

bulletin du comité de liaison enseignants et astronomes

# Les Cahiers Clairaut

Lect  
pour  
et se  
DIS  
RE  
d'o  
Ar  
fo  
Réfle  
déb  
Info  
élève  
Vie  
Tex  
exerc  
Articles  
Les potins de la Voie lactée



numéro 99 - AUTOMNE 2002

ISSN 0758-234X

# Comité de liaison enseignants astronomes

## Le CLEA

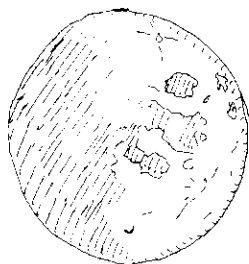
Le CLEA, Comité de Liaison Enseignants et Astronomes, est une association déclarée (loi de 1901). Elle réunit des enseignants et des astronomes professionnels qui veulent ensemble promouvoir l'enseignement de l'astronomie à tous les niveaux de l'enseignement et dans les organismes de culture populaire. 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 80  
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

Nous joignons à ce numéro un questionnaire sur les Cahiers Clairaut, afin de mieux cerner vos attentes et améliorer le bulletin grâce à vos idées.

Nous comptons sur votre participation pour toucher de nouveaux lecteurs afin d'enrayer la diminution lente mais régulière du nombre d'abonnés et souhaitons avoir dépouillé vos réponses rapides avant l'A.G.

**L'Assemblée Générale du CLEA  
aura lieu cette année à Orléans  
le dimanche 24 novembre 2002.**

J.L. Atteia et R. Mochkovitch nous offrent un bel exposé sur les sursauts  $\gamma$ , tandis que Juan Zorec finit de nous décrire les intéressantes propriétés des étoiles Be. Christian Scotta conclut son étude approfondie sur Copernic et Charles-Henri Eyraud nous parle avec enthousiasme de l'école d'été de l'EAAE qui a eu lieu en Laponie en juillet. Catherine Vignon et Marie-Claude Paskoff nous font partager leurs lectures.

Le Cahier Pédagogique de 20 pages, que nous espérons publier à chaque numéro d'automne, propose des articles de tous niveaux. Vous y reconnaitrez, parmi les auteurs, des membres du Comité de Rédaction (Francis Berthomieu, Martine Bobin, Pierre Causeret et Frédéric Dahringher). Dominique Balin, qui depuis décembre 2001 s'occupe de l'envoi de nos publications, présente ici un travail fort intéressant pour le primaire.

La récente école d'été au col Bayard, organisée par le CLEA en dehors des instances officielles, a été une belle réussite. Nous en parlerons plus en détail dans le numéro 100 et vous pouvez déjà consulter le site.

N'hésitez pas à adresser à la Rédaction la relation de vos interventions dans l'enseignement de l'astronomie. Nous vous souhaitons à tous une excellente rentrée.

La Rédaction

# Les Cahiers Clairaut

Automne 2002 n° 99



## Article de fond

- Les sursauts  $\gamma$  p. 2  
Les étoiles Be p. 7



## Histoire

- Nicolas Copernic p. 10



## Vie associative

- p. 17



## Lectures pour la Marquise

- p. 20

## Cahier pédagogique



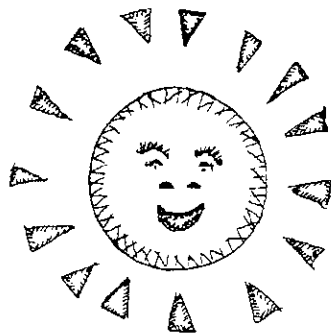
- Construire (encore !)  
un cadran solaire  
à l'école primaire p. II

- Spectro pour débutants  
p. VI

- Des masses, des poids  
et des planètes p. X

- Construction d'un pla-  
nétaire héliocentrique  
à l'aide de Géoplan  
p. XI

- Les maths dans le  
calendrier :  
le calendrier perpétuel  
p. XV



# Les sursauts $\gamma$

J.L. Atteia, CESR

Robert Mochkovitch, IAP

ARTICLE DE FOND

Les auteurs nous offrent un exposé très complet des connaissances actuelles sur les sursauts  $\gamma$ , sujet aussi difficile que passionnant. Après un bref historique ils nous explicitent les propriétés que l'on peut dégager de l'observation.

Les modèles théoriques de sursauts  $\gamma$  seront développés dans le CC n° 100.

## Introduction et historique

Les sursauts gamma sont des éclairs de rayonnement gamma, à la fois brefs et très puissants, qui atteignent chaque jour la Terre. L'origine de ce phénomène astrophysique remarquable est restée longtemps mystérieuse puisque c'est seulement à partir de 1997 que les astrophysiciens ont véritablement espéré résoudre l'énigme posée par ces sources qui les intriguaient depuis le début des années 1970. Ces longues années d'études et d'observations ont donné lieu à de multiples tâtonnements, fausses pistes et rebondissements et représentent sans doute l'un des feuilletons scientifiques les plus passionnants de la fin du 20<sup>e</sup> siècle, illustrant parfaitement les incertitudes de la recherche scientifique.

La découverte proprement dite des sursauts a été le fruit du hasard. Ce sont les satellites militaires américains de la série Vela lancés dans les années 1960 qui, les premiers, observèrent des bouffés intenses de rayons gamma en provenance de l'espace. Après quelques années d'observation, et ayant constaté que ces événements provenaient bien de sources célestes et non d'explosions nucléaires provoquées par

l'homme dans l'espace, les militaires confièrent le problème aux astrophysiciens...

Dès la parution en 1973 de l'article mentionnant la découverte des sursauts plusieurs groupes, aux Etats Unis, en France et en Union Soviétique, se lancèrent dans la réalisation de détecteurs pour les observer. Dans la lignée des détecteurs militaires, les instruments scientifiques des années 1980 et 1990 étaient relativement simples. Ils ne fournissaient pas d'emblée la direction des sursauts, mais deux techniques permettaient de la reconstruire a posteriori. La première donnait une idée grossière de la direction des sources par la comparaison des flux de photons tombant sur des détecteurs ayant des orientations différentes. Elle a été longtemps utilisée par les russes, puis plus récemment par les américains avec l'expérience BATSE. La seconde était basée sur la mesure exacte du temps d'arrivée du sursaut sur plusieurs satellites répartis dans le Système Solaire. Cette seconde méthode offrait une précision bien supérieure (de l'ordre de la minute d'arc), mais elle avait l'inconvénient de faire appel aux données de plusieurs satellites (d'équipes souvent concurrentes), ce

qui explique qu'un délai de plusieurs semaines était en général requis pour obtenir les positions finales. En France, le CESR (Centre d'Etude Spatiale des Rayonnements) s'est particulièrement impliqué dans cette seconde voie avec pour objectif l'obtention de positions fiables. Ces travaux ont abouti, à la fin des années 1980 à la publication d'un important catalogue de positions précises de sources.

Malgré ces efforts, les sursauts gamma ne semblaient pouvoir être associées à aucun objet bien identifié (pulsars, quasars, sources X, étoiles variables). Les boîtes d'erreur restaient désespérément vides, comme si une fois le sursaut passé, ne subsistait aucune trace de la source qui l'avait produit... En plus de cette absence têtue de lien avec des objets connus, deux observations troublaient les astrophysiciens. Il s'agissait de l'isotropie de la distribution des sursauts sur le ciel et de l'absence d'émission X permanente en provenance des sources. L'isotropie posait problème car elle ne reflétait pas la célèbre structure aplatie de notre Galaxie. Il fallait donc supposer que les sursauts se produisaient tout près du Soleil (à quelques centaines de parsecs tout au plus). Mais alors pourquoi ne voyait-on pas les sources en rayons X alors que ces radiations avaient déjà permis la découverte de plusieurs populations nouvelles d'étoiles à neutrons dans toute la Galaxie.

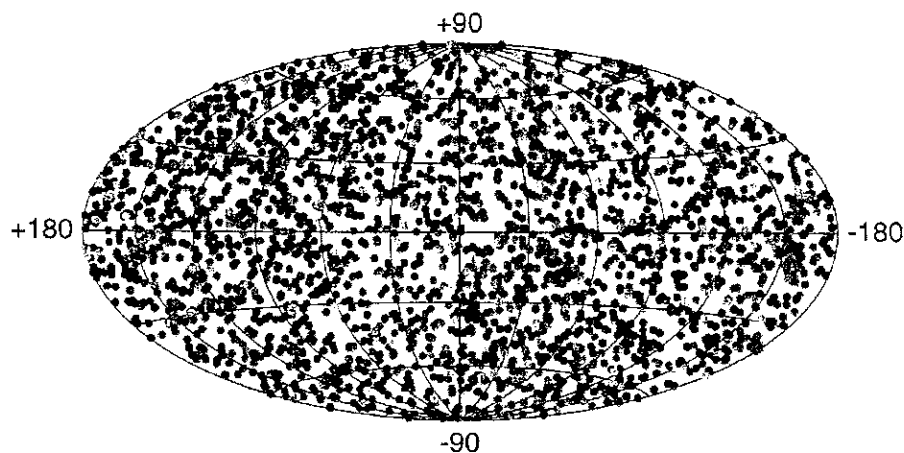
En dépit de ces questions la majorité des astrophysiciens demeurait convaincue que le lien finirait par être établi entre les sursauts et une sous-population particulièrement discrète d'étoiles à neutrons ou de trous noirs de notre Galaxie<sup>1</sup>. C'est pourquoi les premières observations de BATSE étaient attendues avec impatience. Cet instrument, placé sur le gros satellite américain d'astronomie gamma Compton GRO, emportait des détecteurs 10 à 20 fois plus sensibles que tous ceux qui avaient volé auparavant. Il ne faisait aucun doute que si les sursauts étaient situés dans notre Galaxie, BATSE les détecterait dans un grand volume et produirait enfin une carte les montrant concentrés dans le plan du disque galactique...

## Les observations

### Propriété globales.

Les premiers résultats de BATSE tombèrent six mois environ après le lancement. La carte de la distribution sur le ciel des 153 premiers sursauts (BATSE "voit" environ un événement par jour) fut publiée dans le journal "Nature" en Janvier 1992. Elle ne laissait pas plus entrevoir la structure galactique que toutes celles qui l'avait précédée. Après la publications de ces observations il fallut donc abandonner définitivement l'idée d'une genèse des sursauts au sein de notre Galaxie. A la fin de la mission, après neuf ans de fonctionnement, le nombre de sursauts vus par BATSE dépasse 2700 et la carte obtenue (fig. 1) continue à ne montrer aucun écart significatif à l'isotropie.

## 2704 BATSE Gamma-Ray Bursts



**fig. 1 : distribution de tous les sursauts vus par l'expérience BATSE. Il n'y a aucun écart mesurable à l'isotropie.**

Les données de BATSE contenaient par ailleurs une autre information capitale, relative cette fois à l'homogénéité de la distribution des sursauts.

La relation  $\text{Log } N - \text{Log } P$  qui donne le nombre d'événements plus brillants qu'un flux donné  $P$  de photons est simplement une droite de pente  $-3/2$  dans le cas de sources réparties de manière homogène dans un espace euclidien. Les données de BATSE suivaient effectivement une droite de pente  $-3/2$  pour les sursauts brillants mais présentaient un "manque" significatif de sursauts faibles. Cette observation pouvait s'interpréter de deux façons différentes: la première consistait à supposer que les sursauts restaient des objets relativement proches appartenant à un grand halo sphérique centré sur notre Galaxie. L'absence de composante dipolaire détectable dans la répartition des sources sur le ciel (alors que le Soleil se trouve à 8 kpc du centre de la Galaxie) imposait par ailleurs à ce halo d'avoir un rayon dépassant 100 kpc. Dans cette hypothèse, l'écart à la droite de pente  $-3/2$  traduisait simplement la diminution du nombre de sources à la périphérie du halo. L'autre possibilité était bien sûr de placer les sursauts à distance cosmologique. L'isotropie était alors naturellement expliquée : à des décalages vers le rouge  $z$  voisins de l'unité, la forme de la courbe  $\text{Log } N - \text{Log } P$  s'interprétait par des effets cosmologiques.

Le débat entre tenants de ces deux explications est resté vif pendant 5 ans avant qu'en 1997 les observations du satellite "Beppo" SAX conduisent à la première mesure de distance pour un sursaut et confirment l'hypothèse cosmologique.

## Propriétés temporelles.

Les sursauts gamma sont des événements intrinsèquement courts mais dont la durée couvre malgré tout six ordres de grandeur depuis quelques millisecondes jusqu'à mille secondes environ. L'histogramme des durées présente deux pics bien définis, le premier autour de quelques dixièmes et le second autour de quelques dizaines de secondes.

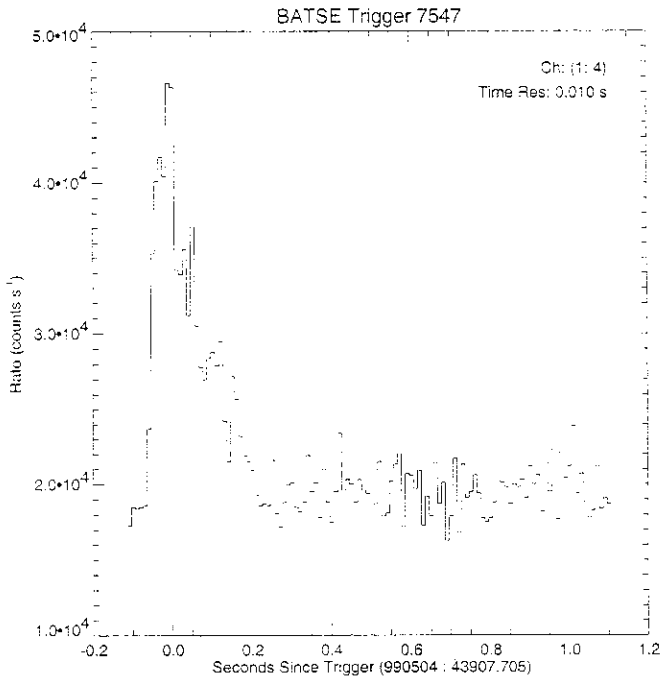


Figure 2a : Exemple de sursaut court

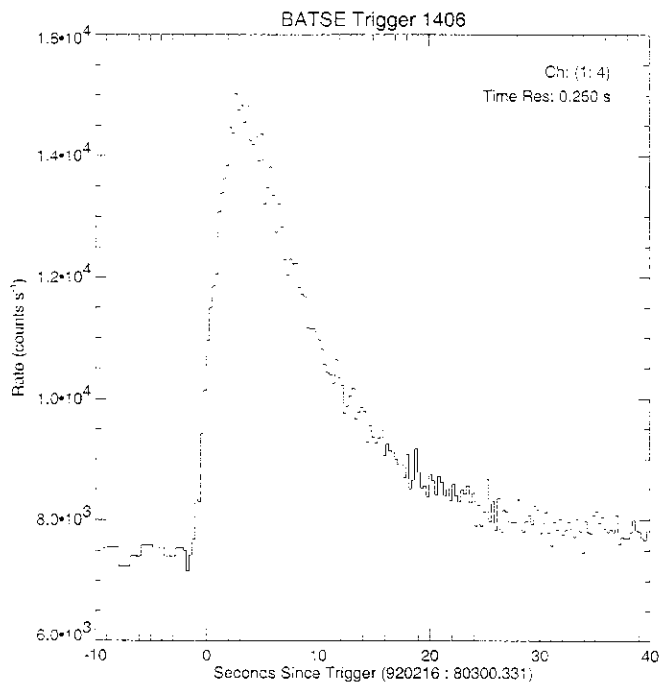


Figure 2b : Exemple de sursaut long simple

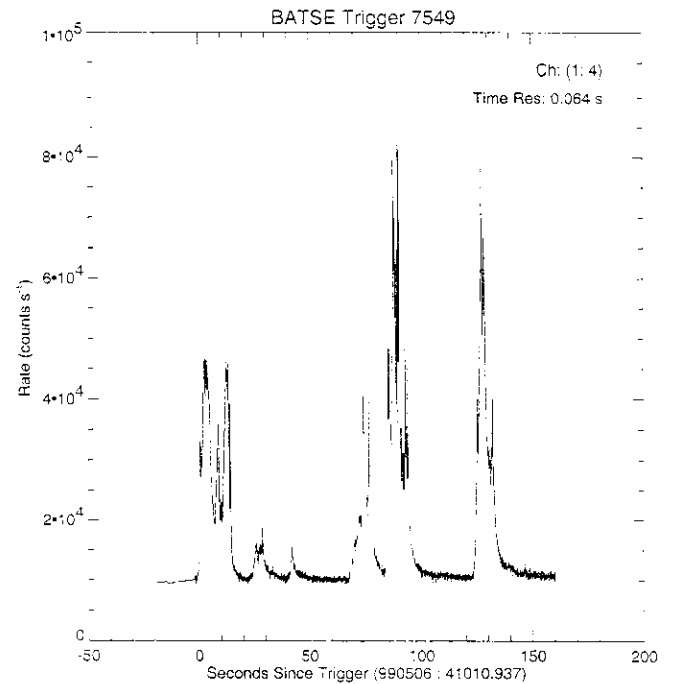


Figure 2c : Exemple de sursaut long complexe

Cette séparation nette pourrait indiquer des origines différentes pour les sursauts courts et les sursauts longs mais cette question reste encore largement débattue.

Les profils temporels des sursauts montrent par ailleurs une très grande diversité (fig. 2a - 2b - 2c). Certains présentent une évolution simple avec un pulse unique d'intensité. La montée est en général rapide et le déclin quasi-exponentiel ce qui a conduit à qualifier de "FRED" pour "Fast Rise Exponential Decay" ce type de profil. D'autres sont beaucoup plus complexes avec une succession de pics bien séparés ou au contraire se chevauchant partiellement. Ils peuvent le plus souvent être analysés en terme d'une superposition de pulses élémentaires chacun étant de type "FRED". La variabilité temporelle est rapide, et peut être présente à de nombreuses échelles à l'intérieur d'un même sursaut. Dans certains cas, elle atteint le niveau de la milliseconde.

## Propriétés spectrales.

Le spectre des sursauts gamma est non thermique c'est à dire différent d'un corps noir. Entre 10 keV et quelques MeV, il peut, dans la majorité des cas, être caractérisé par un collage de deux lois de puissance

$$N(E) \propto E^{-\alpha} \text{ pour } E < E_0 \text{ et } N(E) \propto E^{-\beta} \text{ pour } E > E_0$$

où  $N(E)$  est la densité de flux des photons reçus (en photons.cm<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> keV<sup>-1</sup>). Les valeurs caractéristiques des indices spectraux  $\alpha$  et  $\beta$  sont  $0,6 < \alpha < 1,5$  et  $2 < \beta < 3$  et l'énergie de transition  $E_0$  est de l'ordre de quelques centaines de keV. Au-dessus de 500 keV seule une fraction des sursauts émet

de manière notable et dans quelques cas le spectre en loi de puissance se poursuit au-delà de 10 MeV. A beaucoup plus haute énergie quelques sursauts ont été détectés par l'expérience EGRET également à bord de Compton GRO. Des photons de plusieurs GeV ont été observés parfois longtemps après la fin de l'émission gamma classique. Le record<sup>2</sup> en ce domaine appartient à GRB 9402172 où un photon de 18 GeV a été détecté 5000 s après la fin du sursaut. A basse énergie, l'émission X entre 2 et 10 keV prolonge l'émission gamma tout en continuant à suivre un spectre proche d'une loi de puissance. Par contre aucune information n'est aujourd'hui disponible sur les domaines UV et X très mou et ce n'est que dans le visible que des observations sont à nouveau disponibles.

La présence ou l'absence de raies dans le spectre des sursauts a fait l'objet de nombreuses controverses. Certaines expériences russes et le satellite japonais GINGA indiquaient l'existence "d'accidents spectraux" qui furent interprétés comme des raies cyclotron (à quelques dizaines de keV) ou d'annihilation électron-positron vers 500 keV. Aucune de ces raies ne fut confirmée par l'expérience BATSE pourtant plus sensible, de sorte que leur réalité est aujourd'hui fortement contestée. Cette question est tout à fait critique car la plupart des modèles actuels cherchant à expliquer l'émission gamma des sursauts sont incompatibles avec la présence de raies cyclotron ou d'annihilation électron-positron.

### Liens entre les propriétés temporelles et les propriétés spectrales.

La recherche de liens entre les propriétés temporelles et les propriétés spectrales des sursauts revêt une grande importance car celles-ci fournissent souvent des tests contraignants pour les modèles. La relation la mieux établie analyse la dureté des sursauts en fonction de leur durée. La dureté est définie comme le rapport du nombre de photons reçus dans deux bandes d'énergie différentes. La fig.3 montre ainsi les résultats de l'expérience PHEBUS qui utilise les bandes 120 - 320 keV et 320 - 7000 keV. Une nette distinction apparaît, séparant les sursauts courts (de durée  $t < 2$  s) qui sont globalement plus durs que les sursauts longs ( $t > 2$  s). Le même type de relation est retrouvée en utilisant d'autres bandes spectrales, en particulier celles de l'expérience BATSE.

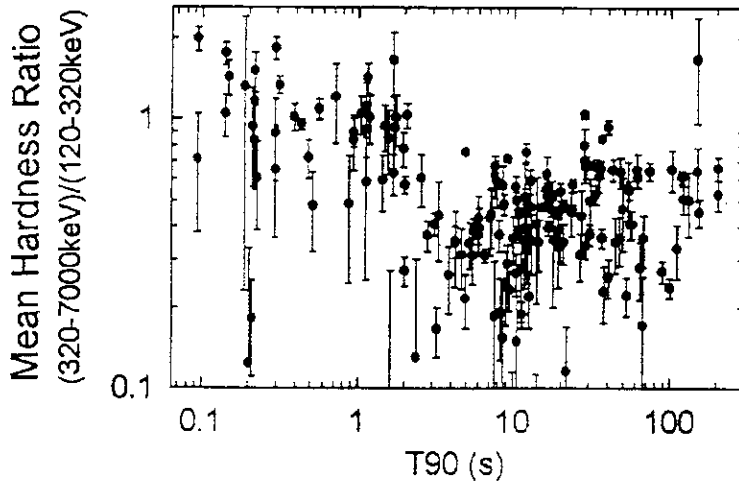


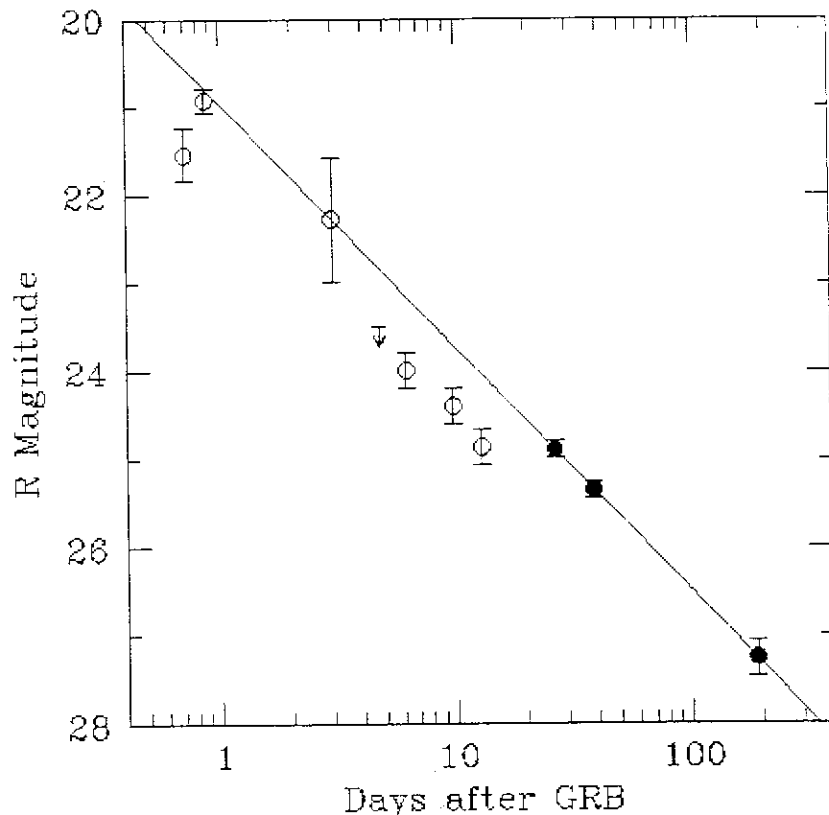
fig. 3 : Relation durée - dureté pour un échantillon de sursauts observés par l'expérience PHEBUS.

La relation durée-dureté concerne la dureté globale du sursaut prenant en compte l'ensemble des photons reçus. Il est également possible d'obtenir la dureté "instantanée" en découpant le sursaut en un certain nombre d'intervalles de temps sur lesquels la dureté est mesurée individuellement. La dureté instantanée apparaît fortement corrélée à l'intensité tout au long du sursaut mais à l'intérieur des pulses le maximum de dureté précède légèrement le maximum d'intensité. La forme des pulses évolue également en fonction de l'énergie d'observation. Leur largeur suit une loi de la forme  $W(E) \propto E^{-0.4}$  de sorte qu'ils sont environ deux fois plus minces à 300 keV qu'à 50 keV.

### Les contreparties à plus basse énergie.

Pendant la période qui suivit l'annonce des résultats de BATSE il devint clair que la controverse qui persistait sur l'échelle de distance des sursauts ne pourrait être levée que par l'observation de contreparties à basse énergie, en particulier dans le domaine visible. La recherche de contreparties à partir des observations gamma était virtuellement impossible en raison de la dimension des boîtes d'erreur (plusieurs degrés pour BATSE). A l'intérieur de plusieurs degrés le nombre d'objets détectables par un grand télescope est en effet si important qu'une éventuelle contrepartie n'avait que très peu de chance d'être retrouvée. Les boîtes d'erreur plus petites obtenues par triangulation entre plusieurs satellites étaient quant à elles disponibles trop tardivement pour détecter une source rapidement déclinante. Le satellite italo-néerlandais "Beppo" SAX (du nom du physicien italien Giuseppe "Beppo" Occhialini) lancé en Avril 1996 a enfin permis de résoudre le problème. Doté à la fois d'un détecteur de sursauts gamma et de télescopes X, il tira parti de la résolution voisine de la minute d'arc accessible dans le domaine X pour donner en moins d'une heure la position précise des sursauts qu'il détectait. Il devenait alors possible de rechercher une contrepartie optique à l'aide de grands télescopes et la première fut effectivement découverte le

28 Février 1997. Il s'agissait d'un objet initialement de magnitude 21 mais faiblissant rapidement. Le flux déclinait en suivant une loi de puissance  $F \propto t^{-1,2}$  en accord avec des prédictions théoriques antérieures à l'observation (fig.4). La contrepartie était entourée d'une nébulosité à peine visible qui, s'il s'agissait de la galaxie hôte du sursaut, indiquait que l'objet se trouvait à très grande distance. L'hypothèse d'une origine cosmologique des sursauts était confortée mais manquait encore une preuve plus directe.



**Figure 4 : Courbe de lumière (dans le rouge) de l'afterglow du sursaut GRB 970228.**

**L'évolution est proche d'une droite en coordonnées Log -- Log (la magnitude étant une échelle logarithmique) ce qui correspond à un déclin en loi de puissance.**

Celle-ci est venue deux mois plus tard avec l'observation du sursaut GRB970508. Le spectre de sa contrepartie optique obtenu avec le télescope Keck II (de 10 m de diamètre) a en effet montré la présence de fines raies d'absorption du fer et du magnésium affecté d'un décalage vers le rouge  $z = 0,835$ . Ces raies sont la trace de la présence sur la ligne de visée de gaz appartenant probablement à la galaxie hôte, située à plusieurs milliards d'années-lumière. Depuis lors, une dizaine d'autres décalages ont été mesurés entre  $z = 0,42$  et  $z = 4,5$  confirmant de manière quasi-définitive<sup>3</sup> l'échelle de distance cosmologique pour les sursauts.

Les contreparties découvertes grâce à "Beppo" SAX correspondent à des émissions postérieures au sursaut gamma proprement dit et ont été baptisées "afterglows" par les anglo-saxons. Selon les cas elles peuvent être étudiées de quelques semaines à quelques mois (le record appartenant à GRB970228 dont la courbe de lumière a été suivie pendant près de six mois) avant de devenir inobservables.

Des contreparties radio ont également été détectées et celle du sursaut GRB970508 a donné lieu à un résultat tout à fait remarquable. La source radio associée au sursaut a d'abord présenté des scintillations qui ont cessé au bout d'une semaine environ. Les scintillations sont dues aux fluctuations de densité électronique dans le milieu interstellaire et se manifestent tant que la dimension angulaire de la source n'excède pas une certaine limite (de la même manière que les étoiles scintillent mais pas les planètes). L'estimation de la taille angulaire de GRB970508 après une semaine a ainsi montré que le gaz émetteur devait être en expansion relativiste sans qu'il soit cependant possible de déterminer de façon précise son facteur de Lorentz.

Un autre type de contrepartie optique fut enfin découvert sur le sursaut GRB990123 situé à  $z = 1,6$ . Moins de 5 secondes après sa découverte par BATSE, et grâce à un réseau d'alerte sophistiqué, il put être pointé par une caméra automatique à grand champ quiregistra une émission de lumière visible atteignant la magnitude 9. Si le sursaut s'était trouvé dans notre Galaxie, à une distance de 1000 années-lumière par exemple, son éclat aurait dépassé pendant quelques secondes celui du Soleil !!! Cette émission très précoce, contemporaine de l'émission gamma, est mal comprise mais a probablement une cause différente de celle de l'afterglow.

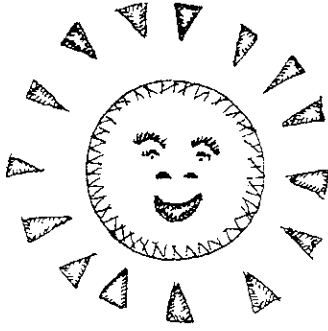
#### Notes

1 - Il faut malgré tout souligner que certains astronomes, plus audacieux ou perspicaces que leurs collègues, suggéraient déjà que les sursauts puissent provenir des confins de l'Univers, et correspondre à des explosions plus fantastiques encore que celles des supernovae.

2 - La notation utilisée donne la date du sursaut. Ainsi GRB 940217 est le sursaut (Gamma-Ray Burst) du 17 Février 1994.

3 - Un des sursauts détecté par "Beppo" SAX pourrait malgré tout être associé à une supernova relativement proche à  $z \sim 0,01$ .





# Les étoiles Be

Juan Zorec, I.A.P.

ARTICLE DE FOND

A l'issue de la seconde partie de cet article qui décrit les propriétés des étoiles chaudes de type spectral B, caractérisées par des raies d'émission, une interrogation subsiste encore : la faculté de produire des enveloppes circumstellaires est-elle un stade obligé de l'évolution des étoiles B ou liée à des conditions particulières au moment de la formation de l'étoile ?

## Le spectre infrarouge

### Spectre des raies

Parmi les caractéristiques spectrales les plus intéressantes dans l'infrarouge des étoiles Be, on remarque la présence des raies en émission des séries supérieures de l'hydrogène, notamment la série de Paschen.

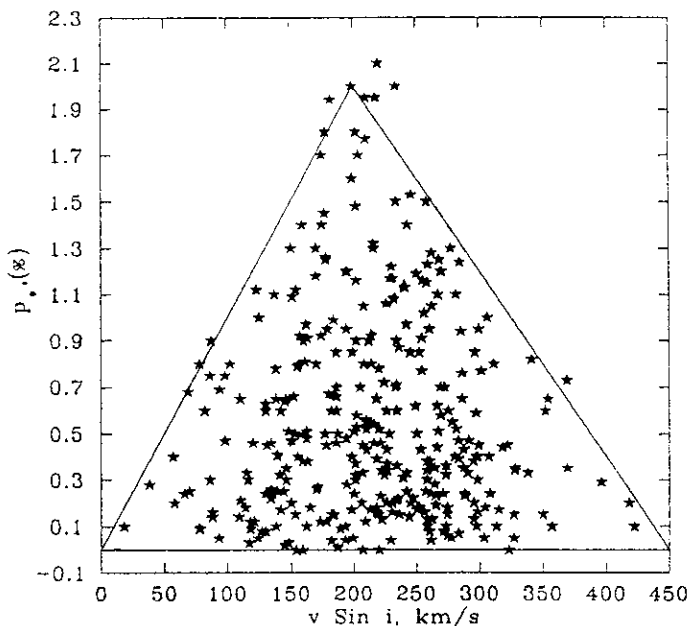
Tandis que les émissions dans le visible sont le plus souvent vues seulement dans les trois premières raies de Balmer ( $H\alpha$ ,  $H\beta$ ,  $H\gamma$ ), l'émission dans la série de Paschen est très intense et elle va de  $Pa\alpha$  ( $\lambda$  18751 Å) jusqu'à  $Pa20$  ( $\lambda$  8392 Å) et quelquefois jusqu'à des termes encore plus élevés. L'émission dans les raies de Paschen n'est pourtant visible que dans les étoiles Be plus chaudes que B6. Pour chacune des raies de Paschen on trouve aussi une corrélation entre sa largeur à mi-hauteur et le  $V_{\sin i}$ . La région de formation des émissions dans les raies de Paschen, telle qu'elle est obtenue en utilisant la relation de Huang, est en moyenne plus proche de l'étoile centrale que celle des émissions dans la série de Balmer.

## Spectre continu

Pour caractériser la distribution d'énergie dans l'infrarouge, on peut se limiter à deux longueurs d'onde : 3,5  $\mu\text{m}$  et 12  $\mu\text{m}$ . Le rayonnement dans ces deux longueurs d'onde semble être thermique, produit notamment par les transitions libre-libre et libre-lié de l'hydrogène. Il n'y a pas de trace de contribution due aux grains de poussière. L'excès du flux à 3,5  $\mu\text{m}$  d'une étoile Be, mesuré à partir du niveau du flux du rayonnement continu d'une étoile B du même type spectral, n'est jamais supérieur à 2 mag. Il est statistiquement plus fort pour les étoiles Be les plus chaudes et il décroît progressivement vers les étoiles Be plus froides, pour atteindre un maximum de 0,5 mag dans les B9e. Cet excès est légèrement supérieur à la longueur d'onde de 12  $\mu\text{m}$ . Les derniers travaux sur ces excès de flux dans les étoiles Be ne signalent aucune corrélation significative entre ces excès et le  $V_{\sin i}$ . Si l'enveloppe circumstellaire était fortement aplatie, comme le supposent un bon nombre d'auteurs, les excès de flux à 3,5  $\mu\text{m}$  et à 12  $\mu\text{m}$  devraient être plus intenses dans les étoiles Be avec un  $V_{\sin i}$  petit.

## La polarisation

On mesure le plus souvent dans les étoiles Be la polarisation linéaire à la longueur d'onde de la magnitude V. Les mesures montrent que la valeur supérieure dans les étoiles Be classiques est  $p = 2\%$  dans les plus chaudes et que celle-ci décroît dans les plus froides. Elle n'est que  $p = 0.5\%$  parmi les B9e. La polarisation est produite par la dispersion des photons provoquée par les électrons libres dans une enveloppe asymétrique. Elle a donc toutes les chances d'être plus élevée parmi les étoiles les plus chaudes, où le volume ionisé de l'enveloppe circumstellaire est plus grand. Si les enveloppes étaient véritablement très aplaties, elle devrait être aussi plus significative pour les étoiles Be vues dans le plan de l'équateur, donc celles avec un  $V \sin i$  plus grand. Or, dans un diagramme où sont portées les valeurs observées de la polarisation en fonction du  $V \sin i$ , elles se situent dans un triangle.



**Figure 8 :**

Corrélation entre la polarisation  $p$  à la longueur d'onde efficace de la magnitude V et le  $V \sin i$ . Les valeurs de  $p$  pour chaque  $V \sin i$  dépendent de la structure physique des enveloppes circumstellaires et des paramètres qui les caractérisent. Si les enveloppes devaient être toutes des disques plats, les valeurs de  $p$  devraient se situer en dessous d'une diagonale qui traverse entièrement le diagramme, parallèle au côté gauche du triangle de la figure (Yudin 2001).

La polarisation augmente depuis  $0\%$  à  $V \sin i \approx 0 \text{ km s}^{-1}$  elle est la plus intense à  $V \sin i = 200 \text{ km s}^{-1}$ , puis elle décroît vers  $0\%$  à  $V \sin i \approx 400 \text{ km s}^{-1}$  (voir figure 8). Il est donc clair que les enveloppes aplaties ne donnent pas toujours des explications satisfaisantes à la polarisation et ainsi sur la

géométrie la plus probable de l'enveloppe circumstellaire des étoiles Be.

Notons que le problème de la géométrie des enveloppes circumstellaires des étoiles Be n'est pas une question anodine. Cette géométrie dépend en grande partie du mode d'éjection de matière dominant. Ce mode, à son tour, dépend des instabilités que l'étoile subit. L'ensemble de ces phénomènes, perte de masse continue incluse, sont des phénomènes dont la nature et l'origine sont mal compris.

## L'interférométrie des étoiles Be

Les nouvelles techniques d'interférométrie ont permis d'évaluer le diamètre des enveloppes circumstellaires de quelques étoiles Be. Celles-ci sont en accord avec les estimations obtenues par l'analyse des données spectroscopiques et spectrophotométriques. À savoir, les raies de Balmer se forment dans une région qui est de l'ordre de 10 rayons stellaires, tandis que le continu visible se forme dans un environnement d'un à trois rayons stellaires. Ces mêmes données suggèrent aussi un certain aplatissement, mais les paramètres estimés dépendent des modèles proposés, ce qui rend incertaine toute conclusion sur leur aplatissement.

Des techniques semblables à celles développées à l'Observatoire de la Côte d'Azur ont montré l'existence de perturbations non axisymétriques dans les enveloppes circumstellaires en fonction desquelles il serait possible de rendre compte des variations V/R des raies en émission.

## Modèle d'étoile Be

La description des faits les plus saillants dans les étoiles Be : rotation élevée, présence de raies en émission, polarisation du rayonnement, signes de grande activité (superionisation, vents stellaires, sursauts lumineux, pulsations non radiales, rayons X, etc.), variabilité spectroscopique et spectrophotométrique, donne des éléments qu'un modèle phénoménologique devrait pouvoir expliquer de manière plus ou moins cohérente. Le modèle rotationnel de Struve peut rendre compte de la production de raies en émission dans des enveloppes circumstellaires autour des objets en rotation rapide. Malgré la simplicité de ce modèle, ses difficultés majeures sont :

1 - les étoiles Be n'ont pas de rotation critique et l'éjection de matière par l'équateur est compromise ;

2 - une même étoile peut avoir, à des époques différentes, des spectres de type B-normal, Be, Be-shell. Comme dans le modèle de Struve ces phases sont dues à un effet d'angle selon lequel on voit le disque circumstellaire, il est difficile d'imaginer que les transitions des phases dans une même étoile, puissent être expliquées par des changements, plus ou moins chaotiques, de l'orientation du disque par rapport à l'observateur.



# Cahier Pédagogique

## CC 99 automne 2002

AVEC NOS ÉLÈVES

### **Construire (encore ! ) un cadran solaire à l'école primaire**

Niveau primaire p. II à V

Dominique Balin

### **Huit expériences simples pour débiter en spectro sans gros matériel**

Niveau collège p. VI à IX

Pierre Causeret

### **Des masses, des poids et des planètes**

Niveau lycée p. X

Francis Berthomieu

### **Construction d'un planétaire héliocentrique à l'aide de géoplan**

Niveau lycée p. XI à XIV

Frédéric Dahringer et Jean-Yves Le Goff

### **Les maths dans le calendrier : le calendrier perpétuel**

Niveau lycée p. XV à XX

Martine et Michel Bobin

# Construire (encore !)

## un cadran solaire en école primaire

Les collègues qui pratiquent avec leur classe cette activité apprécieront, outre les détails techniques, les remarques éclairantes sur le temps qu'il faut, les recherches à faire et à prolonger, les difficultés, et les réussites, que nous donne ici Dominique Balin. Il se dégage de son article une ambiance, celle de sa classe, tout à fait sympathique.

Astronomie et enseignement primaire font bon ménage car la curiosité des jeunes enfants est réelle. Peu d'élèves sont déjà blasés. Mais surtout la dimension temps n'est pas une contrainte. L'enseignant dispose de dix mois pour mettre en place les observations, les analyser et en tirer tous les enseignements possibles. Et puis s'il pleut ce lundi, ce n'est pas bien grave, nous recommencerons mardi ou jeudi, ou la semaine prochaine...

Je vais donc vous décrire comment nous en sommes arrivés, mes élèves et moi, à construire des cadrans solaires. Le cheminement que nous avons suivi, certains problèmes que nous avons rencontrés et les réponses que nous y avons apportées.

Tout d'abord je tiens à préciser que j'ai intégré à mon emploi du temps une séance hebdomadaire de "Réponses aux questions".

Au fond de ma classe est accrochée une "boîte à questions" (décorée d'une photo de la galaxie d'Andromède) dans laquelle les enfants déposent des questions signées de leur nom. Ces questions sont le plus souvent des demandes d'explications complémentaires mais elles peuvent porter sur n'importe quel thème scolaire ou non.

Si certains élèves peuvent répondre, ils le font. Le plus souvent j'explique. Parfois nous décidons de faire une étude en classe et des volontaires font des recherches avant exposés.

Mon année d'astronomie avec ce CM2 a commencé dans la cour de l'école, à la mi-septembre, un jour de grand soleil pendant une mise en rang. Un enfant faisait le pitre et je regardais son ombre. Immédiatement, une question a fusé :

"Qu'est-ce que vous regardez M'sieu ?"  
"- L'ombre de Sébastien."

Et nous nous sommes retrouvés une dizaine à regarder l'ombre de Sébastien qui se demandait, inquiet, ce qu'on lui voulait.

Arrivé en classe, j'ai expliqué "l'incident" pour rassurer Sébastien et annoncer que ceux qui avaient des questions n'avaient qu'à les mettre dans la boîte prévue pour ça.

Voici, remaniées, quelques unes des questions déposées ce jour-là :

"Pourquoi vous avez regardé mon ombre et pas celle des autres ?"

"De quoi c'est fait une ombre ?"

"C'est vrai qu'on peut perdre son ombre ?"

"Pourquoi dans la cour j'ai qu'une ombre alors qu'à mon entraînement de foot j'en ai quatre ?"

"Pourquoi mon ombre est plus grande que moi ?"

Bref, j'avais réussi ma manipulation de masse. Les élèves avaient intégré le rôle de la boîte à questions et nous allions commencer avec envie et curiosité la leçon sur les ombres et la lumière.

Si la notion d'ombre portée passe bien un jour de grand soleil, celle d'ombre propre est plus difficile à appréhender car moins visuelle. Pour cela, il est plus parlant de faire l'obscurité dans une pièce et d'utiliser une source de lumière artificielle.

Suite à cette leçon, une de nos activités parallèles a été un concours d'ombres chinoises.

Pour la notion d'ombre et source de lumière, nous avons planté un bâton dans une des pelouses de l'école. Nous avons observé la variation de la dimension de l'ombre, qu'elle "tournait" par rapport au soleil "qui se déplaçait dans le ciel".

Une des questions que se sont posées les élèves fut un grand sujet de polémiques :

"Quand l'ombre portée était-elle la plus grande ? Le matin ou le soir ?"

Résoudre ce problème n'a pas été une mince affaire ! Voici les principaux obstacles rencontrés :

- faire des relevés fiables sur une pelouse,
- faire des relevés en nombre suffisant sachant que les enseignants ne peuvent laisser circuler les élèves seuls dans les couloirs (une fois ou deux, passe, mais toutes les quinze minutes, fréquence choisie à l'unanimité, ça ne va pas),
- le jeu consistant pour certains à déplanter le gnomon,
- l'heure de la montre qui, avec son décalage légal, pervertit la notion de matin et d'après-midi,

- mais surtout, nous arrivions trop tard et repartions trop tôt de l'école pour répondre par observation.

Comme les fenêtres de la classe étaient orientées plein Sud, notre première réponse a été de faire les relevés en intérieur. Sur une planche avec un grand clou planté verticalement par dessous nous fixions une grande feuille de papier d'emballage et faisons nos relevés. La planche était calée à l'aide d'une équerre pour que sa position soit toujours la même. Nous faisons une croix à la pointe de l'ombre, puis nous notons l'heure. Très vite, les relevés ont été faits à heures fixes.

Il nous a fallu trois jours de relevés pour acquérir la notion de midi solaire et beaucoup plus pour expliquer l'heure légale qu'elle soit d'été ou d'hiver. Quant au pourquoi du changement d'heure, mes raisons n'ont convaincu personne. On aime bien le changement d'heure de septembre car on "gagne" une heure et on n'aime pas celui de mars car on nous "vole" une heure...

Le mouvement apparent du soleil au cours de l'année s'est trouvé mis en évidence après trois semaines d'interruption dans les observations pour cause de météo défavorable. Quand le soleil est enfin réapparu, nous avons fait nos relevés sur la feuille déjà utilisée précédemment en pointant l'ombre avec une autre couleur. Les ombres étaient toutes plus grandes pour des relevés à des heures à peu près équivalentes.

Par la suite, nous avons fait quelques relevés sur une feuille de papier calque afin de pouvoir comparer les résultats à deux dates différentes.

Nous avons à cette occasion compris que la longueur de l'ombre dépend de la hauteur de la source de lumière, que le soleil n'était pas toujours à la même hauteur et une interrogation demandant si les saisons avaient à voir avec ça a été posée dans notre boîte aux questions.

Le mouvement apparent du Soleil est difficile à imaginer par les élèves. Concevoir que le Soleil est fixe et que l'on tourne alors que l'on ne sent rien... Ceux qui prenaient souvent le

métre ont plus rapidement compris car ils ont fait la comparaison avec le déplacement de la rame quand elle quitte la station et l'impression visuelle que c'est la station qui se déplace.

Enfin, pour répondre à la question de départ, à savoir : "A quel moment l'ombre est-elle la plus grande ? Le matin ou le soir ?", nous avons finalement utilisé une lampe de poche comme source de lumière. La polémique s'est terminée sur un match nul. Pas de gagnants, mais surtout, chose essentielle, pas de perdants. L'ombre est aussi longue au lever qu'au coucher, quand le soleil est rasant.

Cette histoire d'ombre la plus longue nous a ramené à l'ombre la plus courte et au midi solaire (nous avons parlé à cette occasion des méridiens).

Connaissant midi au soleil, connaissant l'existence des cadrans solaires, comment connaître l'heure quand on n'a pas de montre ? Comment lire l'heure sur un cadran solaire et est-ce qu'il est possible d'en construire un ?

Un premier cadran, empirique, a été tracé sur notre planche de relevés en utilisant une feuille ayant un grand nombre de repères. Placer les heures solaires en partant des heures légales fut une véritable galère !

De quel côté était le matin et le soir ? Fallait-il enlever ou rajouter les heures ?

D'autres questions que se posèrent les élèves compliquèrent la situation : Comment gérer la différence de longueur d'ombre du style ?

Et si on déplace le cadran ? Faut-il indiquer l'heure solaire ou l'heure légale ?

Une semaine de pluie plus tard, ayant constaté que notre cadran solaire "donnait bien" l'heure malgré un intempestif déplacement de notre installation pour cause de nettoyage, nous décidâmes de nous lancer dans des constructions individuelles.

Dans un premier temps, j'avais pensé à la réalisation d'un cadran équatorial en bois.

L'intérêt de ce cadran est la relative

simplicité des tracés.

Un des inconvénients est que les découpes du bois ne peuvent être faites en classe et au final, les élèves ne font qu'un assemblage ce qui n'est guère intéressant.

Il fallait donc se poser la question des matériaux utilisables en classe. Matériaux pouvant être travaillés par des mains d'élèves. Et là, apparaissent des problèmes insoupçonnables au premier abord.

Par exemple, interdiction d'utiliser un "cutter" en classe (même pour l'enseignant !), proscription de certaines colles (les plus efficaces) que les élèves pourraient "sniffer"...

Mon choix s'est fixé sur le bristol, matériau un peu rigide découpable avec des ciseaux à bouts ronds.

Hélas, avec ce matériau trop souple, impossible de faire un cadran équatorial.

Un autre inconvénient à la réalisation d'un cadran équatorial est que nous avons toujours observé sur un plan horizontal et qu'il valait mieux continuer de travailler dans des représentations déjà bien installées chez les élèves.

Le type de cadran solaire choisi a donc été le cadran horizontal.

Cherchant la facilité, j'ai cherché dans différents livres de "Travaux manuels" un modèle simple dans la construction et la réalisation. Tous utilisaient la colle pour fixer le style et il était difficile voire impossible d'avoir un style bien vertical. Le bristol est trop souple pour bien rester en forme au niveau des plis et après collage il se déforme légèrement.

La réponse au problème de la colle (et de la précision du collage des élèves !) fut de la supprimer.

Le cadran finalement proposé aux élèves nécessite deux demi-feuilles de bristol et pas de colle. La table du cadran a une entaille et le style, fait par pliage, s'insère dans cette entaille.

Les tracés des secteurs angulaires des heures sont plus difficiles puisqu'inégaux, mais en primaire, ce n'est pas dramatique de donner directement les valeurs aux élèves en leur disant que les calculs sont trop compliqués pour eux (ce qui est vrai d'ailleurs !).

Voici donc, remaniées pour cet article, les différentes étapes de construction du cadran solaire horizontal qui ont été détaillées par notre groupe classe.

### Construction du style

Nous avons utilisé des cartes de visite de récupération dont les dimensions étaient 15 sur 10 cm.

1 - Tracer un segment [AO] partageant la longueur de la feuille en deux parties égales ( $2 \times 7,5$  cm).

Ce segment matérialisera après pliage le style du cadran solaire.

2 - Tracer un segment [OC] dont l'angle AOC a pour mesure la latitude du lieu où vous comptez utiliser le cadran.

Sur l'exemple,  $48^\circ$  correspond à la latitude arrondie de Paris.

3) Tracer le segment [OC'] symétrique du segment [OC] par rapport à la droite (OA).

4) Plier soigneusement la feuille en suivant le segment [OA], trait à l'extérieur du pli.

5) Plier soigneusement la feuille en suivant le segment [OC], trait à l'intérieur du pli.

6) Plier soigneusement la feuille en suivant le segment [OC'], trait à l'intérieur du pli.

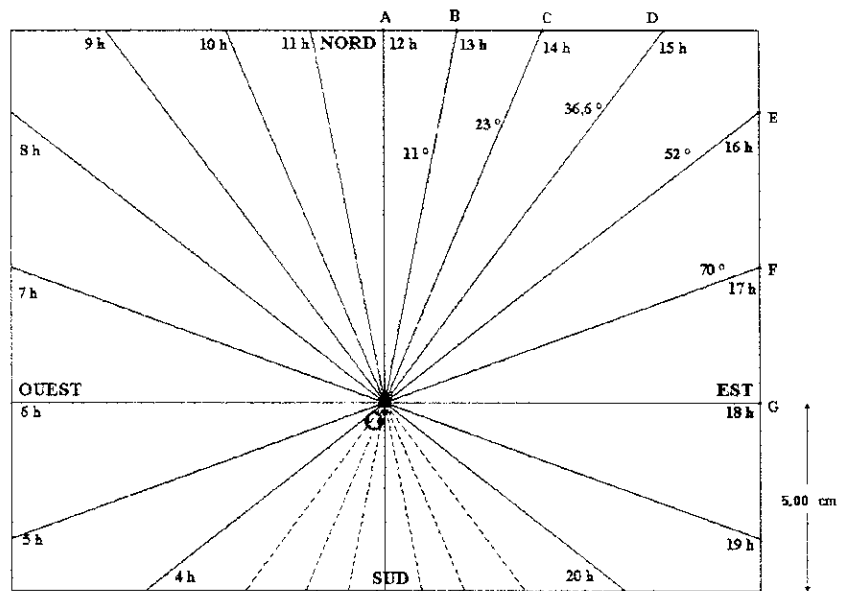
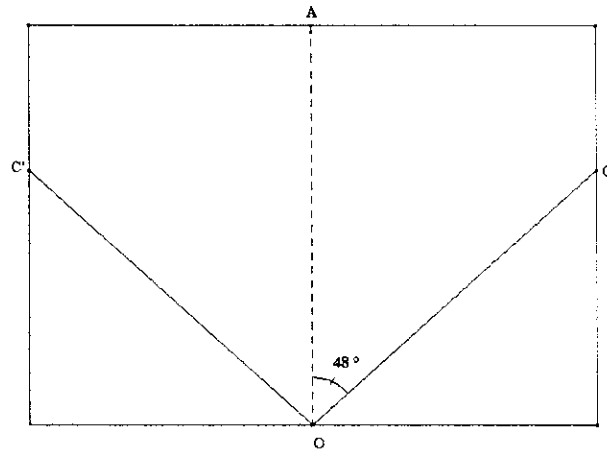
Le style est terminé. Pour l'utiliser, on le pliera le long de l'axe (AO), on l'insérera dans la table du cadran, les deux triangles servant à stabiliser et rigidifier l'ensemble.

### Construction de la table

Prévoir un bristol un peu plus épais que celui du style. Une feuille de 15 sur 21 cm convient (nous avons utilisé une feuille  $21 \times 29,7$  coupée en deux).

1- Tracer une droite partageant la longueur de la feuille en deux parties égales de 10,5 cm de large. Ce sera l'axe Nord-Sud du cadran.

2 - Tracer à 5 cm d'un bord une droite perpendiculaire à l'axe Nord-Sud. Ce sera l'axe Est-Ouest. Attention à bien positionner les quatre points cardinaux.



3 - Tracer les angles que vous aurez précédemment calculés dans la partie Nord-Est par exemple (La méthode de calcul est indiquée plus loin dans l'article). Prolongez les segments dans la partie Sud-Ouest. Cinq calculs suffisent car les marques sont symétriques par rapport à l'axe Nord-Sud.

Terminer les tracés. Les valeurs placées sur la figure sont valables pour la latitude de Paris.

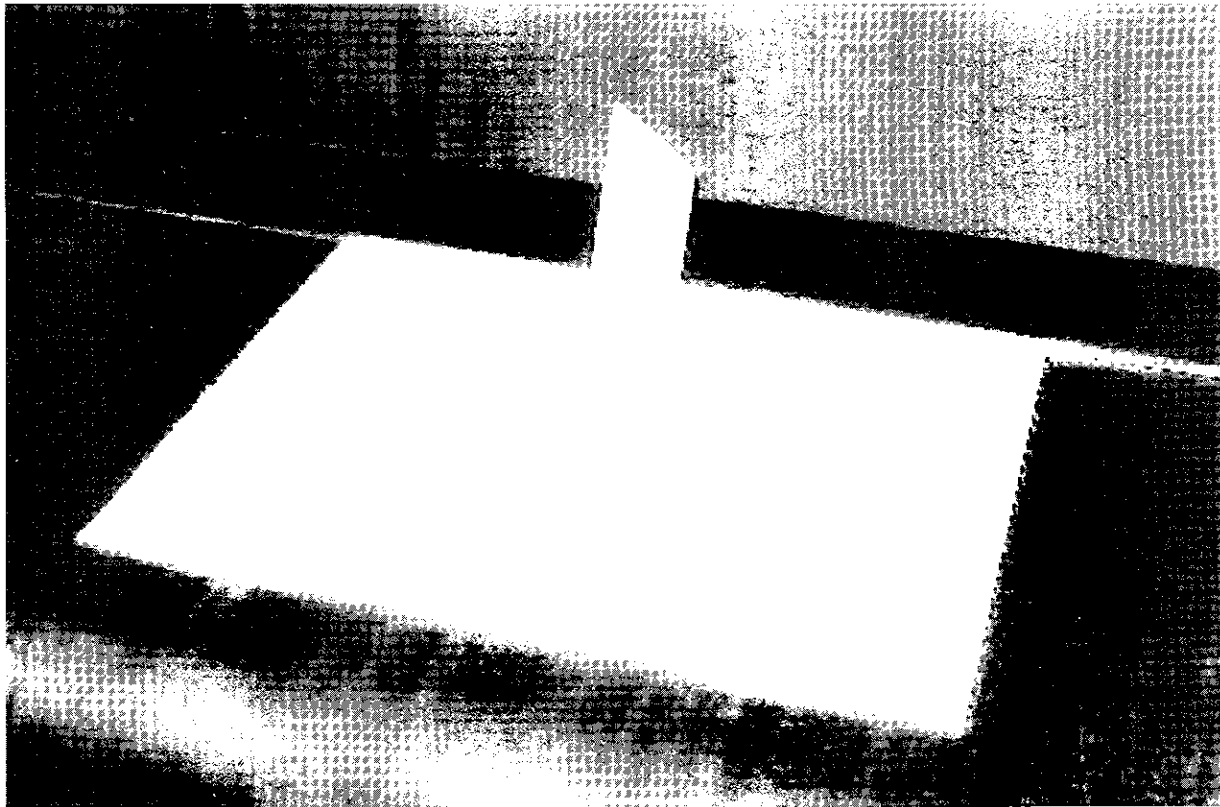
4 - Placer les heures.

5 - Sur le segment [OA], faire une fente de 1 mm de large. Attention à ne pas dépasser le point O. Le style sera inséré dans cette fente.

### Calculer les angles

Pour ceux qui seraient rebutés par les calculs, il est toujours possible de faire les tracés de façon approximative en notant (après avoir réglé une montre sur le temps local moyen) la position de l'ombre toutes les heures. Dans cette hypothèse, il vaut mieux pratiquer cette démarche le 15 avril, le 15 mai, le 1er septembre ou le 24 décembre, dates où la différence entre l'heure des montres et du cadran est infime. L'écart maximum, lié à l'équation du temps dépasse 16 minutes le 4 novembre.

Un des inconvénients, si vous faites ces relevés en classe, est d'être limité aux heures d'ouvertures scolaires.



Comme tout bon pessimiste qui se respecte, le jour non reportable où vous voudrez faire vos relevés, prévoyez une leçon sur les différents types de nuages.

Pour calculer, en degrés, les cinq angles de façon précise, on peut utiliser les formules suivantes où  $\varphi$  désigne la latitude du lieu.

$$\begin{aligned} \tan AOB &= (\tan 15) (\sin \varphi) \\ \tan AOC &= (\tan 30) (\sin \varphi) \\ \tan AOD &= (\tan 45) (\sin \varphi) \\ \tan AOE &= (\tan 60) (\sin \varphi) \\ \tan AOF &= (\tan 75) (\sin \varphi) \end{aligned}$$

On trouve, avec pour Paris  $\varphi \approx 48^\circ$ , respectivement :  $11^\circ$ ,  $23^\circ$ ,  $36,6^\circ$ ,  $52^\circ$  et  $70^\circ$ .

Il est inutile de calculer d'autres angles car les marques sont symétriques par rapport à l'axe Nord-Sud.

En conclusion, cette année-là, l'Astronomie a été le moteur interdisciplinaire de nos activités.

Nous avons certes réalisé des cadrans solaires, mais nous avons aussi, souvent sans rentrer dans les

détails, répondu à bien d'autres interrogations portant sur les saisons, l'arc en ciel et la décomposition de la lumière (merci aux bricolages des Universités d'été du C.L.E.A.), la Lune (phases, marées), le Soleil (et ses taches), les planètes, les étoiles, les comètes ( passage d'Hale-Bopp), les galaxies...

A mes yeux pourtant, ces nouvelles connaissances ne sont pas le plus important. Ce groupe classe a levé le nez sur ce monde qui l'entoure. Pour ces élèves, la Lune, le Soleil, les étoiles ne sont plus seulement des éléments d'un décor. Ils ont pris corps par observation ou par questionnement. Ils se sont concrétisés.

Leur univers s'est élargi à l'Univers.

#### Références :

Pour en savoir plus sur le cadran solaire horizontal : <http://physique.paris.iufm.fr/cadran-solaire>  
 Pour connaître votre latitude : <http://www.ign.fr>

#### Dans les Cahiers Clairaut :

- Cadran solaire à trois dimensions. Daniel Toussaint CC11
- Cadran solaire. J. Ollier CC17
- Cherchons midi à 14h. Jacky Dupré CC27
- Equation du temps. Jean-Claude Allard CC31
- Comment utiliser le cadran solaire sphérique d'Aix en Othe ? Daniel Toussaint CC28
- Un cadran solaire avec la main. J-Paul Parisot et Françoise Suagher CC42
- Le canon solaire de l'ENG de Douai. Michel Laisne CC49
- Un cadran bifilaire. CC65-66. Paul Perbost.
- Le cadran solaire de Freeman : un cadran solaire indépendant de la latitude. Paul Perbost CC77-79
- Un simulateur de cadran solaire. Esteban Esteban et Rosa Maria Ros 80
- Style vertical ou style incliné ? Laurence Portier Cc84
- Un cadran solaire en CM2. Stéphanie Redondy et Magali Girardot CC92
- Un cadran solaire demi-cylindrique. Pierre Causeret CC94.

# Huit expériences simples pour débuter en spectro sans gros matériel

Je vous propose quelques montages de spectroscopie faciles à réaliser, certains d'entre eux ayant déjà été proposés dans des précédents numéros ou dans divers livres.

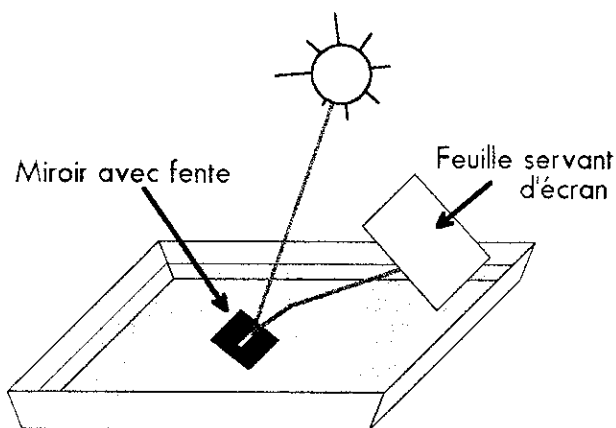
## 1. Montages à eau

Il n'est pas toujours facile de se procurer un prisme en verre. Mais l'eau remplace aisément le verre.

### Expérience n°1

On trouve cette expérience dans différents ouvrages mais souvent mal décrite. Le principe est simple : la lumière du Soleil entre dans une bassine d'eau, se reflète sur un miroir immergé et ressort. En entrant et sortant, la réfraction décompose la lumière (l'indice de réfraction dépendant de la longueur d'onde).

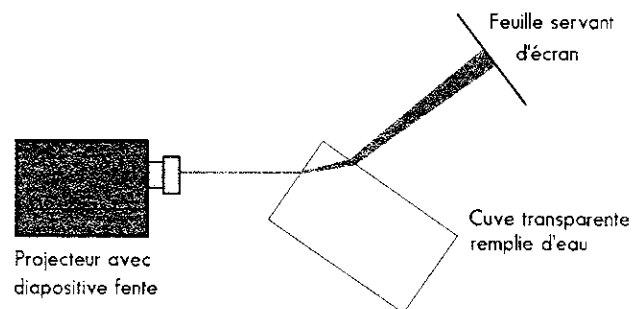
Mais si on ne prend pas de précaution, de nombreux spectres se superposent et on n'observe rien. Pour voir les différentes couleurs de l'arc-en-ciel, il suffit d'utiliser un petit miroir sur lequel on aura collé du ruban adhésif noir pour faire une fente.



### Expérience n°2

La source est cette fois un projecteur de diapositives dans lequel on a inséré la diapositive servant de fente ou un rétro-projecteur (voir l'encadré sources de lumière). Le prisme est

une cuve en verre ou une boîte en plastique transparent remplie d'eau. On observe ainsi le spectre continu de la lampe du projecteur.



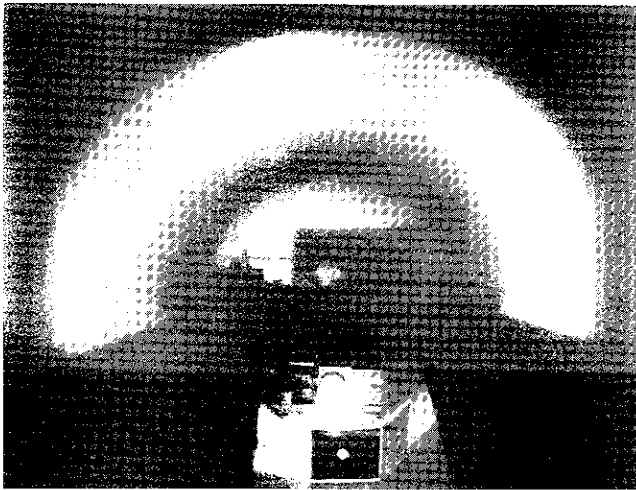
## 2. Montages avec réseau par réflexion

Un bon réseau par réflexion coûte quelques centaines d'euros. Mais pour 1 euro, on peut se procurer un CD Rom vierge qui permet déjà quelques expériences intéressantes. Les CD Rom publicitaires gravés sont gratuits mais donnent de moins bons résultats. Il suffit d'observer un CD Rom sous une lampe ou au Soleil pour voir qu'il décompose la lumière.

### Expérience n°3

Avec un projecteur de diapositives (sans diapo fente), un CD Rom disposé face à l'objectif (il suffit de le laisser dans une boîte de CD couvercle ouvert et côté à graver dirigé vers la source lumineuse) et un écran, on peut réaliser un très bel arc-en-ciel. Le rouge se retrouve à l'extérieur, comme dans un vrai. Ici, c'est la forme des sillons du CD qui crée les arcs de cercle, ce qui n'a aucun rapport avec la forme de l'arc-en-ciel naturel.

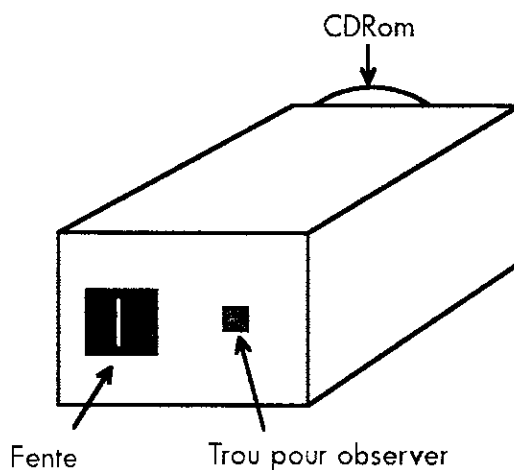




#### Expérience n°4

Pour observer des spectres précis avec un CDRom, il faudra utiliser une fente. Ce petit montage utilise une boîte à chaussures, une fente d'un demi mm de largeur découpé dans du carton et un CDRom. (Montage décrit dans le n°28 de la revue Cosinus).

Quand on observe le fond de ciel, on peut deviner quelques raies d'absorption, en particulier une raie du sodium à la limite rouge orange ou du magnésium dans le vert bleu. Avec une lampe fluo, on obtient des raies d'émission sous la forme de superbes arcs colorés.



Spectroscope avec boîte à chaussures et CDRom. La boîte fait 30 cm de longueur. Le trou de droite, de 1 à 2 cm de côté, est situé à 10 cm de la fente. Le CDRom est inséré dans la boîte grâce à deux entailles dans le carton.



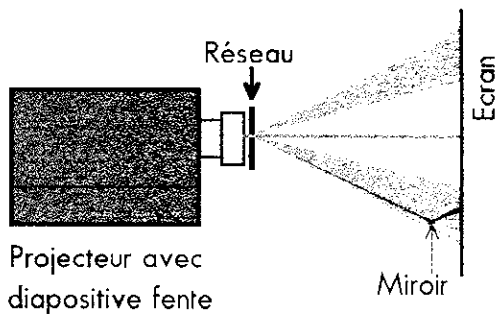
Avec cet appareil, l'observateur doit avoir la source lumineuse dans le dos (ici le fond de ciel). Il ne faut pas viser directement le Soleil pour ne pas risquer de s'abîmer les yeux.

### 3. Montages avec réseau par transmission

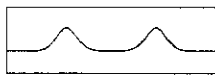
On trouve des réseaux par transmission dans tous les catalogues de matériel de physique. Mais vous obtiendrez le meilleur rapport qualité prix avec les réseaux vendus par le CLEA. Les feuilles de réseau vendues par votre association préférée peuvent être découpées et insérées dans des caches diapos.

#### Expérience n°5

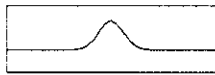
La diapositive fente est dans le projecteur et on fixe le réseau sur l'objectif. On obtient ainsi deux superbes spectres (plus les deux spectres du deuxième ordre). On peut ensuite s'amuser à composer les couleurs primaires avec un petit miroir : envoyez du rouge sur le vert et vous obtiendrez un superbe jaune. Vous pouvez aussi fabriquer du cyan et du magenta, c'est assez amusant. On peut aussi se servir d'un rétroprojecteur.



Si vous montrez l'expérience à un prof d'arts plastiques, il sera encore plus surpris. Par contre, il n'est pas du tout certain qu'elle fonctionne avec un extra terrestre. En effet, le jaune obtenu en additionnant le rouge et le vert doit avoir un spectre de cette forme



alors que le jaune que l'on trouve directement sur l'écran à la limite rouge vert doit plutôt ressembler à



Nos yeux voient la même chose puisque dans les deux cas ce sont nos cônes rouges et verts du fond de l'oeil qui sont excités. Mais si votre extra terrestre a des capteurs spécifiques pour les longueurs d'onde du rouge, du jaune et du vert, il verra des couleurs totalement différentes.

#### Expérience n°6

C'est un grand classique des stages CLEA qui fonctionne très bien : un tube de carton de 30 à 60 cm de long, une fente réalisée avec deux moitiés de lame de rasoir d'un côté, une diapositive réseau de l'autre et vous obtenez un superbe spectroscopie. Les lignes du réseau doivent être parallèles à la fente mais il suffit d'essayer pour ne pas se tromper.

On peut observer alors différentes sources de lumière (en mettant l'oeil côté réseau) : une lampe à incandescence vous montre un spectre continu, une lampe fluo des raies d'émission et le fond de ciel donne un superbe spectre continu dans lequel de nombreuses raies d'absorptions sont visibles.

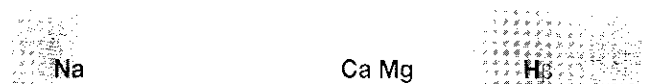


La luminosité et le nombre de raies va dépendre de la longueur du tube et de la largeur de la fente. Avec un tube de 40 ou 50 cm et une fente d'environ 1/4 mm, on obtient un spectre suffisamment lumineux avec une bonne dizaine de raies bien visibles.

#### Expérience n°7

Le spectroscopie précédent est bien pratique mais il peut être utile d'enregistrer l'image pour travailler dessus. On peut photographier simplement le spectre en mettant l'appareil photo à la place de l'oeil. Un appareil photo numérique avec zoom est le mieux. On peut bricoler une fixation avec un pied photo, on met un tissu noir sur l'extrémité du tube côté appareil pour éviter les reflets et on peut obtenir des résultats satisfaisants. Mais le moins cher est d'utiliser une webcam (on en trouve à moins de 100 €) branchée sur un micro ordinateur. De plus, on peut observer l'image à plusieurs sur l'écran. On peut l'enregistrer ou l'imprimer en couleurs. Si on dispose d'un vidéo projecteur, on peut même avoir le spectre sur grand écran.

Mais attention, une webcam est munie d'un objectif grand angle. Le spectre y apparaît minuscule et sans détails. Pour obtenir un résultat exploitable, il faut une webcam dont on dévisse l'objectif (c'est possible sur certains modèles comme les ToUcam ou les anciennes Vestapro). On le remplace par un objectif d'appareil photo 24x36 de type grand angle (25 à 30 mm). Un bricolage permet d'aligner la webcam et l'objectif derrière le spectro. Voici un spectre du fond de ciel réalisé ainsi. Il est à l'origine en couleurs, ce qui permet de reconnaître facilement certaines raies comme celle du sodium ou celles du magnésium. Il arrive de trouver certaines raies supplémentaires dues à des reflets sur les lames de rasoir mal alignées.



## Expérience n° 8

Dernières propositions d'expérience : un appareil photo avec un réseau fixé sur l'objectif pour réaliser des spectres d'étoiles et de nébuleuses. Dans la photo ci-dessous, vous reconnaîtrez les trois étoiles alignées du baudrier d'Orion avec au-dessus Bételgeuse et Bellatrix. La nébuleuse d'Orion est visible en bas, au centre du carré. Sur cette même photo, vous avez les spectres de différentes étoiles sous forme de segments. Mais le spectre de la nébuleuse d'Orion apparaît comme une tache rouge (entourée sur la photo), correspondant à la raie H alpha de l'hydrogène. Tout cela se voit évidemment mieux sur la photo originale en couleurs...



Pour que le spectre de chacune des étoiles ne soient pas trop fin, on utilise le mouvement apparent du ciel pour l'élargir. Il faut donc orienter le réseau correctement pour cela, traits perpendiculaires au déplacement des étoiles.

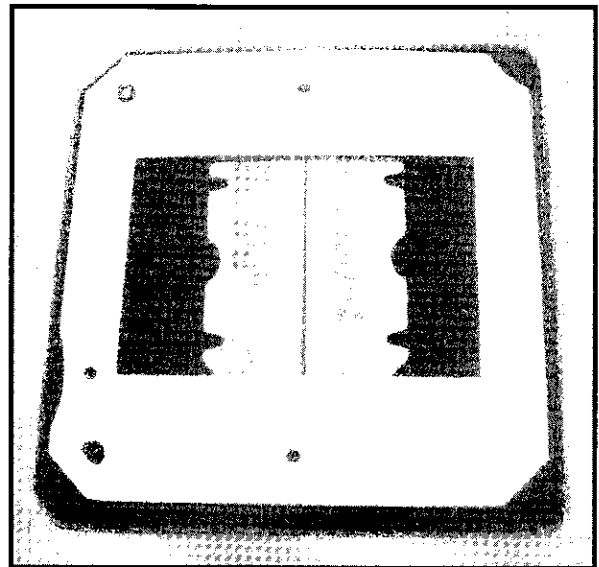
Sur la même photo, on obtient des spectres d'ordre 1 ou d'ordre -1 (couleurs inversées). On peut ainsi avoir sur une même photo d'Orion le spectre d'Aldébaran située au nord d'Orion et celui de Sirius située au sud.

Si on veut n'avoir que les spectres sans les étoiles, on peut mettre devant l'objectif à quelque distance un carton noir qui arrêtera la lumière de ces étoiles en laissant passer sur le côté la lumière des astres dont on cherche le spectre.

## Quelques sources lumineuses

1. Le Soleil. Source non ponctuelle ( $0,5^\circ$  de diamètre apparent), couramment disponible dans certaines régions de France mais plus difficile à trouver dans d'autres. Le fond de ciel (bleu ou gris) diffuse aussi de la lumière en provenance du Soleil et l'observation de son spectre donne les mêmes résultats. On obtient un spectre continu très facilement, avec des raies d'absorption dues à l'atmosphère solaire si le montage est plus précis. Rappelons qu'il ne faut jamais viser directement le Soleil. Soit on projette une image (comme dans l'expérience n°1), soit on observe le fond de ciel (expériences 4, 6, 7).

2. Projecteur de diapositives. On y insère une diapositive servant de fente réalisée avec du carton noir ou mieux, avec deux moitiés de lame de rasoir.



3. Rétroprojecteur. On dépose à sa surface une feuille de carton dans laquelle on a découpé une ouverture en forme de fente.

4. Ampoule électrique classique : elle montre un spectre continu.

5. Tube fluo dit improprement "néon" ou ampoule économique : son spectre est constitué de raies d'émission.

# Des masses, des poids et des planètes !

## Exercice proposé en seconde

### Introduction

Au dessus d'un pommier, la Lune... Une pomme tombe du pommier... Pour répondre aux questions qui suivent, il vous faudra utiliser les résultats de quelques expériences, faites ou ... à faire !

- Quelle est la vitesse de la Lune sur son orbite ?
- Pourquoi peut-on dire que la Lune "tombe" vers la Terre ?
- A quelle distance du centre de la Terre les deux objets (pomme et Lune) se trouvent-ils ? Comparez ces deux distances.
- Quelle distance la pomme parcourt-elle pendant la première seconde de chute ?
- De combien la Lune "tombe"-t-elle en une seconde ?
- Comparez les distances parcourues lors de leur première seconde de "chute" par la pomme et par la Lune...

#### Newton énonce la loi de la gravitation universelle:

Deux objets (ponctuels ou à répartition sphérique de masse), de centres A et B, et de masse  $M_A$  et  $M_B$ , exercent l'un sur l'autre une force d'attraction gravitationnelle  $F$  dont les caractéristiques sont les suivantes :

direction : celle de la droite (AB)

sens : ces deux forces sont attractives

valeur : les deux forces ont la même valeur  $F$

et  $F = G \cdot M_A \cdot M_B / AB^2$

$G$  est la constante universelle de la gravitation :

$G = 6,67 \cdot 10^{-11}$  SI

- Quelle est l'unité (SI) de  $G$  ?
  - Montrez, à l'aide des calculs effectués ci-dessus, que la proposition de Newton, affirmant que la force a une valeur inversement proportionnelle au carré de la distance entre les points A et B, est bien justifiée par l'expérience...
  - Montrez enfin qu'il est possible d'utiliser cette loi pour connaître la masse de la planète Terre.
- On rappelle simplement que l'intensité de la pesanteur sur Terre est  $g = 9,81 \text{ N.kg}^{-1}$ .
- Remarque : vous verrez en Terminale que l'intensité de la pesanteur, exprimée actuellement en  $\text{N.kg}^{-1}$  est aussi appelée "accélération de la pesanteur" et s'exprime aussi en  $\text{m.s}^{-2}$  avec la même valeur.
- A l'aide des logiciels mis à votre disposition, (téléchargeables sur le site de J.F. Noblet, à l'adresse [http://perso.infonie.fr/jf\\_noblet/index.htm](http://perso.infonie.fr/jf_noblet/index.htm)), vous écrirez les caractéristiques des planètes du Système Solaire sous forme de tableau : on pourra donner les valeurs numériques en utilisant d'abord une unité commode (premier tableau) puis

l'unité légale du Système International (deuxième tableau) : quelques calculs de conversion seront nécessaires...

Les 6 premières lignes seront remplies en recopiant les valeurs données par le logiciel.

La détermination de la masse  $M$  de la planète utilisera un calcul semblable à celui que vous avez déjà fait pour la Terre.

#### Unités commodes (à préciser)

Nom de la Planète ; diamètre ; rayon de l'orbite ; pesanteur sur la planète ; période de rotation (autour de son axe) ; période de révolution (autour du Soleil)

#### Unités légales (SI).

Nom de la Planète ; diamètre (m) ; rayon de l'orbite (m) ; pesanteur sur la planète ( $\text{N.kg}^{-1}$ ) ; période de rotation (s) ; période de révolution (s) ; masse de la planète (kg).

### Kepler

Kepler découvrit au XVII<sup>e</sup> siècle les lois qui régissent le mouvement des planètes : l'une de ces lois précise que si  $R$  est le rayon de l'orbite (supposée circulaire) et  $T$  la période de révolution, alors  $R^3$  est proportionnel à  $T^2$

● Traduisez cette loi par une formule mathématique

● Pour chaque planète calculer  $R^3$  et  $T^2$ .

Tracer le graphe donnant  $R^3$  en fonction de  $T^2$ .

● Ces deux grandeurs sont-elles proportionnelles ? Si oui, déterminez la valeur du coefficient de proportionnalité.

### Newton

Newton alla plus loin que Kepler : en utilisant la loi de la Gravitation Universelle, il démontra une relation mathématique, valable pour le Système Solaire, et dans laquelle  $R$  est le rayon de l'orbite d'une planète quelconque,  $T$  sa période de révolution,  $G$  la constante universelle de gravitation, et  $M$  la masse de l'astre central (le Soleil dans notre cas)

$$R^3 / T^2 = G M / 4 \pi^2$$

- Quelle est donc la masse de notre Soleil ?

### Satellites de la Terre

Les satellites de la Terre obéissent à une loi mathématique similaire à celle qui régit le mouvement des planètes, satellites du Soleil.

● Ecrivez la relation mathématique qui traduit cette loi en précisant bien le sens de chacun des symboles littéraux employés.

● Vérifiez la validité de la loi pour le satellite naturel Lune.

● Déterminez le rayon de l'orbite d'un satellite "géostationnaire"

● Déterminez la période de l'ISS (la Station Spatiale Internationale)... Une recherche sur Internet de la donnée qui vous manque est permise !

# Un planétaire héliocentrique avec GéoplanW

**Ce n'est pas révolutionnaire, mais ça tourne !**

L'objectif est de construire un modèle du système solaire permettant de décrire le mouvement annuel des planètes autour du Soleil et d'en déduire leur visibilité depuis la Terre.

Il s'agit en fait de la transposition sur ordinateur d'un "classique du CLEA", le planétaire en carton, en utilisant un logiciel de construction géométrique, GéoplanW, vendu pour un prix modique par le CRDP de Champagne - Ardennes.

On propose donc ici une initiation, en parallèle, à l'astronomie et à l'utilisation de ce logiciel.

En cours de réalisation, il faudra faire une recherche documentaire sur les caractéristiques orbitales des planètes et leur position à une date donnée.

## Astronomie

### Informations à trouver dans un livre ou sur Internet :

- Caractéristiques orbitales des planètes,
- Diamètre du Soleil.

### On admettra :

- que les planètes sont pratiquement toutes dans le même plan, le plan de l'écliptique, (plan de révolution de la Terre autour du Soleil).

Ceci sera montré dans l'annexe 1.

- qu'elles ont un mouvement circulaire uniforme autour du Soleil.

Les trajectoires des planètes sont des ellipses (lois de Kepler) ; on montrera en annexe 2 qu'elles sont assimilables à des cercles.

## Etudes préliminaires

### 1 - Montrons que la Terre est un objet ponctuel par rapport au Soleil.

Rayon du Soleil,  $R_S = 750\,000$  km

Rayon de la Terre,  $R_T = 6400$  km.

La limite de l'approximation peut être obtenue en représentant Jupiter.

## Utilisation de Géoplan

La barre d'outils du logiciel propose quelques fonctions qui seront utiles lors de cette initiation.

Il va de soi que ce logiciel offre beaucoup plus de possibilités que ce qui sera présenté ici.

La fonction "Créer" permet, en menus déroulants de créer les différentes figures et fonctions utiles.

Dans la rubrique "Divers" on trouve les fonctions "supprimer" et "modifier".

"rap" affiche le rapport de tout ce qui a été créé.

"bis" est un raccourci pour créer des objets semblables.

"<" et ">" permettent des zooms avant et arrière.

Les axes de coordonnées peuvent être affichés ou effacés par la fonction les représentant.

Une palette graphique permet de choisir des couleurs ou des hachures.

*Créer un point libre S, dans le plan.*

Créer un cercle de centre S et de rayon  $R_S$  (créer une ligne, cercle, défini par son centre et son rayon).

Utiliser le zoom arrière (<) jusqu'à faire apparaître le cercle.

Faire de même pour créer la Terre (T,  $R_T$ ).

La position des points S et T peut être modifiée en cliquant sur ces points (une main apparaît alors).

Un clic droit permet de bouger l'ensemble de la figure sur l'écran.

## 2 - Montrons que le Soleil peut être représenté par un point, comparé à la dimension des trajectoires des planètes.

On peut prendre la Terre dont la distance moyenne au Soleil,  $d$ , est de 150 millions de km.

La limite de l'approximation peut être obtenue en représentant la trajectoire de Mercure.

### Réalisation

## 3 - Dessin des trajectoires des planètes.

On tracera des cercles de même centre S, et de rayons égaux aux distances respectives des planètes au Soleil, trouvées par la recherche documentaire initiale.

On pourra pour simplifier exprimer ces distances en Unités Astronomiques, soit 1 pour la distance Soleil - Terre, et donc 0,387 pour Mercure, 0,723 pour Vénus, etc.

## 4 - Placer les planètes sur leur trajectoire à la date du 1er Janvier 2002.

Il faut pour cela connaître leur longitude écliptique héliocentrique à cette date.

C'est l'angle que fait la direction Soleil - planète avec une direction de référence, mesuré dans le plan de l'écliptique.

Cette direction de référence est celle du point  $\gamma$ , point vernal, c'est à dire celle de la direction du Soleil, vu de la Terre, à l'équinoxe de printemps.

Elle sera représentée par l'axe  $S_x$  du repère.

Cette information est disponible sur le site Internet du "Bureau des Longitudes" : [www.bdl.fr](http://www.bdl.fr).

(Serveur d'éphémérides, éphémérides générales des corps du système solaire).

Il faudra utiliser la définition du point vernal pour connaître la position de la Terre au 1<sup>er</sup> Janvier (on doit trouver environ  $100^\circ$ ).

## 5 - Faire bouger les planètes.

Il faut calculer la vitesse angulaire des planètes, par exemple en degré par jour, connaissant la durée en jours d'une révolution complète ( $360^\circ$ ) de la planète.

Effacer la Terre (*Divers, supprimer*)

Créer un cercle de centre S et de rayon  $d = 150\,000\,000$  km. Utiliser un zoom arrière jusqu'à faire apparaître la trajectoire de la Terre.

Créer un point repéré S, dans le plan, de coordonnées 0 et 0. C'est le centre du système d'axes qu'on peut faire apparaître ou disparaître.

Créer successivement des cercles  $C_1, C_2$ , etc, de centre S et de rayons correspondant aux orbites des différentes planètes. Il sera pratique d'utiliser la fonction "bis".

Création du point M représentant Mercure.

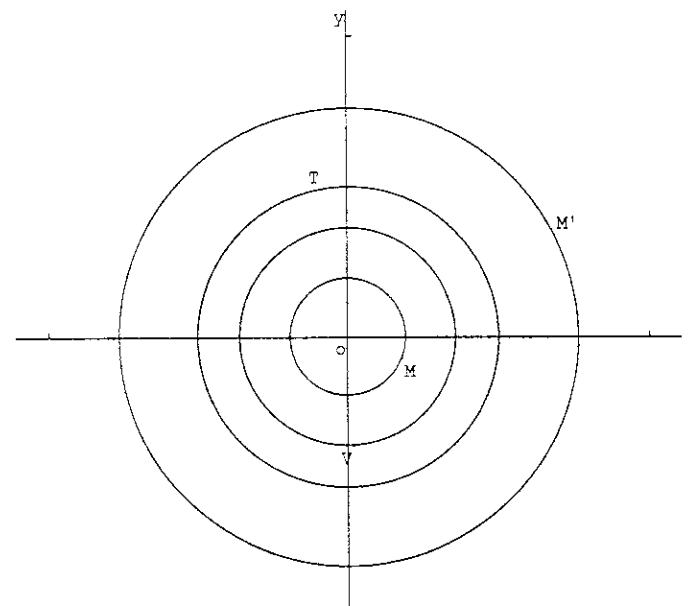
(Distance Soleil-Mercure = 0,387 UA ; Longitude de Mercure au 1<sup>er</sup> janvier 2002 =  $338^\circ$ )

Créer un point repéré M sur un cercle,  $C_1$ , repéré par son angle (en degré) avec l'axe origine,  $S_x$ .

Cet angle est donc de  $338^\circ$

Créer successivement toutes les planètes sur leur trajectoire en utilisant la fonction "bis".

Pour Vénus, on aura V repéré sur le cercle  $C_2$  par un angle de  $273^\circ$ .



Créer un "numérique", n, réel libre dans un intervalle  $[0 ; 360]$ . Il représente le nombre de jours de l'année.

En admettant que l'année, sur Terre, compte  $n = 360$  jours, on aura donc une vitesse de  $1^\circ$  par jour pour la Terre.

Pour Mercure, on obtient  $4,09^\circ$  par jour, et pour Vénus,  $1,60^\circ$  par jour.

On pourra dans ces conditions faire bouger les planètes pendant un an, en exprimant leur coordonnées en fonction de leur vitesse angulaire.

Il sera bon, au bout d'une année, de remettre le planétaire à jour, en actualisant les longitudes écliptiques héliocentriques, au 1er Janvier de l'année suivante.

## 6 - Savoir si une planète est observable depuis la Terre.

Il faut pour cela représenter la Terre par un petit cercle ( $C'$ ), de centre T (position de la Terre) et y placer un point d'observation P.

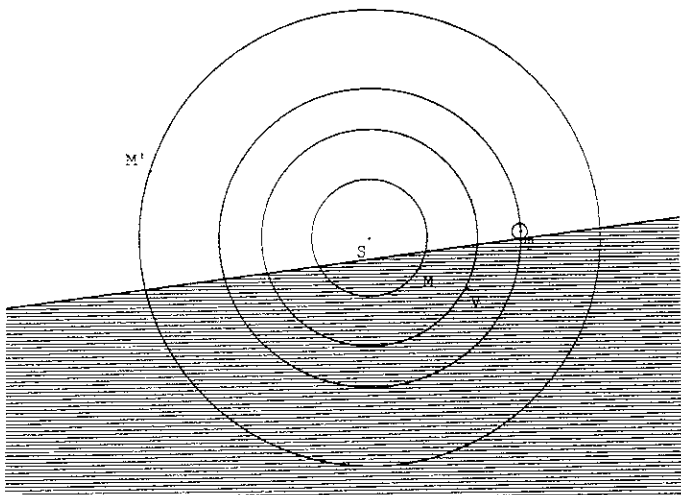
Une droite (D) tangente à ce cercle en P partagera l'espace en deux : une partie "jour" contenant le Soleil, et l'autre partie, "nuit", où seront situées les planètes observables.

La partie "nuit" peut être définie par la droite D et un point  $S'$  symétrique de S par rapport à T.

La rotation de la Terre sur elle-même sera simulée en modifiant les valeurs de h, nombre créé ci-contre.

Les planètes situées du même côté que le Soleil ne sont pas observables, contrairement à celles qui sont dans la partie hachurée.

La droite, dans sa rotation, montre les leviers et couchers du Soleil et des planètes.



Positions au 21 Septembre 2002

Modification des coordonnées des planètes :

Dans "Divers", choisir *modifier M*, de la façon suivante :

L'angle devient  $338^\circ + 4,09 * n$

Et pour Vénus, on aura un angle égal à :

$273^\circ + 1,60 * n$

Faire les modifications pour toutes les planètes.

On peut faire varier n en utilisant la fonction "Piloter" et les flèches  $\rightarrow$  et  $\leftarrow$ . Les touches + et - permettent d'accélérer et de ralentir la variation de n.

Créer un cercle,  $C'$ , de centre T et de rayon petit, par exemple 0,05.

Créer un "numérique", h, réel libre. Il servira à situer le point d'observation sur la Terre.

Créer un point P repéré sur le cercle  $C'$ , caractérisé par l'angle h.

Créer la ligne, droite D, passant par P et perpendiculaire à TP.

Créer le point  $S'$  image de S par symétrie centrale

Créer le demi-plan DP, défini par la droite D et le point  $S'$  et le hachurer grâce à la palette disponible.

On pourra aussi utiliser la fonction "non dessiné" de cette palette pour  $S'$ .

Faire piloter h de la même manière que n.

Remarque : on peut facilement passer du pilotage de n à celui de h en créant des commandes, touches N pour n et H pour h par exemple, de la façon suivante :

Créer, une commande, sélection pour pilotage au clavier.

## 7 - Calcul et affichage de la date.

Il s'agit de compter les mois et les jours de l'année, en utilisant une fonction préexistante du logiciel.  
La fonction "partie entière" :  $\text{int}()$ ,

### Annexe 1

Compte tenu de la distance Soleil – planète et de l'inclinaison  $i$ , du plan de l'orbite de la planète par rapport au plan de l'écliptique, on peut dessiner les positions extrêmes des différentes planètes par rapport à l'axe des  $x$ , repère correspondant au plan de l'écliptique.

Les angles  $i$  d'inclinaison sont à chercher dans les caractéristiques orbitales des planètes.  
( $7^\circ$  pour Mercure,  $3,4^\circ$  pour Vénus,  $0^\circ$  pour la Terre, etc)

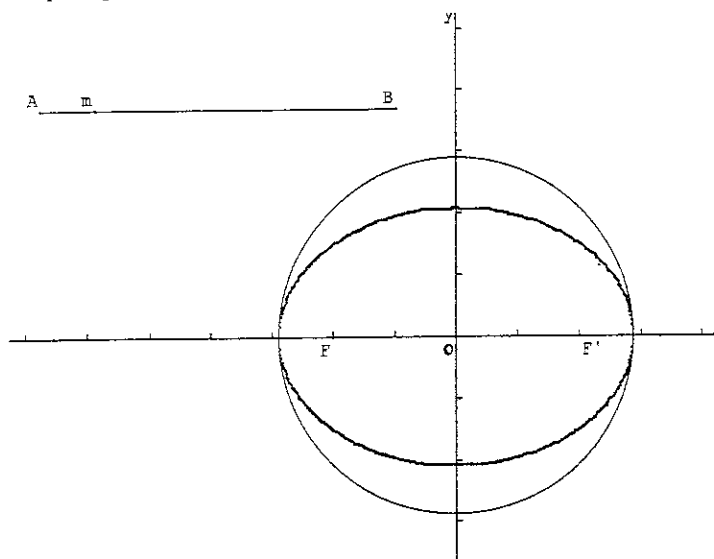
### Annexe 2

On construira des ellipses par la méthode des jardiniers :  
Une ellipse est l'ensemble des points  $M$  dont la somme des distances à deux points fixes  $F$  et  $F'$ , est constante de valeur  $2a$  avec  $2a > FF'$ .

Le point  $M$  sera obtenu par l'intersection des deux cercles de centres  $F$  et  $F'$  et de rayons  $Am$  et  $Bm$ ,  $m$  étant un point variable sur un segment  $[AB]$  de longueur  $2a$ .  
Il y aura 2 points d'intersection qui dessineront chacun une demi-ellipse quand  $m$  décrira le segment  $[AB]$ .

En effet la distance  $FF' = 2c$  est strictement inférieure à la somme des distances  $FM$  et  $F'M$  égale à  $2a$  : pour une ellipse, l'excentricité  $e = c/a$  est strictement inférieure à 1.

L'objectif est de montrer que les valeurs de l'excentricité des trajectoires des planètes sont si faibles que ces ellipses sont pratiquement des cercles.



Créer, numérique, calcul algébrique,  $E = n / 30$  ; c'est le nombre de mois, en nombre décimal.

Créer  $Mo = \text{int}(E) + 1$  : représente le numéro du mois en cours.

Créer  $Jr = \text{int}[(E - \text{int}(E)) \times 30] + 1$  : représente le jour du mois en cours.

Pour l'affichage, utiliser la fonction, créer, affichage, scalai - re déjà défini.

Créer  $S$ , au centre des axes.

Créer  $M$  pour Mercure, point repéré dans le plan (angle en radian) :

$$x = 0,387\cos(7*\pi/180)$$

$$y = 0,387\sin(7*\pi/180)$$

Créer de même les positions des autres planètes.

Créer les points libres  $A$  et  $B$  puis le segment  $[AB]$ .

Créer un numérique  $a'$ , calcul algébrique, égal à la longueur du segment  $[AB]$ .

Créer un numérique  $a$ , calcul algébrique, égal à  $a' / 2$ .

Créer un point  $m$  libre sur le segment  $[AB]$ .

Créer un réel libre  $c$ , et les points  $F$  et  $F'$  repérés dans le plan de coordonnées  $(c, 0)$  et  $(-c, 0)$ .

Créer la droite  $(FF')$ , qui sera le grand axe des ellipses.

Créer le point  $O$ , milieu du segment  $[FF']$ .

Créer le cercle  $C1$  de centre  $F$  et de rayon  $mA$ , et le cercle  $C2$  de centre  $F'$  et de rayon  $mB$ .

Utiliser la palette graphique pour que ces cercles ne soient pas dessinés.

Créer les points  $M$  et  $M'$ , intersections des cercles  $C1$  et  $C2$ .

Créer un cercle  $C$  de centre  $O$  et de rayon  $a/2$ . Il pourra être coloré et servira de référence à la limite ellipse-cercle.

Créer, numérique, calcul algébrique  $e = c/a$ , qui est égal à l'excentricité de l'ellipse.

Afficher  $e$ , avec trois décimales.

Faire piloter  $m$  par la touche  $M$  du clavier,  $c$  par la touche  $C$  et  $a$  par la touche  $A$ .

On peut faire apparaître la demi-ellipse  $E1$ , lieu de  $M$  et la demi ellipse  $E2$ , lieu de  $M'$  de la façon suivante :  
créer, ligne, courbe, lieu d'un point, pilote  $m$  lieu de  $M$  ou lieu de  $M'$ .





# Les maths dans le calendrier : le calendrier perpétuel

Certains de nos élèves de 1<sup>ère</sup> S ayant choisi le calendrier comme thème de recherche de TPE, nous avons voulu leur donner des outils mathématiques utiles et adaptés à leur niveau.

De nombreux articles<sup>1</sup> ont été écrits sur le calendrier perpétuel. Le but de celui-ci est d'expliciter la réalisation des tableaux d'indices<sup>2</sup> que l'on utilise pour déterminer le jour de la semaine correspondant à une date donnée.

## Introduction

Les notions utilisées ici sont la congruence modulo 7 et la partie entière d'un nombre réel (cf. encadrés 4 et 5).

Chaque entier étant congru au reste de sa division euclidienne par 7, et les restes possibles étant 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6 on peut ranger de manière unique chaque entier dans une des 7 classes d'équivalence modulo 7.

On attribue à chacun des 7 jours de la semaine un nombre appelé **indice du jour** : dimanche 0 ; lundi 1 ; mardi 2 ; mercredi 3 ; jeudi 4 ; vendredi 5 ; samedi 6.

On fait ensuite calculer aux élèves les restes de la division euclidienne par 7 de nombres importants pour le calendrier : nombre de jours dans un mois, nombre de jours dans une année.

Après avoir expliqué aux élèves ces notions, on peut leur poser quelques petits exercices simples les mettant en jeu (cf encadré 1 pour les réponses) :

- 1 - Si un mois commence par un lundi, par quel jour commence le mois suivant ?
- 2 - Si une année commence par un lundi quel jour est le 25 septembre ?
- 3 - Sachant que le premier janvier 2002 était un mardi, quel jour était le premier janvier 1900 ?
- 4 - Quel jour de la semaine êtes-vous né ? (en faisant le calcul à partir de la date où est posé l'exercice).
- 5 - Quel est le nombre d'années normales et le nombre d'années bissextiles séparant :
  - a) le premier janvier de l'année 1981 du premier janvier de l'année séculaire la précédant soit l'année 1900.
  - b) le premier janvier de l'année 2081 du premier janvier de l'année séculaire la précédant soit l'année 2000.
- 6 - Quel est le nombre d'années bissextiles et d'années normales séparant le premier janvier de deux années séculaires successives ?

Ce dernier exercice est l'occasion de parler aux élèves de la réforme à la base du calendrier grégorien<sup>3</sup>.

A Rome, en Espagne et au Portugal, le lendemain du jeudi 4 octobre 1582 fut le vendredi 15 octobre.

## Etant donnée une date J, quel est le jour de la semaine qui lui correspond ?

On choisit dans un premier temps une date origine  $J_0$  : le premier mars d'une année fictive 0. (La correction des années bissextiles se faisant à la fin du mois de février il est commode de choisir le premier mars).

On se donne une date J, par exemple le 14 juillet 2002. Une date est formée de quatre éléments :

- le quantième  $q$  du jour (dans le mois)
- le mois  $M$
- le millésime  $a = \overline{mcd u} = 1000 m + 100 c + 10 d + u$  qu'on subdivise en deux éléments :
  - le début  $C = \overline{mc} = 10 m + c$  ;  $C$  est le nombre de centaines du millésime,
  - la fin du millésime  $U = \overline{d u} = 10 d + u$ .

$$a = 100 C + U.$$

Une année séculaire, la dernière d'un siècle, est caractérisable par  $U = 0$ .

Pour notre exemple :  $q = 14$ ,  $M = \text{juillet}$ ,  $a = 2002$  donc  $C = 20$ ,  $U = 02$ .

On fait intervenir trois autres dates associées à  $J_0$  et  $J$  de la façon suivante :

- $J_1$  est le premier mars de l'année séculaire précédant (ou identique à) l'année  $a$ .
- $J_2$  est le premier mars de l'année  $a$ .
- $J_3$  est le premier jour du mois  $M$  de l'année  $a$ .

## Solutions des exercices

**1** - Si un mois commence par un lundi,

- s'il comporte 28 jours, le mois suivant commence par un lundi :  $28 \equiv 0 \pmod{7}$ .
- s'il comporte 29 jours, le mois suivant commence par un mardi :  $29 \equiv 1 \pmod{7}$ .
- s'il comporte 30 jours, le mois suivant commence par un mercredi :  $30 \equiv 2 \pmod{7}$ .
- s'il comporte 31 jours, le mois suivant commence par un jeudi :  $31 \equiv 3 \pmod{7}$ .

**2** - Entre le premier janvier et le premier septembre de l'année il y a 5 mois à 31 jours, 2 mois à 30 jours et 1 mois à 28 jours si elle est non bissextile, 1 mois à 29 jours si elle est bissextile.

Calculons le décalage si l'année est non bissextile :  $5 \cdot 31 + 2 \cdot 30 + 28 \equiv 5 \times 3 + 2 \times 2 + 0 \pmod{7} \equiv 5 \pmod{7}$

Le décalage de 5 jours livre, avec premier janvier = lundi :  $1 + 5 = 6$  : samedi

Donc le 25 septembre sera un mardi :  $6 + 24 \equiv 2 \pmod{7}$ .

Si l'année est bissextile, le décalage sera de :  $5 \times 31 + 2 \times 30 + 29 \equiv 5 \times 3 + 2 \times 2 + 1 \pmod{7} \equiv 6 \pmod{7}$

Le 1<sup>er</sup> septembre sera un dimanche :  $1 + 6 = 7 \equiv 0 \pmod{7}$

Donc le 25 septembre sera un mercredi :  $7 + 24 \equiv 2 \pmod{7}$

**3** - Entre le premier janvier 1900 et le premier janvier 2002, il y a 102 années dont 25 bissextiles et 77 non bissextiles.  
 $25 \times 2 + 77 \times 1 = 127 \equiv 1 \pmod{7}$ . Le premier janvier 1900 était un lundi.

**5** - Entre le premier janvier 1900 et le premier janvier 1981, il y a 81 années dont 20 bissextiles car 1900 n'est pas bissextile.

Entre le premier janvier 2000 et le premier janvier 2081, il y a 81 années dont 21 bissextiles car 2000 est bissextile.

**7** - Avant la réforme grégorienne, l'intervalle séparant le premier janvier de deux années séculaires consécutives comportait toujours 25 années bissextiles

Après la réforme grégorienne deux cas se présentent. Voici un exemple de chacun :

Entre le premier janvier 1600 et le premier janvier 1700, il y a 100 années dont 25 bissextiles car 1600 est bissextile.

Entre le premier janvier 1700 et le premier janvier 1800, il y a 100 années dont 24 bissextiles car 1700 n'est pas bissextile...

<b>L'exemple du 14 juillet 2002 : q = 14 ; M = juillet ; C = 20 ; U = 02</b>				
J <sub>0</sub>	J <sub>1</sub>	J <sub>2</sub>	J <sub>3</sub>	J
Date origine fictive : 1er mars 0 dans le calendrier grégorien	1er mars 2000	1er mars 2002	1er juillet 2002	14 juillet 2002
Durée en jours	$\Delta(J_0J_1) = 20$ siècles	$\Delta(J_1J_2) = 2$ ans	$\Delta(J_0J_1) = 4$ mois	$\Delta(J_0J_1) = 13$ jours
son reste modulo [7]	I <sub>0</sub> = 0	I <sub>1</sub> = 2	I <sub>2</sub> = 3	I <sub>3</sub> = 6
Calculs	$5 \times C + E(C / 4)$ = $105 \equiv 0 \pmod{7}$	$U + E(U / 4)$ = $2 \equiv 2 \pmod{7}$	3 (juillet)	$I_3 \equiv q - 1 \pmod{7}$ = $13 \equiv 6 \pmod{7}$

Pour notre exemple :  
 $J_1$  est le premier mars 2000,  
 $J_2$  est le premier mars 2002,  
 $J_3$  est le premier juillet 2002.

$\Delta(J_0J)$  est la durée (algébrique) de l'instant  $J_0$  vers l'instant  $J$  (exprimée en nombre de journées).

$$\Delta(J_0J) = \Delta(J_0J_1) + \Delta(J_1J_2) + \Delta(J_2J_3) + \Delta(J_3J)$$

$\Delta(J_0J_1)$  est la durée de l'instant  $J_0$ , premier mars de l'année 0 vers l'instant  $J_1$ , premier mars de l'année séculaire précédant a. Pour la calculer, on a besoin de connaître le début C du millésime. Le reste modulo 7 de ce nombre est noté  $I_0$ .

$\Delta(J_1J_2)$  est la durée de l'instant  $J_1$ , premier mars de l'année séculaire précédant l'année a vers la date  $J_2$ , premier mars de l'année a. Pour la calculer, on a besoin de connaître la fin U du millésime. Le reste modulo 7 de ce nombre est noté  $I_1$ .

$\Delta(J_2J_3)$  est la durée de l'instant  $J_2$ , premier mars de l'année a, vers l'instant  $J_3$ , premier jour du mois M. Pour la calculer, on a besoin de connaître le mois M. Le reste modulo 7 de ce nombre est noté  $I_2$ .

$\Delta(J_3J)$  est la durée de l'instant  $J_3$ , premier jour du mois M, vers l'instant J. Pour la calculer, on a besoin de connaître le quantième q. Le reste modulo 7 de ce nombre est noté  $I_3$ .

On a donc,  $I(J)$  désignant l'indice de la date J :

$$I(J) - I(J_0) \equiv I_3 + I_2 + I_1 + I_0 \pmod{7}$$

### → Calcul de $I_3$

Entre les dates  $J_3$  et J il y a  $(q - 1)$  jours, donc  $I_3$  est congru à  $(q - 1)$  modulo 7.

$$I_3 \equiv q - 1 \pmod{7}$$

Pour notre exemple  $(q - 1) = 13$  donc  $I_3 = 6$ .

### → Calcul de $I_2$

Pour mars on a  $I_2 = 0$ .

$31 \equiv 3 \pmod{7}$  donc pour avril on aura  $I_2 = 3$ .

$30 \equiv 2 \pmod{7}$  donc pour mai on aura  $I_2 = 3 + 2 = 5$ .

et ainsi de suite ...

Pour le mois de février d'une année normale, la différence  $\Delta(J_2J_3)$  est égale à - 28 soit 0 modulo 7. Pour février d'une année normale on aura alors  $I_2 = 0$ .

Pour le mois de février d'une année bissextile, la différence  $\Delta(J_2J_3)$  est égale à - 29 soit 6 modulo 7. Pour février d'une année bissextile, on aura alors  $I_2 = 6$ .

Pour le mois de janvier d'une année normale, la différence

$\Delta(J_2J_3)$  est égale à - 28 - 31 soit 4 modulo 7. Pour janvier d'une année normale on aura alors  $I_2 = 4$ .

Pour le mois de janvier d'une année bissextile, la différence  $\Delta(J_2J_3)$  est égale à - 29 - 31 soit 3 modulo 7. Pour janvier d'une année bissextile on aura alors  $I_2 = 3$ .

On obtient donc le tableau suivant (où (n) désigne une année normale et (b) une année bissextile) :  
 pour notre exemple  $I_2 = 3$ .

$I_2$	mois
0	février (n) ; mars ; novembre.
1	juin
2	septembre ; décembre.
3	janvier (b) ; avril ; juillet
4	janvier (n) ; octobre
5	mai
6	février (b) ; août.

### → Calcul de $I_1$

Du premier mars d'une année au premier mars de l'année suivante, la durée est de 365 jours si la deuxième année est normale et de 366 jours si la deuxième année est bissextile.  $365 \equiv 1 \pmod{7}$  et  $366 \equiv 2 \pmod{7}$  donc une année normale crée un décalage de 1 et une année bissextile un décalage de 2.

Pour calculer la durée du premier mars de l'année séculaire précédant a vers le premier mars de l'année a on calcule le nombre total d'années et le nombre d'années bissextiles rencontrées.

Le nombre total d'années est U et le nombre d'années bissextiles rencontrées est la partie entière de  $U / 4$  (on a commencé au premier mars pour ne pas se poser le problème de savoir si l'année séculaire est ou non bissextile).

$$J_2 - J_1 = 365 \times U + 1 \times E(U / 4) \equiv U + E(U / 4) \pmod{7}$$

$$I_1 \equiv U + E(U / 4) \pmod{7}$$

Pour notre exemple  $I_1 = 2$  ( $U = 2$  donc  $E(U/4) = 0$ ).

Pour C = 00,  $I_1 = 0$  ; pour C = 01,  $I_1 = 1$  ; pour C = 02,  $I_1 = 2$  ; pour C = 03,  $I_1 = 3$  ; pour C = 04,  $I_1 = 5$  ; pour C = 06,  $I_1 = 6$ ...

### → Calcul de $I_0$ dans le calendrier grégorien

Dans le calendrier julien, une année sur 4 est bissextile donc l'intervalle séparant deux années séculaires consécutives est formé de 25 années bissextiles et de 75 années normales. le décalage correspondant à un siècle est donc 125, congru à 6 modulo 7.

Dans le calendrier grégorien, seule une année séculaire sur 4 est bissextile. La durée séparant le premier mars d'une année séculaire du premier mars de l'année séculaire non bissextile suivante comporte 24 années bissextiles et 76 années nor-

males. Le décalage correspondant est donc de 124 congru à 5 modulo 7.

Entre le premier mars de l'année 0 et le premier mars de l'année a, on a C siècles comportant 24 ou 25 années bissextiles dont E (C/4) en comportent 25.

$$I_0 \equiv C \times 5 + E(C/4) [7]$$

Pour notre exemple  $I_0 = 0$  (C = 20 donc  $E(C/4) = 5$ , donc  $I_0 \equiv 20 \times 5 + 5 \equiv 0 [7]$ ). En effet, pour C = 19 on a  $E(C/4) = 4$  donc  $I_0 \equiv 5 \times 19 + 4 \equiv 1 [7]$ .

On peut maintenant connaître l'indice de n'importe quel jour J si on connaît l'indice de  $J_0$ .

Pour cela on part de l'indice connu d'un jour J : le 14 juillet 2002 est un dimanche.  $I(J) = 0$   
Donc  $0 \equiv I(J_0) + 0 + 2 + 3 + 6 \equiv I(J_0) + 4 [7]$   
donc  $I(J_0) \equiv -4 [7]$  donc  $I(J_0) = 3$ .

Le premier mars de l'année fictive  $J_0$  est donc un mercredi. Pour n'importe quel jour J on a alors :

$$I(J) \equiv 3 + I_3 + I_2 + I_1 + I_0 [7]$$

### → Indices pratiques

Pour une plus grande commodité d'utilisation, les indices théoriques  $I_0, I_1, I_2, I_3$  sont remplacés par des indices pratiques définis ci-dessous et présentés dans les tableaux d'indices de la page ci-contre.

on pose  $i_3 = I_3 + 1 \equiv q [7]$  :  $i_3$  est l'indice du quantième.  
on pose  $i_2 = I_2 + 3$  de manière à ce que l'indice du mois de janvier (n) soit 0 ;  $i_2$  est l'indice du mois.  
on pose  $i_1 = I_1$  ;  $i_1$  est l'indice de la fin du millésime.  
On pose  $i_0 = I_0 + 6$  de manière à avoir  $i_0 = 0$  pour le début du millésime 19.  $i_0$  est l'indice de début de millésime.  
On a alors  $I(J) \equiv 3 + i_3 - 1 + i_2 - 3 + i_1 + i_0 - 6 [7]$  donc :

$$I(J) \equiv i_3 + i_2 + i_1 + i_0 [7]$$

### → Cas du calendrier julien

Dans le cas du calendrier julien,  $J_0$  est le premier mars de l'année julienne fictive 0, qui n'est pas le même que précédemment. On choisit pour J le jeudi 4 octobre 1582, dernière date julienne avant la réforme grégorienne à Rome.

On a pour cette date  $I(J) = 4$  ;  $I_3 = 3$  ;  $I_2 = 4$  ;  $I_1 = 4$  ;  
 $I_0 = 15 \times 6 \equiv 6 [7]$   
Donc  $I(J_0) + 3 + 4 + 4 + 6 \equiv 4 [7]$  donc  $I(J_0) = 1$ .  
Le premier mars julien 00 aurait été un lundi. D'où pour un jour J quelconque du calendrier julien :

$$I(J) \equiv 1 + I_3 + I_2 + I_1 + I_0 [7]$$

$$\text{On a alors } I(J) \equiv 1 + i_3 - 1 + i_2 - 3 + i_1 + I_0 [7] \\ \equiv i_3 + i_2 + i_1 + I_0 - 3 [7]$$

Pour obtenir  $I(J) \equiv i_3 + i_2 + i_1 + i_0 [7]$   
on doit avoir  $i_0 \equiv I_0 - 3 [7]$ . On pose donc  $i_0 = I_0 + 4$ .

### Notes et références :

#### 1 - Références sur le calendrier perpétuel :

CC n° 20 : idées pour la programmation d'un calendrier grégorien par Maurice Carmagnole.

CC n° 31 : construction et mode d'emploi d'un calendrier perpétuel (maquette) par Jean-Paul Parisot.

CC n° 76 : un calendrier perpétuel (algorithme) par Michel Toulmonde.

CC n° 91: le calendrier perpétuel (maquette) par Michel Montangerand.

Une fiche du HS 3 (Le temps et les constellations) est consacrée au calendrier perpétuel.

Pour cet article, nous nous sommes inspirés de l'article de Roger Cuculière, "les mathématiques du calendrier", dans "Pour la Science" de novembre 1986.

#### 2 - Les tableaux d'indices :

Ils sont présents dans les articles cités plus hauts et dans les éphémérides du BDL (Bureau des longitudes).

#### 3 - La réforme grégorienne :

Ce sujet est traité dans tous les ouvrages sur les calendriers. C'est l'occasion de citer ici quelques références :

"La question du calendrier" ; Abbé Chauve-Bertrand, La Renaissance du livre Paris, 1920.

"Le calendrier : Histoire du monde" ; Ph. Vidal ; éd. Traditionnelles, 1978.

"Le calendrier" ; Paul Couderc ; que sais-je ? ; PUF, n° 203, 6e édition, 1986.

"HS n°3 : le temps et les constellations" ; Josée Sert, Cécile Schulman et Gilbert Walusinski, 1991.

"Calendriers et chronologie" ; Jean-Paul Parisot, et Françoise Suagher ; Masson, 1996.

"Le temps compté, le temps conté" ; David Ewing Duncan ; NIL éditions.

"La saga des calendriers ou le frisson millénariste" ; Jean Lefort ; Pour la Science, Belin 1998.

"Numéro spécial de "M13" sur les calendriers" ; Jacques Gispert ; bulletin de l'Association Marseillaise d'Astronomie (déc. 99), centre d'animation de quartier du Petit Bosquet, 213, avenue de Montolivet, 13012 Marseille.

"Rythmes du temps, astronomie et calendriers" ; Emile Biémont ; De Boeck, 2000 (recension dans le CC 91).

"Le calendrier, maître du temps?" ; Jacqueline de Bourgoing, Découvertes Gallimard n° 400 (recension dans le CC 95).

## Tableaux d'indices

1	lundi
2	Mardi
3	Mercredi
4	Jeudi
5	Vendredi
6	Samedi
0	Dimanche

Indices des jours

1	1	8	15	22	29
2	2	9	16	23	30
3	3	10	17	24	31
4	4	11	18	25	
5	5	12	19	26	
6	6	13	20	27	
0	7	14	21	28	

Indices  $i_3$  du quantième

L'indice du quantième est le reste modulo 7 du quantième du mois

1	mai		
2	février (b)	août	
3	février (n)	mars	novembre
4	juin		
5	septembre	décembre	
6	janvier (b)	avril	juillet
0	janvier (n)	octobre	

Indices  $i_2$  du mois

1	1	7	12	18	29	35	40	46	57	63	68	74	85	91	96
2	2		13	19	24	30	41	47	52	58	69	75	80	86	97
3	3	8	14		25	31	36	42	53	59	64	70	81	87	92
4		9	15	20	26		37	43	48	54	65	71	76	82	93
5	4	10		21	27	32	38	49	55	60	66	77	83	88	94
6	5	11	16	22		33	39	44	50	61	67	72	78	89	95
0	0	6		17	23	28	34	45	51	56	62	73	79	84	90

Indices  $i_1$  de fin de millésime

A partir de l'indice 0 pour la fin de millésime 00, on ajoute 1 pendant trois ans et la quatrième année on ajoute 2

1	3	10					
2	2	9		18	22	26	30
3	1	8	15	J			
4	0	7	14	17	21	25	29
5		6	13				
6		5	12	16	20	24	28
0		4	11	15G	19	23	27

Indices  $i_0$  de début de millésime julien jusqu'au 4 octobre 1582 grégorien à partir du 15 octobre 1582

A partir de 00 (J) on retranche 1 chaque début de millésime.

A partir de 15 (G) on retranche 1 puis trois fois 2 puis on recommence.

## La congruence modulo 7

Sur un cadran d'horloge à douze graduations horaires les instants 10 h, 22 h, 34h,..., - 2 h, - 14 h, ... voient l'aiguille à la même place et 5 h après 10 h il est 3 h. Pour faciliter ces raisonnements arithmétiques le mathématicien allemand C. F. Gauss inventa en 1801 (à 24 ans...) l'arithmétique modulaire dont voici un petit résumé dans le cas du nombre 7.

Les nombres  $1 ; 8 (7 + 1) ; 15 (2 \times 7 + 1) ; 22 (3 \times 7 + 1) ; -6 (-1 \times 7 + 1) ; -13 (-2 \times 7 + 1) \dots$  sont congrus à 1 modulo 7. Ils ont le même reste dans la division euclidienne par 7 : 1

**Définition 1** : a et b étant deux entiers (relatifs), on dit que a est congru à b modulo 7, s'il existe un entier relatif k tel que  $a = 7 \times k + b$ .

Ceci se note  $a \equiv b [7]$ .

**Propriété 1** : la relation de congruence modulo 7 est une relation d'équivalence dans l'ensemble Z des entiers.

Elle est **réflexive** : on a pour tout entier a  $a \equiv a [7]$   
En effet  $a = 7 \cdot 0 + a$

Elle est **symétrique** : quels que soient les entiers a et b : si  $a \equiv b [7]$  alors  $b \equiv a [7]$ .  
En effet s'il existe un entier k tel que  $a = 7 \cdot k + b$ , alors il existe un entier (-k) telque  $b = 7 \cdot (-k) + a$ .

Elle est **transitive** : quels que soient les entiers a, b, c : si  $a \equiv b [7]$  et si  $b \equiv c [7]$  alors  $a \equiv c [7]$ .  
En effet s'il existe un entier k et un entier k' tels que  $a = 7 \cdot k + b$  et  $b = 7 \cdot k' + c$  alors  
 $a = 7 \cdot k + 7 \cdot k' + c = 7 \cdot (k + k') + c$ .

**Définition 2** : on appelle classe d'équivalence d'un entier l'ensemble de tous les entiers qui lui sont congrus.

La classe de l'entier 29 contient les entiers 1, 8, 16, 23, 29, ..., - 6, - 13, - 20, - 27, ...  
C'est aussi la classe de l'entier 1.

**Définition 3** : division euclidienne par 7 (c'est la division de l'école primaire).

Pour tout entier relatif a il existe un unique couple d'entiers relatifs (q,r) vérifiant  
 $a = 7 \cdot q + r$  et  $0 \leq r < 7$ .

q est le quotient euclidien de a par 7 et r le reste modulo 7 de l'entier a.

On a alors  $a \equiv r [7]$ .

Les classes d'équivalence de la congruence modulo 7 sont donc celles des 7 restes possibles : 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6.

**Propriété 3** : si deux entiers sont congrus modulo 7, alors ils ont même reste dans la division euclidienne par 7.

En effet si  $a \equiv b [7]$  et si b a pour reste r dans la division euclidienne par 7,  
alors  $a = 7 \cdot k + b$  et  $b = 7 \cdot k' + r$  et  $0 \leq r < 7$   
donc  $a = 7 \cdot (k + k') + r$  et  $0 \leq r < 7$  donc a pour reste r dans la division euclidienne par 7.

**Propriété 4** : la congruence modulo 7 est compatible avec l'addition, la soustraction et la multiplication dans Z.

Pour tous entiers a, b, c, d :

si  $a \equiv b [7]$  et si  $c \equiv d [7]$ , alors

$$a + c \equiv b + d [7]$$

$$a - c \equiv b - d [7]$$

$$ac \equiv bd [7].$$

En effet s'il existe un entier k et un entier k' tels que  
 $a = 7 \cdot k + b$  et  $c = 7 \cdot k' + d$ , alors :  
 $a + c = 7 \cdot (k + k') + b + d$   
 $a - c = 7 \cdot (k - k') + b - d$   
 $ac = 7 \cdot (7 \cdot kk' + 7 \cdot kd + 7 \cdot k'b) + bd$ .

## Partie entière d'un nombre réel

Pour tout réel x, il existe un unique entier relatif n appelé partie entière du réel x et noté E(x), tel que :  
 $n \leq x < n + 1$

$$26 / 7 \approx 3,71$$

$$E(26 / 7) = 3 \text{ car } 3 \leq 26 / 7 < 4$$

Le reste de la division euclidienne de 26 par 7 est

$$26 - 7 \times 3 = 26 - 7 \times E(26 / 7) = 5$$

$$- 26 / 7 \approx - 3,71$$

$$E(- 26 / 7) = - 4 \text{ car } - 4 \leq - 26 / 7 < - 3$$

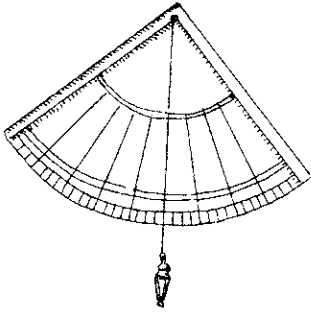
Le reste de la division euclidienne de - 26 par 7 est

$$- 26 - 7 \times (- 4) = - 26 - 7 \times E(- 26 / 7) = 2$$

Plus généralement :

le reste modulo 7 du naturel n est  $n - 7 \times E(n / 7)$ .





# Nicolas Copernic

Christian Scotta

HISTOIRE

Vous avez lu dans le précédent numéro, 98, le début de cet article où Christian Scotta exposa la vie de Copernic puis le système copernicien. Les mouvements de la Terre et le rôle du Soleil y étaient précisés.

Aujourd'hui notre auteur conclut son étude en détaillant les sphères célestes, les planètes, la physique copernicienne. Des précisions de démarche, de vocabulaire, de calcul sont données in fine dans sept annexes suivies d'un glossaire.

## Les sphères célestes

### Le Monde est une sphère.

Le monde est sphérique, comme le sont ses parties, le Soleil et les planètes. L'orbe des Etoiles Fixes "contient toutes choses et leur donne un lieu" : Copernic ne dit rien sur l'épaisseur de cet orbe. Il refuse de se prononcer sur la finitude ou l'infinitude de l'Univers. Il ne pensait pas, comme Platon ou Aristote, qu'à l'extérieur de la sphère des étoiles fixes, il n'y a rien, ni espace, ni matière : en effet, le néant contiendrait quelque chose.

C'est pourquoi le Ciel peut être fini sur sa surface convexe et infini sur sa concavité. Dans ce cas, il est nécessairement immobile. Mais il laisse aux "physiologues" la question de savoir si l'univers est fini ou infini. Au chapitre 10, la sphère des étoiles fixes "se contient elle-même et contient tout", et, en étant immobile, est le "lieu de toutes choses".

Même si l'épaisseur de la sphère est infinie, le monde de Copernic est fini, délimité par la concavité de la sphère céleste<sup>1</sup>. La sphère étoilée, immobile, est le référen-

tiel des mouvements planétaires. Jean Jacques Szczeciniarz qualifie cette sphère céleste d'espace absolu, parce qu'elle est immobile et que, se contenant elle-même, elle n'est pas conditionnée par autre chose<sup>2</sup>.

Certes, cette sphère semble correspondre à la définition que Newton donne de l'espace absolu ("sans relation à quoi que ce soit d'extérieur, restant toujours semblable et immobile"<sup>3</sup>).

Mais Newton pense plutôt à un espace vide, infini et isotrope : pour lui, contrairement à Copernic, "les étoiles fixes sont dispersées de façon régulière dans toutes les parties de l'espace"<sup>4</sup>.

### Les sphères célestes sont-elles matérielles ?

Copernic parle des "orbes célestes" comme s'ils étaient matériels. Par exemple, il évoque l'orbe ou la sphère qui existe entre la convexité de l'orbe de Vénus et la concavité de l'orbe de Mars et qui contient la Terre et la Lune. Ou : "Il y a plusieurs mouvements dus à plusieurs sphères". Ou encore : "sphère des étoiles attachées".

Nous avons vu qu'un troisième mouvement de la Terre découle de la solidité de la sphère qui emporte la Terre autour du Soleil.

Le mouvement circulaire étant naturel à la sphère, les sphères célestes n'ont donc pas besoin d'être en contact pour s'entraîner les unes aux autres, ni la sphère de Saturne de toucher la sphère des fixes pour être entraînée par elle (comme chez Aristote).

Mais dans ses démonstrations, Copernic n'utilise pas des sphères concentriques (comme le fit Eudoxe) mais seulement les cercles tracés sur ces sphères (déférents et épicycles) : difficile de savoir si, en physicien, il pensait à des sphères matérielles - faites d'éther, comme chez Aristote - ou si, en géomètre, il pensait à des sphères imaginaires - comme Eudoxe . Mais l'explication qu'il donne du 3<sup>e</sup> mouvement de la Terre ne se comprend que s'il imaginait l'axe terrestre fixé dans une sphère en rotation autour du Soleil.

## Les planètes

### Différence entre les étoiles et les planètes.

Les planètes réfléchissent la lumière du Soleil. Copernic indique que dans le système de Ptolémée, on ne devrait voir qu'un croissant de Vénus ou de Mercure sans préciser que dans le sien, on devrait voir des phases identiques à celles de la Lune. Il faudra attendre la lunette de Galilée pour le constater (1610). Galilée reprend cet argument<sup>5</sup>.

Copernic met en parallèle la différence entre la lumière des étoiles (scintillation) et celle des planètes (pas de scintillation) avec la différence entre les objets mus, les planètes, et les objets non mus, les étoiles.

Aristote expliquait ainsi cette scintillation : en contemplant les étoiles, notre regard porte plus loin qu'en contemplant les planètes plus proches . Avec Copernic, un espace immense sépare la sphère de Saturne de la sphère des fixes : notre regard porte donc encore plus loin. Mais il ne dit pas si la

lumière des étoiles leur est propre.

Le Ciel est plus noble que la Terre et les planètes parce qu'il est immobile alors qu'elles se déplacent. L'immobilité est un caractère de noblesse : Copernic réutilise cette idée déjà énoncée par Platon .

### Les planètes divinisées.

Dans son manuscrit, Copernic parle "*des révolutions du monde divin*" et de "*corps divins*". Dans l'édition imprimée, il écrit simplement : "*corps célestes*".

Il s'agit sans doute d'un souvenir de Ptolémée qui écrit dans l'Almageste "*êtres divins et célestes*", expression que reprend Rhéticus. Pour Copernic, les corps célestes "*sont constitués dans l'arrangement le meilleur*" . Il écrit à propos de Mercure : la théorie du mouvement de cette planète doit la défendre "*du dommage et des occasions de dégradation*", preuve de la pureté qu'il accorde aux planètes.

On pensait, depuis Aristote, que les planètes et les étoiles sont inaltérables et d'une nature différente du monde sublunaire. Par contre, la Terre était le lieu le plus impur du monde, ce que niera Galilée : "elle n'est pas la sentine de l'ordure et des déchets du monde"<sup>6</sup>.

Mais Copernic fait de la Terre l'une des planètes . Or, la Terre est le lieu du changement et de la dégradation. Comment concilier ces deux caractères contradictoires de la Terre ? Si Copernic affirme que la Terre produit plantes et animaux parce qu'elle est fécondée par le Soleil, il n'aborde pas ce caractère contradictoire entre la nature divine et la nature corruptible de la Terre.

Mais il reste une distinction entre le Ciel plus noble en raison de son immobilité, et les planètes moins nobles car sujettes aux mouvements.

L'Anglais Thomas Digges (1576) continue de faire de la Terre un corps impur : "*La sphère des éléments comprise dans l'orbite de la Lune, je l'appelle la sphère de la Mortalité, parce que c'est l'empire particulier de la Mort.*"

## La physique de Copernic

### Mouvement rectiligne et mouvement circulaire.

Copernic retient la division des mouvements en mouvements naturels (les mouvements circulaires) et en mouvements violents (les mouvements rectilignes).

#### Mouvements naturels :

Le mouvement circulaire uniforme est un mouvement simple et perpétuel qui appartient par nature aux corps sphériques. La sphère exprime sa forme en tournant : donc, la Terre tourne sur elle-même et autour du Soleil parce qu'elle est sphérique.

Pour Copernic, le mouvement naturel est lié à la géométrie de la sphère, et n'a pas besoin d'une force motrice externe.

Telle est l'interprétation d'Alexandre Koyré : "Placez un corps rond dans l'espace, il va tourner... sans avoir besoin... de moteur qui entretienne son mouvement". Alors que pour Aristote, le mouvement naturel est lié à la substance (les sphères célestes sont constituées par l'éther ou 5<sup>e</sup> élément) et a besoin d'une cause externe (le Premier Mobile lui-même immobile).

Le mouvement circulaire n'est plus uniforme :

- si le corps n'est pas parfaitement sphérique.
- ou bien si la force motrice est inconstante : dans ce cas, Copernic envisage la possibilité que ce mouvement circulaire soit entretenu par une cause (la force motrice), celle-ci étant variable.

#### Le mouvement rectiligne :

Les mouvements rectilignes des corps (vers le bas pour les graves, vers le haut pour les corps légers comme le feu) sont des mouvements violents, en ce sens qu'ils expulsent les corps hors de leurs lieux naturels.

Dans ce cas, les corps cherchent à retourner dans leurs lieux naturels (la surface de la Terre) où ils seront au repos (par rapport à cette surface, qui est en rotation). "*L'état d'immobilité est plus noble et plus divin que l'état de changement.*"



La recherche du repos est l'inertie au sens où l'entendra Képler pour qui "toute matière tend à rester en repos dans le lieu où elle se trouve"<sup>7</sup>.

Mais cette distinction entre mouvements naturels et violents est un "*acte de raison*".

Chez Aristote, cette distinction est réelle, liée à la situation des corps dans l'univers : les corps supra lunaires (les astres placés au-delà de la Lune) ne connaissent que le mouvement circulaire, tandis que les corps sublunaires (la Terre et les couches de feu, d'air et d'eau qui l'entourent) ne connaissent que les mouvements rectilignes. Copernic combine les deux sortes de mouvements (contrairement au Stagirite), mais il ne dit rien de la trajectoire qui résulte de ces deux mouvements.

### La gravité.

La gravité reste une qualité occulte. C'est "*une certaine appétence naturelle... donnée aux parties de se retrouver en leur unité et intégrité, se réunissant sous la forme d'un globe*". La gravité est la "nostalgie de la sphéricité" (A. Koestler<sup>8</sup>).

Chez Aristote, les corps tombent vers le centre de la Terre parce que celle-ci est placée au centre du monde. Chez Copernic, la Terre n'est plus au centre du monde : les corps tombent vers le centre de la Terre, mais d'autres corps doivent tomber vers les centres des autres planètes. Chaque planète est donc un centre "attractif", ce qui suggère une unité de nature ou de comportement entre les planètes et la Terre.

Mais il ne s'agit pas de l'attraction universelle entre les corps : chaque planète agit indépendamment des autres, et elles ne s'attirent pas les unes les autres. Par contre, un corps cesse d'être lourd ou léger dès qu'il atteint le sol : il a rejoint sa totalité. La légèreté résulte de l'action de la chaleur qui repousse les corps vers le haut. On a ici l'ébauche d'une analyse dynamique du mouvement.

### La relativité.

La rotation de la Terre et sa révolution autour du Soleil sont, dans la pratique, imperceptibles pour l'observateur terrestre. Nous sommes dans la même situation qu'un marin qui peut se considérer immobile dans son navire et attribuer le mouvement au rivage. Nous avons vu que la rotation axiale ne produit aucun effet sur les corps placés à la surface de la Terre et que la révolution de la Terre autour du Soleil ne produit aucun effet de parallaxe sur les étoiles.

La Terre au repos et la Terre en mouvement sont deux possibilités indiscernables l'une de l'autre : mais la 2<sup>e</sup> possibilité (révolution de la Terre) permet, entre autres, d'expliquer la variation d'éclat des planètes ainsi que leurs stations et rétrogradations. Szczeciniarz voit une ébauche d'une théorie de la relativité (galiléenne) dans le fait que Copernic parle d'une indiscernabilité du repos et du mouvement de la Terre<sup>9</sup>.

Par conséquent, seuls nous sont perceptibles les mouvements rectilignes (vers le centre et à partir du centre), parce qu'ils se superposent au mouvement commun de rotation que la Terre communique à tous les corps placés sur sa surface. On pense aux arguments de Galilée pour décrire la chute d'une pierre lâchée du haut d'une tour. Pour nous, "qui nous mouvons tous de conserve avec le mouvement diurne, en même temps que la pierre, le mouvement diurne est comme s'il n'existait pas, il reste insensible, imperceptible et n'a aucune action ; seul est observable pour nous le mouvement qui nous fait défaut, le mouvement de la pierre qui rase la tour en tombant"<sup>10</sup>.

Mais l'univers de Copernic possède des directions absolues, le centre du Soleil et la face concave de la sphère des fixes. Le choix d'origine des coordonnées n'y est pas arbitraire, comme ce serait le cas dans un univers uniformément peuplé d'étoiles (comme chez Giordano Bruno). Certes, nous ne percevons pas la révolution de la Terre autour du Soleil, mais c'est à cause du manque de résolution des instruments. La parallaxe des étoiles est très petite,

nous dit Copernic, puisqu'elle ne nous est pas perceptible mais elle n'est pas nécessairement nulle.

## Conclusion

Copernic élabore un système solaire où les planètes, peut-être portées par des orbites solides, se déplacent selon des mouvements circulaires uniformes, conformément à la physique d'Aristote. Mais il prend de la distance par rapport à cette physique : il abolit la dichotomie entre le monde sublunaire et le monde supra lunaire. Pour répondre aux objections contre les mouvements de la Terre, il compose le mouvement rectiligne avec le mouvement circulaire et il utilise un principe de relativité à propos du mouvement local, en employant des arguments que Galilée développera par la suite.

Bien que délogé du centre du monde, la Terre et l'humanité continuent d'occuper une place privilégiée, proche du Soleil situé au milieu de l'Univers.

Tel est Copernic, homme de la Renaissance, admirateur des Anciens et plus particulièrement de Ptolémée. Il est "tout imprégné de pythagorisme : beauté du Soleil, perfection de la sphère, harmonie du cosmos"<sup>11</sup>. Le monde reflète la perfection divine : la "machine du monde" a été faite "pour nous" par l'auteur "le meilleur et le plus exact", c'est-à-dire Dieu<sup>12</sup>.

Cela n'empêche pas la rigueur scientifique : il n'évita pas le problème des irrégularités observées dans les mouvements planétaires, ce qui l'amena à encombrer son système avec des cercles excentriques et de cercles épicycles, et à produire un système bien plus compliqué que ce qu'il annonce dans les premiers chapitres du "*De Revolutionibus*".

## Annexe 1. Le "*Commentariolus*".

Copernic diffuse ce "petit commentaire", probablement à partir de 1512. Il

y énonce l'essentiel de son système mais sans aucune démonstration.

Dans le Préambule, il établit le "principe du mouvement parfait", le mouvement circulaire uniforme.

Il énonce ensuite 7 postulats ("pétitions") :

1<sup>er</sup> postulat : les orbites célestes n'ont pas le même centre (c'est-à-dire : la Terre est au centre de l'orbite lunaire, le Soleil est au centre des orbites planétaires).

2<sup>e</sup> postulat : la Terre est à la fois le centre des graves et le centre de l'orbite lunaire.

3<sup>e</sup> postulat : le centre du monde est proche du Soleil mais ne coïncide pas avec lui.

4<sup>e</sup> postulat : la distance de la Terre au Soleil est très petite par rapport au rayon de la sphère des Étoiles Fixes.

5<sup>e</sup> postulat : rotation diurne la Terre.

6<sup>e</sup> postulat : révolution annuelle de la Terre.

7<sup>e</sup> postulat : explication des stations et des rétrogradations des planètes.

## Annexe 2. La genèse du système.

Copernic n'explique pas comment il en est venu à mettre la Terre en mouvement. Dans sa préface au Pape Paul III, il se déclare insatisfait du système ptoléméen qui aboutit à une construction monstrueuse. Il rechercha parmi les Anciens si quelques uns n'avaient pas eu une opinion différente. Il trouva dans Cicéron ("Académiques") que Hicétas de Syracuse (qu'il nomme Nicétas) croyait à la rotation diurne de la Terre. Puis il cite Plutarque ("De placitis philosophorum") qui évoque Héraclide du Pont et Ecphantus qui admettaient tous deux la rotation diurne de la Terre. "*Partant de là, j'ai commencé, moi aussi, à penser à la mobilité de la Terre.*"

C'est la version retenue par Galilée ("Dialogue sur les deux grands systèmes du monde"). Copernic est parti du système ptoléméen qui ne correspond pas aux phénomènes célestes. Il rechercha si quelques anciens avaient élaboré un système différent. Et, en fai-

sant tourner la Terre sur elle-même et autour du Soleil, il aboutit à un système répondant aux phénomènes.

Au Chapitre 5 du "De Revolutionibus", Copernic évoque les mêmes personnages que dans la préface au Pape, à savoir Héraclides, Ecphantus et Hicétas qui faisaient tourner la Terre sur son axe tout en la plaçant au centre du monde. Or, il propose le cheminement suivant.

- nier la position centrale de la Terre ;

- admettre que la distance de la Terre au Soleil et que les distances des planètes au Soleil soient très petites par rapport à la grandeur de la sphère des Fixes ;

- rechercher un centre autour duquel les mouvements planétaires deviennent réguliers.

Si on les rapporte au Soleil (plus exactement au centre de l'orbite terrestre) et non plus au centre de la Terre, ces mouvements planétaires deviennent réguliers.

Puis il cite le Pythagoricien Philolaos, qui plaçait un feu central et non pas le Soleil au centre du monde. Il omet de citer Aristarque de Samos.

Au Chapitre 10, il évoque Martianus Capella qui faisait tourner Mercure et Vénus autour du Soleil et non autour de la Terre (c'est le système d'Héraclide du Pont). L'orbite de Vénus entoure celle de Mercure. En rapportant les orbites des planètes Mars, Jupiter et Saturne à ce centre, les orbites de ces planètes entourent la Terre. Alors on ne se tromperait guère, comme le prouve l'ordre canonique de leurs mouvements (les périodes de révolutions sont plus longues quand les planètes sont plus loin du Soleil). On pourrait penser que Copernic va exposer ce qui sera le système que Tycho Brahe.

Mais Copernic ne s'arrête pas là. Il existe un espace vide, une coupure entre les orbites de Vénus et de Mars. Copernic y fait tourner la Terre accompagnée de la Lune.

Jean-Jacques Szczeciniarz ne croit pas que Copernic ait envisagé un système tychonien. En effet, après avoir placé Mercure et Vénus autour du Soleil, Copernic aurait pu faire tourner les planètes Mars, Jupiter et Saturne

autour du Soleil : mais alors les orbites se seraient entrecroisées, du moins si, comme le pense Jean-Jacques Szczeciniarz, Copernic utilise des orbites solides. Par contre, comme le souligne avec raison Jean-Jacques Szczeciniarz, deux centres de révolutions, comme chez Tycho – un autour de la Terre, l'autre autour du Soleil – ne correspondraient pas à la recherche d'unité de Copernic. Aussi, celui-ci place-t-il l'orbite mobile de la Terre entre ceux de Vénus et de Mars, l'ensemble tournant autour du Soleil, sans passer par une étape tychonienne ("Copernic et la révolution copernicienne").

## Annexe 3. Calcul des distances planétaires.

### Planètes supérieures :

A l'opposition et à la conjonction, le Soleil, la Terre et la planète sont sur une ligne droite.

A la quadrature suivante, la Terre forme un angle droit avec le Soleil et la planète. A ce moment là, un observateur placé sur la planète verrait la Terre à sa plus grande distance angulaire du Soleil. Pour lui, le rayon de l'orbite terrestre sous-tendrait un angle  $\alpha$ . La distance de la planète est égale à l'inverse du sinus de l'angle  $\alpha$ ..

Il est plus facile de déterminer le moment de l'opposition que celui de la conjonction. A l'opposition, la Terre est entre le Soleil et la planète. La planète se lève au coucher du Soleil et brille toute la nuit. A la conjonction, le Soleil est entre la Terre : la planète est alors difficile à observer car elle est proche du Soleil. Il n'est pas facile de déterminer le moment où la Terre est en quadrature. Copernic utilisa des observations voisines de la quadrature.

### Planètes inférieures :

A l'élongation maximale, la planète est pour nous à sa plus grande distance angulaire du Soleil. Sa distance au Soleil est égale au sinus de cet angle  $\alpha$ ..

Les distances obtenues sont des multiples de la distance de la Terre au centre du Soleil. Théoriquement du moins, parce qu'elles sont mesurées par rapport au centre de l'orbite terrestre qui ne coïncide pas avec le centre du Soleil.

### Annexe 5. Distances et périodes des planètes, selon Copernic.

Planète	Période	Distance en UA	Distance en km
Saturne	30 ans	9,175	67 855 041
Jupiter	12 ans	5,216	38 578 950
Mars	23 mois	1,52	11 241 216
Terre	1 an	1	7 395 867
Vénus	9 mois	0,719	5 319 504
Mercuré	88 jours	0,376	2 778 939

L'UA est l'unité astronomique égale à la distance Terre Soleil, mais Copernic n'utilisait pas cette expression. De plus, la distance est celle de la planète au centre de l'orbite terrestre. Ce sont les distances moyennes : en effet, les planètes s'éloignent du centre de l'orbite terrestre selon une distance maximale que Copernic appelle "apogée". Elles s'en rapprochent selon une distance minimale que Copernic appelle "périgée". Kepler parlera d'"aphélie" et de "périhélie".

(Dans le "De revolutionibus", Copernic indique 80 jours pour Mercure au lieu de 88 jours, valeur qu'il donne dans le "Commentariolus".)

Le système solaire de Copernic est donc 20 fois plus petit que le nôtre. Sa sphère de Saturne tiendrait dans l'orbite vraie de Vénus (108 millions de km).

### Diamètres et volumes selon Copernic et dans l'astronomie moderne (en italiques).

	Diamètre	Diamètre en km	<i>Diamètre réel</i>	Volume	<i>Volume</i>
Terre	1	12 540	<i>12 750</i>	1	<i>1</i>
Lune	0,3	3 630	<i>470</i>	1/43	<i>1/50</i>
Soleil	5,5	68 970	<i>1 392 5000</i>	162	<i>1 301 000</i>

La mesure de la Terre provient d'Eratosthène pour qui le tour de la Terre est de 250 000 stades et dans l'hypothèse où 1 stade = 0,1575 km. Donc, un rayon terrestre = 6270 km. Le Soleil est 19 fois plus loin que la Lune (au lieu de 390 fois). Il n'y a pas de progrès par rapport à la mesure d'Aristarque de Samos. Son diamètre est 20 fois trop petit.

### Annexe 6. Les orbites célestes sont-ils solides ?

H. Hogonnard-Roche, E. Rosen, J.-P. Verdet indiquent que Copernic ne se prononce jamais explicitement sur la réalité physique des sphères célestes ("Introduction à l'astronomie de Copernic"). Ils citent quelques textes qui montrent l'équivalence entre un orbe ("orbis") et une sphère ("sphaera").

Par exemple : "Il n'y a pas un centre unique pour tous les orbites ou sphères célestes", "Commentariolus", Premier Postulat. ("Omnium orbium coelestium sive sphaerarum unum centrum non esse").

Le Chapitre 10 du "De Revolutionibus" s'intitule : "de l'ordre des orbites célestes" ("De ordine coelestium orbium") alors que le corps du texte parle de sphères célestes : "L'ordre des sphères est le suivant" ("ordo sphaerarum sequitur in hunc modum").

Copernic pense-t-il à des sphères géométriques, sans consistance matérielle ? C'était l'avis de Kepler : Copernic ne croyait pas que les orbites soient faites d'une "matière adamantine", c'est-à-dire dure comme le diamant ("le Secret du Monde"), Kepler remplit l'espace entre les orbites par de "l'air céleste".

D'ailleurs, dans le système de Copernic, les orbites ne se touchent pas et ne peuvent pas s'entraîner les uns les autres. La Sphère des Fixes, très lointaine, ne peut pas entraîner la sphère de Saturne à cause de l'immense espace qui les sépare. De plus, l'orbite de la Lune doit couper l'orbite de la Terre en deux points (l'orbite de la Terre passe par son centre), à moins que l'orbite de la Terre n'ait une épaisseur égale au diamètre de l'orbite lunaire.

Alexandre Koyré s'appuie sur le troisième mouvement attribué à la Terre par Copernic (mouvement incompréhensible si on n'imagine pas l'axe terrestre fixé dans une sphère en rotation autour du Soleil) pour affirmer la "solidité" des orbites de Copernic (note à sa traduction des chapitres 4 et 11 du "De Revolutionibus").

Jean-Jacques Szczeciniarz admet la solidité des sphères coperniciennes :

"Tout mouvement dans le ciel renvoie un orbe sphérique qui le supporte et à chaque orbe correspond un mouvement... Copernic a posé dès ce chapitre -Ch.4- des orbites sphériques réels..." ("Copernic et la révolution copernicienne").

De plus, si Copernic n'attribue aucun rôle physique au Soleil, c'est parce que "les orbites solides suffisent aux nécessités de la physique des mouvements" (ibidem). Il est donc difficile de dire si Copernic parle de sphères matérielles ou de sphères géométriques imaginaires.

### Annexe 7. Le troisième mouvement de la Terre.

Copernic évoque ce 3<sup>e</sup> mouvement dans le "Commentariolus" : "A quoi sont rattachés les pôles, il ne m'appartient pas de le dire".

Il fait la comparaison avec une aiguille de fer frottée contre un aimant qui "tend toujours à s'orienter vers une même région du monde". Fait-il allusion à l'aiguille aimantée qui est toujours orientée vers le nord ? Mais il lui semble préférable d'introduire "quelque orbe, dont le mouvement entraîne les pôles eux-mêmes et qui devra sans nul doute se trouver sous l'orbe de la Lune". Copernic ne reprend pas ces explications dans le "De Revolutionibus".

Rhéticus décrit ce mouvement comme suit : "les extrémités de l'axe de la Terre, qui sont les pôles de la Terre, se meuvent chaque jour contre l'ordre des signes <vers l'ouest>, d'une distance angulaire à peu près égale à celle dont le centre de la Terre est mû par le grand orbe, selon l'ordre des signes <vers l'est>". ("Narratio Prima", XII). Mais il donne pas d'explication physique à ce mouvement.

## Glossaire Copernicien

**Apogée** : plus grande distance d'une planète à la Terre (Ptolémée) ou au centre de l'orbite terrestre (Copernic). C'est l'aphélie de Kepler.

**Déférent** : cercle qui porte l'épicycle.

**Epicycle** : une planète se meut sur la circonférence d'un petit cercle appelé épicycle. Le centre de cet épicycle se déplace sur la circonférence du déférent.

**Excentrique** : le centre du déférent ne coïncide pas avec la Terre (Ptolémée) ou avec le centre de l'orbite terrestre (Copernic).

**Homocentrique** : le centre du déférent coïncide avec la Terre (Ptolémée) ou avec le centre de l'orbite terrestre (Copernic).

**Mouvements de la Terre** : le 1<sup>er</sup> est le mouvement diurne, en 24 h (rotation de la sphère des fixes – Ptolémée – ou de la Terre – Copernic. Le 2<sup>e</sup> est la révolution annuelle du Soleil – Ptolémée – ou de la Terre – Copernic. Le 3<sup>e</sup> est le mouvement de l'axe qui lui permet de conserver la même direction par rapport aux étoiles.

**Orbe** : sphère (réelle ou imaginaire) qui porte une planète. L'orbite est le

cercle qui passe par l'équateur de cette sphère.

**Périgée** : plus petite distance d'une planète à la Terre (Ptolémée) ou au centre de l'orbite terrestre (Copernic). C'est le périhélie de Kepler.

**Planètes** : les corps errants qui se déplacent par rapport aux étoiles fixes. Chez Ptolémée, Soleil, Lune, Mercure, Vénus, Mars, Jupiter et Saturne. Chez Copernic : Mercure, Vénus, la Terre (accompagnée de la Lune, Mars, Jupiter et Saturne.

**Signes** : aller dans l'ordre des signes <du Zodiaque>, en conséquence, d'ouest en est (mouvements des planètes par rapport aux étoiles. Aller contre l'ordre des signes, en conséquence, d'est en ouest (mouvement apparent des astres).

**Sphère des étoiles fixes** : les étoiles gardent la même position les unes par rapport aux autres (constellations) et semblent fixées sur une sphère centrée sur la Terre (Ptolémée) ou sur le Soleil (Copernic).

## 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".

### Autres notes :

- 1 - A. Koyré, "Du monde clos à l'univers infini"
- 2 - J.-J. Szczeciniarz, "Copernic et la révolution copernicienne". Pour Aristote, la Terre, placée au centre, définit le "bas" absolu et le ciel, à la périphérie, définit le "haut" absolu. Mais le lieu de toutes choses n'est pas le ciel étoilé, en rotation autour de la Terre, mais "l'extrémité du ciel qui touche le corps mobile <le ciel>, une limite au repos" ("Physique").
- 3 - "Principia"
- 4 - "Principia". Le "principe copernicien" des cosmologistes (il n'y a pas de région singulière dans l'Univers) porte bien mal son nom. Chez Copernic, la sphère céleste constitue une singularité dans une "plénitude" infinie.
- 5 - "Dialogue sur les deux grands systèmes du monde".

6 - "Messager céleste"

7 - "Secret du Monde"

8 - "Les Somnambules"

9 - "Copernic et la révolution copernicienne"

10 - "Dialogue sur les deux grands systèmes du monde".

11 - Hélène Védrine in "Histoire de la philosophie".

12 - "préface au Pape"

### Sources et bibliographie :

#### Citations du "De Revolutionibus".

Nous avons traduit sur l'édition de Nuremberg, parue en 1543 (fac-similé Bibliothèque Nationale).

#### Traductions du "De Revolutionibus..."

Alexandre Koyré, éd. Diderot, coll. Pergame. Contient les 11 premiers chapitres du Livre 1.

Thomas Kuhn, "La Révolution copernicienne", Poche, coll. Biblio/essais. Contient des extraits des 10 premiers chapitres du Livre 1.

J.P. Verdet, "Astronomie et Astrophysique", Larousse, coll. « Textes essentiels ». Contient des extraits des 10 premiers chapitres du Livre 1.

#### Traduction du "Commentariolus"

J.P. Verdet, "Astronomie et Astrophysique", Larousse, coll. "Textes essentiels". Contient la traduction intégrale.

#### Bibliographie - Etudes

Jacques Arnould : "la Révolution Copernic : le soleil détrône la Terre", "Notre Histoire", n°173, janvier 2000.

Collectif : "Nicolas Copernic", "Les Cahiers de Science et Vie", n°39, juin 1997.

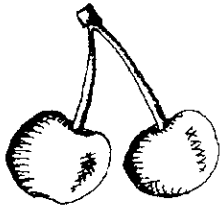
Arthur Koestler : "Les somnambules", 1960, 3<sup>e</sup> Partie : "Un chanoine craintif".

Alexandre Koyré : "La révolution copernicienne", "Histoire générale des Sciences", 1958, tome 2, "la Science moderne", Livre 1, Ch.2.

H. Hogonnard-Roche, E. Rosen, J.-P. Verdet : "Introduction à l'astronomie de Copernic", Bianchard, 1975.

Jean-Pierre Verdet : "Copernic", article dans "Encyclopédia universalis".

Jean-Jacques Szczeciniarz : "Copernic et la révolution copernicienne", Flammarion, 1998.



## Sixième Université d'été de L'EAAE



Soleil de minuit à Enontekiö Copyright 2002 Sakari Ekko  
Latitude : 69° N Longitude : 23°45 E

### Dimanche 7 juillet

Après plusieurs mois d'attente, j'ai appris début juin que ma candidature à la 6<sup>e</sup> université d'été européenne était acceptée ; je me retrouve donc à l'aéroport d'Helsinki après un voyage depuis Lyon, via l'Allemagne. A la porte d'où doit partir notre avion pour Kittilä au Nord de la Finlande, quelques personnes qui fraternisent : certainement des participants des années précédentes, je ferai leur connaissance plus tard.

A Kittilä un bus nous attend pour aller à Enontekiö ; en chemin quelques rennes sauvages traversent la route ou accompagnent le bus quelques instants. Vu d'avion, tout le sud de la Finlande est parsemé de lacs, au nord, ils sont plus rares ; c'est un paysage de toundra où alternent une végétation d'arbustes nains et une forêt de pins et de bouleaux peu élevés. L'installation dans nos chambres se fait rapidement dans les différents lieux d'hébergement.

### Lundi 8 juillet

Le premier exposé est celui de John Percy de l'Université de Toronto présentant l'importance de l'enseignement de l'astronomie ainsi que quelques expériences fondamentales permettant de comprendre certaines notions de base ; de nombreuses

ressources en anglais sont mises à disposition sur le web. Les ateliers<sup>1</sup> fonctionnent par rotation et s'enchaînent toute la semaine ; il y a environ 80 participants répartis dans 4 groupes. Deux conférences brillantes et enjouées sur les aurores boréales et sur le fonctionnement interne du Soleil termineront la semaine. Presque tous les pays de l'Europe sont représentés (Allemagne, Belgique, Autriche, Italie, Grande Bretagne, Grèce, Pays Bas, avec un fort contingent de Finlandais, Espagnols, Portugais et Français et même un représentant de l'Islande, de la Bulgarie, de la Russie). Les ateliers auront lieu dans l'Ecole voisine aux locaux vastes et clairs.

Le soir le temps est beau et nous profitons de cette première possibilité pour voir le soleil de minuit. Vers 11 heures nous partons en car pour un des plus hauts sommets de la région (630 m). Le car nous dépose, et après 45 minutes de marche nous arrivons au sommet. Il est 1h du matin heure légale en Finlande; toute la Laponie est sous nos yeux : sur 360° un paysage très faiblement vallonné, des lacs et la toundra à perte de vue. Par chance cette nuit l'horizon Nord est dégagé, le Soleil est à quelques degrés de hauteur au dessus ; à 1h30, c'est le soleil de minuit : à 69 degrés de latitude Nord, le Soleil nous indique la direction du Nord, le pôle Nord est quand même bien loin à plus de 2300 km.

Nous nous sommes éparpillés sur cet immense sommet et resterons encore presque deux heures pour voir le Soleil s'élever à nouveau.



**Soleil de minuit finlandais et Camera obscura**

**Mardi 9**



**Sunspotter**

Nous sommes rentrés ce matin vers 4h00. Le petit déjeuner est beaucoup plus silencieux que d'habitude et les ateliers s'enchaîneront quand même toute la journée. En début de

soirée est même prévue une séance de présentation par chaque pays de la place de l'enseignement de l'astronomie dans les programmes ; le groupe français en élaborant le cursus de la Maternelle à la Terminale trouve la part de l'astronomie assez faible. Après les présentations des autres pays européens nous nous trouverons plutôt bien lotis.

Le soir tout le monde va se coucher tôt mais, se réveille dans la nuit, il fait grand jour ; impossible de reconnaître l'heure à la luminosité ambiante : ma montre m'indique 23h45. Je décide de me lever et d'aller sur le sommet le plus proche pour profiter d'un deuxième soleil de minuit. Après une heure de marche, j'arrive un peu avant le point le plus bas, j'aperçois au loin notre village, le lac où nous sommes baignés, la nature silencieuse et illuminée de couleurs comme lors d'un long crépuscule.

**Mercredi 10**

Ateliers toute la journée.

En plus, une courte présentation est faite en assemblée générale sur les posters que les participants ont réalisé chez eux. Les posters seront visibles dans une salle toute la semaine et nous permettront de prendre des contacts, de percevoir aussi ce qui se fait à côté dans les pays voisins. Dans cette même salle sont exposés des livres de chaque pays apportés par les participants ; je regrette de n'avoir pas pu prendre l'ensemble des brochures du CLEA...



**Horizon**

**Jeudi 11**

Nous partons pour Alta dans le Finnmark Norvégien, à 210 km au Nord ; les paysages changent complètement au cours du trajet. Après la Laponie, aux courbes douces, c'est un paysage plus abrupt que l'on découvre avec des petites

gorges parcourues par des torrents, puis finalement l'immense fjord au fond duquel se niche Alta, cité au patrimoine mondial de l'Humanité de l'Unesco pour ses gravures rupestres. Le lieu est magnifique et les gravures se découvrent tout au long d'un chemin qui permet d'observer tout le site du fond de fjord.

## Vendredi 12

Ateliers matin et après midi.

Le soir nous sommes reçus par le maire d'Enontekiö et la responsable du service éducatif. Ils nous présentent très chaleureusement leur pays, ses habitudes et ses réalités quotidiennes parfois difficiles. Un petit récital de chants lapons de toute beauté nous le fait aussi découvrir de façon plus intime.

## Samedi 13

Les derniers ateliers ont lieu ce matin et en fin d'après midi nous visitons un élevage de rennes. Ce dernier soir nous ferons la marche jusqu'au sommet voisin pour voir le soleil de minuit. Deux heures d'attente, la température s'est refroidie et le Soleil est maintenant caché par les nuages ; il ne réapparaîtra pas. Pendant tout ce temps c'est un feu de fortune qui nous a permis de nous réchauffer un peu, de discuter ensemble pour cette dernière soirée commune.

## Dimanche 14 : départ et perspectives...

C'est le départ en car puis en avion ; à Helsinki c'est la séparation après cette semaine de travail mais surtout d'échanges, de projets pour préparer de nouvelles rencontres avec nos élèves si possible...

Quelle belle semaine de travail et de rencontres avons nous vécue ; organisée avec chaleur, dynamisme par Maria Rosa Ros de Barcelone, Irma Hannula d'Helsinki et leurs équipes. L'ambiance m'a rappelé l'université d'été que j'avais suivie en 1992 à Gap, où j'ai fait connaissance du CLEA et qui m'a donné des moyens d'apprendre et d'enseigner l'astronomie. J'avais acheté alors plusieurs brochures, les cours d'Orsay, et cela m'a donné du grain à moudre pour toute ma formation, puis celles que j'ai organisées... Un petit regret donc pour les collègues étrangers qui lors de cette 6<sup>e</sup> université d'été de l'EAAE n'ont pas pu profiter de la longue expérience du CLEA et de ses formateurs (seul Francis Berthomieu a pu réaliser un atelier très apprécié sur les spectres d'étoiles) et qui n'ont pas pu mettre dans leur bagages une traduction dans leur langue des brochures, diapositives, livres ; c'était pourtant lors de la séance de présentation une des premières remarques : le manque de matériel pédagogique. Une suggestion aussi pour donner aux Cahiers Clairaut la dimension européenne qu'ils méritent : une page internationale. Faire traduire par exemple un article en au moins une autre langue, demander aux collègues européens des articles et les traduire. Bien sûr l'anglais a été pendant

toute cette session la langue internationale mais le français, l'allemand, l'italien, l'espagnol nous ont souvent permis d'approfondir nos échanges et restent le meilleur moyen de communication dans un échange à deux partenaires. Des idées pour les participants qui s'inscriront pour 2003 (en Autriche) et 2004 (aux Pays Bas)...



Coopération européenne

### Notes :

1 - Université de Toronto:

<http://www.utm.utoronto.ca/~astro/teachers.htm>

Site de l'EAAE :

<http://www.eaae-france.org/eaee/index.html>

European Cooperation on School Education, Projets Comenius :

<http://europa.eu.int/comm/education/socrates/comenius/index.html>

2 - L'heure légale en Finlande est UTC + 3h, le soleil de minuit a donc lieu à 0h + 3heures - 23,75\*4 + 5 min = 1h30 (longitude 23°45' ouest, et le 8 juillet, E = +5min)

3 - Programme

gl1 : listening to the sun's heart heartbeat

gl2 : the sun and stars in your classroom

gl3 : astronomy curricula in Europe

wsl : aurora borealis : measuring the magnetic field

ws2 : holding simple sundials

ws3 : luminosity and temperature of the sun

ws4 : measuring the diameter of the sun

ws5 : measuring the distance to the cat's eye nebula

ws6 : models of the movement of sun and earth

ws7 : observing sunset

ws8 : photographing the sun

ws9 : stellar evolution and the periodic table of elements

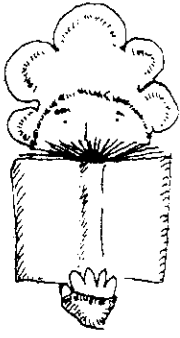
ws10 : studying the sun and stars spectra

ws11 : sunrise and sunset positions change every day

ws12 : the rotation of the sun

ws13 : the sun above and below the local horizon

Charles-Henri Eyraud.



## Max Planck et les Quanta Système de Jupiter

### Max Planck et les Quanta

J-CI Boudenot et Gilles Cohen-Tanoudji,  
éd. Ellipses.

Un livre de dimensions modestes mais très dense et passionnant. J.L. Badevant en rend très bien compte dans sa préface "... Ce livre fait oeuvre d'Histoire, il plaque l'histoire des événements sur celle du siècle. Les trames s'enchevêtrent, les drames aussi. Ensuite, et ce n'est pas son moindre mérite, il fait place à l'être humain exceptionnel qu'était Max Planck. On découvre, dans un intimisme bouleversant, la ligne de vie d'un homme, lui aussi placé dans son temps exactement à cheval sur deux siècles... Tout au long du livre, on ne cesse d'admirer le travail méticuleux et rempli d'humanité qu'ont fait J-CI Boudenot et Gilles Cohen-Tanoudji. Ils se sont passionnés pour les hommes comme pour la science..."

Après une mise au point précise sur l'état des connaissances en thermodynamique à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, fondement ultérieur du travail de Max Planck, les auteurs du livre font un récit très vivant de la formulation de la loi dans les derniers jours de l'année 1900 et de l'élaboration de son interprétation théorique en illustrant leur propos des commentaires de Max Planck lui-même. Puis l'entrée en scène d'A. Einstein permet de comprendre la lente émergence du concept de quanta et l'idée de nature discontinue de l'énergie lumineuse. Les chapitres suivants mêlent l'extrême effervescence scientifique et les graves événements du monde de toute la première moitié du XX<sup>e</sup> siècle qui remplirent aussi la vie de Max Planck presque jusqu'à sa mort en 1947 à 89 ans. Le dernier tiers du livre traite de l'immense variété des prolongements de la théorie quantique jusqu'à nos jours et confirme ainsi l'énorme fécondité du travail de Max Planck.

PS : un article de G. Cohen-Tanoudji dans la revue du Palais de la Découverte de l'année 2001 (n° 288) est consacré au même sujet, ce numéro étant intitulé "100 ans de révolution quantique".

Catherine Vignon

### Système de Jupiter

Numéro spécial de l'Astronomie, revue de la Société Astronomique de France, 95 p., 10 euros.

Jupiter, la géante gazeuse du système solaire est connue depuis la plus haute Antiquité, mais la découverte du monde jovien a commencé avec les observations de Galilée, au début du XVII<sup>e</sup> siècle. L'amélioration des connaissances s'est poursuivie régulièrement au rythme des progrès des instruments des astronomes jusque dans les années 70 du XX<sup>e</sup> siècle. Avec l'ère des engins lancés dans l'espace, un saut qualitatif a été effectué dans l'imagerie et la connaissance de la grosse planète et de ses satellites. Aujourd'hui encore la sonde *Galileo* est en orbite autour de Jupiter et continue à envoyer des informations utiles.

Faire le point des connaissances actuelles sur ce monde colossal et divers, tel est l'objectif de ce numéro spécial de l'*Astronomie*. Le volume est très riche et varié car le sujet est exploré sous de nombreux aspects. Les auteurs des 14 premiers chapitres sont des spécialistes de planétologie, de magnétisme planétaire, amis aussi d'histoire de l'astronomie et de la conquête spatiale. Au fil de la lecture, on apprendra comment s'est formé Jupiter, l'activité qui règne dans sa haute atmosphère, l'existence d'aurores polaires, les volcans de Io, la surface glacée d'Europe, les surfaces criblées d'impacts de Callisto et Ganymède, etc.

Les astronomes amateurs ne sont pas oubliés ; ils découvriront de belles images pour leur donner envie d'essayer à leur tour. S'ils possèdent une webcam, ils trouveront de précieux renseignements. Les enseignants familiarisés avec les logiciels de *Hands On Universe* (HOU) trouveront un exemple d'activité scientifique portant sur les satellites joviens

On peut faire la commande à la SAF,  
tél : 01 42 24 13 74  
fax : 01 42 30 75 47

Marie-Claude Paskoff



### **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 photocopiés 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 <b>CAHIERS CLAIRAUT</b> n° 97 à 100	25 €
Le numéro des Cahiers Clairaut	7 €
<b>COLLECTIONS DES CAHIERS CLAIRAUT</b> 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](mailto:clea.astro@astro.u-psud.fr)  
adresse du site du CLEA : [www.ac-nice.fr/clea](http://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