadre prestigieux, ces écoles d'été d'astronomie s'adressent à tous les enseignants et formateurs, débutants ou non, et passionnés d'astronomie.



Des cours
accessibles,



des ateliers
pratiques, et
des
observations.

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

Une ambiance agréable !

Les productions du CLEA¹

Fiches pédagogiques:

Astronomie à l'école élémentaire, la Lune, gravitation et lumière, mathématiques et astronomie...

Séries de diapositives pédagogiques:

Les phénomènes lumineux, initiation aux constellations, une expérience pour illustrer les saisons...

Fascicules thématiques pour la formation des maîtres en astronomie:

Le repérage dans l'espace et le temps, le mouvement des astres, la lumière messagère des astres, naissance, vie et mort des étoiles, univers extragalactique et cosmologie...

Matériel:

filtres colorés, réseaux de diffraction, transparents animés...

Des documents en perpétuelle évolution!

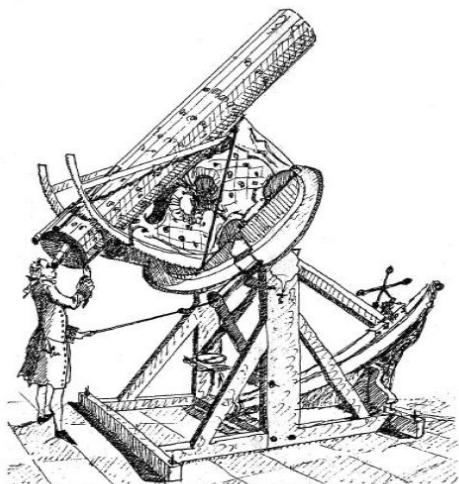
1) Ventes aux adhérents uniquement

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

L'information toujours actualisée !



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

Comment nous joindre

Informations générales :

<http://www.ac-nice.fr/clea>
clea.astro@astro.u-psud.fr

ou

CLEA,
Laboratoire d'astronomie,
Bâtiment 470,
Université de Paris-Sud,
91405 ORSAY CEDEX

Ecole d'Eté d'Astronomie :

jean.a.riper@wanadoo.fr

Cahiers Clairaut :

patu@obs.univ-lyon1.fr

Ventes des productions :

clea.astro@astro.u-psud.fr

Site internet :

berthomi@ac-nice.fr

Adhésion au CLEA:

Adhésion CLEA pour 2006 : 5 €
Adhésion CLEA+ Abonnement aux Cahiers Clairaut pour 2006 : 35 €

Chèque à l'ordre du CLEA, à envoyer à
Jean Ripert
Impasse de Mouyracs
46090 PRADINES

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

dépôt légal : 1er trimestre 1979
numéro d'inscription CCPPAP : 61660

prix au numéro : 7 €