

bulletin du comité de liaison enseignants et astronomes

Les Cahiers Clairaut

Lect
pour
et se
His
Re
d'o
Ar
fo
Réfle
deb
Info
élève
Vie
Tex
exerc
Articles



Les potins de la Voie lactée

numéro 98 - ÉTÉ 2002

ISSN 0758-234X

Comité de liaison enseignants astronomes

Le CLEA

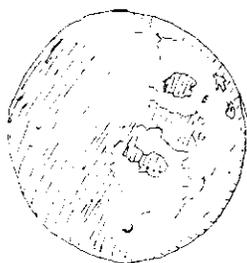
Le **CLEA**, Comité de Liaison Enseignants et Astronomes, est une association déclarée (loi de 1901). Elle réunit des enseignants et des astronomes professionnels qui veulent ensemble promouvoir l'enseignement de l'astronomie à tous les niveaux de l'enseignement et dans les organismes de culture populaire.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

agissent dans le cadre de la formation initiale et continue des enseignants.

Le **CLEA** organise des stages nationaux (universités d'été) et régionaux dans le cadre des MAF-PEN. Ces stages sont ouverts aux enseignants de l'école primaire, du collège et du lycée. On s'efforce d'y conjuguer information théorique et travaux pratiques (obser-

vations, travaux sur documents, mise au point de matériels didactiques et recherche du meilleur usage de ces matériels, etc).

Aussi bien au cours de ces stages que dans ses diverses publications, le **CLEA** favorise les échanges directs entre enseignants et astronomes hors de toute contrainte hiérarchique.



Pour toute information s'adresser au siège du CLEA
Laboratoire d'Astronomie, bât. 470
Université Paris Sud 91405 Orsay cedex
Tel / Fax : 01 69 15 63 60
Adresse électronique : clea.astro@astro.u-psud.fr
Le CLEA est présent sur internet à l'adresse
<http://www.ac-nice.fr/clea>

Bureau du CLEA pour 2002

Présidents d'honneurs

Jean-Claude Pecker et Evry Schatzman

Présidente

Lucienne Gouguenheim

Vice-Présidents

Agnès Acker, Marie-France Duval
Jean Ripert, Josée Sert
Gilbert Walusinski

Rédactrice en chef

Martine Bobin

Rédacteur associé

Frédéric Dahringer

Trésorière

Béatrice Sandré

Secrétaires

Martine Bobin et Catherine Vignon

Comité de rédaction des Cahiers Clairaut

Daniel Bardin
Francis Berthomieu
Martine Bobin
Michel Bobin
Lucette Bottinelli
Pierre Causeret
Frédéric Dahringer
Jacky Dupré
Charles-Henri Eyraud
Jean-Luc Fouquet
Lucienne Gouguenheim
Marie-Agnès Lahellec
Colette Le Lay
Lucette Mayer
Georges Paturel
Jean Ripert
Josée Sert
Daniel Toussaint
Gilbert Walusinski

EDITORIAL

Dans ce contexte politique difficile, le rôle de l'enseignant est primordial, alors que ses conditions de travail sont de plus en plus pénibles. Développer l'esprit critique et la réflexion de nos élèves est la priorité.

Au CLEA, nous continuons et continuerons à oeuvrer dans ce sens et il est important que nos activités puissent se poursuivre : animations de stages et d'écoles d'été, publications, diffusion de celles-ci, site internet.

Nous espérons que ce numéro d'été des Cahiers vous donnera matière à réflexion pour vous et vos élèves.

L'article de Juan Zorec sur les étoiles Be fournit un bel exemple du travail de recherche en astrophysique.

Georges Patuere poursuit ses expériences et a cette fois-ci construit un pendule de Foucault amélioré par Charron. Roger Meunier nous détaille la construction du spectrographe solaire qu'il utilise dans son club.

Paul Perbost s'est intéressé au fonctionnement d'un antique cadran solaire récemment acquis par le musée du Louvre.

Christian Scotta nous présente une étude approfondie sur Copernic.

Francis Berthomieu, Marie-Agnès Lahellec et Lucette Mayer proposent des activités originales pour la seconde. Quant à Pierre Causeret, il nous initie aux subtilités de la latitude (géocentrique et astronomique) en proposant deux niveaux de lecture selon que l'on est plus ou moins matheux.

Dans les potins, Lucienne Gouguenheim décrit un système solaire en formation.

Merci à Dominique Abouaf et José Sert pour la rubrique "Vie associative" et à Charles-Henri Eyraud, Annie Laval et Catherine Vignon pour leurs lectures.

Bonnes vacances à tous,

La Rédaction

Les Cahiers Clairaut

Été 2002 n° 98



Article de fond

Les Etoiles Be p. 2



Avec nos élèves

Quelques idées pour mesurer la Terre (niveau seconde) p. 8

Activités en seconde p. 11

Il ne faut pas confondre latitude et longitude ! (niveau lycée) p. 11



Travaux pratiques

Le pendule de Foucault-Charron p. 19



Réalisation d'objets

Un spectrographe solaire p. 23



Reportages

Le cadran solaire de Carthage p. 26



Remue-méninges

Soleil se levant derrière le Mont Blanc p. 28



Histoire

Nicolas Copernic p. 30



Lectures pour la Marquise

p. 35



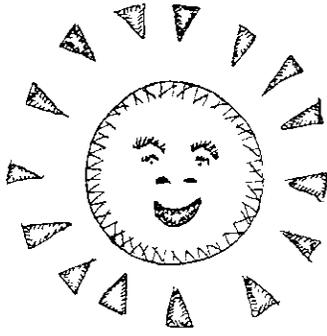
Vie associative

p. 37

Les potins de la Voie lactée

p. 39





Les étoiles Be

Juan Zorec, I.A.P.

ARTICLE DE FOND

Juan Zorec nous fait partager son intérêt pour son thème de recherche, les étoiles Be, étoiles de type B entourées d'une enveloppe gazeuse.

Il nous montre comment, à partir d'observations variées on peut déterminer les propriétés et construire un modèle de ces étoiles.

Cet article (réparti sur les CC 98 et 99) est une excellente illustration du travail de recherche en astrophysique.

Introduction

Lorsqu'à Rome, en 1866, le Père Agnello Secchi C.J. tourna vers le ciel sa lunette équipée d'un modeste spectrographe, il ne se doutait certainement pas qu'un siècle et demi plus tard, autant de questions pourraient encore se poser sur la nature de l'objet qui l'avait tant ému :

"... je ne pourrais différer davantage à vous signaler une particularité curieuse de l'étoile γ Cassiopeia, unique jusqu'à présent. Pendant que la grande majorité des étoiles blanches montre la raie F ($H\beta$, λ 4861 Å) très nette et large, comme α Lyrae, Sirius, etc., γ Cas a, à sa place, une ligne lumineuse très belle et bien plus brillante que tout le reste du spectre" (Secchi 1867).

γ Cas (HD 5394) a été longtemps considérée comme le prototype d'une classe d'étoiles particulières, dénommées "Be". On s'accorde à appeler Be une étoile chaude, de type spectral B, non supergéante, dont le spectre présente ou a présenté au moins une fois une raie de Balmer en émission (Jaschek et al. 1981). Après la décou-

verte de l'émission dans le spectre de γ Cas, la plupart des objets à raies en émission de notre Galaxie ont été découverts et répertoriés par Paul Willard Merrill et Cora G. Burwell dans le catalogue "Mount Wilson Catalog of Be stars" - MWC (Merrill et Burwell 1933, 1943, 1949, 1950). Dans ce catalogue, il y a beaucoup d'objets que l'on ne considère plus comme des étoiles Be à proprement parler. Ceux des objets que l'on considère avoir des caractéristiques typiquement Be, se trouvent dans le catalogue de Jaschek et Egret (1982).

Malgré les questions que l'on se posait il y a à peine 20 ans sur l'origine véritable de ces raies brillantes, de nos jours, il semble clair que la contribution la plus importante à cette émission est due à une enveloppe de gaz qui entoure l'étoile. Malgré cet acquis, deux ensembles de questions fondamentales restent sans réponse :

- 1- comment est formée cette enveloppe circumstellaire et quelle est sa structure ;
- 2- quelle est la nature de l'objet qui l'a produite et à quel moment de son évolution l'enveloppe s'est créée ?

Caractéristiques spectrales générales des étoiles Be

Caractéristiques du spectre de raies dans le visible.

Les étoiles Be du catalogue de Jaschek et Egret (1982) sont appelées aussi des étoiles "Be classiques", pour les distinguer des autres types d'étoiles B à raies en émission, telles que les supergéantes B, les étoiles B[e] qui ont des raies interdites dans le spectre visible, etc..., pour lesquelles l'origine des raies en émission n'est pas due au même phénomène que dans le cas des étoiles Be classiques.

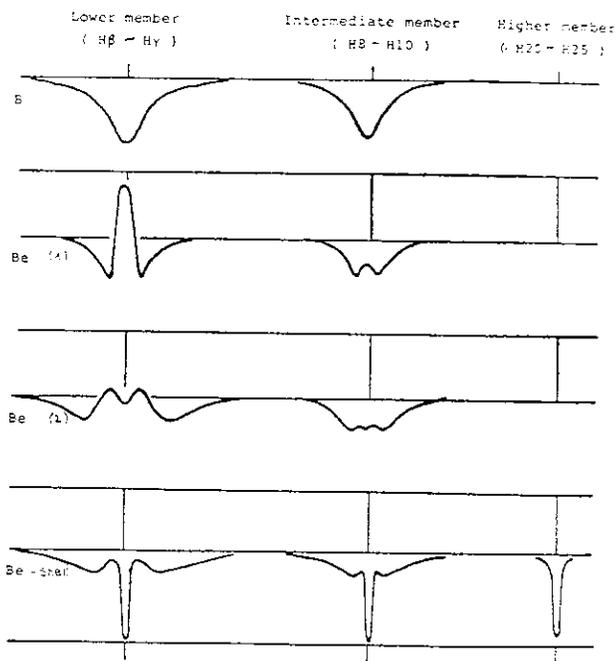


Figure 1 :

Représentation schématique des profils des raies de Balmer des étoiles Be dans les phases "B-normal", "Be" et "Be-shell". Formes des profils dans les raies $H\alpha$ à $H\gamma$, dans les membres intermédiaires, de $H8$ à $H10$ (H_n , $n =$ niveau atomique supérieur de la transition) et dans les membres élevés, de $H20$ à $H25$ (Kogure et Hirata 1982).

Les raies en émission des étoiles "Be classiques", notamment celles de la série de Balmer, peuvent avoir quatre aspects distincts :

1 - Les raies de Balmer sont toutes en absorption et elles ont le même aspect que dans les étoiles B qui n'ont jamais montré d'émission. L'aspect spectroscopique de l'étoile Be est dit alors "B-normal".

2 - Le profil des raies en émission peut avoir un ou deux pics. L'émission se superpose à une raie photosphérique en absorption très large. L'émission peut aussi remplir entière-

ment cette absorption sous-jacente. Le spectre porte alors le nom générique "Be".

3 - Une raie fine et profonde en absorption se superpose à l'émission. L'aspect spectroscopique est désigné alors comme étant "Be-shell". Même si cette dénomination rappelle une enveloppe gazeuse absorbante, le terme "shell" a seulement une connotation spectroscopique.

4 - Dans quelques cas, on trouve des raies photosphériques auxquelles se superpose une absorption de type "shell". Le spectre est alors appelé "B-shell".

Dans les étoiles Be les plus chaudes, on observe des émissions de l'hélium neutre et du fer ionisé. Les spectres Be-shell montrent aussi des raies en absorption de FeII, CrII, NiII, TiII et d'autres métaux ionisés. Comme ces absorptions sont produites à partir de niveaux métastables, leur renforcement implique que le milieu où elles se forment est peu dense et que le rayonnement stellaire s'y trouve dilué. La figure 1 donne un aperçu des profils des raies de Balmer observées dans les étoiles Be. On peut trouver un répertoire détaillé des spectres des étoiles Be dans le visible, dans "An atlas of Be stars" de Hubert-Deleplace et Hubert (1979).

Les aspects spectroscopiques décrits plus haut n'identifient pas des objets à caractéristiques physiques fondamentalement différentes. Selon l'époque d'observation, la même étoile Be peut avoir un spectre "B-normal", "B", "Be-shell" ou "B-shell".

D'une manière générale, on préfère parler de phénomène Be, plutôt que d'étoiles Be, car il n'est pas exclusif des étoiles à type spectral B, mais est observé aussi dans quelques étoiles O tardives et parmi les étoiles A les plus chaudes.

Caractéristiques spectrophotométriques dans le visible.

Dans le domaine spectral entre 3000 et 7000 Å, la distribution d'énergie d'une étoile Be classique peut, lui aussi, avoir trois aspects différents :

1 - Le spectre peut présenter une seule discontinuité de Balmer, comme dans le cas d'une étoile B sans émission. Le spectre est alors dit d'étoile B-normale dans le continu.

2 - Dans la région de la discontinuité de Balmer, on voit deux composantes. L'une, la "première" discontinuité de Balmer, est due à la photosphère de l'étoile centrale et ressemble à celle d'une étoile B normale. L'autre composante, la "deuxième discontinuité de Balmer", se situe vers des longueurs d'ondes plus courtes et elle est en "émission". Cette émission se produit de manière abrupte à une longueur d'onde qui est proche de la longueur d'onde théorique de la discontinuité de Balmer (λ 3648 Å). L'apparition de l'émission du spectre continu à cette longueur d'onde indique que la masse volumique et la température du gaz où se forme cette émission sont basses, inférieures à celles de la photosphère. En effet, lorsque la masse volumique et la température sont élevées, la pression du gaz produit un élargissement des niveaux supérieurs d'énergie de l'hydrogène en les chevauchant et les fondant entre eux pour former un pseudo-continu. Le seuil d'ionisation de l'hydrogène, qui normalement se

produit à λ 3648 Å, est alors repoussé à une énergie plus basse, $\lambda > 3648$ Å, cas de la discontinuité de Balmer stellaire.

3 - Deux discontinuités de Balmer sont visibles, mais la "deuxième", située aussi à λ 3648 Å, est en absorption. Au cours des variations de l'intensité des émissions et / ou absorptions "shell", la "deuxième" discontinuité de Balmer est variable, tandis que la première reste inchangée. Cette dernière est donc utilisée comme signature de la photosphère pour déterminer les paramètres fondamentaux de l'étoile centrale.

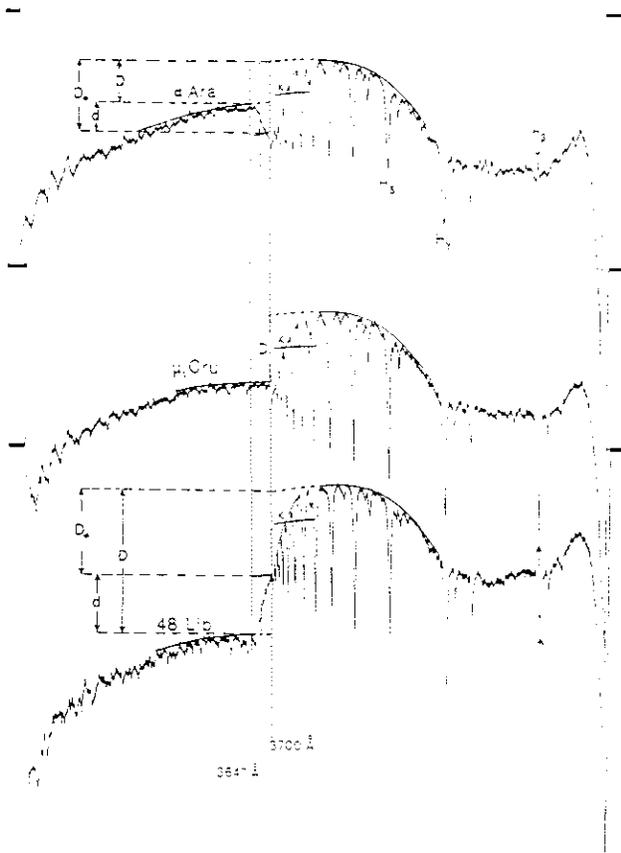


Figure 2 :

Traces microphotométriques des distributions d'énergie, non corrigées des réponses des plaques photographiques, de 3200 Å à 5000 Å des étoiles B et Be. L'étoile μ_1 Cru est une étoile B normale (B2IV-V) : elle a une seule discontinuité de Balmer en absorption. Les étoiles α Ara (B2Ve) et 48 Lib (B3-4III-IVe) sont des étoiles Be qui présentent deux discontinuités de Balmer. La première est la discontinuité qui est due à la photosphère. La deuxième discontinuité est située vers λ 3648 Å. Dans α Ara la deuxième discontinuité est en émission ($d < 0$), tandis que dans 48 Lib elle est en absorption ($d > 0$). La discontinuité totale est la somme $D = D_* + d$, où D_* est la composante stellaire constante et d est la composante circumstellaire variable (Zorec 1986).

La figure 2 montre l'aspect de la discontinuité de Balmer dans les trois stades : B-normale, Be et Be-shell dans le continu. Il s'agit des enregistrements de spectres à basse dispersion, obtenus avec des plaques photographiques et avec le spectrographe "Chalonge" (Baillet et al.1973) spécialement conçu pour l'étude de la discontinuité de Balmer.

La discontinuité de Balmer photosphérique est caractérisée avec deux paramètres mesurables sur les spectres. Le saut proprement dit en flux de rayonnement de la discontinuité, qui détermine le type spectral de l'étoile, et sa position spectrale moyenne, qui donne sa classe de luminosité. La valeur du saut, mesurée à $\lambda = 3700$ Å, est une fonction de l'état d'ionisation de la photosphère et ainsi, de la température effective. La position spectrale de la discontinuité est une fonction de la pression du gaz dans la photosphère. Comme nous l'avons indiqué plus haut, celle-ci agit sur la largeur des niveaux atomiques et sur celle des raies spectrales. Ces élargissements produisent un décalage de la discontinuité vers le rouge si la pression du gaz est élevée. Comme la pression dépend aussi de la densité du gaz, et à son tour, celle-ci dépend de la gravité de l'atmosphère, la position spectrale de la discontinuité nous permet de déterminer la gravité superficielle de l'étoile. Cette méthode de classification spectrale a été inventée en 1938 par D. Barbier et D. Chalonge à l'Institut d'Astrophysique de Paris. Elle est aujourd'hui mondialement connue sous le nom de "système spectrophotométrique BCD" (Barbier-Chalonge-Divan) (Chalonge et Divan 1952).

La rotation

Les premiers travaux de Struve (1931) ont montré que les étoiles Be étaient des rotateurs rapides. Cet constat a été depuis largement confirmé. Evoquer de nos jours les étoiles Be, c'est parler des rotateurs les plus rapides qui soient parmi les objets non compacts. Selon les types spectraux et les classes de luminosité, les étoiles Be tournent en moyenne 1,5 fois à 2 fois plus vite que les étoiles B sans émission homologue en classification spectrale. Une caractéristique assez importante des étoiles Be est le rapport entre la vitesse linéaire vraie de rotation à l'équateur, V_e , et la vitesse de rotation de rupture, V_c . En moyenne ce rapport est $V_e / V_c = 0,8$ et les écarts sur cette valeur ne sont pas grands.

Une autre caractéristique importante des étoiles Be est la corrélation qui existe entre la largeur à mi-hauteur des raies en émission et la vitesse de rotation projetée $V \sin i$. La figure 3 montre cette corrélation pour la raie H α . Struve (1931) s'est inspiré de cette loi pour proposer le modèle, dit "rotationnel" d'enveloppe circumstellaire pour les étoiles Be. Selon ce modèle, à cause de sa grande vitesse de rotation, l'étoile centrale éjecte de la matière par l'équateur en formant un disque circumstellaire plat (figure 4). D'après ce modèle, les différents aspects "Be" et "Be-shell" des profils des raies en émission seraient donc dus seulement à un effet d'angle selon lequel est vu le système étoile-enveloppe. Ce modèle a inspiré plusieurs générations d'astronomes et, de nos jours,

on propose encore des modèles d'enveloppes circumstellaires qui ressemblent à celui proposé par Struve.

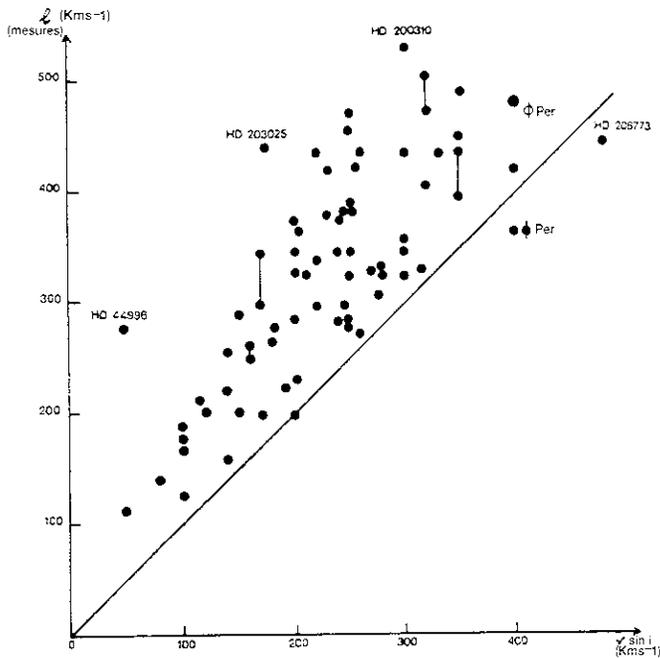


Figure 3

Largeur à mi-hauteur en km s^{-1} de la raie $H\alpha$ en émission en fonction de la vitesse de rotation projetée $V \sin i$ (Andrillat 1983).

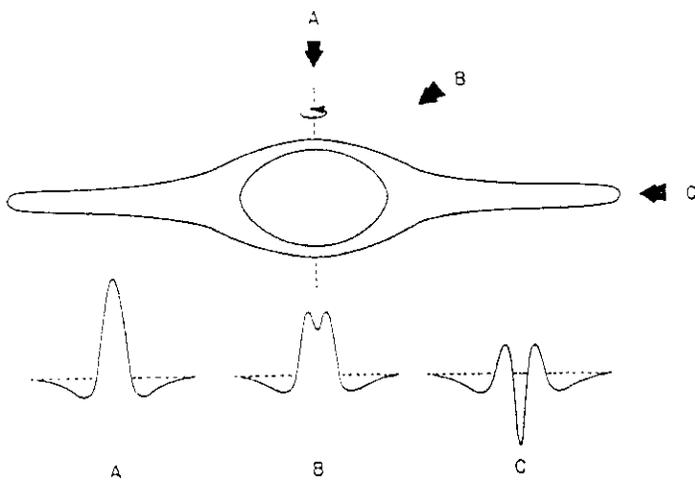


Figure 4 :

Vue schématique du modèle de Struve de l'enveloppe circumstellaire d'une étoile Be. Dans la figure sont représentées aussi les types de profils des raies en émission produites par cette enveloppe. Les formes des profils dépendent de la ligne de visée (A, B ou C) selon laquelle est observée l'étoile Be (Slettebak 1979).

Du fait que $V_e \neq V_c$ dans les étoiles Be, l'instabilité dynamique nécessaire pour produire l'éjection de matière par l'équateur n'existe pas et le modèle de Struve, dans son aspect initial, ne peut pas expliquer le phénomène. Malgré cela, la corrélation entre les largeurs des raies en émission et le $V \sin i$ implique que probablement l'enveloppe est animée d'une vitesse de rotation non négligeable autour de l'étoile pour la rendre plus ou moins aplatie. Si l'on suppose alors que chaque photon issu de l'enveloppe peut s'échapper librement, il est facile de prouver que l'intensité d'émission à chaque fréquence dans la raie, est proportionnelle à la longueur de la courbe d'égalité vitesse radiale qui produit son décalage Doppler par rapport au centre de la raie. Suivant ce raisonnement, Huang (1972) obtient le rayon extérieur, R_e , de la région de l'enveloppe circumstellaire qui contribue à l'émission de la raie : $R_e / R_* = (2V \sin i / \Delta_{\text{pic}})^j$. Dans cette relation, R_* est le rayon de l'étoile centrale et Δ_{pic} est la séparation, en km s^{-1} , entre les pics d'émission de la raie. L'exposant est $j = 1$ pour une enveloppe où l'on suppose que la matière éjectée par l'étoile conserve son moment angulaire et $j = 2$, si la rotation de l'enveloppe est képlerienne.

Activité des étoiles Be

Variabilité spectrale

Une des caractéristiques les plus notables des étoiles Be est leur variabilité. Celle-ci concerne aussi bien l'intensité des raies en émission et / ou en absorption "shell" que le spectre continu. Une des variations les plus connues des raies est celle du rapport d'intensité des pics d'émission V/R (V indique l'intensité du pic du côté bleu des longueurs d'onde et R , celle du côté rouge). Ces variations ont un caractère quasi-périodique d'environ 7 ans, mais elles peuvent être beaucoup plus rapides pour les Be avancées, bien que très rarement.

Un cas particulier de variation dans les raies est dénommée "transition de phase". Cette transition implique que le spectre subit des passages entre les différents aspects possibles : $\text{Be} \leftrightarrow \text{B} \leftrightarrow \text{Be-shell}$. Ces changements se produisent généralement de manière progressive sur plusieurs années, mais ils peuvent se produire de manière beaucoup plus rapide, en quelques mois.

Variabilité spectrophotométrique

La variation photométrique des étoiles Be est un phénomène connu de longue date. La variation dans la magnitude V est généralement inférieure à 0,6 mag, tandis que celle dans la magnitude U , notamment dans les phases "shell" peuvent atteindre 1 à 1,5 mag. Les variations photométriques de courte période (quelques jours et moins) et faible amplitude (quelques centièmes de magnitude), sont dues à des phénomènes de pulsation non radiale. Selon les auteurs, on peut les attribuer aussi à des passages de taches plus au moins

brillantes sur la surface de l'étoile ou à des nuages en corotation avec l'étoile. Les variations périodiques de quelques mois sont supposées être dues au caractère binaire de l'étoile centrale. Les changements à long terme, variations généralement irrégulières, dont les échelles de temps vont pourtant de quelques mois à quelques années, sont dues probablement à la variation de la structure de l'enveloppe circumstellaire. La variation de cette structure pourrait expliquer aussi les "transitions de phase". Malgré l'aspect chaotique des variations à longue échelle, il y a deux comportements bien définis entre des paramètres photométriques et spectro-photométriques selon que la deuxième discontinuité de Balmer est en émission ou en absorption. Dans le premier cas, la variation de la magnitude V et celle de l'indice de couleur (B-V) sont linéairement corrélées avec la variation de l'émission dans la deuxième discontinuité. L'étoile est vue plus brillante et la distribution de son énergie légèrement rougie, lorsque l'émission dans la deuxième discontinuité de Balmer est plus forte. Dans le deuxième cas, aucune variation, ni de la magnitude ni de la distribution de l'énergie dans le visible n'est observable, lorsque l'absorption dans la deuxième discontinuité de Balmer augmente. La phase émissive dans le continu est supposée être due à une augmentation de la taille de l'enveloppe circumstellaire, tandis que la phase d'absorption peut s'expliquer par un tassement de l'enveloppe, au cours duquel celle-ci est légèrement refroidie par l'écrantage du rayonnement stellaire par l'enveloppe, à cause de l'augmentation de son pouvoir absorbant.

Sursauts de lumière.

Grâce à des observations photométriques très suivies réalisées pendant la mission spatiale HIPPARCOS, un nouveau phénomène photométrique très généralisé parmi les étoiles Be a été découvert. En effet, les étoiles Be montrent de manière récurrente des phases relativement courtes pendant lesquelles est observée une augmentation d'environ 0,3 mag dans la magnitude V. Celles-ci sont suivies d'une période plus ou moins longue de diminution de lumière. La durée totale du phénomène est, selon les cas, de quelques mois à deux ans environ. Les premières interprétations de ce phénomène semblent indiquer qu'il s'agit d'éjections discrètes et massives de matière.

Superionisation et vents stellaires.

La distribution d'énergie dans l'ultraviolet lointain ($\lambda\lambda$ 1200-3000 Å) dans les étoiles Be est, sauf dans des cas assez rares, semblable à celui des étoiles B normales. La principale différence dans l'UV lointain entre les étoiles Be et les étoiles B normales est due à la présence de quelques transitions qui ne sont pas habituellement présentes pour la température effective de l'étoile. Il s'agit notamment des raies de résonance de l'OVI ($\lambda\lambda$ 1032-1038 Å), du NV ($\lambda\lambda$ 1239-1243 Å), du SiIV ($\lambda\lambda$ 1394-1403 Å) et du CIV ($\lambda\lambda$ 1548-1551 Å).

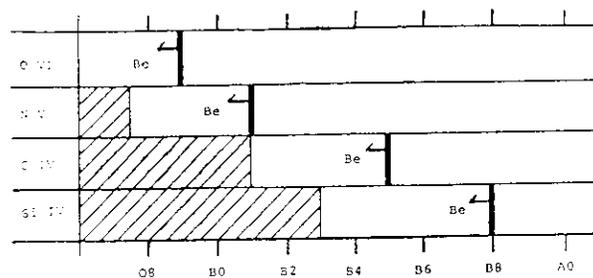


Figure 5 :

Phénomène de superionisation dans les étoiles Be. La présence des ions marqués est normale dans les domaines hachurés de types spectraux. Dans les étoiles Be ces ions sont présents à partir des types spectraux marqués avec une flèche (Kogure et Hirata 1982).

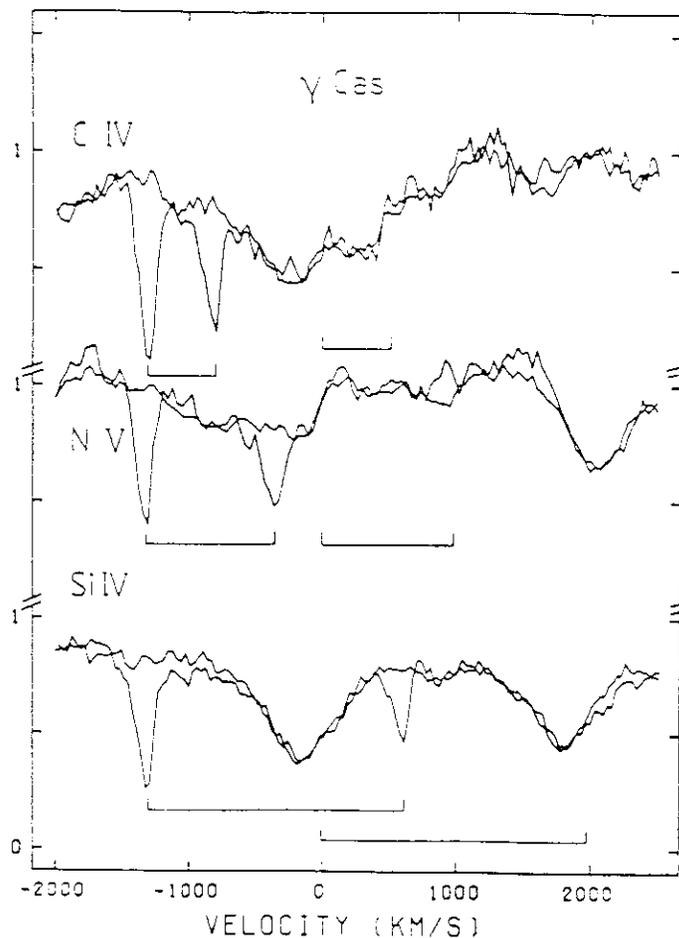


Figure 6 :

Raies de résonance du CIV ($\lambda\lambda$ 1548-1551 Å), de NV ($\lambda\lambda$ 1239-1243 Å) et du SiIV ($\lambda\lambda$ 1394-1403 Å) de γ Cas observées à deux moments différents où elles sont avec et sans composantes discrètes. Le déplacement vers le bleu des composantes discrètes est d'environ 1300 km s^{-1} (Henrichs et al. 1983).

On utilise le terme "superionisation" pour désigner la présence de ces transitions dans les étoiles Be qui ont des températures effectives telles que dans les étoiles B normales ces états d'ionisation n'existeraient pas. Le diagramme de la figure 5 montre schématiquement les domaines des types spectraux où la présence de chacune des transitions mentionnées est normale, ainsi que l'étendue de ces domaines où statistiquement celles-ci sont visibles dans les étoiles Be.

La présence de ces raies suggère donc l'existence de zones chaudes au dessus de la photosphère. La nature et l'origine de ces régions sont encore l'objet de controverses. Les profils de ces raies sont très souvent variables et asymétriques, avec des ailes bleues qui impliquent des vitesses d'expansion allant jusqu'à 1000 km s^{-1} . Il n'est pas rare non plus de trouver des composantes discrètes à ces raies dont les vitesses sont supérieures à la vitesse d'échappement de l'étoile (figure 6). La présence des raies d'éléments superionisés avec des profils asymétriques est interprétée en termes de vent stellaire variable, caractérisé par des taux de perte de masse allant en moyenne de 10^{-11} à 10^{-9} masses solaires par an. Les valeurs des taux de perte de masse sont entre un et deux ordres de grandeurs supérieures à celles observées pour les étoiles B sans émission. Les composantes discrètes peuvent être dues aussi bien à des éjections discrètes de matière comme à des chocs dus à l'interaction de la masse éjectée avec le milieu circumstellaire.

Rayonnement X

Le niveau supérieur normal d'émission de rayons X d'énergie entre 0,2 et 11 keV dans le domaine des types spectraux O8 à A2, se situe à $L_x \sim 10^{32} \text{ erg s}^{-1}$. Dans les étoiles Be, la luminosité en rayons X varie de 10^{32} à $10^{37} \text{ erg s}^{-1}$ environ. Cet excès ne s'observe pourtant que dans les étoiles Be de types spectraux plus chauds que B3.

Les sursauts de rayons X dépassant le niveau normal $L_x \sim 10^{32} \text{ erg s}^{-1}$, comme dans A0538-66 ou V0332+53, sont interprétés comme étant dus à des étoiles binaires où une des composantes est une étoile Be et l'autre une étoile à neutrons.

Les pulsations non radiales

Dans les profils des raies en absorption des étoiles B et Be, en particulier dans les raies de l'HeI, on observe un phénomène de propagation de déformations. L'évolution de telles structures dans les profils est interprétée en termes de pulsations non radiales et / ou en termes de modulations produites par des taches à la surface de l'étoile, dont le passage est synchronisé avec la rotation stellaire.

La figure 7 montre une étoile en rotation rapide ayant des zones sur sa surface déformée par les pulsations non radiales. Certaines ont un mouvement vers l'observateur et d'autres s'en éloignent. Ces déplacements relatifs provoquent les distorsions observées dans le profil des raies. Les données d'observation semblent indiquer que l'amplitude de ces oscillations serait corrélées avec la variation de l'intensité

des émissions dans les raies de Balmer. Les pulsations non radiales peuvent avoir des mouvements progrades en additionnant leur vitesse à celle de la rotation stellaire. Il n'est donc pas exclu que des vitesses supercritiques puissent être ainsi atteintes. Il a été suggéré que les pulsations non radiales, conjuguées avec la rotation rapide, pourraient produire des phénomènes de perte de masse suffisants pour former des enveloppes circumstellaires. Les corrélations ne sont pourtant pas suffisamment évidentes pour désigner les pulsations non radiales comme les seules responsables du déclenchement du phénomène Be.

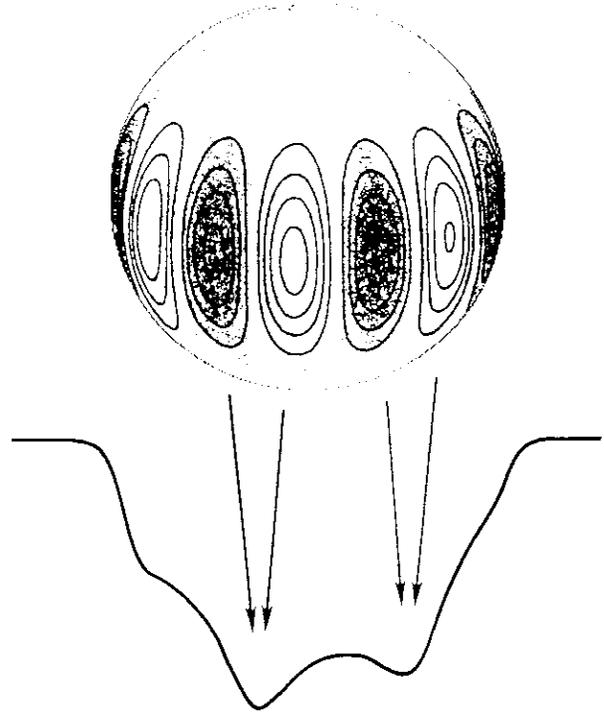


Figure 7 :

Illustration de la formation des distorsions dans les raies spectrales d'une étoile en rotation rapide présentant des oscillations non radiales. Le schéma est une carte de vitesse. La largeur totale de la raie correspond à la vitesse linéaire de rotation de l'étoile à l'équateur. Les "ellipses" concentriques dans la région équatoriale dessinent les contours d'égale vitesse des zones en mouvement vers l'observateur (régions claires) ou en s'en éloignant (régions sombres). Les flèches indiquent la correspondance entre les mouvements à la surface de l'étoile et les déformations qu'ils provoquent sur la raie spectrale (Vogt et Penrod 1983).



Quelques suggestions pour mesurer la Terre

Francis Berthomieu

Avec les programmes 2000 de physique, la mesure de notre planète est devenue incontournable.

Désormais, tous les ans, les élèves de seconde doivent renouveler l'exploit d'Eratosthène : en principe, il suffit de rassembler un simple bâton, un jour de Soleil, et deux lieux d'observation, suffisamment éloignés l'un de l'autre... Le principe est simple et bien connu de tous.

C'est, comme toujours, lors de la mise en oeuvre concrète que les problèmes pratiques surgissent et empêchent beaucoup de groupes d'arriver à leurs fins... :

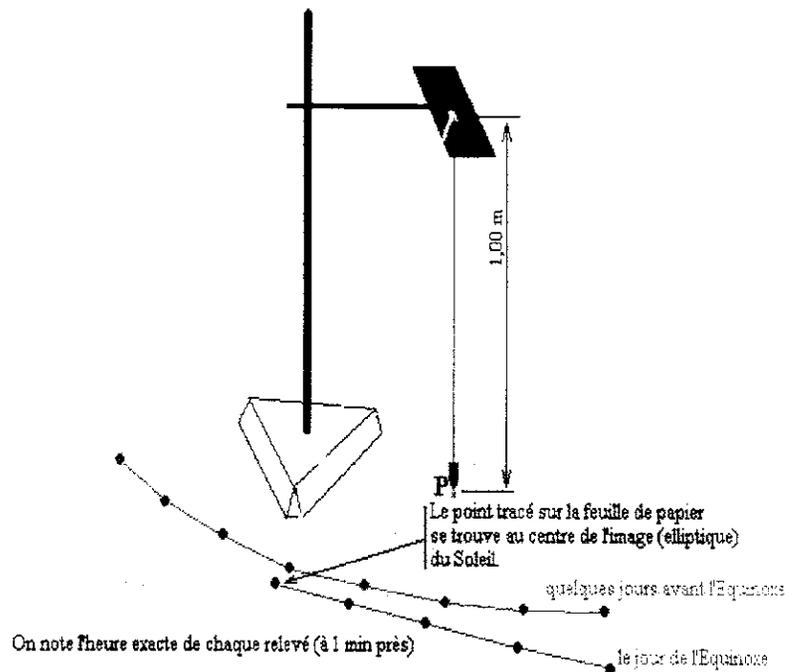


Schéma 1 : le dispositif

◆ Comment effectuer des mesures suffisamment précises de la hauteur du Soleil ?

- Il est délicat de planter le gnomon bien verticalement :

- Le Soleil étant une source étendue (diamètre apparent d'un demi degré environ), l'ombre portée de l'extrémité du gnomon est bien floue, avec zones d'ombre et de pénombre !

◆ Comment trouver la deuxième équipe, dont l'établissement doit se trouver (approximativement) sur le même méridien ?

◆ Comment effectuer les mesures à l'instant du passage au méridien ? Cela ne se produit-il pas généralement à l'heure... où tout le monde est à la cantine ?

Voici quelques propositions qui tentent d'apporter des solutions concrètes à ces divers soucis pédagogiques.

Le dispositif...



Photo du dispositif

Le CLEA propose depuis plusieurs années déjà sur son site web un protocole expérimental qui résout le premier problème, (et en partie le deuxième en

servant de relais pour la mise en contact des établissements candidats) ! Le schéma 1 ci-contre en détaille les éléments.

Une grande feuille de papier est posée sur un sol bien horizontal. Une longue tige, fixée solidement à un socle lourd, maintient une plaque de carton rigide percée en son centre d'un petit trou (qui peut être éventuellement un carré de 5 mm de côté : la formation d'une image ronde du Soleil sur le papier n'en sera que plus intéressante à interpréter... Belle situation problème, peut-être déjà résolue en collège !). On règle avec précision la hauteur du centre du trou au dessus du sol : on peut par exemple choisir une hauteur de 1,00 m.

Par ce petit trou, on fait passer un fil à plomb, qui indique sur le papier un point (noté P) situé à l'exacte verticale du trou.

Le tout est placé judicieusement pour que le Soleil l'éclaire pendant la plus grande partie de la journée (entre 10h et 16h pour fixer les idées...).

Le méridien du lieu

Une première opération fondamentale doit être menée à bien en priorité : tracer le "méridien" du lieu. Il s'agit de la droite, passant par le point P, qui matérialise sur le sol la direction Nord - Sud.

Ce tracé peut être effectué n'importe quel jour ! Le jour de l'équinoxe, la tache lumineuse image du Soleil décrira une droite parfaite : ce peut être une occasion à ne pas manquer... mais il ne fait pas toujours soleil le jour de l'équinoxe !

Il suffit alors que toutes les heures (les récréations peuvent fort bien fournir l'occasion de ces quelques mesures) ou si possible toutes les demi-heures, un petit groupe d'élèves soit chargé de relever sur le papier la position du centre de la tache lumineuse image du Soleil, en notant à côté l'heure exacte (à la minute près).

Un schéma valant toujours mieux qu'un long discours, voici celui qui donne la méthode de tracé de la ligne méridienne : les croix matérialisent les positions successives du centre de la tache lumineuse. Un cercle de centre P et de rayon suffisant a été tracé pour couper cette ligne en deux points A et B : le méridien est la bissectrice de l'angle APB !

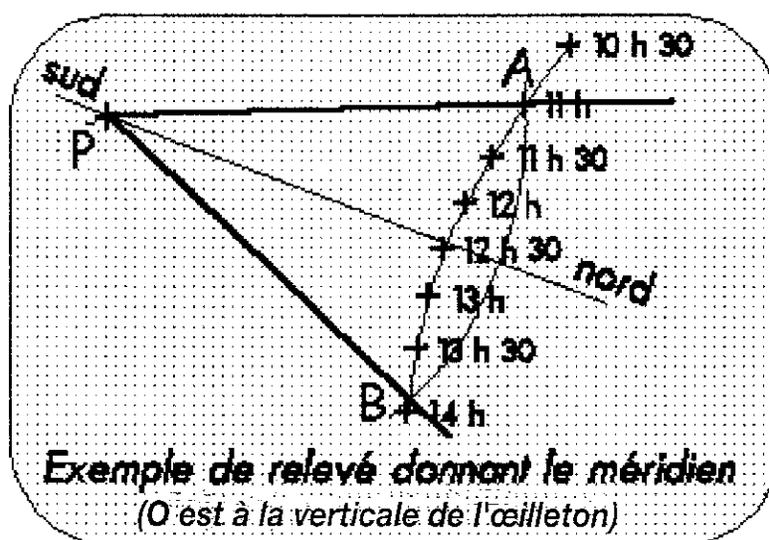
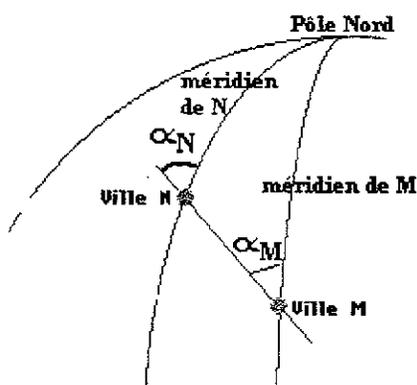


Schéma 2 : méthode de tracé de la ligne méridienne (Pierre Causeret)

A la recherche d'un "grand cercle"

La résolution des deux problèmes qui restent va surgir d'une constatation simple : nous partons de l'hypothèse que la Terre est une sphère et que l'on peut y trouver ce que l'on appelle des "grands cercles" dont le rayon est égal à celui de la sphère. Or, sur une sphère, s'il n'y a qu'un seul "cercle équatorial" et une bonne infinité de "cercles méridiens"... il existe aussi d'autres "grands cercles". En particulier, si nous prenons deux villes quelconques M et N, situées à quelques centaines de kilomètres l'une de l'autre, il existe toujours un grand cercle, dont le centre est confondu avec celui de la sphère terrestre, qui passe par ces deux villes. Sur une carte géographique, le tracé de ce "grand cercle" sera (en première approximation et si la carte se limite à une zone restreinte contenant les deux villes) confondu avec la droite Δ qui relie ces deux villes : cette droite fait un certain angle α avec les méridiens, mesurable aisément avec un rapporteur sur la carte... Il sera intéressant de voir (et d'expliquer) que cet angle est légèrement différent pour les deux villes et que l'écart mesuré est d'autant plus grand que les deux villes sont plus décalées (en longitude et en latitude !) Le schéma suivant permet de visualiser cet écart : on y voit que les méridiens se resserrent en allant vers le Nord et que α_N est plus grand que α_M



Mesures et calculs...

Nous, qui travaillons dans la ville M, nous pouvons reporter cette droite Δ sur la feuille de papier qui a recueilli nos observations préalables, en la fai-

sant passer par le point P, et en veillant à ce qu'elle fasse bien un angle α avec notre méridien : ce sera α_M pour la ville M. Nos collaborateurs de la ville N feront de même en se servant de l'angle α_N .

Nous n'aurons plus alors qu'à attendre un jour commun de Soleil dans nos deux villes pour relever position S et heure précise du passage de l'image du Soleil sur la droite Δ .

Il sera aisé à chacun de mesurer la distance qui sépare les points P et S à cet instant.

Un coup de téléphone ou une liaison Internet entre les deux villes devrait permettre de découvrir :

- Que l'image du Soleil est passée sur la droite Δ à la même heure dans les deux observatoires.
- Que la hauteur du Soleil n'y était pas la même.
- Qu'il est possible, en connaissant la distance entre les deux villes (la carte géographique nous la donnera), de calculer le rayon de la Terre !

Le calcul classique, utilisant les résultats des deux équipes, permettra de déduire les hauteurs h et h' du Soleil à cet instant là dans chacune des deux villes.

Résultats

Voici les résultats obtenus entre les villes de Draguignan et Vichy le 27 septembre 2001...

Mesure de l'angle α (sur la carte géographique) : à Draguignan $\alpha = 38^\circ$; à Vichy $\alpha = 40^\circ$

Distance entre Draguignan et Vichy :
D = 360 km

Heure commune des observations :
11 h 28 min (temps légal).

Longueur PS à Draguignan :
1,30 m \pm 0,01m.

Longueur PS à Vichy :
1,46 m \pm 0,01m.

(Les "gnomons" mesuraient 1,00 m)

Hauteur du Soleil calculée pour Draguignan : entre $37,4^\circ$ et $37,8^\circ$.
(valeur $h = 37,6^\circ \pm 0,2^\circ$)

Hauteur du Soleil calculée pour Vichy : entre $34,2^\circ$ et $34,6^\circ$.
(valeur $h' = 34,4^\circ \pm 0,2^\circ$)

Calcul du rayon de la Terre :

$$h - h' = 3,2^\circ \pm 0,2^\circ$$

$$R = 360 \times D / [2\pi \times (h - h')]]$$

On trouve ici un encadrement plutôt satisfaisant :

$$6066 \text{ km} < R < 6875 \text{ km}$$

note :

Le CLEA reste à la disposition de tous pour la constitution d'équipes. Nous publierons aussi sur notre site les résultats que vous nous adresserez. Contacts et précisions sur le site aux rubriques "Dans nos classes" ou "Nouveautés".



Quatre ans déjà !

Souvenez-vous !

Ce fut à l'occasion d'une mémorable Université d'Été que naquit le site Internet du CLEA !

A l'occasion du Solstice d'Été, et pour fêter ce quatrième anniversaire, nos "pages web" font peau neuve.

Vous y trouverez, bien sûr, nos rubriques habituelles, mais aussi des nouveautés, sous une forme qui, nous l'espérons, sera plus conviviale et plus pratique...

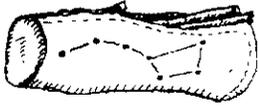
Comme les habitués ont pu le constater, nos rubriques s'étoffent peu à peu, grâce à vos contributions.

Vos questions, vos suggestions, vos propositions d'expériences astronomiques et pédagogiques ... trouveront toujours leur place naturelle dans ces pages, qui sont les vôtres.

N'hésitez donc pas à nous rendre visite et à nous contacter !

Une seule adresse :

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



Activités en seconde

AVEC NOS ÉLÈVES

1 - Un naufrage : le problème de la longitude

Marie-Agnès Lahellec

Cet exercice, proposé en classe de seconde, peut constituer une activité pour introduire la mesure du temps et le pendule.

Voici un texte tiré du livre "Les découvreurs". Daniel Boorstin (Robert Laffont)

En 1707, toute une flotte anglaise avait sombré sur les rochers des îles Scilly, à moins de quarante milles des côtes... À l'époque la plus glorieuse de la Royal Navy, la perte accidentelle et non au combat, de tant de marins si près de leur port d'attache était une grave humiliation... Deux éminents mathématiciens déclarèrent publiquement que la catastrophe aurait pu être évitée si seulement les marins n'avaient pas été aussi ignorants de la longitude... Sous le choc des événements, le Parlement adopte en 1714 une loi offrant une récompense à quiconque découvrirait un moyen pour déterminer la longitude en mer. ... L'heureux gagnant en fût John Harrison

En 1761 son modèle d'horloge n° 4 parut bien au point. Au bout d'un voyage de neuf semaines à la Jamaïque, l'horloge n'accusait que cinq secondes de retard, soit 1,25 minute de longitude, ce qui était bien en deçà des trente minutes maximales autorisées par le Parlement.

On suppose que la Terre est sphérique.

1 - Le mille marin est la distance séparant deux points d'un même méridien dont les verticales font un angle de 1' entre elles. Faites un schéma exprimant la définition. Donner la longueur du méridien terrestre en milles marins.

2 - Le rayon moyen de la Terre vaut $6,4 \cdot 10^3$ km. Donner la valeur du mille marin en m. En déduire la distance du lieu de naufrage aux côtes en km.

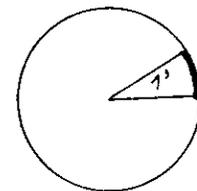
3 - Expliquer comment une mesure de temps permet de déterminer une longitude et dire de quel temps il s'agit.

4 - Vérifier l'assertion : "cinq secondes de retard, soit 1,25 minute de longitude".

5 - Quelle erreur sur la position d'un bateau (supposé situé à l'équateur) ces cinq secondes de retard induiraient-elles ?

Corrigé

1- On représente un méridien terrestre. Le mille marin est la longueur de l'arc intercepté par un angle au centre d'une minute, le schéma n'est que qualitatif.



La longueur du méridien terrestre correspond à un angle au centre de 360° soit $360 \times 60' = 21\ 600'$.

La longueur du méridien terrestre est donc $L = 21\ 600$ milles marins.

2 - La longueur du méridien terrestre en m : $L = 2 \pi R$.
 $L = 4,02 \cdot 10^7$ m Donc **un mille marin vaut $4,02 \cdot 10^7 / 21\,600 = 1,86 \cdot 10^3$ m.**
 Le naufrage a eu lieu à quarante milles des côtes soit à 74 km des côtes.

3 - On détermine l'heure de passage du Soleil au méridien du lieu où se trouve le bateau. Si l'on a un "gardien du temps" c'est-à-dire une horloge qui conserve l'heure du méridien de Greenwich on a la mesure du décalage horaire entre les deux méridiens et donc la longitude (1h de décalage horaire correspond à 15 ° de longitude).

Remarque : la détermination de la latitude ne posait pas de problème. On la calculait à partir de l'angle entre l'horizon et la direction du soleil au passage au méridien. Cet angle s'appelle « hauteur » du Soleil .

4 - Etablissons la correspondance entre temps et longitude :

| temps | longitude |
|-------------|-------------------|
| 60 minutes | 15 ° |
| 60 secondes | 15' |
| une seconde | $60 / 15 = 0,25'$ |
| 5 secondes | 1,25' |

5 - On a une erreur de 1,25 mille marin sur la position du bateau soit 2,3 km trajet supposé à l'équateur .

C'est assez remarquable : en 9 semaines, l'erreur de positionnement du bateau due au retard de l'horloge, est très faible. La précision, donnée dans le texte, concerne la route du bateau à l'équateur car on suppose une incertitude de 5 secondes.

En effet, en supposant une recherche de position pour un parallèle donné, l'incertitude en distance dépend de la latitude par la formule suivante où $\Delta\theta$ est l'erreur de longitude :

$$\Delta d = R_{\text{parallèle}} \times \Delta\theta \text{ (radian)}$$

$$R_{\text{parallèle}} = R_T \times \cos(\text{latitude})$$

NDLR : trajets sur une surface.

1 - l'orthodromie (de $\alpha\theta\theta\sigma$: droit et $\delta\rho\mu\sigma\sigma$: course) est le terme de navigation pour ce que les géomètres appellent géodésique (ligne de longueur minimale entre deux points). malheureusement on démontre qu'il n'existe aucune carte isométrique.

2 - la loxodromie ($\lambda\alpha\zeta\sigma\sigma$: oblique) désigne une trajectoire à cap constant (ce qui présuppose une carte, c'est à dire sur la surface un réseau de courbes (méridiens et parallèles)). Elle fut fort utilisée sur des cartes utilisant la projection de Mercator car les loxodromies y sont représentées par des droites (cette projection est "conforme" i.e. "conserve" les angles).

3 - comme la Terre est plutôt un ellipsoïde qu'une sphère la définition que l'on trouve pour le "mille marin" ou "nautique" est : 1' de longitude à la latitude 45°.

2 - Etude d'un texte de Janssen

Lucette Mayer

Le texte de Janssen "observations spectrales prises pendant l'éclipse du 18 août 1868" est clair et intéressant et constitue une bonne illustration de l'étude de spectres. Lucette Mayer nous montre comment elle l'a rendu accessible et attrayant pour ses élèves de seconde.

Le nouveau programme de seconde nous propose de traiter dans la partie "Messages de la lumière" les différents spectres :

"Extraits du B.O. :

2.2. Les spectres d'émission et d'absorption.

2.2.1 Spectres d'émission : spectres continus d'origine thermique, spectre de raies.

2.2.2 Spectres d'absorption : Bandes d'absorption de solutions colorées, raies d'absorption caractéristiques d'un atome ou d'un ion.

2.3. Application à l'astrophysique."

Pour terminer cette partie du programme il m'a semblé intéressant de donner aux élèves un texte historique à étudier à la maison, ce qui nous a permis pendant la dernière heure de cours

avant les vacances de Noël de faire un bilan de l'étude des spectres mais aussi de parler des éclipses de Soleil, beaucoup d'élèves ont raconté "leur propre observation" de l'éclipse du 11 août 1999, les discussions ont été très animées et la majorité des élèves a participé avec intérêt.

Les questions simples, permettent après avoir relu le texte en classe d'expliquer les passages difficiles.

Observations spectrales prises pendant l'éclipse du 18 août 1868 par Jules Janssen.

Calcutta, 3 novembre 1868. L'éclipse approchait et le temps ne semblait pas devoir nous favoriser ; il pleuvait depuis longtemps sur toute la côte. On considérait ces pluies comme exceptionnelles. Bien heureusement, le temps se remit peu à peu avant le 18. Le jour de l'éclipse, le Soleil brilla dès son lever, bien qu'il fût encore dans une couche de vapeurs ; il s'en dégagait bientôt, et, au moment où nos lunettes nous signalaient le commencement de l'éclipse, il brillait de tout son éclat.

Chacun était à son poste. Les observations commencèrent immédiatement.

Pendant les premières phases, quelques légères vapeurs vinrent passer sur le Soleil ; elles nuisirent à la netteté des mesures thermométriques, mais quand le moment de la totalité approcha, le ciel reprit une pureté suffisante. Cependant la lumière baissait visiblement, les objets semblaient éclairés par un clair de Lune. L'instant décisif approchait et on l'attendait avec une certaine anxiété ; cette anxiété n'était rien à nos facultés, elle les surexcitait plutôt et d'ailleurs elle se trouvait bien justifiée, et par la grandeur du phénomène que la nature nous préparait, et par le sentiment que les fruits de longs préparatifs et d'un grand voyage allaient dépendre d'une observation de quelques instants.

Bientôt le disque solaire se trouve réduit à une mince faucille lumineuse. On redouble d'attention. Les fentes spectrales de l'appareil de 6 pouces sont rigoureusement tenues en contact avec la portion du limbe lunaire qui va éteindre les derniers rayons solaires, de manière que ces fentes soient amenées par la Lune elle-même dans les plus basses régions de l'atmosphère solaire quand les deux disques seront tangents.

L'obscurité a lieu tout à coup et les phénomènes spectraux changent aussitôt d'une manière bien remarquable. Deux spectres formés de cinq ou six lignes très brillantes, rouge, jaune, verte, bleue, violette, occupent le champ spectral et remplacent l'image prismatique solaire qui vient de disparaître. Ces spectres, hauts d'environ une minute, se correspondent raie pour raie ; ils sont séparés par un espace obscur, où je ne distingue aucune raie brillante sensible. Le chercheur montre que ces deux spectres sont dus à deux magnifiques protubérances, qui brillent maintenant à droite et à gauche de la ligne des contacts où vient d'avoir eu lieu l'extinction. L'une d'elles surtout, celle de gauche, est d'une hauteur de plus de trois minutes ; elle rappelle la flamme d'un feu de forge, sortant avec force des ouvertures du combustible, poussée par la violence du vent. La protubérance de droite (bord occidental) présente l'apparence d'un massif de montagnes neigeuses, dont la base reposerait sur le limbe de la Lune, et qui seraient éclairées par un Soleil couchant. Ces apparences ont été décrites avec soin par M. Jules Lefaucheur ; je ferai seulement remarquer, avant de quitter le sujet des protubérances, sur lequel j'aurai à revenir d'une manière spéciale, que l'observation précédente montre immédiatement :

- 1° La nature gazeuse des protubérances (raies spectrales brillantes) ;
- 2° La similitude générale de leur composition chimique (spectres se correspondant raie pour raie) ;
- 3° Leur espèce chimique (les raies rouge et bleue de leur spectre n'étaient autres que les raies C et F du spectre solaire caractérisant, comme on sait, le gaz hydrogène).

(Extrait de Textes Essentiels. Astronomie et astrophysique. JP Verdet).

Travail de recherche à la maison

1 - Qui était Jules Janssen ?

2 - De quel genre d'éclipse s'agit-il ? Dans quel pays et à quelle date a-t-elle été observée ?

3 - Pourquoi l'auteur parle-t-il d'anxiété avant l'observation ? Est-ce justifié ?

4 - En quoi les "quelques légères vapeurs vinrent passer sur le Soleil...", peuvent-elles nuire aux mesures thermométriques ?

5 - Qu'est-ce que le limbe lunaire ? une protubérance solaire ?

6 - Au moment de l'obscurité quelle est la nature des spectres qui apparaissent ? L'auteur dit "ces spectres remplacent l'image prismatique solaire qui vient de disparaître" de quoi s'agit-il ?

7 - où sont placées les fentes des spectroscopes permettant d'observer les deux spectres évoqués ?

8 - quel est le système dispersif utilisé par Janssen ? Quel est celui que nous utilisons couramment ?

9 - Expliquer l'expression utilisée au sujet d'une protubérance : "...celle de gauche est d'une hauteur de plus de trois minutes".

10 - L'auteur énonce trois conclusions après les observations, utiliser les résultats des précédents TP pour expliquer ces conclusions.

11 - Quels sont vos souvenirs de l'éclipse du 11 août 1999 ? Pouvez-vous décrire vos observations ?



Il ne faut pas confondre latitude et latitude !

Pierre Causeret

La latitude géocentrique d'un point à la surface de la Terre est l'angle que fait le plan de l'équateur avec la droite joignant le centre de la Terre à l'observateur. Le principe paraît simple sur la figure ci-contre et pourtant ce n'est pas celle que l'on mesure : en effet, il n'est pas possible à un observateur terrestre de savoir où est situé le centre de la Terre, la verticale du fil à plomb ne passant pas par ce centre.

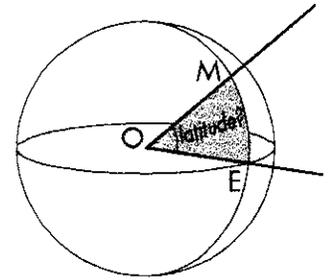


fig. 1

On appelle latitude astronomique celle que l'on mesure, qu'on définit comme l'angle entre le plan de l'équateur et la verticale du lieu.

J'ai longtemps confondu ces deux latitudes. Bien qu'elles ne diffèrent que de quelques minutes d'angle au maximum, cette confusion amène à des contresens.

La verticale

Attachez un objet au bout d'une ficelle un jour sans vent et vous aurez une verticale. Dans un repère terrestre lié à l'observateur, cet objet est soumis à la gravitation mais aussi à l'accélération centripète, due à la rotation de la Terre.

Pour simplifier, imaginons une Terre sphérique. Dans ce cas, le champ de gravitation, noté ici g , est dirigée vers le centre de la Terre (à condition que la répartition de masse soit à symétrie sphérique).

L'accélération centripète, notée c , est perpendiculaire à l'axe de la Terre. La

somme des deux vecteurs g et c donne l'accélération de la pesanteur p et la direction de la verticale.

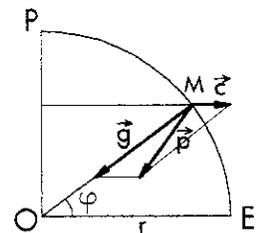


fig. 2

Pour un rayon de 6370 km et une latitude $\varphi = 47^\circ$, on trouve pour la gravitation $g = 9,83 \text{ m.s}^{-2}$, pour l'accélération centrifuge $c = 0,023 \text{ m.s}^{-2}$ et pour la pesanteur $p = 9,81 \text{ m.s}^{-2}$. Quant à la déviation, l'angle entre la verticale et (MO), elle vaut un dixième de degré. Nous verrons tout à l'heure que ce modèle n'est pas très bon.

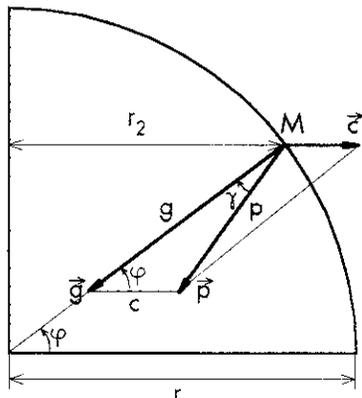


fig. 3

Calculs

- **données physiques** (unités SI: m, kg, s.)
 $G = 6,672 \cdot 10^{-11}$ (constante de la gravitation)
 $m_T = 5,975 \cdot 10^{24}$ (masse de la Terre)
 $r_T = 6,371 \cdot 10^6$ (rayon de la sphère terrestre)
 $\omega = 2\pi / 86\,164$ (vitesse angulaire de la rotation terrestre)
 (1 jour sidéral = 23 h 56 min 04 s = 86 164 s).

- **données et formules géométriques**

- φ : latitude du lieu
- $r_2 = r \cos \varphi$
- γ = déviation de la pesanteur par rapport au rayon
- $p^2 = g^2 + c^2 - 2gc \cos \varphi$ (formule d'Al Kaschi)
- $\sin \gamma / c = \sin \varphi / p$

- **formules dynamiques**

- $g = G \cdot m_T / r^2$
- $c = \omega^2 \cdot r_2$
- **calculs à partir des données et formules ci-dessus.**
 $g \approx 9,822$; $\omega^2 \cdot r_T \approx 3,388 \cdot 10^{-2}$;
 À la latitude 47° on obtient : $c \approx 0,023$; $p \approx 9,806$ et
 $\gamma \approx 0,0099^\circ$

les formules générales sont :

$$c = (\omega^2 \cdot r_T) \cdot \cos \varphi ;$$

$$p = \sqrt{g^2 + (\omega^2 r_T)^2 \cos^2 \varphi - 2g(\omega^2 r_T) \cos \varphi}$$

$$(\omega^2 r_T) \sin \varphi \cos \varphi$$

$$\gamma = \text{Arcsin} \frac{(\omega^2 r_T) \sin \varphi \cos \varphi}{\sqrt{g^2 + (\omega^2 r_T)^2 \cos^2 \varphi - 2g(\omega^2 r_T) \cos \varphi}}$$

| | | | | | | | | | | |
|--------------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----|
| $\varphi (^\circ)$ | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 |
| $\gamma (^\circ)$ | 0 | 0,034 | 0,064 | 0,086 | 0,098 | 0,097 | 0,086 | 0,064 | 0,034 | 0 |

La forme de la Terre

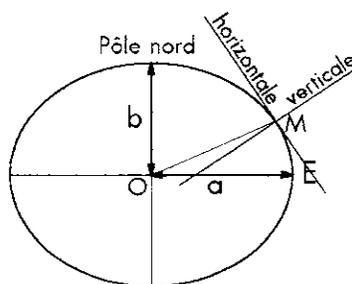
Imaginons que la Terre soit parfaitement sphérique (fig2). Versez de l'eau au point M. Que va-t-il se passer ? La pesanteur va agir sur cette eau en suivant la verticale. Mais comme la verticale ne passe pas par le centre de la Terre, l'eau va s'écouler en direction de l'équateur. Ce type d'expérience nous paraît contre nature : nous savons bien que l'eau n'est pas plus attirée par le sud que par le nord.

Tout simplement parce que la Terre est suffisamment déformable et a pris naturellement la bonne forme, de telle manière qu'une verticale en un point soit perpendiculaire au plan horizontal (plan tangent en ce point à la Terre).

La Terre a approximativement la forme d'un ellipsoïde de révolution du type aplati (rayon polaire < rayon équatorial)

Le rayon équatorial mesure un peu plus de 6378 km contre à peine 6357 pour le rayon polaire. La différence étant 21,4 km, l'aplatissement est de $21,4 / 6378$ soit $1 / 298$ ou 0,3%. Ces résultats proviennent de mesure.

A partir de ces données, on peut calculer qu'à la latitude de 47° , la verticale s'écarte d'environ $0,2^\circ$ de la droite (OM).



- $a \approx 6378 \text{ km}$
- $b \approx 6357 \text{ km}$

Aplatissement :
 $f = (a - b) / a \approx 1 / 298$

Déviation de la verticale à 47° de latitude :
 $0,2^\circ$

fig. 4

Calculs

(valides sauf aux pôles (les trois tangentes évoquées ne sont pas définies) mais le problème est trivial).

On peut écrire l'équation de l'ellipse sous sa forme paramétrée : $x = a \cos t$ $y = b \sin t$ avec $t \in [0 ; 2\pi[$

Latitude géocentrique φ_c :

$$\tan \varphi_c = b \sin t / a \cos t = (b / a) \tan t$$

En dérivant x et y en fonction de t, on obtient $x' = -a \sin t$ et $y' = b \cos t$. Le coefficient directeur de la tangente (T) est $y' / x' = b \cos t / (-a \sin t)$

On en déduit le coefficient directeur de la perpendiculaire à (T), la verticale, qui est $a \sin t / b \cos t$ soit $(a / b) \tan t$ (le produit des coefficients directeurs de deux droites perpendiculaires est -1).

Si φ_a est la latitude astronomique, on a donc :

$$\tan \varphi_a = (a / b) \tan t. \text{ Et comme } \tan \varphi_c = (b / a) \tan t, \text{ on obtient } \tan \varphi_a = (a^2 / b^2) \tan \varphi_c$$

Si φ_c vaut 47° , on trouve $\varphi_a = 47,19^\circ$ soit une différence de presque $0,2^\circ$.

Retour à la pesanteur

Retour à la pesanteur

Nous avons trouvé un écart de $0,1^\circ$ seulement dans le premier calcul avec une Terre sphérique. En réalité, la Terre est aplatie aux pôles et le vecteur \vec{g} n'est pas dirigé vers le centre de la Terre à cause de l'attraction du bourrelet équatorial.

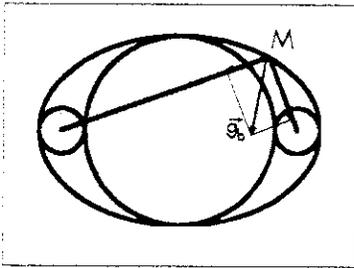


fig. 5 :

Attraction due au bourrelet équatorial

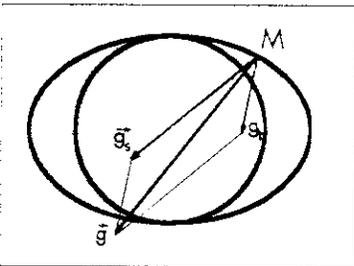


fig. 6 :

Attraction totale (sphère + bourrelet équatorial)

Si on rajoute maintenant l'accélération centrifuge, on remarque que la pesanteur est davantage déviée que ce que l'on avait trouvé dans le premier calcul "sphérique". Ce qui permet d'expliquer cette déviation de $0,2^\circ$ à 47° de latitude. Pour affiner le croquis "sphérique" de la figure 3, il se crée un ellipsoïde et \vec{p} lui est normal (fig. 7).

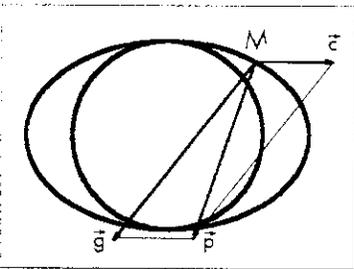


fig. 7

Pesanteur (attraction totale + accélération centrifuge)

Le problème n'est pas simple. Un certain Clairaut avait montré que si la Terre était un fluide homogène, elle devrait prendre la forme d'un ellipsoïde de révolution avec un aplatissement de $1/232$.

L'aplatissement mesuré de $1/298$ s'explique par des variations de densité entre le centre et la surface de la Terre.

Latitude géocentrique et latitude astronomique

L'écart δ entre la verticale (VM) et la radiale (OM) est la différence entre la latitude astronomique φ_a et la latitude géocentrique φ_c .

La forme de la Terre permet d'établir la correspondance suivante

| | | | | | |
|---------------------------|---|--------|--------|--------|--------|
| φ_c ($^\circ$) | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 |
| φ_a ($^\circ$) | 0 | 10,06 | 20,12 | 30,16 | 40,19 |
| $(\varphi_a - \varphi_c)$ | 0 | 0,0648 | 0,1218 | 0,1639 | 0,1862 |

| | | | | | |
|---------|--------|--------|--------|--------|----|
| 44,905 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 |
| 45,09 | 50,19 | 60,16 | 70,12 | 80,06 | 90 |
| 0,18896 | 0,1860 | 0,1634 | 0,1212 | 0,0644 | 0 |

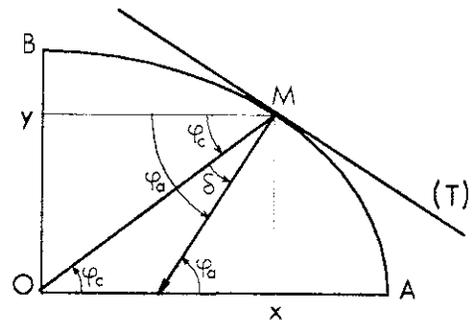
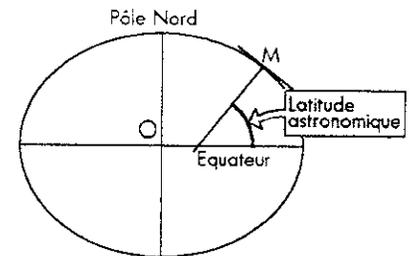
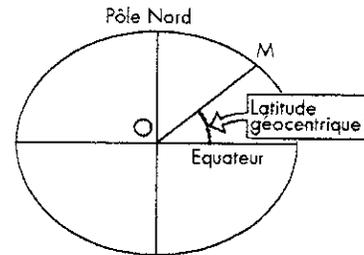


fig. 8

Etude de la déviation :

Etudions de plus près la fonction F donnant la déviation $\delta = \varphi_a - \varphi_c$ en fonction de φ_c .

$$F : \varphi_c \mapsto \varphi_a - \varphi_c = \text{Arctan} \left(\frac{a^2 - b^2}{b^2} \tan \varphi_c \right) - \varphi_c$$

On trouve qu'elle est maximale en $\varphi_c^* = \text{Arctan} (b/a) \approx 44,9055^\circ$, car sa dérivée,

$$F'(\varphi_c) = \frac{(a^2 - b^2) (\tan \varphi_c + b/a)}{b(a^2 \tan^2 \varphi_c + b^2)} (\tan \varphi_c - b/a)$$

s'annule en changeant de signe (d'abord positive puis négative).

La déviation maximale est alors $\delta_{\max} = F(\varphi_c^*) = \text{Arc tan} (a/b) - \text{Arc tan} (b/a) \approx 0,1889$

1° de latitude, est-ce plus grand à l'équateur ou aux pôles ?

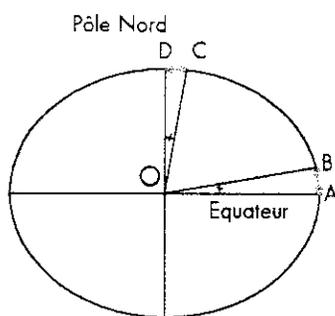


fig. 9

Par 1° de latitude, on entend la distance à la surface de la Terre séparant deux points situés sur le même méridien ayant des latitudes différant de 1°.

Si on parle de latitude géocentrique, alors 1° du côté de l'équateur, c'est plus grand que 1° du côté des pôles (111,3 km contre 110,9).

Mais comme cette latitude n'est pas directement mesurable, c'est à 1° de latitude astronomique que ce sont intéressés les savants du 18^e siècle lorsqu'ils partirent en Laponie et au Pérou pour vérifier si la Terre est aplatie aux pôles.

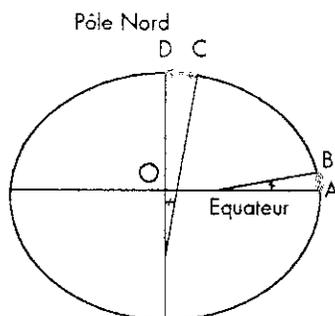


fig. 10

En latitude astronomique, c'est l'inverse.

Les droites passant par A, B, C et D sont des verticales. Seules les verticales aux pôles et à l'équateur passent par le centre de la Terre. Les autres en sont déviées à cause de l'accélération centrifuge d'une part et de l'attraction du bourrelet équatorial d'autre part.

Ces verticales sont des normales à l'ellipse (normale à l'ellipse = perpendiculaire à la tangente).

On peut calculer simplement que 1° de latitude du côté d'un pôle, c'est plus grand que 1° à l'équateur (111,7 km contre 110,6).

Cela signifie que la courbure de l'ellipse est plus importante côté équateur que côté pôle.

Maupertuis avait trouvé 111,9 km en Laponie à 66° de latitude nord contre 111,2 déjà mesurés en France. Au Pérou, Bouguer et La Condamine avait obtenu 110,6 km. La Terre

était bien aplatie aux pôles comme l'avait prévu Newton et contrairement aux affirmations de Descartes.

Historiquement, c'est à partir de ces mesures que l'on a pu calculer l'aplatissement de la Terre, à l'inverse des calculs que nous avons fait précédemment.

Remarque :

Les normales à un cercle, ses rayons, passent toutes par le centre. En revanche, les normales à une ellipse (les verticales pour cet article) enveloppent une courbe (c'est à dire en sont les tangentes) que l'on appelle la développée de l'ellipse.

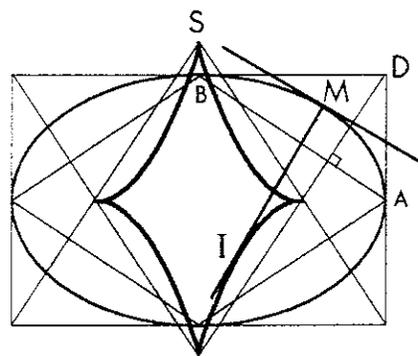


fig. 11

La figure 11 représente la normale en M à l'ellipse E et notamment son point caractéristique I, qui est aussi le centre de courbure pour le point M.

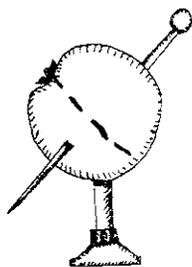
Les coordonnées de M ($x = a \cos t$; $y = b \sin t$) constituent l'équation paramétrique de l'ellipse et celles de I ($X = ((a^2 - b^2) / a) \cos^3 t$; $Y = - ((a^2 - b^2) / b) \sin^3 t$) l'équation paramétrique de la développée.

Notons que la construction des quatre points de rebroussement de la développée est simple. Intersecter avec les axes de coordonnées la perpendiculaire menée par D, sommet du rectangle, au côté [AB] du losange.

Note : Merci à Michel Bobin pour sa relecture attentive et ses remarques.

Bibliographie.

La gravimétrie, Jean Goguel, Collection Que sais-je.
Astronomie générale, Bakouline..., Editions de Moscou.
Questions d'astronomie, tome 3, C. Dumoulin, CRDP du Limousin.
Le procès des étoiles, F. Trystam, éditions Payot (histoire romancée de l'expédition de La Condamine au Pérou).
Théorie de la figure de la Terre, Clairaut, 1808. (cet ouvrage est signalé par Christian Dumoulin dans sa bibliographie mais je ne le connais pas).



LE PENDULE DE FOUCAULT-CHARRON

G. Paturel, Observatoire de Lyon

Georges Paturel a construit un pendule de Foucault dont les oscillations sont entretenues par l'ingénieux dispositif de F. Charron.

Dans ce premier article, il nous donne les détails techniques de la mise en œuvre de son expérience et les résultats obtenus.

Remettons les pendules à l'heure

Les oscillations d'un pendule pesant (pour plus de simplicité imaginez ce pendule placé à un pôle terrestre) doivent garder la même direction, disons par rapport aux étoiles, car aucune force n'agit pour la faire changer. Si la Terre tourne, et nul n'en doute aujourd'hui, on doit voir ce plan d'oscillation tourner par rapport au sol, mais en réalité, c'est le sol qui tourne. Au pôle on doit voir le plan d'oscillation faire un tour en 24 heures. Ce petit rappel sur le phénomène étant fait, venons-en à notre propos : essayer de refaire l'expérience.

Dans les cahiers Clairaut, mon collègue R. Garnier et moi-même avons publié un petit article (CC 94, p32, 2001) sur l'histoire du pendule de Foucault. Il est vrai que je me suis intéressé à cette expérience à partir du jour où j'ai exhumé d'un placard de l'observatoire de Lyon, l'article original de Foucault. Cet article rédigé pour les Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris en 1851 est très instructif. La première expérience fut faite par Foucault dans sa cave avec un pendule de 2 mètres seulement, construit à partir d'un fil d'acier de moins d'un millimètre de section et d'une sphère en laiton

de 5 kilogrammes. Cette expérience est si simple dans son principe, que beaucoup ont essayé de la reproduire. En pratique, cette expérience est plus délicate qu'il n'y paraît. J'ai moi-même essayé quelques déboires en voulant faire l'expérience avec une masse insuffisante et dans un lieu exposé aux courants d'air et aux enfants !

Dans le livre de mécanique de G. Bruhat, j'ai trouvé le schéma simplifié d'un pendule entretenu électriquement et l'auteur prétendait qu'il était facile de mettre en évidence la rotation de la Terre. C'est vrai ! Mais de là à trouver la bonne valeur pour la vitesse de rotation du plan des oscillations, il y a un fossé (voir les comptes rendus de l'école d'été de Sophia-Antipolis, 1982). Lors de la dernière assemblée générale du CLEA je parlais incidemment à mes voisines de table de l'expérience que j'étais en train de tenter, avec un pendule entretenu électriquement. Vous me croirez ou non, mais c'est pourtant la stricte vérité, j'étais en compagnie de la petite fille de l'inventeur du système décrit par Bruhat. Cet inventeur, professeur de physique à la Faculté Libre d'Angers est F. Charron, grand-père de notre collègue Béatrice Sandré. Il avait protesté auprès de Bruhat pour ne pas avoir été cité. Je voulais remettre les pendules à l'heure. C'est fait. Cela n'enlève

rien à l'immense admiration que j'ai pour les livres de physique de Bruhat, mais F. Charron devait être cité. Donc, c'est en fait un pendule de Foucault-Charron que je vais vous décrire.

Dans un prochain article j'expliquerai la physique du phénomène. Mais pour l'instant nous allons seulement nous concentrer sur la réalisation technique du pendule. Je vais décrire le pendule que j'ai réalisé mais seulement à titre indicatif ; vous pourrez essayer de faire mieux, car je suis un assez piètre expérimentateur.

Description du principe du pendule de Foucault-Charron.

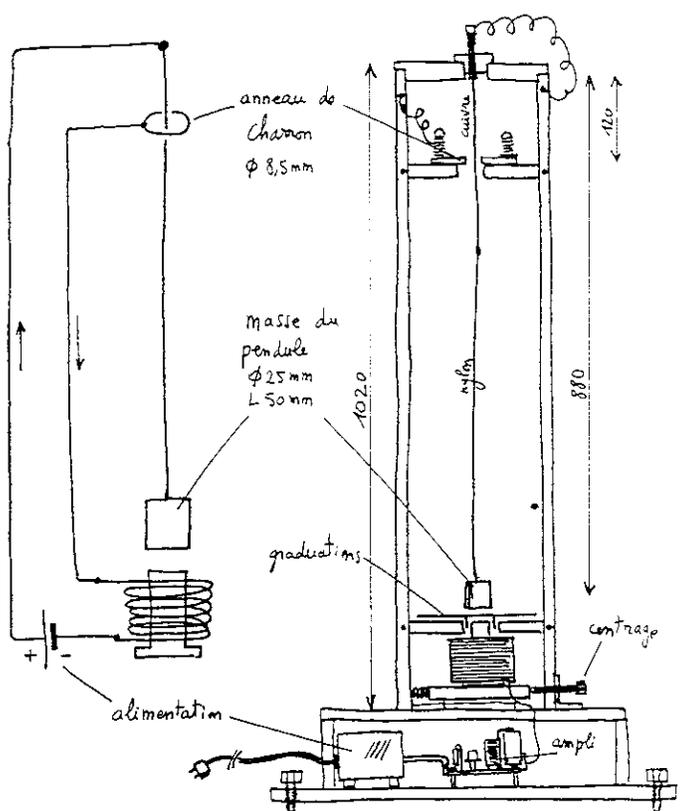


fig.1 : le principe et la réalisation

Le schéma ci-dessus fera comprendre le principe, je l'espère, mieux qu'un long discours. Commentons néanmoins. Au repos, le pendule est vertical, il n'y a pas de contact électrique entre le fil de suspension et l'anneau (dit anneau de Charron), l'électroaimant n'est pas alimenté, le système reste au repos. Si vous donnez une impulsion, le pendule commence ses oscillations. Sans alimentation il s'arrêterait bientôt, mais, l'alimentation étant branchée, le fil du pendule hors de sa position d'équilibre, va établir un contact qui alimentera l'électroaimant. Ce dernier attirera le pendule vers le centre. Deux fois par période le pendule sera soumis à une force de rappel radiale. Si le pendule est bien construit,

la force sera vraiment radiale et, en conséquence, le plan d'oscillation ne sera pas modifié. Les oscillations se poursuivront indéfiniment.

Pendant que je rédige ces lignes, j'entends mon pendule qui oscille. Je l'ai lancé ce matin et je note régulièrement la position du plan d'oscillation. Je vous communiquerai les valeurs mesurées à la fin de l'article.

Avantage procuré par l'anneau de Charron.

Pour lancer son pendule, Foucault l'avait fixé hors de la position d'équilibre avec un petit fil. Je vous reproduis les termes originaux : "...pour l'écarter de sa position d'équilibre, on l'embrasse dans une anse de fil organique dont l'extrémité libre est attachée à un point fixe pris sur la muraille... Puis dès qu'on est parvenu à l'amener au repos, on brûle le fil organique en quelque point de sa longueur ; sa ténacité venant à faire défaut, il se rompt... et le pendule... entre en marche...". Qu'en termes élégants ces choses là sont dites !

Quand le pendule est tenu par le fil organique on pourrait penser que le pendule est immobile. Eh bien non ! En effet la muraille à laquelle le fil est attaché est solidaire de la Terre et tourne avec elle, entraînant le pendule. On croit lâcher le pendule sans vitesse tangentielle initiale et pourtant on lui communique inmanquablement une vitesse qui tend à lui faire décrire une ellipse. Muni de son anneau de Charron, le pendule va se stabiliser de lui-même. En effet, en décrivant une ellipse, le fil va frotter tangentiellement sur l'intérieur de l'anneau. Le frottement va réduire ce mouvement parasite. Seul subsistera le mouvement radial. Si, de surcroît, le pendule est entretenu électriquement, le plan d'oscillation sera parfait au bout de quelques oscillations. Vous pourrez très bien lancer votre pendule en donnant un grand coup de pied dans le bâti.

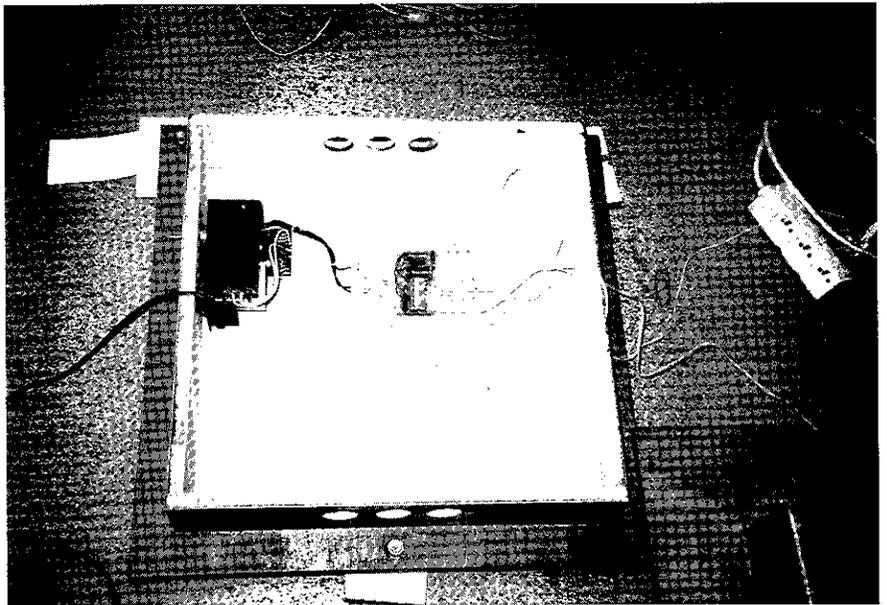
Vous comprenez donc que l'anneau ne sert pas qu'à entretenir les oscillations, il les améliore, à tel point que certains pendules libres (non entretenus) ont été munis d'un anneau de Charron, juste pour éviter que le pendule ne décrive une ellipse au lieu d'un plan.

Une question revient souvent : le fil de suspension va-t-il subir une torsion du fait du changement apparent du plan d'oscillation ? En réfléchissant au phénomène, on s'aperçoit que le fil subira bien une torsion mais, puisqu'il n'est fixé que par une extrémité, cette torsion disparaîtra au fur et à mesure. En d'autres termes la masse du pendule tournera sur elle-même et restera toujours dans la même direction par rapport au support. Il n'est donc pas besoin de prévoir des suspensions à la "Cardan".

Les difficultés rencontrées

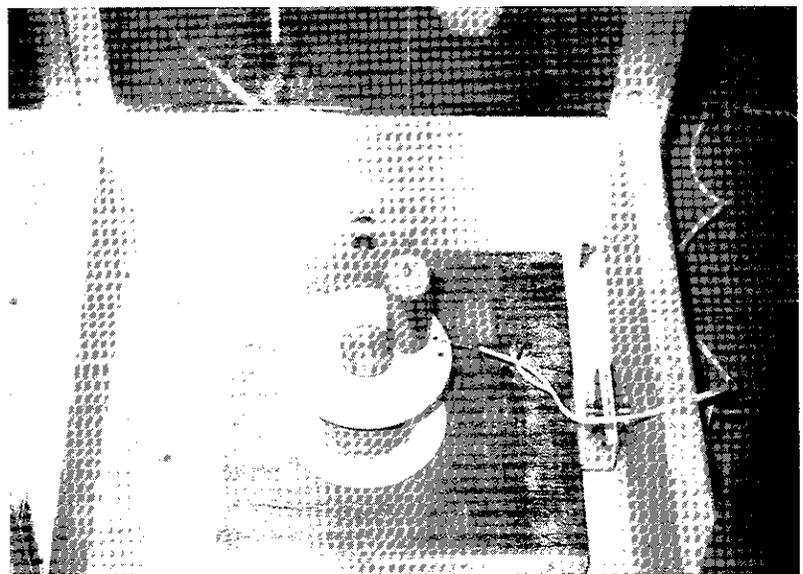
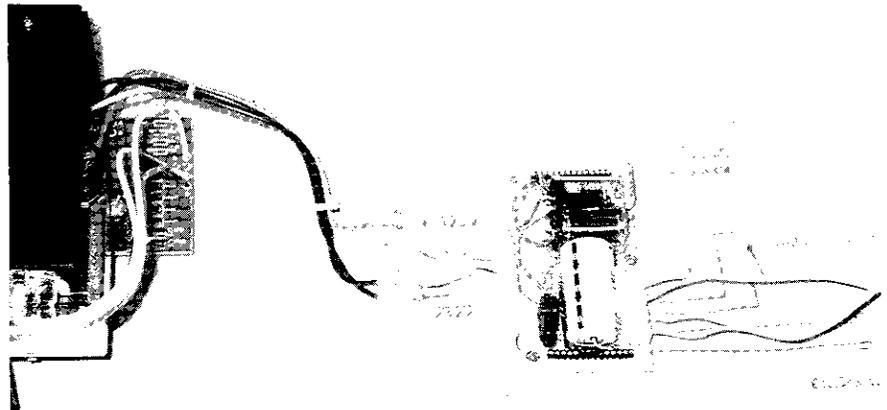
N'étant pas équipé pour réaliser des pièces mécaniques de précision j'ai rencontré une difficulté. Parfois, le pendule

se stabilisait dans une direction qu'il ne quittait plus. Parfois, le pendule tournait beaucoup plus rapidement que le mouvement de la Terre ne le laisserait prévoir. J'ai longtemps été perplexe. En analysant le phénomène j'ai trouvé une cause possible à ce comportement anormal : un défaut de symétrie dans le système : Soit le fil, au repos, ne passe pas juste au centre de l'anneau de Charron, soit l'anneau n'est pas bien circulaire (j'ai changé ma perceuse pour faire un anneau parfait), soit encore l'électroaimant n'est pas parfaitement centré sous la position du pendule au repos. Cela m'a conduit à peaufiner les réglages. Je vous les décrirai plus loin.



Une autre difficulté provenait de l'oxydation du contact entre le fil et l'anneau. Le problème a été résolu en fabriquant un petit amplificateur qui permet de réduire l'intensité du contact.

Une dernière difficulté m'a amené à concevoir une amélioration simple mais très efficace. Quand le fil de suspension établit le contact qui va alimenter l'électroaimant, le pendule est en train de s'écarter de sa position d'équilibre. La masse du pendule subit donc d'abord un freinage avant de subir l'accélération centrale qui lui communiquera le petit surplus d'énergie nécessaire à la compensation des frottements. De ce fait l'amplitude est réduite. Pour augmenter le temps d'action de l'électroaimant on est conduit à réduire le diamètre de l'anneau de Charron. Mais alors le centrage devient plus difficile. La solution trouvée est la suivante : On place aux bornes de l'électroaimant un condensateur de forte capacité (2200 μF). Quand le contact est établi, le courant qui devrait normalement aller dans l'électroaimant, va d'abord charger le condensateur ; d'où un retard de l'action de l'électroaimant. Puis, quand le contact se coupe lors du retour vers le centre de la masse du pendule, le condensateur se décharge dans l'électroaimant en donnant ainsi une ultime impulsion à un moment très favorable puisque le pendule est plus proche de l'électroaimant.



La réalisation technique

Le bâti : L'ensemble du système est abrité dans un caisson vitré pour éviter les courants d'air. Ce caisson a été étudié et réalisé par un élève d'un IUT, J. Lapostole. Nous donnons, à la figure 1, les cotes principales du pendule. La partie inférieure, qui constitue le socle, abrite une alimentation électrique « 5V continu » récupérée sur un ordinateur hors d'usage. L'alimentation possède une sortie 12 V inutilisée. Cette alimentation alimente l'amplificateur et l'électroaimant. Nous donnons une photo de l'intérieur du socle.

Les photos ci-contre représentent l'intérieur montrant la partie électronique et l'électroaimant.

L'amplificateur : Il est donné, à la figure 2, à titre d'exemple, car les éléments ont tous été récupérés sur de vieux appareils. J'ai pris l'unique transistor au hasard dans mon stock de pièces récupérées. Comme il possédait un radiateur je l'ai choisi en pensant qu'il devait avoir une puissance suffisante. Là encore, le schéma est indicatif et, selon les pièces que vous aurez en votre possession, vous pourrez adapter la réalisation. On peut aussi se passer de cet amplificateur pour commander directement l'électroaimant à partir du contact entre le fil et l'anneau de Charron. Le petit condensateur aux bornes du contact du relais supprime l'étincelle qui pourrait l'abîmer. Ce type de contact est très résistant, mais il est si facile de le protéger qu'il ne faut pas s'en priver.

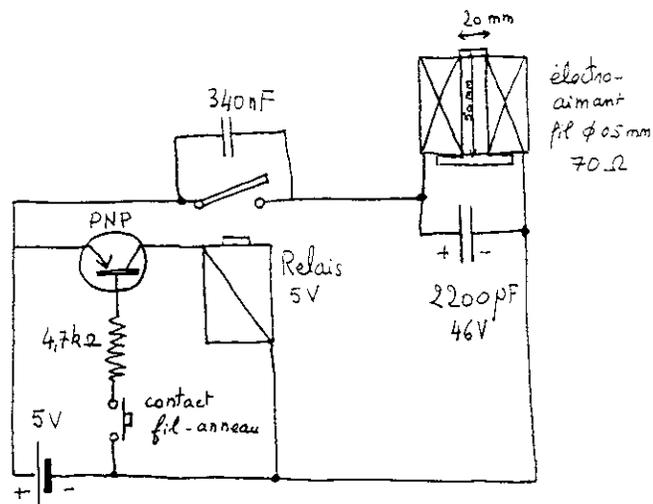


fig.2 : le schéma électronique

La suspension du pendule : Le fil du pendule doit être métallique. Il est en cuivre pour la partie supérieure qui intervient pour établir le contact. La partie inférieure est un fil de pêche en nylon très fin (30/100). Il fallait un fil très souple pour que la masse du pendule reste bien verticale au repos. Un fil plus rigide utilisé auparavant imposait une position bancal à la masse cylindrique du pendule. De ce fait la

symétrie axiale était rompue. Le fil supérieur en cuivre est gainé de plastique dans la zone de fixation. Il a un diamètre total de 0,5 millimètre (gaine plus âme de cuivre monobrin). Il s'agit d'un fil utilisé en électronique pour le « wrapping ». Le fil est passé dans le mécanisme récupéré sur un portemine "0,5". Pour que le fil ne glisse pas dans le portemine un sucre d'électricien consolide le tout. Le fil de Nylon est lui aussi fixé sur la masse du pendule par un mécanisme de stylo.

L'anneau de Charron : En fait d'anneau, il s'agit un trou (diamètre 8,5 mm) dans une plaque de cuivre. La plaque de cuivre est pressée sur le bâti de bois par deux vis munies chacune d'un ressort et d'une rondelle. Ce montage permet de déplacer l'anneau de Charron pour ajuster le centrage. Ce système mériterait d'être amélioré pour permettre un réglage plus "micrométrique".

L'électroaimant : La masse de fer centrale a été faite au tour par un collègue mécanicien. L'enroulement est fait simplement d'une bobine de fil à wrapper à moitié vide, récupérée. La résistance ohmique est de 75 Ω. Cet électroaimant est fixé sur une plaque de bois, tirée par des ressorts et poussée par des vis accessibles de l'extérieur du boîtier. Les vis poussantes prennent appui sur deux bords de la plaque de bois. Ce mécanisme rustique permet de faire le réglage du centrage, pendule au repos.

Les graduations : J'ai découpé un disque de carton sur lequel j'ai tracé des cercles concentriques espacés d'un centimètre et des rayons tous les 10 degrés. Sous le carton, j'ai collé une bague en plastique, bien centrée, et d'un diamètre intérieur égal au diamètre du fer de l'électroaimant. Ainsi le disque des graduations, une fois posé sur le fer de l'électroaimant, est parfaitement centré. Les cercles concentriques servent à faciliter les réglages.

La mise en service

Il faut commencer par les réglages. On règle la parfaite horizontalité du bâti avec un niveau à bulle. Trois vis du socle permettent un ajustement facile. Le pendule étant bien au repos, on ajuste la position de l'électroaimant avec le système « tirant-poussant ». Le plus petit cercle dessiné sur la plaque de graduation a pour diamètre le diamètre de la masse du pendule. Le centrage à l'œil est facile. Reste à régler le centrage de l'anneau de Charron. J'ai procédé ainsi (mais nous devrions pouvoir faire mieux). J'ai fait balancer le pendule avec une amplitude minimale et, pendant ces faibles oscillations, je réglais la position de l'anneau pour que le contact s'établisse bien des deux côtés des oscillations. Les oscillations étant bien symétriques il fallait qu'elles produisent un contact sur les deux bords opposés de l'anneau (ou pas de contact du tout si l'amplitude est trop faible). J'ai répété l'opération dans la direction perpendiculaire. Ce réglage à l'avantage de pouvoir être fait quand la dernière vitre est fermée. Le lancement est donc prêt. On donne quelques impulsions sur le boîtier, en résonance avec le pen-

dule. Quand l'amplitude devient suffisante, on entend le relais qui commence à claquer en cadence... le pendule est parti. L'amplitude augmente progressivement et la trajectoire du pendule se stabilise, tic, tac, tic, tac...

Les mesures.

Ce matin j'ai lancé le pendule à 9h 30. Il est 23h il balance encore... Le lendemain, le pendule balance encore, j'allais dire imperturbablement, mais non, car son plan d'oscillation tourne, et dans le bon sens. Reste à voir s'il tourne à la bonne vitesse.. La figure 3 donne la direction des oscillations (mesurée en degrés par rapport au zéro arbitraire des graduations) en fonction du temps. Les mesures s'étendent sur plus de 50 heures. Le plan d'oscillation a tourné de plus d'un tour (près de 500 degrés). On remarque immédiatement sur le graphique qu'il y a une périodicité inattendue. Elle résulte probablement d'un défaut de symétrie axiale (électroaimant ou anneau de Charron mal centré). J'ai tracé la droite sur laquelle les points devraient s'aligner à notre latitude (45,7°). La Terre tourne trop lentement à Saint-Genis Laval. Dans un prochain article je reviendrai sur ces résultats pour donner les explications générales, bien sûr, mais aussi pour expliquer cette apparente lenteur locale de la rotation de la Terre.

Quoi qu'il en soit, l'expérience est très spectaculaire car en très peu de temps on peut mettre en évidence la rotation de notre bonne vieille Terre. Mais attention, les alignements doivent être faits avec le plus grand soin.

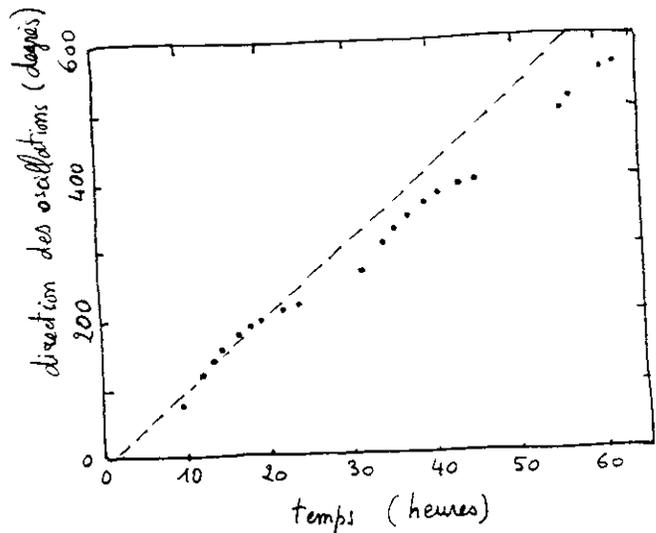


fig.3 : les observations

Bonne chance à ceux qui seront tentés par cette expérience.

Remerciements :

Je remercie B. Sandré qui m'a donné des articles très intéressants sur le pendule de Foucault, amélioré par F. Charron son grand-père.



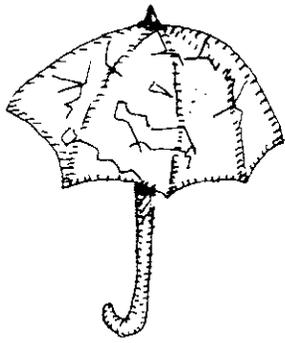
Attrapez une étoile ! (Catch a star !) ... et découvrez tous ses secrets !

L'ESO et l'EAAE organisent un programme sur Internet, dans le cadre de la Semaine Européenne de la Science et de la Technologie 2002, pour les élèves des écoles européennes, du primaire à la Terminale.

Des groupes de quatre participant-e-s (c'est à dire trois élèves et un-e enseignant-e) choisissent un objet astronomique - une étoile brillante, une galaxie distante, une belle comète, une planète ou une lune du système solaire, ou un autre corps céleste. Ils doivent trouver le plus d'information possible sur "leur" objet. Cette information peut concerner sa position et sa visibilité dans le ciel, ou ses caractéristiques physiques et chimiques, ou des aspects historiques particuliers, ou des aspects mythologiques qui lui sont liés...

Le but est de trouver de l'information sur cet objet à partir de différentes sources et d'écrire un rapport intéressant à son sujet sous format html, avec images et texte. Si le rapport est validé (par un jury, composé de spécialistes de l'ESO et de l'EAAE), il sera publié sur le site Internet officiel de "Attrapez une étoile !" aux côtés des autres rapports venant de toute l'Europe. Les 1000 premiers participant-e-s recevront un T-shirt "Catch your star". Un tirage au sort sera effectué, le gros lot étant un voyage à l'Observatoire Paranal de l'ESO au Chili pour les plus de quinze ans. D'autres prix seront annoncés ultérieurement.

Tous renseignements disponibles en Français sur le site www.eaae-france.org.
Site officiel de "catch a star" : <http://www.eso.org/outreach/eduoff/catchstar/>



Un spectrographe solaire

Roger Meunier

RÉALISATION D'OBJETS

Notre collègue Roger Meunier nous transmet les plans et la description d'un spectro solaire de grande qualité ; cet appareil a déjà été présenté lors d'assemblée générales du C L E A.

Il est possible de réaliser de nombreuses observations avec un tel montage mais, également, de s'inspirer de sa description pour faire comprendre ce genre d'appareil à nos élèves de lycée.

Quelques remarques pour compléter le schéma de principe...

1 - Le collecteur utilisé est un Célestron 8 mais en usage solaire, on peut se contenter d'une ouverture plus modeste, 60 ou 80 mm par exemple. Par contre, il peut être intéressant d'avoir une focale assez importante (>1000 mm) afin d'avoir une image du Soleil sur la fente permettant de se repérer plus facilement. Ainsi, le positionnement d'une tache sur la fente sera d'autant plus facilité que la taille du disque solaire sera plus grand.

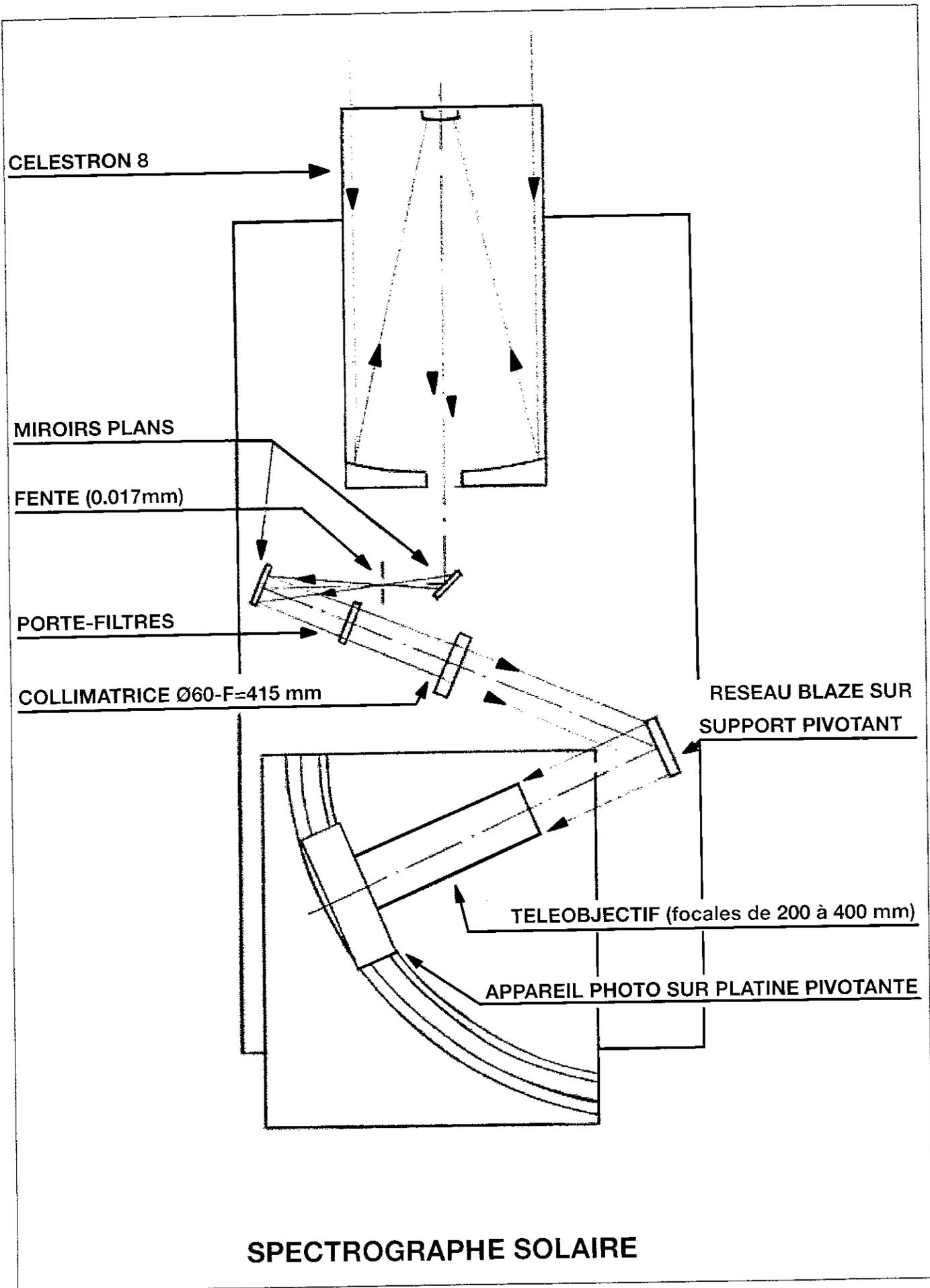
2 - La qualité de la fente est un élément important : en usage solaire, la largeur peut être de 15 à 50 microns avec une largeur d'autant plus faible que la qualité du ciel est bonne. On peut réaliser des fentes fixes (par exemple 15, 30, 45 microns) ou réaliser une fente variable mais c'est plus délicat à construire. En effet, le parallélisme de la fente est important ; on peut réaliser les fentes fixes de la façon suivante avec des morceaux de lames de cutter (modèle

robuste). L'idéal est de disposer d'une loupe binoculaire ou d'un petit microscope afin de sélectionner des morceaux de lames d'environ 20 mm de long avec un profil de bonne qualité. On colle la première fente ; après séchage, la mise en place de la seconde lame peut se faire de 2 façons différentes :

a) en effectuant le collage sous une loupe binoculaire afin de bien régler l'écartement des lames,

b) en s'aidant d'un feuillard d'épaisseur calibrée que l'on trouve chez les entreprises qui font de l'usinage de précision.

Les lames seront collées sur un support rigide et bon conducteur de la chaleur (pour un usage solaire), cuivre ou aluminium par exemple, de quelques mm d'épaisseur et de format 50×50 mm. Ces dimensions correspondent à celle d'une diapositive et permettront de vérifier la qualité de la fente (largeur et parallélisme) en la projetant sur une surface éloignée de quelques mètres. Rappelons que la fente doit se trouver au foyer de l'instrument collectant la lumière.



3 - Le porte-filtres n'est pas nécessaire dans un premier temps mais il est bon de réserver une place pour en installer un en cas de besoin. Par exemple, si l'on veut essayer de mettre en évidence l'effet Zeeman sur les taches solaires, l'observation des composantes des raies nécessitera l'installation d'un filtre polarisant et d'une lame quart d'onde dans le faisceau lumineux entre la fente et la collimatrice.

4 - Il est souvent utile de pouvoir disposer d'un ou deux miroirs plans de petite taille afin de replier le faisceau lumineux ; il est souhaitable de le fixer sur un support pivotant afin de faciliter les réglages définitifs.

5 - La lentille collimatrice doit avoir son foyer en coïncidence avec la fente ; son diamètre doit être au moins égal à la diagonale du réseau afin d'alimenter celui-ci sans perte de lumière avec un flux parallèle. La collimatrice peut être un doublet achromatique ou un objectif photo dont le rapport F/D doit être relativement proche de celui de l'instrument collecteur. Enfin, elle doit être installée sur un support réglable afin de pouvoir être positionnée correctement.

6 - Le réseau est évidemment la pièce maîtresse du spectrographe ; son coût est important si l'on veut une très bonne qualité comme les réseaux avec support en verre de forte épaisseur et fonctionnant par réflexion (prix de l'ordre de 800 à 1600 euros). Cela dit, il existe des réseaux en verre à support mince chez Edmund (de l'ordre de 100 euros) ou encore moins cher un réseau type diapo par transmission chez Jeulin (quelques euros).

Les réseaux utilisés dans les 2 spectrographes sont de marque Bausch et Lomb, mesurent 56 X 56mm et ont une résolution de 1200 traits / mm pour l'un et 2160 traits / mm pour l'autre. Le réseau est monté sur un support réglable en rotation, l'idéal étant un système de roue dentée et vis sans fin pouvant être entraîné soit manuellement, soit par un petit moteur électrique. Sur le Soleil, même avec un réseau de coût modeste, on peut observer des phénomènes intéressants.

7 - La focale de l'objectif de chambre utilisé dépend du grandissement de l'image désiré : si la focale de l'objectif de chambre est égale à celle de la collimatrice, le grandissement est égal à 1 donc la hauteur totale du spectre sera égale au diamètre du soleil sur la fente d'entrée, ce diamètre ne dépendant que de la focale du collecteur (diamètre du soleil sur la fente = focale du collecteur X 0,09 à peu de chose près...).

Les deux spectrographes sont équipés de différents supports afin de pouvoir installer :

- un boîtier photo avec différentes optiques photo (focales de 60 à 400 mm), lunettes de $D = 63\text{mm}$ et focale = 860mm ainsi que $D = 80\text{mm}$ et focale = 500mm.

- une caméra CCD avec différentes optiques.

- une caméra vidéo de type industriel.

En mode photo, les films utilisés sont du Kodak TP2415 en général; on peut cependant pour la partie bleue du spectre utiliser du Tmax 100 ou Tmax 400 dont le rendement est supérieur au TP2415 (au détriment toutefois de la résolution).

8 - La réalisation du spectrographe n'offre pas de grosses difficultés. Il faut veiller néanmoins à une bonne rigidité du plateau support (contreplaqué renforcé de tasseaux par exemple), à la possibilité d'effectuer des réglages sur les différents éléments du spectrographe et enfin de rendre étanche à la lumière tout le trajet lumineux, depuis la fente jusqu'après le réseau. On peut envisager un caisson de contreplaqué mince où on perce les trous nécessaires pour laisser passer le flux d'entrée et l'objectif de chambre à la sortie.

Bibliographie :

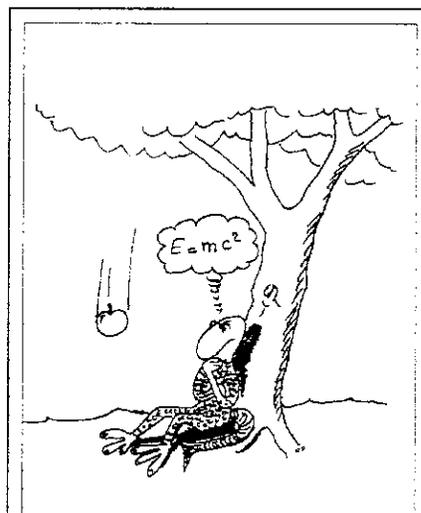
- Introduction à l'astronomie (Agnès Acker ; Ed. Masson)
- Méthodes de l'astrophysique (Lucienne Gougouenheim ; Ed. Hachette-CNRS)
- Guide de l'Observateur-Tome 2 (Patrice Martinez ; Ed SAP)

- Articles de Daniel Bardin parus dans les Cahiers Clairaut et la revue Pulsar.

NDLR :

Roger Meunier développe une activité d'astronomie amateur dans un club de la région de Melun-Fontainebleau. Il a souvent l'occasion, avec ses collègues, d'animer des interventions en direction du grand public et des divers lycées de son secteur. Notre collègue fait fonctionner un groupe d'étude du Soleil, notamment en spectroscopie; il tient à la disposition de toutes les personnes intéressées un texte très détaillé qui indique de nombreuses pistes et de thèmes de travail sur le Soleil (où les manip les plus abordables sont repérées par une écriture en caractères plus gras).

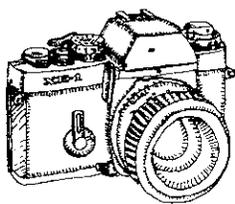
Roger Meunier,
16, rue des Grands Jardins
77 820 Le Chatelet en Brie
roger.meunier@wanadoo.fr



Ce dessin de Georges Paturol est une invitation à consulter le petit dernier de la belle collection "les génies de la science", consacré à Einstein (n° 11 mai 2002).

Cette série trimestrielle, éditée par "Pour la Science" (Belin) comporte en particulier un tome sur Galilée (n° 1 : novembre 1999) et Kepler (n° 8 : août 2001).

A mettre dans les mains de nos élèves.



Le cadran solaire de Carthage

Paul Perbost

Découvert récemment et acquis par Le Louvre, ce cadran solaire antique a fait l'objet d'un article du Monde, dans son édition du 7 janvier 2000, sous la plume de Pierre Barthélemy (p. 22), illustré par une belle photographie en couleurs. C'est un cadran du genre scaphé, mot dérivant du grec σκαφή, qui désigne tout corps creusé, comme, par exemple, une cuvette hémisphérique. Très répandu dans l'Antiquité, cette sorte d'instrument est mentionnée par Vitruve, l'architecte romain de César et d'Auguste, qui en attribue l'invention à l'astronome grec Aristarque de Samos, contemporain d'Archimède : "Scaphen siue hemisphaerium Aristarchus Samius dicitur inuenisse..." (Vitr. De Architectura, IX, 8, 1). Cicéron cite également le scaphé comme un genre de sphère où se trouvent représentés les mouvements du Soleil et de la Lune : "Sphaerae genus, in quo solis et lunae inessent." (Cic, Rep. I, 22).



www.louvre.fr ; département des antiquités grecques, étrusques et romaines (MA 5074-1 et 2).

Principe de l'instrument

C'est un scaphé hémisphérique particulier, dit Antiforeum ou Antiforée chez Vitruve (Vitr. D.A. IX,9), qui tourne sa surface concave vers le midi, comme son nom l'indique : en effet, il lui vient du grec $\alpha\nu\tau\iota\text{-}\beta\omicron\rho\epsilon\iota\omicron\varsigma$, qui signifie opposé au Nord (boréal).

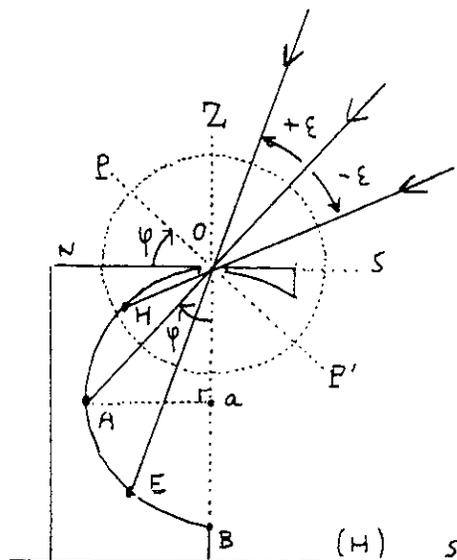
La figure ci-contre est une coupe sagittale méridienne de l'instrument, ancré sur le plan horizontal (H) par une patte verticale de fixation. Une section circulaire de la sphère céleste locale lui est adjointe, pour élucider son fonctionnement. On voit le zénith, Z, les points cardinaux N et S, ainsi que l'axe du monde, PP' incliné d'un angle φ sur l'horizon, cet angle étant par définition la latitude du lieu, dite autrefois hauteur du pôle.

Les rayons du soleil pénètrent dans l'enceinte du cadran par un orifice circulaire percé dans l'armature de sa partie supérieure, piquant d'une petite tâche lumineuse sa surface concave, où sont tracées les lignes horaires et dessinés les "arcs des signes" : l'instrument est donc à la fois montre et calendrier. Sur la figure on distingue les points qui correspondent aux équinoxes (A : aequinoctium) et aux solstices (E : été ; H : hiver) ; les traces d'entrées dans les signes du Zodiaque sont simplement piquetées.

Par l'effet du mouvement diurne, les rayons du soleil engendrent quotidiennement une surface conique de révolution à deux nappes, d'axe PP' et de demi-angle au sommet, $\theta = \pi/2 - |\delta|$, δ étant la déclinaison solaire aux jours considérés (équinoxes, solstices, entrées dans les signes du Zodiaque, etc...). Notons qu'aux équinoxes cette surface conique dégénère en un plan.

Aux équinoxes, $\delta = 0$ et aux solstices, $\delta = \pm \varepsilon$ ($\varepsilon \approx 24^\circ$, obliquité de l'écliptique). Les cônes quotidiens découpent sur l'hémisphère des courbes qui se croisent au point O. Parmi elles, seul le cercle équinoxial est plan : l'équateur l'y découpe aux jours des équinoxes. Les autres s'enroulent autour de l'orifice, à l'extérieur de ce cercle, ou à son intérieur selon que la déclinaison du soleil est positive ou négative. Elles rappellent la célèbre hippopède de Viviani découpée sur une sphère par un cylindre, qui ressemble à une ganse nouée sur sa surface, en toute élégance. En particulier, selon un usage immémorial, teintée d'astrologie, on y dessine rituellement les signes : Bélier, Taureau, etc..., Poissons.

La photo du cadran de Carthage, reproduite dans cette brève note, en est un bel exemple, vénérable au moins par son antiquité. Quant aux "heures temporaires" tracées une fois pour toutes, elles semblent tisser avec les arcs des signes une belle toile d'araignée qui tapisse l'intérieur du cadran : d'où le nom d'arachné que l'on donne parfois à ce genre d'horloge solaire (grec $\alpha\rho\alpha\chi\nu\eta$, araignée).



O est l'orifice et [OB] est le diamètre vertical de l'hémisphère de rayon R

Le point A correspondant aux équinoxes a pour déclinaison 0 donc la droite (OA) est perpendiculaire à l'axe des pôles (PP'). L'angle géométrique BOA est donc égal à l'angle géométrique NOP égal à φ .

Dans le triangle OaA, rectangle en a on a $Oa = OA \cos \varphi$

Dans le triangle OAB, rectangle en A on a $OA = 2R \cos \varphi$.

On a donc $Oa = 2R \cos^2 \varphi$ i.e. $\cos^2 \varphi = Oa / 2R$

Or, sur la photo originale on peut mesurer 2R et Oa :

$2R = 86,5 \text{ mm}$; $Oa = 48,5 \text{ mm}$.

D'où $\varphi = 41^\circ 30'$ qui est la latitude de Rome.

(cf A. Szabo, Les débuts de l'Astronomie, de la Géographie et de la Trigonométrie, chez les Grecs ; Vrin 2d.)

Estimation de la latitude

La détermination de la latitude du lieu initial d'utilisation du cadran, connue de son réalisateur, semble plutôt exiger des mesures précises que de "savants calculs". Parmi ces mesures, celles du rayon de l'hémisphère et de la "distance méridienne" OA paraissent primordiales. Pour le reste, un zeste de trigonométrie élémentaire devrait suffire pour le calcul de φ avec une précision acceptable.

Le cadran solaire de Carthage aurait-il été construit d'abord à Rome ? (La revue Géo d'août 2001 confirme cette origine du Cadran de Carthage (p. 68)).

NDLR :

1 - nous remercions madame Catherine Jaques, responsable du site internet du Louvre, qui nous a autorisé à reproduire des images.

2 - la latitude ($36^\circ 50'$) de Carthage conduirait sur la photo où $2R = 86,5 \text{ mm}$ à $Oa = 55,5 \text{ mm}$.



Soleil se levant derrière le Mont Blanc

Pierre Causeret

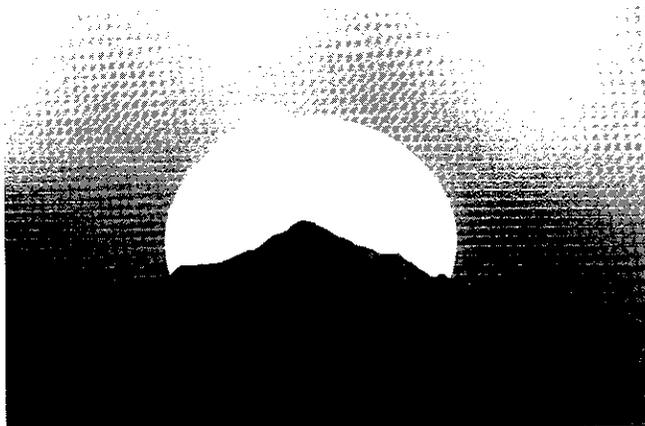
REMUE-MÉNINGES



Photo du Mont Blanc juste avant le lever du Soleil



Photo prise peu après le lever du Soleil



Montage montrant la photo que j'espérais faire

Depuis la Saône et Loire, on peut photographier le Soleil se levant devant le Mont Blanc aux alentours du solstice d'hiver. Le célèbre sommet qui culmine maintenant à 4810 mètres est pourtant situé à un peu plus de 180 km à vol d'oiseau.

Mais je n'ai encore pas réussi la photo dont je rêve car il n'est pas facile de trouver précisément où se placer.

Le jour où j'ai réalisé les deux premières photos, j'avais mal choisi mon emplacement.

La question est de trouver de quelle distance et dans quelle direction je dois me déplacer pour obtenir une photo comme le montage présenté en bas (en prenant évidemment la photo le même jour et à la même heure). Je rappelle que le diamètre apparent du Soleil est d'un demi degré.

Solution du n°97

(la vitesse de l'ombre rue de la Porte aux Lions)

Calcul de la hauteur du Soleil aux solstices :

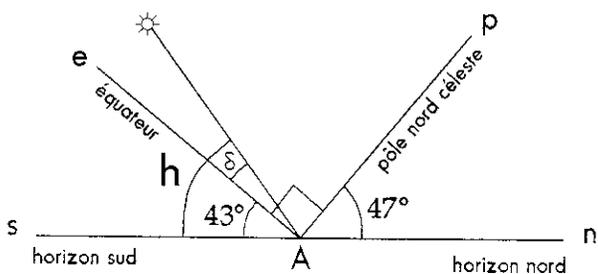
La figure ci-dessous est faite dans le plan du méridien. l'angle nAp est égal à la latitude, 47° à Dijon.

l'angle eAs, que fait le plan de l'équateur avec le plan horizontal mesure 43° (180° - 90° - 47°).

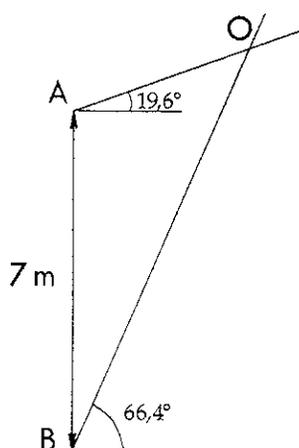
δ est la déclinaison du Soleil et h sa hauteur au-dessus de l'horizon à midi solaire vrai.

Au solstice d'été : $\delta = 23,4^\circ$ et $h = 66,4^\circ$

Au solstice d'hiver : $\delta = -23,4^\circ$ et $h = 19,6^\circ$



Calcul de l'emplacement de l'oeilleton



Pour que la table de 7 mètres soit utilisée d'un solstice à l'autre, le centre du soleil percé doit être placé en O.

L'angle OAB mesure $109,6^\circ$; l'angle OBA mesure $23,6^\circ$; l'angle AOB mesure $180^\circ - 109,6^\circ - 23,6^\circ = 46,8^\circ$.

La relation des sinus dans le triangle OAB donne :

$$\frac{OB}{\sin OAB} = \frac{AB}{\sin AOB}$$

on en déduit $OB \approx 9$ mètres

On peut calculer qu'à cette distance, le diamètre apparent du Soleil étant de $0,5^\circ$, la tache lumineuse aura un diamètre d'au moins 8 cm.

Déplacement de l'ombre

Le Soleil se déplace aux solstices de $360^\circ \cos 23,4^\circ$ en 24 h soit de $0,23^\circ$ par minute (en 24h, on le voit avancer de 360° aux équinoxes mais de seulement 330° aux solstices car il semble décrire un cône. L'erreur est peu importante si on prend 360° en 24h).

Un déplacement de $0,23^\circ$, cela donne 36 mm à 9 mètres.

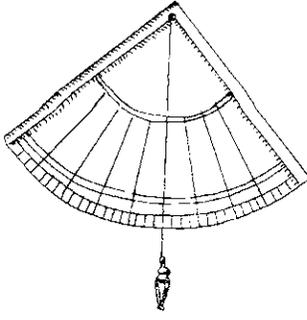
L'ombre se déplace donc à la vitesse de 36 mm par minute (2,16 m/h).

Si on considère que l'on peut apprécier la position de la tache lumineuse au cm près (ce qui n'est pas si mal pour une tache floue de 8 cm de diamètre), la précision est de cette méridienne est de l'ordre de 15 ou 20 secondes.



L'Observatoire de la Côte d'Azur a mis en route, sous l'impulsion du Pr. J Gay, astronome à l'OCA et enseignant à l'Université, un projet visant à mobiliser et coordonner des élèves, des enseignants, des établissements, des associations et tout public intéressé, pour l'observation collective des prochains passages de Mercure et de Venus devant le Soleil (respectivement en Mai 2003 et Juin 2004). Il est question de faire pratiquer à chacun l'observation, ce qui, en l'occurrence, demande essentiellement un chronomètre, un instrument modeste (mais complètement sécurisé : observation par projection) et du beau temps. Ce projet rencontre le souci des personnels de l'OCA de faire aimer les sciences et la pratique scientifique aux jeunes de tous âges, souci pour lequel nous maintenons diverses actions en direction des élèves, des enseignants et du grand public, et à qui, bien évidemment nous recommandons les cahiers Clairaut et l'adhésion au CLEA, dont notre collègue astronome Christiane Froeschlé est la correspondante pour la région de Nice. Une page Web consacrée à ce projet sera bientôt ouverte au sein du site web de l'OCA (www.obs-azur.fr). Le développement de ce projet s'accompagne de contacts auprès de personnalités et d'associations, dans le but d'avoir de leur part un soutien moral et si possible une sorte de parrainage officiel. Ainsi, tout naturellement, nous avons pensé solliciter dans ce sens le CLEA.

Yves Rabbia, membre du collectif-promoteur du projet.



Nicolas Copernic

Christian Scotta

HISTOIRE

Dans ce premier article, Christian Scotta replace Copernic dans son époque et le situe par rapport aux anciens. Il nous offre d'abord, loin de l'image d'Epinal, un regard critique, argumenté, sur le personnage (Copernic observait peu). Il expose ensuite le système de Copernic (la Terre est en mouvement) qui modélise l'Univers en se fondant sur une idée, "idéal d'harmonie", et sur des constatations expérimentales (les saisons, les rétrogradations des planètes).

Au fil de l'exposé, l'auteur donne l'éclairage des successeurs de Copernic (Galilée, Newton) sur ce modèle.

"Qu'y-t-il de plus beau que le ciel qui assurément contient tout ce qui est beau ?"

Sa vie, son oeuvre

Né à Thorn, aujourd'hui Torun en 1473, orphelin à 10 ans, il est recueilli par son oncle. Il a 19 ans quand Christophe Colomb découvre l'Amérique (1492) et 42 ans lors de la bataille de Marignan (1515).

De 1491 à 1495, il est étudiant à l'université de Cracovie. Puis, comme de nombreux étudiants assez fortunés pour le faire, il se rend en Italie où il passe près de 10 ans. Il étudie le droit à Bologne (1496), fait un pèlerinage à Rome (1500) où, âgé de 27 ans, il fut, selon Rheticus, "professeur de mathématiques devant une large audience d'étudiants et un cercle d'hommes éminents et de spécialistes"¹. Il étudie la médecine à Padoue (1501) puis reçoit son doctorat de droit à Ferrare en 1503.

Entre temps, il est élu chanoine² du diocèse de Warmie (1497), ce qui lui assure un revenu confortable. La capitale de ce

diocèse est la ville de Frauenburg, aujourd'hui Frombork ("forteresse de la Vierge"). Il soigne l'évêque Watzzerolde, qui est son oncle et son protecteur. Il s'est représenté lui-même dans un autoportrait, un brin de muguet à la main, emblème des guérisseurs. Une copie de ce tableau est visible sur l'horloge astronomique de la cathédrale de Strasbourg. Il se fixe à Frombork en 1512 et y restera toute sa vie.

Le 9 mars 1497, il observe l'occultation d'Aldébaran (dans le Taureau) par la Lune, en compagnie de l'astronome Domenico Maria Novora. Il diffuse sa théorie du mouvement de la Terre dans un petit manuscrit, rédigé vers 1510-1512, le "Commentariolus" ou "le Petit Traité". Copié et recopié par ses lecteurs, ce manuscrit fait connaître Copernic dans le monde savant. Le 1er mai 1514, Matthias de Miechow, professeur à l'université de Cracovie, signale dans le catalogue de sa bibliothèque "un manuscrit de 6 feuilles exposant la théorie d'un auteur qui affirme que la terre se déplace tandis que le Soleil est immobile".

C'est dans ce Commentariolus que se trouvent les sept postulats de Copernic.

En 1514, le pape Léon X l'invite à travailler sur la réforme du calendrier mais Copernic décline l'offre. En 1517, il publie un "Essai sur la frappe de la monnaie".

Sa théorie du mouvement de la Terre commence à être connue, puisqu'en 1538, Martin Luther évoque cet "astrologue" qui "souhaite renverser toute la science de l'astronomie".

Vers 1530, Copernic commence la rédaction du "De Revolutionibus...". Le manuscrit est inachevé quand Georg Joachim Rhéticus (âgé alors de 25 ans) lui rend visite en mai 1539 : Copernic est alors âgé de 66 ans. Rhéticus reste chez Copernic jusqu'en septembre 1541. En 1540, Rhéticus publie la "Narratio Prima" ("Premier Rapport"), dans laquelle il expose les thèses de Copernic. Il assure la relecture du manuscrit du "De Revolutionibus" qu'il emporte à Nuremberg pour le confier à un imprimeur. Mais devant rejoindre son poste de professeur à l'université de Leipzig, il demande au théologien protestant Andréas Osiander (1498-1552) d'assurer la publication de l'ouvrage qui sort en 1543 sous le titre suivant "De Revolutionibus Orbium Coelestium" (en 1000 exemplaires).

Copernic dédie son ouvrage à Paul III, élu pape en 1534, connu pour avoir été fêru d'astrologie. Copernic aurait reçu un exemplaire imprimé sur son lit de mort, en 1543.

La préface d'Osiander.

A-t-il lu la préface qu' Osiander, rédigea sans la signer et qui affirme que le système héliocentrique n'est qu'un artifice mathématique ?

"Car ces hypothèses (héliocentrisme et mouvements de la Terre) n'ont pas besoin d'être vraies ni même probables, si elles procurent un calcul conforme aux observations, cela seul est suffisant... Et si des causes sont imaginées (pour expliquer l'inégalité apparente des mouvements planétaires), comme beaucoup le sont, elles ne sont pas présentées pour convaincre qui que ce soit de leur vérité, mais seulement pour fournir une base correcte aux calculs..."

Osiander affirme qu'on ne connaîtra jamais la cause véritable des phénomènes astronomiques. Il trahit la pensée de Copernic qui, comme le souligne Arthur Koestler³ croyait à la réalité physique du système héliocentrique. Les épicycles et les excentriques n'étaient pas non plus pour lui de simples artifices de calcul⁴.

Cependant, pour Jacques Gapaillard⁵, "le point de vue positiviste (d'Osiander) ... correspond à une certaine conception moderne des activités scientifiques".

La Narratio Prima fit davantage pour l'héliocentrisme que le De Revolutionibus. Une seconde édition du De Revolutionibus se fit toutefois à Bâle en 1566 et une troisième à Groningue en 1617.

Arthur Koestler.

Arthur Koestler affiche une piètre opinion de Copernic dans "Les Somnambules" (1960) : "un chanoine craintif" (titre de la 3^e partie consacrée à Copernic), manquant de courage pour affirmer ses opinions ; "le mystificateur", qui fit croire qu'il vivait sur les bords de la Vistule, "un morne pédant, dénué de flair et de l'intuition de somnambule des vrais génies ; c'est un homme qui, s'étant emparé d'une bonne idée, en fit un mauvais système, besognant patiemment à entasser des épicycles et des déférents dans le plus triste, le plus illisible des livres célèbres."

Ptolémée a lui aussi droit au qualificatif de "pédant...qui empile avec une morne obstination orbe sur orbe".

Koestler reproche à Copernic d'avoir peu observé et d'avoir trop fait confiance aux observations des Anciens (Ptolémée, Hipparque...). Copernic n'utilise en effet que 27 observations personnelles. Il lui reproche en outre son ingratitude envers Rhéticus qu'il ne cite nulle part. Ce jugement mérite d'être nuancé. Mais il est certain qu'il a trop différé la publication de son oeuvre, peut-être ne l'eut-il jamais fait sans Rhéticus.

Les disciples de Copernic.

Dans le "De Revolutionibus", Copernic ne cite pas son seul disciple, Georg Joachim Rhéticus (1514-1574),

pourtant à l'origine de l'ouvrage. Découragé, Rhéticus ne s'occupa plus d'astronomie.

Les premiers partisans de l'héliocentrisme n'ont pas connu Copernic. Citons Michael Maestlin (1550-1631), le maître de Képler; Christopher Rothmann (1540-1597) ; Johannes Képler (1571-1630).

La lettre de Lysis à Hipparque.

Pourquoi Copernic a-t-il attendu "quatre fois neuf ans" avant de publier son oeuvre ?

Dans le manuscrit du "De Revolutionibus", il insère sa propre traduction (un faux, on le saura plus tard) d'une lettre que le pythagoricien Lysis adressa à Hipparque, peu après la mort de son maître Pythagore (vers 580-vers 470 av. notre ère). Cette lettre témoigne de l'usage des pythagoriciens qui transmettaient leur doctrine uniquement "à leurs proches et à leurs amis", et par voie orale uniquement. Seule l'insistance de ses amis a convaincu Copernic de publier son oeuvre.

Copernic craignait en effet d'être incompris de la plupart des philosophes, à cause de l'absurdité apparente de sa "théorie du mouvement de la Terre". Il fut tenté de ne rien divulguer, dans la crainte "du mépris à cause de la nouveauté et de l'absurdité de son opinion". Cette lettre de Lysis à Hipparque est un faux d'inspiration pythagoricienne. Diogène Laërce⁶ cite la fin de cette lettre dans sa "Vie, doctrine et sentences des Philosophes illustres".

Les prédécesseurs de Copernic.

Comme il l'indique lui-même dans sa Préface, Copernic n'est pas le premier à mettre la Terre en mouvement. Il cite les Grecs de l'Antiquité qui ont eu cette audace. Hicéas de Syracuse (V^e siècle avant notre ère), Héraclite du Pont et Ecphantus (IV^e siècle avant notre ère) faisaient tourner la Terre sur elle-même⁷. Philolaos (IV^e siècle avant notre ère, disciple de Pythagore), faisait tourner la Terre autour du feu central, le Soleil n'étant qu'un reflet de ce feu central, idée à laquelle Platon aurait adhééré à la fin de sa vie (selon Plutarque). Aristarque de Samos (III^e siècle avant notre ère), surnommé le Copernic de l'Antiquité, parce qu'il fit

tourner la Terre sur son axe et autour du Soleil. Copernic le cite dans son manuscrit mais pas dans l'édition imprimée.

Il a peut être connu son contemporain Celio Calcagnini, qui rédigea un petit traité intitulé : "comment le ciel se tient immobile et comment la Terre se meut". Mais Calcagnini s'en tient à l'idée d'Hicetas de Syracuse qui croyait que le Ciel et tous les astres sont immobiles. Il explique les mouvements apparents des astres par la rotation de la Terre autour d'un axe qui s'incline dans différentes directions.

Le système de Copernic

"L'arrangement du monde est un témoignage de l'œuvre divine".

Copernic donne une image simplifiée de son système au chapitre 10 du "De Revolutionibus" : les orbites ne sont pas à l'échelle et il omet les épicycles mineurs.

Ce schéma aurait pu suffire. En effet, Platon recommandait de considérer "les ornements du ciel" (les astres) comme les plus beaux et les plus parfaits objets de leur ordre "sans devoir s'attarder à les étudier dans le détail" car les corps célestes visibles ne sont que les reflets imparfaits de modèles idéaux et éternels⁸.

Dans cet esprit, notre système solaire est aussi harmonieux que puisse l'être un objet du monde sensible.

Mais en tant que parties du monde corporel, les planètes présentent des irrégularités dans leurs mouvements. Un autre que Copernic les aurait négligées.

Les avantages

1 - Unité du monde.

La Terre est de même nature que les planètes. Elle est l'une des planètes. Son mouvement est décrit de la même façon que celui des autres planètes. La dualité Ciel Terre disparaît : Copernic généralise la gravité au Soleil et aux autres planètes, chacune exerçant cette tendance en direction de son centre.

2 - Simplicité du système.

- rotation de la Terre sur son axe et immobilisation de la sphère des Fixes. Ptolémée la faisait tourner en 24 heures, bien plus vite que la sphère de Saturne qui tourne en 30 ans.

- un ensemble de sept cercles autour du Soleil : un cercle pour chaque planète (Mercure, Vénus, Terre, Mars, Jupiter et Saturne) plus un cercle pour la Lune. Les planètes ayant une même vitesse linéaire, plus elles sont loin, plus leurs périodes de révolutions sont longues.

De plus, le Soleil placé au centre "peut éclairer tout à la fois" et retrouve le rôle prépondérant que lui attribuaient les Anciens ("Esprit du Monde"). Ce qui est moins évident si, comme Ptolémée, on le place entre Vénus et Mars. Cet argument relève de l'esthétique. Mais Copernic n'attribue pas de rôle moteur au Soleil : le Soleil "gouverne la famille des astres qui l'entourent".

3 - Explication des stations et des rétrogradations des planètes : ces mouvements sont des apparences dues à la révolution de la Terre autour du Soleil. Copernic peut supprimer les épicycles destinés à expliquer ces mouvements.

4 - Echelle du Système Solaire : il donne les premières valeurs correctes des distances relatives des planètes, en nombre de fois la distance Terre-Soleil (aujourd'hui l'Unité Astronomique) ; de plus, il entrevoit une relation entre les périodes de révolution et les distances au Soleil. Kepler trouvera cette relation⁹.

Dans sa description générale du Système solaire, Copernic est guidé par "des considérations d'harmonie"¹⁰. La parfaite organisation du monde témoigne de la perfection du Créateur¹¹. On doit retrouver la structure du monde à partir de la symétrie¹² qui existe entre ses parties de la même façon qu'on obtient un corps harmonieux à partir de membres pris çà et là, pourvu qu'ils soient proportionnés à un même corps. Tout est lié dans le Ciel : on ne peut déplacer aucune partie du monde sans entraîner la confusion dans

tout l'ensemble. Le Soleil est immobile au centre de la sphère des Fixes, elle-même immobile. Les six planètes tournent autour du Soleil d'autant plus lentement qu'elles en sont loin (elles ont la même vitesse linéaire). Mais pour concevoir ce système héliocentrique, l'observateur doit quitter la Terre - du moins par la pensée - pour se rendre au centre du monde¹³.

Les inconvénients

En vertu du "principe du mouvement par fait" (préambule du Commentariolus), les mouvements planétaires se font sur des cercles ou sur des combinaisons de cercles. Copernic donne à ce principe la même importance qu'à l'hypothèse de la "mobilité de la Terre".

Pour rendre compte de la variation de la marche apparente du Soleil (et de l'inégalité des saisons), il faut soit mettre le Soleil au centre de l'orbite terrestre, et faire tourner la Terre sur un petit épicycle (défèrent + épicycle, le défèrent et l'épicycle tournent en une année en sens contraire), soit placer le Soleil à côté du centre de l'orbite terrestre (excentrique) : dans ce cas, la distance angulaire du Soleil au centre est de $1^{\circ} 56'$; la distance linéaire est de $1/31$ de la distance Terre Soleil. Copernic explique ainsi les écarts entre le mouvement moyen (circulaire) et le mouvement vrai (elliptique).

La distance de la Terre au Soleil varie avec une distance maximale et une distance minimale, qu'il continue à nommer respectivement apogée et périégée bien qu'elles ne se rapportent plus à la Terre. Kepler les appellera l'aphélie et le périhélie¹⁴.

Pour rendre compte des inégalités dans les mouvements des planètes, Copernic est également obligé d'utiliser des "épicycles mineurs".

Par exemple, la planète Saturne tourne sur la circonférence d'un petit cercle (l'épicycle) dont le centre décrit la circonférence d'un grand cercle (l'excentrique). La planète sur son épicycle et le centre de l'épicycle tournent dans le même sens et durant la même période. On l'appelle excentrique parce que son centre est décalé par rapport au centre de l'orbite terrestre. (Le centre

du Soleil ne coïncide pas avec le centre de l'orbite terrestre.) Copernic explique ainsi les irrégularités du mouvement de Saturne dont la distance au centre de l'orbite terrestre passe par un maximum et par un minimum.

D'autres cercles étaient nécessaires pour expliquer les écarts au nord et au sud de l'écliptique.

Copernic ne donne aucune explication physique à ces combinaisons de cercles. Il se contente d'évoquer les sphères célestes qui emportent les planètes. Comme Ptolémée, il fait une description géométrique des mouvements planétaires ; c'est de la cinématique. Par contre, les ellipses permettent une explication physique : théorie magnétique de Képler, tourbillons de Descartes (qui parle d'ovales) ou gravitation de Newton. Les mouvements sont expliqués par des forces ; c'est de la dynamique.

Les mouvements de la Terre

Arguments en faveur de la rotation de la Terre (ch. 8 du "De Revolutionibus")

Relativité du mouvement

La Terre est fixe alors que le Ciel tourne d'est en ouest ; le Ciel est fixe alors que la Terre est en rotation d'ouest en est : ces deux propositions sont équivalentes car elles produisent les mêmes apparences. Le mouvement de la Terre n'est pas perceptible, sinon par le mouvement apparent du Ciel en sens inverse. Copernic prend l'exemple du bateau sur une mer calme, exemple repris par Galilée, Descartes et Newton.

Il est plus facile de faire tourner la Terre sur elle-même étant donné sa petitesse, que de faire tourner le Ciel. Il faudrait donner au ciel une vitesse incroyable, étant donné ses dimensions. Appliquant au ciel les effets de la force centrifuge qu'on attribuait à la rotation terrestre, Copernic fait gonfler la sphère céleste sous l'effet de sa rotation : plus le rayon de la sphère céleste

s'agrandit, plus il faut lui attribuer une vitesse linéaire importante car sa vitesse angulaire de rotation reste la même (24 heures).

La Terre tourne parce qu'elle est ronde. Sa rotation est un mouvement naturel et différent des mouvements circulaires des machines. Donc, le mouvement circulaire de la Terre ne produit pas d'effet centrifuge capable de soulever les objets au-dessus du sol, crainte qu'il attribue à Ptolémée, lequel évoquait une chute rectiligne de la Terre¹⁵.

La Terre ne se dérobe pas sous un objet pendant qu'il est en l'air ; comme on le croyait, faisant qu'il retombe à l'ouest de son point de départ¹⁶. Le mouvement de chute vertical se compose avec le mouvement latéral dû à la rotation de la Terre¹⁷. Projetée vers le haut, une pierre conserve le mouvement circulaire et retombe au lieu d'où elle est partie.

"Il convient de reconnaître que par rapport au monde (la Terre), le mouvement des corps qui montent et qui descendent est double, absolument composé du rectiligne et du circulaire."

La Terre possède le mouvement circulaire ; les parties de la Terre "séparées de leur totalité" possèdent en outre le mouvement rectiligne de chute ou d'ascension, en sorte que "le mouvement > circulaire coexiste avec le rectiligne comme le vivant avec le malade". Les mouvements rectilignes des parties (mouvements accidentels) affectent le mouvement de rotation de la Terre autour de son axe (mouvements naturels), de la même façon que l'état de maladie (état accidentel) affecte l'animal dans son état naturel.

Galilée (1564-1642) reconnaît dans le mouvement circulaire uniforme un mouvement inertiel qui, une fois acquis, ne s'arrête jamais¹⁸. Un boulet de canon tiré verticalement ajoute son mouvement autour du centre ("le mouvement universel de la Terre vers l'est") à son mouvement vertical, si bien qu'il se maintient constamment au-dessus du canon¹⁹.

Pour Copernic, l'air (du moins la

partie la plus proche du sol) participe à la rotation de la Terre (à laquelle est jointe l'élément aqueux, c'est-à-dire les mers et les océans), parce qu'il est de la même nature que la Terre (il est "mêlé" avec l'élément terre qui possède naturellement ce mouvement circulaire), ou parce qu'il a "acquis" ce mouvement.

Arguments en faveur de la révolution de la Terre.

La sphère céleste est coupée en deux parties égales par l'horizon. Le rayon de la Terre est si petit que les lignes partant du centre de la Terre se confondent avec celles partant de la surface terrestre où se trouve l'observateur. Par conséquent, le Ciel est immense par rapport à la Terre.

Ptolémée en déduit que la Terre est au centre du monde ; mais on a le même effet si la Terre n'est plus au centre du monde, mais proche de celui-ci. Dans le manuscrit du ch.6, Copernic établit un parallèle entre la taille des atomes, imperceptible, et celle des corps qu'ils composent, avec la taille de l'orbite de la Terre, infime par rapport à celle de la sphère des fixes.

La révolution de la Terre ne produit aucun déplacement apparent des étoiles fixes ; aujourd'hui, on dirait qu'il n'y a aucun effet de parallaxe. Cela s'explique parce que la distance de la Terre au Soleil est très petite comparée à la grandeur de la sphère des Fixes.

Chez Ptolémée, la sphère de Saturne touche la sphère des Fixes ; chez Copernic, un espace immense les sépare.

Par contre, les irrégularités qu'on observe dans les mouvements des planètes s'expliquent bien si la Terre n'occupe pas le centre de leurs révolutions : les planètes peuvent s'approcher et s'éloigner de la Terre tout en décrivant des cercles autour du Soleil.

Le troisième mouvement de la Terre.

Outre la rotation diurne et la révolution annuelle, Copernic attribue un 3^e mouvement à la Terre. L'axe de la Terre est fiché dans l'orbe solide qui entraîne la Terre autour du Soleil, sans que cela gêne la rotation terrestre. La sphère de l'orbe annuelle tourne en une année et pendant ce temps, l'axe devrait décrire un cône en sens inverse.

Or, on sait que l'axe de la Terre vise toujours un même point dans l'espace, proche de l'étoile polaire dans l'hémisphère boréal. Sinon chaque lieu de la surface terrestre ne connaîtrait qu'une saison unique. Il faut donc donner à cet axe un mouvement conique en sens contraire pour que l'axe conserve toujours la direction de l'étoile polaire : ce mouvement conique annuel n'apparaît pas et l'axe semble immobile. Avec un axe qui pointe toujours la même direction, Copernic peut ainsi expliquer l'alternance des saisons.

Cependant, l'axe ne revient pas exactement à une direction parallèle à lui-même. Il décrit un angle légèrement inférieur, et accomplit un mouvement conique dans le sens rétrograde, en une période beaucoup plus longue (quelques 26 000 ans). Copernic explique ainsi la précession des équinoxes alors qu'on l'attribuait à un mouvement propre des étoiles, ce qui nécessitait l'ajout d'une 9^e sphère, placée au-dessus de la sphère des fixes (la 8^e sphère).

Depuis, on a appris qu'une sphère en rotation comme la Terre n'a aucune raison de changer la direction de son axe de rotation, à moins d'y être contrainte par une force extérieure. Ce 3^e mouvement est donc inutile pour expliquer que l'axe terrestre pointe toujours l'étoile polaire. Galilée propose l'expérience suivante²⁰ : il place une balle dans un récipient rempli d'eau. En faisant tourner le récipient, on voit que la balle tourne en sens inverse du récipient mais dans la même période. En fait, la balle ne tourne pas mais regarde toujours la même direction. La Terre est un globe suspendu dans un air ténu et est dans la même situation que la balle : son axe est toujours orienté dans la même direction.

Par contre, il faut noter que Copernic attribue correctement la précession des équinoxes à la Terre et non au ciel. Isaac Newton donnera une explication physique à ce mouvement conique : la Terre n'est pas parfaitement sphérique ; les attractions du Soleil et de la Lune sur le bourrelet équatorial provoquent ce mouvement conique de l'axe de la Terre.

Rôle central du Soleil

Le Soleil est la lampe qui éclaire le monde : il gouverne la famille des planètes mais ne meut pas les planètes. Copernic emploie des formules toutes pythagoriciennes²¹ en parlant du Soleil comme le Dieu visible²², et du monde comme un "temple immense" qui reflète la perfection divine.

"Il l'adore et presque le divinise"²¹

Par contre, Rhéticus donne au Soleil un rôle moteur : le Soleil "est au principe du mouvement et de la lumière"²³.

Copernic reprend à son compte l'hymne au Soleil écrit par Pline l'Ancien dans le 2^e Livre de son Histoire Naturelle :

Celui-ci plaçait le Soleil au milieu de 6 planètes (Lune, Mercure, Vénus, Soleil, Mars, Jupiter et Saturne, la Terre restant au centre de leurs révolutions). Les paroles de Pline prennent un sens nouveau dans l'héliocentrisme ("au milieu" en particulier).

Pline : "Au milieu d'elles < les planètes > se meut le Soleil...qui régit les astres eux-mêmes et le ciel. En considérant ses oeuvres, on apprend que c'est lui l'âme du monde ou plus exactement l'esprit du monde, la règle première et la divinité du monde ; il apporte la lumière aux choses et enlève les ténèbres...Il prête sa lumière aux autres astres ; illustre, excellent, omnivoyant, entendant tout..."

Copernic :

"Au milieu de toutes réside le Soleil. En effet, dans ce temple splendide, qui placerait ce luminaire dans un autre et dans un meilleur lieu que celui d'où il peut tout éclairer à la fois ?

Si du moins ce n'est pas impropre - ment que certains l'appellent lampe du monde, d'autres esprit du monde, d'autre celui qui régit le monde. Trismegiste le nomme Dieu visible, l'Electre de Sophocle l'omnivoyant. Certes, en étant ainsi placé sur le trône royal, le Soleil dirige la famille des astres mus autour de lui."

Notes et références

Par manque de place nous n'avons pas pu reproduire toutes les références précises des citations de Copernic, écrites en italique. Celles-ci proviennent de : "De Revolutionibus" et du "Commentariolus".

1 - "Narratio Prima".

2 - Clerc d'un chapitre, communauté de moines qui assistent l'évêque dans ses fonctions liturgiques, pastorales et administratives.

3 - les citations d' A. Koestler sont toutes tirées de son ouvrage "Les Somnambules", 3^e partie "Un chanoine craintif".

4 - "il n'est pas facile de distinguer lequel des deux < l'épicycle homocentrique, ou l'excentrique > se manifeste dans le ciel".

5 - "Et pourtant, elle tourne !" Seuil.

6 - Diogène Laërce est un écrivain grec du début du III^e siècle, auteur de la première histoire de la philosophie grecque.

7 - l'arabe al-Biruni (973-1050) déclare que l'Indien Aryabhata (V^e siècle) a soutenu la rotation de la Terre ; mais il réfute cette hypothèse.

8 - "La République".

9 - Ptolémée donne les distances des planètes à la Terre en rayons terrestres.

10 - 11 - Alexandre Koyré : "Les étapes de la Cosmologie" in "études d'histoire de la pensée scientifique".

12- symétrie : disposition harmonieuse des parties d'un ensemble.

13 - Jean-Jacques Szczeciniarz : "Copernic et la révolution copernicienne".

14 - "Le Secret du Monde".

15 - 16 - "Almageste".

17 - En physique aristotélicienne, on ne peut composer un mouvement circulaire avec un mouvement rectiligne.

18 - 19 - 20 "Dialogue sur les deux grands systèmes du monde"

21 - Hélène Védrine : "La nouvelle image du monde", chap. 2 de François Chatelet "Histoire de la philosophie".

22 - Copernic aurait été contrarié s'il avait connu l'existence des tâches solaires ! Quand il les découvrit en 1610, le père Scheiner préféra croire à des planètes plutôt que d'infliger une "insulte" au Soleil.

23 - A. Koyré, introduction à la traduction du "De revolutionibus".



Phénomènes naturels Planètes et satellites Le trou dans le calendrier

LECTURES POUR LA MARQUISE

Revue du palais de la découverte

Octobre 2001 ; n° 291.

Son dossier principal "Phénomènes naturels" : chaque article fournit un historique puis une analyse des connaissances actuelles.

Le premier s'intitule "Mirage, source d'illusions et révélateurs de terres inconnues", description des mirages inférieurs les plus couramment observés, puis des mirages supérieurs qui ont accrédité l'existence de vaisseaux fantômes et même les mystérieuses et complexes "Fata Morgana" ou "Fata Bromosa".

Le second analyse les "halos", interaction entre la lumière du Soleil et les cristaux de glace de l'atmosphère, et le rôle de l'oeil pour comprendre les parhélies observés.

Le phénomène auroral tient ensuite une place importante, autant par la relation des hésitations qui ont précédé au cours de l'histoire sa "bonne" interprétation que par le point qui s'est fait ensuite sur les connaissances actuelles et les possibilités encore nombreuses d'observations scientifiques qui sont réalisées lors des observations d'aurores depuis la Terre ou à bord de sondes explorant le système solaire, pour aboutir aux espoirs nés de l'étude des aurores autour d'autres planètes, en planétologie comparée.

Le dernier article nous fait quitter le ciel pour revenir sur Terre ou plutôt à la surface des océans, des mers ou des lacs étudier "la vague, la houle et les "Tsunamis" : une description claire des différentes propagations et des milieux affectés ou non par ces propagations. Un détour par le défolement, phénomène familier des vacances enfantines au bord de la mer ! où l'on apprend la différence entre le déferlement "glissant"

sur une plage en pente douce, "plongeant" si la pente est plus abrupte et même "gonflant" dans d'autres circonstances ! Enfin, des "vagues peu ordinaires" : la seiche ... du lac de Genève ou dans la baignoire, le mascaret ... disparu depuis 1960 de l'estuaire de la Seine, l'aqua alta de la Venise hivernale, la terrible houle cyclonique des tropiques, et les "Tsunamis" accompagnant les tremblements de terre et bien improprement nommés raz de marée.

Comme à l'accoutumée, la Revue du palais de la Découverte est source agréable et précise de connaissances, ne nécessitant pas trop de "prérequis", et toujours de bon niveau scientifique.

Pour se la procurer (4,76 euros, franco de port, pour la France; 5,18 euros pour les DOM, 5,95 euros pour l'étranger) envoyer un chèque à l'ordre du Palais de la Découverte, Délégation à l'écrit, Avenue F. D. Roosevelt, 75008 Paris.

Catherine Vignon

Planètes et Satellites

André Brahic

Editeur Vuibert.

Ce gros livre (360 pages) abondamment illustré de photos en couleur, se veut à la fois manuel pour les étudiants et ouvrage de culture pour le grand public. Bien que ne présentant que peu de calculs, et que l'on peut sauter sans préjudice pour la compréhension générale, il requiert une lecture réfléchie.

Sous-titré "cinq leçons d'astronomie", il présente une synthèse très fournie des connaissances actuelles sur le système solaire dont voici l'essentiel.

La première leçon introductive rappelle comment les conceptions de l'astronomie ont évolué au cours de l'histoire et elle donne les bases de physique nécessaires à la compréhension de l'ensemble.

La deuxième leçon fait l'inventaire et la description des objets du système solaire en insistant sur l'explosion des connaissances apportées, dans les dernières décennies du XX^e siècle, par l'exploration spatiale et les nouvelles techniques d'observation depuis la Terre.

La troisième leçon étudie les mouvements des innombrables compagnons du soleil, des révolutions tranquilles sur les orbites klépériennes aux phénomènes complexes décelés récemment dans les anneaux des planètes extérieures.

La quatrième leçon traite des hypothèses sur la formation du système solaire dont la recherche a connu un récent essor grâce à l'observation d'étoiles en gestation et à l'analyse chimique et isotopique de divers matériaux extraterrestres venus à notre portée.

La cinquième leçon montre comment la prise en compte globale des observations des paysages des planètes et satellites dont nous disposons depuis peu, permet par des comparaisons, un début de compréhension des phénomènes à l'oeuvre dans l'évolution des objets du système solaire.

L'auteur insiste tout au long du livre à la fois sur la diversité et l'unité qui règnent dans le système solaire.

Ainsi les mouvements les plus divers sont observés mais tous sont guidés par la gravitation et la mécanique newtonienne qui peuvent donner naissance à des phénomènes les plus étranges, par exemple le confinement gravitationnel qui, provoquant des effets répulsifs, stabilise les anneaux de Saturne. Et l'ensemble des astéroïdes dont 9000 sont connus avec précision, fournit un excellent laboratoire naturel pour l'étude des mouvements chaotiques.

La contemplation des paysages observés dans le système solaire induit plutôt une impression de diversité, et la complexité des apparences laisse parfois perplexes les astronomes ; cependant une nouvelle science, la planétologie, regroupe et confronte toutes ces observations et l'on comprendra bientôt mieux les volcans terrestres en s'intéressant à ceux de Io, satellite de Jupiter, ou Triton, satellite de Neptune. Peut-être l'étude de Titan, satellite de Saturne, avec son atmosphère riche en molécules carbonées, va-t-elle nous renseigner sur la chimie prébiotique et, par analogie, sur les conditions de l'apparition de la vie sur la Terre.

Cette moisson de connaissances est loin d'avoir donné tous ses fruits et l'auteur insiste sur l'immensité des problèmes non résolus qui sont le moteur de la recherche de demain et nécessiteront de nombreuses campagnes d'exploration spatiale. Cependant on constate avec plaisir la confirmation de résultats de calculs anciens: les points de Lagrange ne sont plus seulement des entités mathématiques, ils sont réellement habités par des astéroïdes près de Jupiter et ailleurs. De très classiques effets de marée expliquent des phénomènes les plus variés, dont l'activité volcanique du satellite Io.

Ce livre apporte une foule de renseignements très précis et peut donc servir d'ouvrage de référence pour tous ceux qui pratiquent l'enseignement de l'astronomie ou qui s'y intéressent à divers titres. Il devrait avoir sa place dans toutes les bonnes bibliothèques.

Annie Laval

Le trou dans le calendrier

Abner Shimony Illustrations de Jonathan Shimony (Niveau Collège)
Editions le Pommier ISBN 9 782746 500075, 15 €
traduction française de "Tibaldo and the hole in the calendar".

Le trou dans le calendrier raconte la vie de Tibaldo, jeune garçon né le 10 octobre 1570 à Bologne en Italie. Tibaldo se prépare à fêter ses 12 ans le 10 octobre 1582, lorsqu'il apprend au

cours d'un exercice de traduction latine de la lettre papale, que le celui-ci a décidé un saut de le calendrier: le lendemain du jeudi 5 octobre 1582 sera dans tous les états pontificaux le vendredi 16 octobre. Déterminé à ne pas perdre sa fête d'anniversaire, Tibaldo n'hésitera pas à présenter sa requête au pape lors d'une visite que celui-ci fait dans son école... Vous saurez la suite en lisant ce charmant roman que nous livre Abner Shimony : riche de détails sur la vie de Bologne à la Renaissance, sur les études des enfants italiens issus des classes favorisées, le livre expose de plus de façon très pédagogique les origines du calendrier julien, les raisons de la réforme du pape Grégoire XIII et l'adoption du nouveau calendrier.

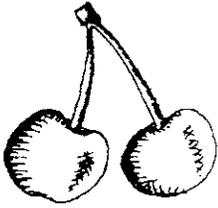
Le livre est complété par des annexes donnant des explications précises et détaillées sur les notions astronomiques essentielles (sous une forme toutefois un peu dense pour des collégiens). Le livre d'Abner Shimony, professeur émérite de physique et de philosophie à l'université de Boston est agréablement illustré de dessins en sépia de son fils Jonathan.

Pour les adultes qui s'intéressent à l'application du nouveau calendrier en France (le lendemain du vendredi 9 décembre 1582 a été le samedi 20 décembre), aux détails moins romancés, un excellent article, (Jérôme Delatour) se trouve dans le recueil d'articles de l'Ecole des Chartres "Construire le Temps, Normes et usages chronologiques du Moyen-âge à l'époque contemporaine", sous la direction de Marie Clotilde Hubert, Editions Champion, Droz, 2000 ISBN 2-900791-33-2, 24, 40 €.

Charles-Henri Eyraud

Signalez-nous des ouvrages intéressants. Prenez le temps d'en lire et d'en faire une recension pour les Cahiers.

Envoyez le tout à Martine Bobin
18, chemin des Bienfaits
91 530 Le Val Saint-Germain
martine.bobin@wanadoo.fr



Assemblée Générale de l'EAAE Formation et information à l'Observatoire de Lyon

VIE ASSOCIATIVE

Assemblée générale de l'EAAE

Elle s'est tenue le 7 avril dernier à ESTEC, en Hollande. Nous avons été accueillis dans les locaux de l'E.S.A. dans l'amphithéâtre Einstein suite aux journées de "Physics on Stage 2". Durant la matinée, les rapports d'activité ont été présentés : une brève lettre du Président Simopoulos, qui n'avait pu être présent, ceux des membres du Conseil Exécutif et des Groupes de Travail.

L'activité européenne de l'EAAE, exceptées les Ecoles d'Eté, a surtout consisté à participer à l'organisation d'opérations européennes : après "Astronomy On line" avec l'ESO, "Sea and Space", "Life In the Universe", "Physics On Stage" 1 et 2, avec l'ESO, l'ESA et le CERN. Ces organismes manquent de contacts avec les enseignants et l'EAAE est donc un partenaire nécessaire et maintenant reconnu, grâce au travail considérable effectué tout au long des dernières années par Fernand Wagner (Luxembourg).

L'EAAE compte à ce jour 278 membres dans 12 pays européens (dont 19 membres en France). Les problèmes de finances sont toujours très compliqués : on paie encore des taxes pour transférer de l'argent d'un pays à l'autre et il y a des difficultés pour faire ouvrir des comptes nationaux pour une association européenne. Il est évident que les cotisations ne peuvent suffire à financer les activités que l'Association souhaiterait avoir. Six pays ont envoyé un compte-rendu d'activité : l'EAAE a été un élément très actif, souvent moteur, en relation avec les opérations européennes décrites plus haut. L'Italie et l'Espagne ont une activité propre dans le pays, qui ressemble à celle du CLEA.

Le seul Groupe de Travail qui a maintenant une activité tout au long des dernières

années est celui de Rosa Maria Ros (Espagne), "Formation des enseignants", grâce à la ténacité et au travail remarquable de celle-ci : les Ecoles d'Eté se succèdent, se renforcent en demandes de participation, et sont intégrées dans les programmes européens Socrates, ce qui est un net progrès du point de vue des finances et un moyen de se faire connaître auprès des enseignants. Ce groupe comprend 24 membres et arrive à se réunir deux fois par an.

Le Groupe de Travail sur les "Concepts Astronomiques", après avoir réussi à organiser une conférence regroupant 300 enseignants au Portugal en novembre 1997, n'a pu continuer à travailler faute de sources de financement.

Le site Internet est géré par Anders Vasterberg (Suède) : www.eaae-astro.org
Diverses propositions ont été faites pour le rendre plus vivant et plus riche d'expériences pédagogiques.

Mogens Winther (Danemark) propose régulièrement des activités sur le Web : planètes, éclipses, comètes, aurores boréales, ...

A noter le beau site français géré par Bernard Pellequer, représentant national : <http://www.eaae-france.org>

Toute personne souhaitant adhérer à l'EAAE peut entrer en contact avec lui :
C/° GEOSPACE, Institut de Botanique -
Université Montpellier II, 163 rue Auguste
Broussonnet, 34090 MONTPELLIER
Tél : 04 67 04 02 22
Mél :
bernard.pellequer@geospace-online.com.

A la suite de ces rapports devaient se tenir les élections. Auparavant, face au constat du peu d'activités en regard des espérances qu'avait suscitées l'apparition de l'EAAE, il a été proposé que seul-e-s soient élu-e-s au Conseil Exécutif des membres actifs durant les dernières

années, habitué-e-s à travailler ensemble et portant des projets concrets, même modestes. L'équipe élue a donc été la suivante :

Président : Fernand WAGNER (Luxembourg), Vice-présidente : Rosa Maria ROS (Espagne), Trésorier : Werner WARLAND (Allemagne), Secrétaire : Josée SERT (France), Anders VASTERBERG (Suède), Giuliano CASALI (Italie), Rainer GAITZSCH (Allemagne), Felisbela MARTINS (Portugal), Margarita METAXA (Grèce). (A noter que toutes sauf deux étaient membres du Groupe de Travail "Formation des enseignants"...)

Il a été décidé de réduire le nombre des Groupes de Travail à deux : "Ecoles d'été", animé par Rosa Maria Ros et "Matériel didactique" (qui collecterait et éditerait –sur le Web, sur CDROM, ou autres- des exercices ou activités provenant des Ecoles d'été, des projets conduits avec les élèves, de la coopération avec le Service Educatif de l'ESO...), animé par Rainer Gaitzsch.

D'autre part, une commission "Projets", animée par Mogens Winther, proposerait des activités pour les élèves, des projets en collaboration au niveau européen (un par an), et travaillerait sur les concepts astronomiques.

Le premier de ces projets a été proposé par Rosa Maria Ros et finalisé avec Arntraud Bacher, qui travaille au Service Educatif de l'ESO avec Richard West. Il s'appelle "Attrapez une étoile !" s'adresse aux élèves d'établissements scolaires du 1^{er} ou du 2^d degré, et s'intégrera dans la Semaine Européenne des Sciences et de la Technologie. (c.f. encadré p. 22).

Margarita Metaxa, qui a déjà beaucoup travaillé sur le sujet, pourrait proposer un projet pour 2003 sur la pollution lumineuse.

Deux autres projets ont été évoqués par Felisbela Martins (avec Anders Vasterberg : "Ce que je pense de...", pour les jeunes enfants, en faisant intervenir les parents ; avec Rosa Maria Ros sur les cadrans solaires) et un dernier par Rosa Maria Ros : "Une photo de la Lune".

La liste de diffusion de l'EAAE sera réservée aux membres et sera donc réactualisée rapidement : si on veut (continuer à) en faire partie, il faut (re)nouveler son adhésion auprès du représentant national. C'est 10 Euros...

La prochaine Assemblée Générale devrait avoir lieu en octobre 2004, peut-être à Toulouse ou à Montpellier ?

Josée Sert

Formation et information à l'Observatoire de Lyon (Service de diffusion des connaissances)

L'Observatoire de Lyon, composante de l'Université Lyon1 est situé à Saint-Genis-Laval, à la périphérie de Lyon. Pour satisfaire un public de plus en plus nombreux qui s'intéresse à l'astronomie, il a été organisé un service orienté principalement vers la diffusion des connaissances pour pouvoir répondre à la diversité des demandes.

Activités de diffusion des connaissances

1) Relation avec le public scolaire

Ce domaine occupe principalement les personnes qui animent ce service. Et accessoirement fait appel aux personnels de l'Observatoire pour s'ajuster à la demande.

- accueil de classes - visites (générales ou à thèmes)
- parcours de découverte avec le Planétarium de Vaulx-en-Velin (tous niveaux)
- formation des enseignants : stages enseignants secondaires (par discipline et en Action culturelle) et stages enseignants primaires (dans le cadre des formations par les IEN)
- interventions dans les classes (principalement à l'occasion de la "Fête de la Science" et dans le cadre "Rencontre avec un chercheur"
- écoles d'été avec l'Observatoire de Genève
- documents pédagogiques élaboration, conception, diffusion construction de maquettes, documents <http://www-obs.univ-lyon1.fr/fc/>

documents Internet
<http://www-obs.univ-lyon1.fr/fc/spectro/wspect00.htm>

2) Autres publics

Principalement pour des groupes ou des regroupements, en semaine ou en soirée : visites (de jour, de nuit) ; portes ouvertes (biennale) ; animations de groupe à la demande.

3) Relation avec les organismes à but culturel

La mise en place et la publicité des activités se fait avec le soutien des organismes régionaux par des relations ou des participations à des instances locales : Pagode (CCSTI : Centre de Culture Scientifique et Technique PUL) ; Mairies, Conseil Général, Conseil Régional (financement).

Personnel et animateurs

- 2 astronomes y passant du temps
- 1 enseignante à mi-temps (Action Culturelle, délégation rectorale)
- 1 emploi jeune
- 1 enseignante retraitée animatrice
- participation ponctuelle d'astronomes

Infrastructure

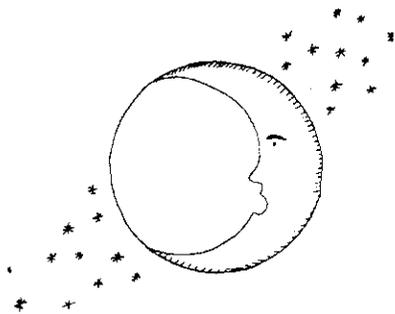
En plus des services de l'Observatoire qui occasionnellement aide aux activités, une partie du matériel est principalement affecté à ces activités.

- 1 télescope de 1 m (et aussi participation de la Société Astronomique de Lyon avec un télescope de 60 cm)
- 1 lunette équatoriale coudée (historique) en état de marche
- 1 caméra CCD (1024x1536) pour l'imagerie et la photométrie (financement MENRT) et son système d'acquisition et de traitement.

Projet

- Transformation d'un emploi jeune en permanent
- Aménagement d'une grande salle de travail et de réception (en partie financée) avec dix postes informatisés pour accueillir une vingtaine de personnes.
- Rénovation du télescope en cours.

Dominique Abouaf



Un système solaire en train de se former

Lucienne Gouguenheim

LES POTINS DE LA VOIE LACTÉE

Disques circumstellaires et planètes

On sait que les planètes se forment dans des disques de poussière entourant des étoiles jeunes, selon un mécanisme complexe, dont on ne comprend pas encore toutes les étapes, et qui démarre par un processus de collisions des petites particules de poussière qui s'agglomèrent entre elles. Ceci explique l'importance que revêtent les observations de disques de poussière ayant des structures étendues, pour nous permettre de comprendre comment se forment les étoiles similaires au Soleil avec leurs systèmes planétaires.

Cependant, le disque circumstellaire est trop peu brillant, comparé à l'étoile centrale, pour qu'on puisse en obtenir une image. Il se révèle seulement quand il est vu à peu près par la tranche ; dans ce cas, la lumière de l'étoile centrale est masquée par les grains de poussière du disque ; ceux des grains qui sont situés un peu au-dessus ou un peu au-dessous du plan moyen du disque diffusent la lumière et l'on observe une image typique, constituée d'une bande obscure entourée de deux nébuleuses à réflexion.

Le premier exemple connu de ce type de structure est l'objet dénommé HH 30 IRS, situé dans le nuage obscur du Taureau, à une distance de 500 années de lumière. Il a été observé par le télescope spatial Hubble en 1996. On a ultérieurement observé plusieurs disques circumstellaires dans le proche infrarouge, avec des télescopes au sol, soit dans de très bonnes

conditions de formation des images (très faible turbulence), soit en utilisant un procédé qui améliore la qualité des images : optique adaptative ou interférométrie des tavelures.

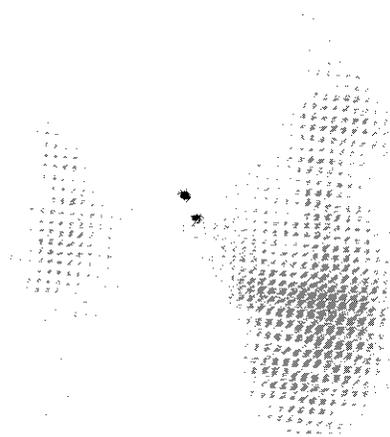


fig. 1

Un exemple est donné dans la fig. 1 : il s'agit d'une observation effectuée par le VLT de l'ESO dans la nébuleuse d'Orion. On voit un disque sombre qui se détache sur le fond de lumière de la nébuleuse : les taches diffuses brillantes que l'on observe de part et d'autre trahissent la présence d'une étoile, dont le rayonnement est diffusé par les grains de poussière du disque. Des observations complémentaires avec le télescope Hubble montrent des indices de la présence de condensations protoplanétaires au sein du disque, dont l'extension est trente fois celle de notre système solaire.

Une découverte surprenante

L'an dernier un groupe d'astronomes autour de Nicolas Grosso ont cherché à identifier de nouvelles sources de rayons X découvertes par les satellites XMM, de l'Agence spatiale européenne, et Chandra, de la NASA, en les observant dans le proche infrarouge au moyen du télescope NTT de l'ESO de 3,4 mètres d'ouverture. Ils ont porté en particulier leur attention sur des sources situées dans le nuage obscur Rho Ophiuchi, qui est l'une des régions de formation d'étoiles la plus proche de nous dans la constellation d'Ophiuchus, à une distance de 500 années de lumière, et découvert un nouveau disque circumstellaire avec la structure habituelle d'une bande obscure entourée de deux nébuleuses à réflexion. Pour confirmer cette découverte et l'approfondir, ils ont observé l'objet toujours dans le proche infrarouge, au moyen du télescope ANTU du VLT de 8,2 mètres d'ouverture, dans de très bonnes conditions de formation des images (avec une résolution de 0,4 μ). En regardant l'image des deux nébuleuses à réflexion et de la bande de poussière, maintenant résolue, Nicolas Grosso et ses collègues ont décidé d'une seule voix de la baptiser : "la soucoupe volante" !

Un objet nouveau

Dans cette région Rho Ophiuchi, on connaît plusieurs exemples de nébuleuses à réflexion entourant une bande obscure ; on devine qu'elles sont produites par des étoiles jeunes, mais ces étoiles ne s'observent pas, parce qu'elles sont enfouies profondément à l'intérieur du nuage sombre. Ce sont essentiellement des protoétoiles, âgées d'environ 100 000 ans, entourées d'un résidu du nuage qui leur a donné naissance.

L'objet qui vient d'être découvert est différent : c'est une étoile nettement plus vieille, d'environ un million d'années et dans un état d'évolution plus avancé. On observe à la périphérie du nuage sombre un disque moins obscurci que l'étoile elle-même, toujours invisible. Ce disque circumstellaire a un rayon de 300 années de lumière, soit 5 fois le rayon de l'orbite de Neptune.

La modélisation du phénomène conduit à évaluer à 4° l'angle d'inclinaison du disque par rapport à la ligne de visée ; la masse totale du disque circumstellaire est environ deux fois celle de Jupiter ; l'analyse spectrale de la lumière réfléchie, dans le visible et l'infrarouge, permet de décrire les propriétés de l'étoile centrale : elle aurait une température superficielle d'environ 3 000 K et une luminosité d'environ 40 % de celle du Soleil.

Tout cela fait dire à Nicolas Grosso que la "soucoupe volante" nous donne un bon portrait de ce qu'à pu être notre système solaire au moment de sa formation.

Les projets

Ce disque étant situé à la périphérie du nuage obscur, il devrait être possible de l'observer dans le domaine millimétrique, où rayonne le gaz qui le constitue : de telles observa-

tions fourniront des informations sur les processus chimiques qui s'y produisent ainsi que sur le champ des vitesses, ce qui permettra de déterminer la masse de l'étoile centrale.

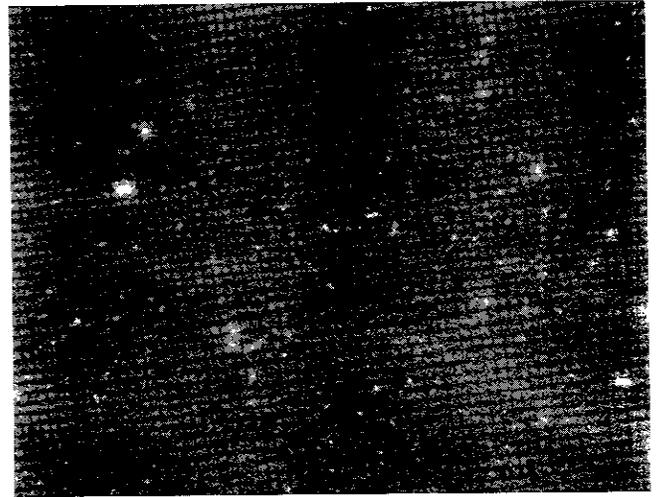


fig. 2 : observation de la "soucoupe volante" effectuée avec le télescope ANTU de 8,2 m d'ouverture du VLT. Le disque circumstellaire se manifeste par l'ombre qu'il porte sur la nébuleuse. On voit aussi dans le champ plusieurs galaxies.

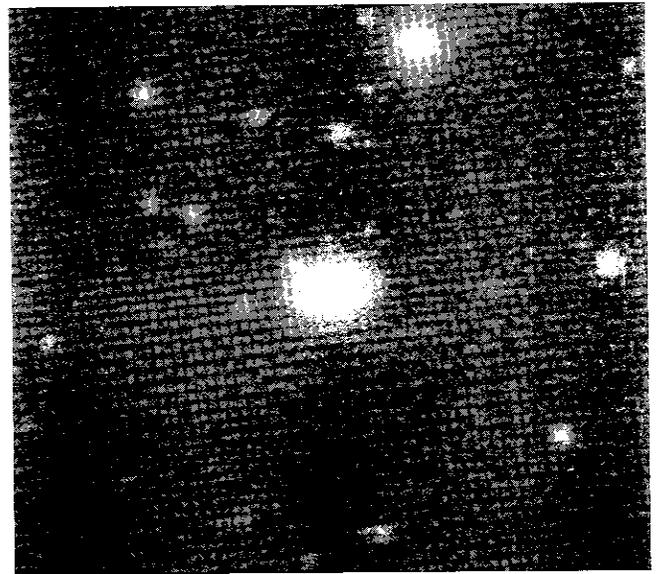


fig. 3 : gros-plan de l'objet

Sources :

Les photos ont été prises sur le site de l'ESO :

<http://www.eso.org/outreach/press-rel/pr-2001/phot-03-01.html>

<http://www.eso.org/outreach/press-rel/pr-2002/pr-09-02.html>

Transparents animés pour rétroprojecteurs

(8 €)

- T1** Le TransSoluTe
(phases de la Lune et éclipses)
- T2** Les fuseaux horaires

Filtres colorés

Six feuilles de filtres colorés et
une feuille de réseaux (11 €)

CD Rom CLEA 2000

Sciences physiques en seconde
Programme 2000 (8 €)

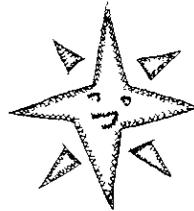
DIAPPOSITIVES

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

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

Publications du **CLEA**

Il faut être adhérent pour se procurer les
publications du CLEA. Les prix indiqués,
en euros, le sont port compris



Toute commande de documents est à
envoyer au siège du CLEA.
Laboratoire d'Astronomie, bât. 470
Université Paris Sud 91405 Orsay cedex

Chèques à l'ordre du CLEA.

Les fiches d'activités pédagogiques du CLEA

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

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

Cours polycopiés d'astrophysique

Maîtrise de l'université
Paris XI Orsay

- P1**
Astrophysique générale (10 €)
- P2**
Processus de rayonnement (5 €)
- P3**
Structure interne
et évolution des étoiles (5 €)
- P4**
Astrophysique solaire (5 €)

CONDITIONS D'ADHESION ET D'ABONNEMENT POUR 2002

| | |
|--|------|
| Cotisation simple au CLEA pour 2002 | 5 € |
| Abonnement simple aux CAHIERS CLAIRAUT n° 97 à 100 | 25 € |
| Le numéro des Cahiers Clairaut | 7 € |
| COLLECTIONS DES CAHIERS CLAIRAUT des années antérieures : | |
| 14 € par an du début (1978) à 1997 | |
| 17 € par an à partir de 1998 | |

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

CLEA Laboratoire d'astronomie, bât 470
Université de Paris Sud
91405 ORSAY Cedex
Tél / Fax : 01 69 15 63 80
adresse électronique : clea.astro@astro.u-psud.fr
adresse du site du CLEA : www.ac-nice.fr/clea

Publications

FASCICULES POUR LA FORMATION DES MAITRES EN ASTRONOMIE

| | |
|---|------|
| 1 - L'observation des astres, le repérage dans l'espace et le temps | 7 € |
| 2 - Le mouvement des astres | 8 € |
| 3 - La lumière messagère des astres | 9 € |
| 4 - Naissance, vie et mort des étoiles | 10 € |
| 6 - Univers extragalactique et cosmologie | 9 € |
| 7 - Une étape de la physique, la Relativité restreinte | 16 € |
| 8 - Moments et problèmes dans l'histoire de l'astronomie | 10 € |
| 9 - Le système solaire | 14 € |
| 10 - La Lune | 10 € |
| 11 - La Terre et le Soleil | 12 € |
| 12 - Simulation et astronomie sur ordinateur | 8 € |

Publication du planétarium de Strasbourg
LSO. Catalogue des étoiles les plus brillantes :
toutes les données disponibles du Centre des Données Stellaires de l'Observatoire
de Strasbourg concernant 2 000 étoiles visibles à l'oeil nu
Commande à adresser au service librairie du Planétarium de Strasbourg

Directrice de la publication : Lucienne Gouguenheim
Imprimerie Hauguel, 92240 Malakoff

dépôt légal : 1^{er} trimestre 1979
numéro d'inscription CPPAP : 61660
prix au numéro : 7 €