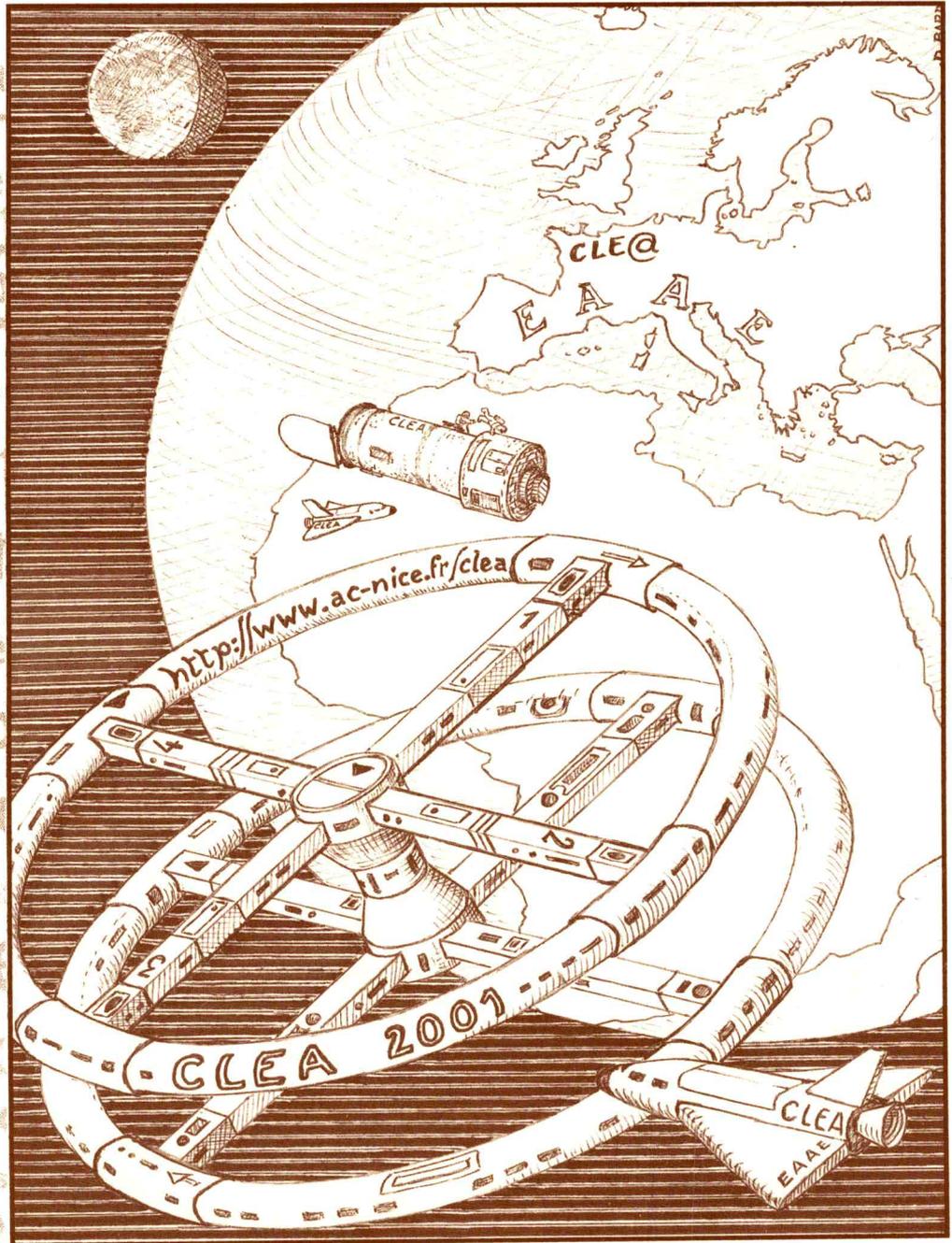


bulletin du comité de liaison enseignants et astronomes

Les Cahiers Clairaut

Lect
pour
et se
His
Ré
d'o
Ar
for
Réfle
déb
Inf
élève
Vie
Tex
exerc
Articles
Les p



numéro 95 - AUTOMNE 2001

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
Le CLEA est présent sur Internet à l'adresse :
<http://www.ac-nice.fr/clea>

Bureau du CLEA pour 2001

Présidents d'honneurs

Jean-Claude Pecker
Evry Schatzman

Présidente

Lucienne Gouguenheim

Vice-Présidents

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

Rédactrice en chef

Martine Bobin

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
Lucienne Gouguenheim
Christian Larcher
Marie-Agnès Lahellec
Colette Le Lay
Lucette Mayer
Georges Paturol
Jean Ripert
Josée Sert
Daniel Toussaint
Gilbert Walusinski

EDITORIAL

Philippe Laporte termine ici son voyage passionnant dans le ciel de l'invisible et Ludovic Van Waerbeke nous communique son enthousiasme pour les lentilles gravitationnelles. Colette le Lay analyse le rôle et l'importance des articles d'astronomie parus dans l'Encyclopédie de Diderot et d'Alembert. Nous aimerions développer la rubrique "Textes" et nous sommes reconnaissants à Pierre Lerich pour son analyse du superbe texte de Copernic : le Commentariolus.

Nous inaugurons aussi, dans ce numéro préparé pendant les vacances d'été, une nouvelle formule que nous espérons pouvoir renouveler chaque année, grâce à votre participation. Un cahier de 20 pages, entièrement consacré à la rubrique "avec nos élèves" rassemble des activités nouvelles, testées par ceux qui les ont rédigées et qui semblent particulièrement bienvenues pour la rentrée !

Les deux textes de Rosa Maria Ros sont extraits du compte rendu de la présentation qu'elle avait faite à l'AG de Toulouse et que tous les participants avaient particulièrement appréciée ; nous la remercions chaleureusement d'avoir bien voulu rédiger ces textes, et qui plus est en français. Merci aussi à Francis Berthomieu, Jean Ripert, Jean-Yves Le Goff, Patrice Buffet et au club du lycée de Chelles, de nous faire partager leurs expériences. Tous nous proposent des activités simples, basées sur l'observation et une véritable démarche expérimentale.

Prochain rendez-vous pour le CLEA : l'assemblée générale aura lieu cette année à Lyon le dimanche 18 novembre 2001. Lucienne et Gilbert demandent également à tous ceux qui le peuvent de retenir également le samedi 17 novembre, où ils souhaitent fêter en fin d'après-midi avec les adhérents du CLEA le prix que l'Académie des Sciences vient de leur décerner conjointement : même si le prix est individualisé, il est une reconnaissance par l'Académie des Sciences de l'importance de l'activité du CLEA.

Bonne rentrée à tous,

La Rédaction

Les Cahiers Clairaut

Automne 2001 n° 95



Article de fond

Les lentilles gravitationnelles

p. 2

Le ciel de l'invisible

p. 11



Histoire

Les articles d'astronomie dans l'Encyclopédie

p. 9



Textes

Notes sur le Commentariolus

p. 16



Lectures pour la Marquise

p. 19

Cahier pédagogique



De l'intérieur et de l'extérieur

p. II

Un simulateur du mouvement du Soleil et des étoiles

p. VI

Comment se retrouver dans le labyrinthe des constellations ?

p. IX

Classer les étoiles selon leur éclat

p. XII

Observer une étoile variable

p. XII

Mesure de la distance de Vénus au Soleil

p. XIV

Calcul de la distance Terre-Mars

p. XV

La chute de la Lune

p. XVIII



Les lentilles gravitationnelles

Ludovic Van Waerbeke, I.A.P.

ARTICLE DE FOND

Après avoir posé le problème de la masse manquante, Ludovic Van Waerbeke rappelle ce qu'est une lentille gravitationnelle puis détaille la physique de ces objets. A côté des découvertes sur les effets forts, dus aux amas de galaxies, les mesures récentes sur des effets bien moindres sont très prometteuses pour l'étude de la distribution de matière de l'Univers. Le questionnement sur la nature de la matière noire complète ce riche exposé.

La cosmologie observationnelle aujourd'hui

Lorsqu'en 1929 l'astronome Edwin Hubble découvrit l'expansion de l'Univers en observant l'éloignement des galaxies les unes par rapport aux autres, il repoussa les limites de l'Univers à des distances inimaginables à l'époque, et marqua véritablement le début de la cosmologie moderne. Quelques dizaines d'années plus tard, un modèle standard de l'Univers a été élaboré, qui, à partir d'un nombre restreint d'hypothèses, permet d'expliquer l'ensemble des observations connues aujourd'hui, il s'agit du fameux big-bang. Malgré ses succès remarquables, il reste néanmoins beaucoup de questions sans réponse. Tout d'abord il ne s'agit que d'un modèle phénoménologique, c'est à dire qu'il contient un grand nombre de paramètres physiques dont la valeur n'est pas donnée par la théorie, et qui doivent être mesurés. C'est le cas par exemple de la constante de Hubble et de la densité de masse dans l'Univers. Une des activités principales de la cosmologie observationnelle aujourd'hui est précisément de mesurer ces paramètres afin de consolider les bases du modèle du big-

bang, et d'en vérifier la cohérence logique. Dans le même but, le cosmologiste cherche aussi à comprendre les conséquences de cette théorie sur l'Univers observable et se demande par exemple comment est distribuée la matière dans l'espace ou comment se forme une galaxie. Le problème de la mesure de la densité de l'Univers et de la distribution de matière sont donc des problèmes centraux dans la cosmologie aujourd'hui, ce seront les thèmes que nous allons développer dans cet article. On espère qu'un jour les contraintes observationnelles seront suffisamment fortes pour que le modèle soit brillamment confirmé ou alors rejeté, auquel cas il faudra alors probablement s'attaquer à des problèmes de physique fondamentale. Dans les deux cas nous aurons certainement progressé dans nos connaissances sur l'Univers !

On sait que l'Univers est composé de milliards de galaxies qui ne sont pas réparties au hasard dans l'espace : les galaxies ont une tendance naturelle au regroupement en amas, et en superamas, l'ensemble étant distribué sur une structure de type bulle de savon, où l'intérieur des bulles est

quasiment vide. On sait que cette structuration de la matière a été produite par la force gravitationnelle. A ses débuts, l'Univers était chaud, très dense et homogène : il y avait très peu de grumeaux de matière, donc pas de structures. Pendant que l'Univers poursuivait son expansion la matière s'est diluée, mais la force de gravitation a accru de la matière à petite échelle, produisant des concentrations de plus en plus denses, aboutissant à la formation d'étoiles, de galaxies, d'amas de galaxies, puis finalement à la structure de type bulle de savon pour les plus grandes échelles. Cette description relativement simpliste est pourtant certainement fidèle à ce qui s'est passé dans l'Univers depuis une dizaine de milliards d'années : la structuration de la matière par la force de gravitation dans un Univers en expansion.

En mesurant les vitesses des galaxies par des techniques spectroscopiques, on peut théoriquement mesurer la quantité de matière responsable du mouvement observé, et ainsi en déduire la densité de l'Univers. Dès 1933, on s'est aperçu que la quantité de matière nécessaire pour expliquer les mouvements des étoiles et des galaxies était bien supérieure à la quantité de matière déduite par la lumière des galaxies, d'où le problème d'existence de matière noire. Comprendre l'origine et la distribution de cette matière est essentiel pour tester le modèle du big-bang. La masse manquante est traditionnellement détectée de manière indirecte à travers ses effets gravitationnels sur la masse visible (grâce au mouvement des galaxies). Il n'y a malheureusement que très peu de moyens d'observation directe. Une nouvelle méthode de détection directe apporte maintenant beaucoup d'espoir aux cosmologistes. Elle utilise l'effet de lentille gravitationnelle.

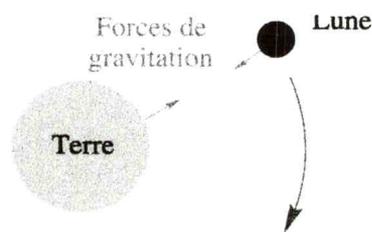
Qu'est-ce qu'une lentille gravitationnelle?

Afin de préciser l'ensemble des phénomènes physiques regroupés sous le nom de lentilles gravitationnelles, nous allons utiliser une simple analogie avec les mirages observés sur terre. Le type de mirage qui nous intéresse est celui causé par la déformation de perception de la réalité liée au fait que la lumière ne se propage pas en ligne droite. Il peut s'agir par exemple d'une illusion dans le désert (présence à l'horizon d'une oasis ou de maisons) ou bien durant une journée très chaude d'été, l'impression que la chaussée devant nous est inondée : dans les deux cas la forte chaleur accumulée pendant plusieurs heures a réchauffé le sol jusqu'à une cinquantaine de degrés celsius. L'air immédiatement en contact avec le sol est beaucoup plus chaud que l'air situé quelques mètres au-dessus. Cette différence de température produit une différence d'indice de réfraction et la lumière se propage alors le long de trajectoires courbes. C'est ce phénomène qui nous permet de voir en plein désert une oasis ou des maisons qui sont en réalité très loin ou bien qui permet au sol chaud de réfléchir l'image du ciel.

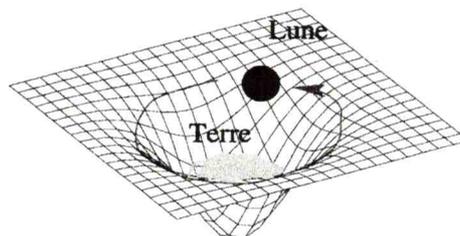
Quel est le rapport avec les lentilles gravitationnelles ?

On sait depuis les travaux d'Einstein sur la relativité générale qu'un rayon lumineux qui passe à proximité d'une masse est dévié. A cause de cet effet, la lumière ne se pro-

page pas en ligne droite dans l'Univers, ce qui peut donc conduire à des effets de mirage. La raison profonde de la déviation de la lumière par la matière vient du caractère géométrique de la relativité générale : pour Einstein, la force de gravitation n'existe pas, mais est une force fictive provoquée par la courbure de l'espace-temps qui modifie les trajectoires du mouvement de chute libre ce qui donne l'apparence de l'existence d'une "force" attractive (fig.1). Dans cette théorie, les corps massifs ainsi que la lumière suivent des trajectoires guidées par la forme géométrique de l'espace-temps.



La gravitation vue par Newton



La gravitation vue par Einstein

Figure 1 :

La théorie de la gravitation telle qu'elle est élaborée par Newton dès le milieu du XVII^e siècle postule l'existence d'une "force" attractive entre les corps massifs. Ainsi la Lune se trouve en orbite autour de la Terre car cette force l'empêche de poursuivre son élan et de s'éloigner indéfiniment. Autrement dit, la Lune n'est pas libre de son mouvement. Dans la théorie de la gravitation d'Einstein, la force n'existe plus, c'est l'espace-temps lui-même qui est courbé par la présence d'un corps massif tel que la Terre. On peut représenter l'espace courbe autour de la Terre par une toile élastique qui se déforme sous l'effet de la présence de la Terre, un peu comme la deuxième figure ci-dessus. La Lune, qui se déplace sans frottement dans cet espace est condamnée à tourner indéfiniment autour de la Terre.

D'après la relativité générale il est même possible de voir deux (ou plus) images du même objet, à condition que la

déviations de la lumière soit suffisamment importantes, comme cela est montré sur la figure 2.

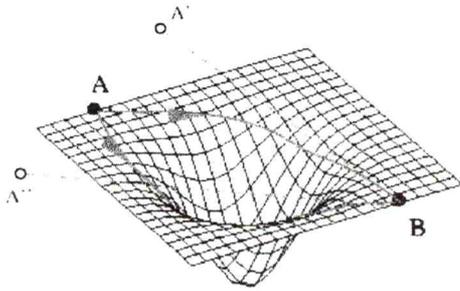


Figure 2 :

Cette illustration représente la forme qu'aurait l'espace autour d'une concentration de masse très importante comme un amas de galaxies, un peu comme le creux d'espace-temps que créait la Terre dans la fig. 1. Deux rayons lumineux partis en A (d'une galaxie lointaine par exemple) arrivent en B car leur chemin est dévié à cause de la présence de l'amas de galaxies. En B, un observateur ne verrait en principe qu'une seule image de A si la masse centrale était absente. Grâce à la courbure de l'espace créée par la masse, il voit maintenant 2 images du même objet A' et A'' qui lui semblent provenir de deux directions différentes !

Ce phénomène a été confirmé pour la première fois en 1919, lorsque l'équipe de Sir Arthur Eddington est allée au Brésil et en Afrique occidentale observer une éclipse totale de Soleil : les scientifiques ont montré que la position apparente d'une étoile derrière le Soleil pendant l'éclipse n'était pas la même que sa position habituelle lorsque le Soleil n'y est pas. L'angle de déflexion de la lumière frôlant le soleil vaut 1,75 secondes d'arc (un millième du diamètre lunaire) : il s'agissait d'un phénomène difficile à mesurer, mais néanmoins à la portée des instruments.

Ce phénomène de déviation des rayons lumineux par la matière est appelé effet de lentille gravitationnelle. Notons qu'il s'agit bien de mirages, c'est à dire que l'on a une vision déformée de la réalité, mais cette illusion est en fait très utile : en mesurant la déflexion de la lumière à proximité du Soleil, on peut en déduire... la masse du Soleil ! En effet plus le Soleil est massif, plus la déflexion de la lumière est importante, et plus la lumière passe loin du Soleil plus la déflexion est faible ; il y a une relation simple entre l'angle de déflexion, la masse et la distance au Soleil. Si G est la constante de gravitation de Newton, c la vitesse de la lumière, M la masse du Soleil, et r la distance d'approche minimale par rapport au centre du Soleil, alors l'angle de déflexion total est donné par la formule :

$$\alpha = \frac{4GM}{rc^2}$$

Dès 1920 l'astronome suisse Fritz Zwicky a compris l'importance de cette découverte, et a imaginé qu'on pourrait dans l'avenir utiliser cet effet pour "peser" l'Univers. Le terme "peser" est impropre puisqu'on doit plutôt parler de mesure de la densité moyenne de l'Univers. On voit cependant tout de suite l'intérêt pour le cosmologiste : cet outil permet potentiellement de voir la matière noire grâce aux effets de lentilles gravitationnelles qu'elle produit. Elle représente un avantage considérable par rapport à l'utilisation des vitesses comme traceur de la densité de matière : comme l'Univers est en expansion, les vitesses mesurées sur les galaxies lointaines contiennent deux composantes : l'une correspond à la vitesse induite par la gravitation locale, la composante qui permet justement de mesurer la densité de masse. L'autre est la vitesse de fuite induite par l'expansion de l'Univers. Il faut donc être capable de séparer ces deux composantes pour pouvoir mesurer la densité de masse, le problème c'est que cette séparation n'est possible que si l'on connaît la distance réelle de la galaxie, ce qui est quasiment impossible en pratique. L'effet de lentille gravitationnelle s'affranchit complètement de ce problème puisqu'il fournit une mesure absolue de la masse, que l'Univers soit en expansion ou pas.

Les lentilles gravitationnelles dans l'Univers

Nous avons parlé de l'effet de lentille gravitationnelle du Soleil sur les étoiles lointaines, mais d'une manière générale, dans l'immensité de l'Univers, peut-on s'attendre à de tels effets à des échelles cosmologiques ?

En fait, grâce à un heureux hasard, l'Univers est rempli de mirages gravitationnels ce qui nous permet effectivement de sonder la matière noire bien au-delà de l'échelle du système solaire. Pour obtenir un effet de lentille gravitationnelle il faut avoir une source de lumière lointaine (comme une galaxie), et une lentille située entre la source et l'observateur. Comme l'Univers est très structuré, il contient beaucoup d'objets massifs entourés de vide (les galaxies, les amas de galaxies et les superamas sont des structures denses de quelques centaines de milliards à plusieurs millions de milliards de fois la masse du Soleil), il y a en fait des lentilles gravitationnelles partout.

Si la source de lumière est étendue (ce qui est le cas d'une galaxie par exemple), l'effet de lentille gravitationnelle produit une image déformée de la source parce que chaque petit rayon lumineux qui en provient subit une déflexion légèrement différente de son voisin. Par exemple si la galaxie source est parfaitement circulaire, son image lentillée ressemblera à une banane allongée, on parle alors de cisaillement gravitationnel.

Le cisaillement produit par les amas de galaxies sur les galaxies lointaines peut être 100 fois plus important que celui produit par le Soleil sur une galaxie lointaine.

La physique des lentilles gravitationnelles

Les effets forts.

Il s'agit de l'effet de distorsion le plus remarquable : il correspond aux cas où la lentille est tellement massive que l'image de la source est complètement déformée, et dans certains cas, plusieurs images de la même source sont produites (comme l'illustre la figure 2). La déformation de l'image est telle que la galaxie lentillée apparaît comme un arc. Seuls des amas de galaxies contenant au moins un million de milliards d'étoiles (soit plusieurs dizaines de milliers de galaxies) peuvent produire de tels effets.

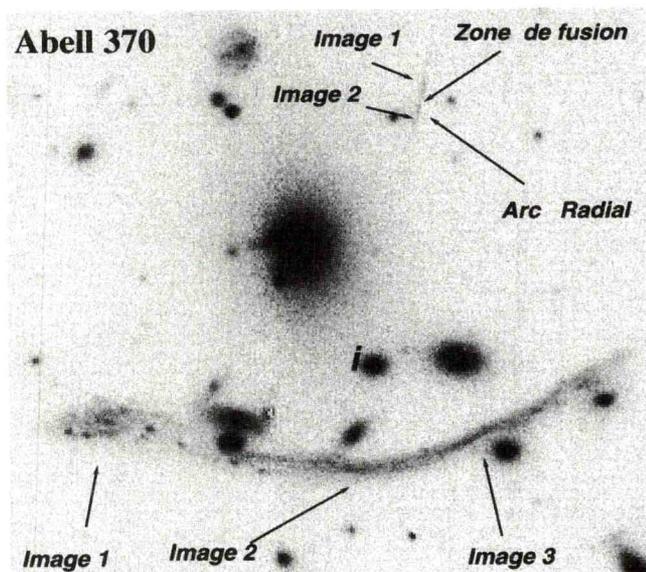


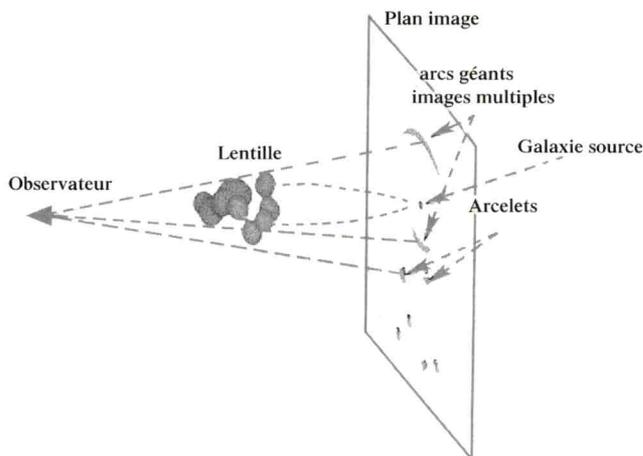
Figure 3 :

Un exemple d'arc gravitationnel dans l'amas de galaxies Abell 370 ($z = 0,375$). On voit très bien en bas de l'image l'objet en forme d'arc très allongé : il s'agit de l'image d'une galaxie lointaine ($z = 0,725$) fortement déformée par la masse de l'amas de galaxies.

La figure 3 montre le centre de l'amas Abell 370 où a été découvert le tout premier arc gravitationnel en 1987 (découverte faite à l'Observatoire de Toulouse par l'équipe de Bernard Fort). L'image de la source ne ressemble plus vraiment à une galaxie... La confirmation de l'effet de lentille gravitationnelle a été donnée par la mesure du redshift de l'arc, confirmant que l'amas est environ 2 fois plus près de nous que l'arc ! Il ne pouvait donc pas s'agir d'une galaxie appartenant à l'amas qui aurait été déchiquetée par les forces

de marées, hypothèse avancée à l'époque par certains cosmologistes pour expliquer le phénomène.

L'illustration sur la figure 4 montre la configuration lentille / source à trois dimensions dans le cas de formation d'arcs gravitationnels, comme pour l'amas Abell 370.



**Les effets de lentilles gravitationnelles :
vue en 3 dimensions**

Figure 4 :

Dans ce qu'on appelle le plan image, il y a une galaxie (la galaxie source) dont la lumière est déviée par la lentille qui est ici un centre d'amas de galaxies contenant une petite dizaine de galaxies. Deux images en forme d'arc sont produites, que l'observateur peut photographier depuis la Terre.

Grâce à l'identification des arcs gravitationnels les astronomes ont pu déterminer avec précision la masse contenue dans plusieurs amas de galaxies. Bien que la relation entre la masse d'un amas et la configuration du banc optique soit beaucoup moins triviale que dans le cas du Soleil, il est facile de comprendre d'où l'on extrait l'information sur la masse.

Sur la figure 5 (page suivante) on peut voir la séquence d'effets de lentilles gravitationnelles obtenue si on pouvait bouger la source située derrière la lentille.

On voit qu'aux différentes positions de la source correspondent différentes configurations des images multiples de la source observées depuis la Terre. Comme on connaît la position angulaire de la lentille et des images ainsi que leurs redshifts respectifs, on peut renvoyer dans le plan source les différentes images de la même galaxie qui doivent alors

converger vers une seule et même image. Or cela ne marche que si on a utilisé la bonne modélisation de distribution de matière noire pour la lentille : si on choisit un mauvais modèle, alors on ne va pas retrouver que toutes les images proviennent de la même source. Les astronomes peuvent ainsi dire avec une assez bonne précision la masse contenue dans un amas de galaxies.

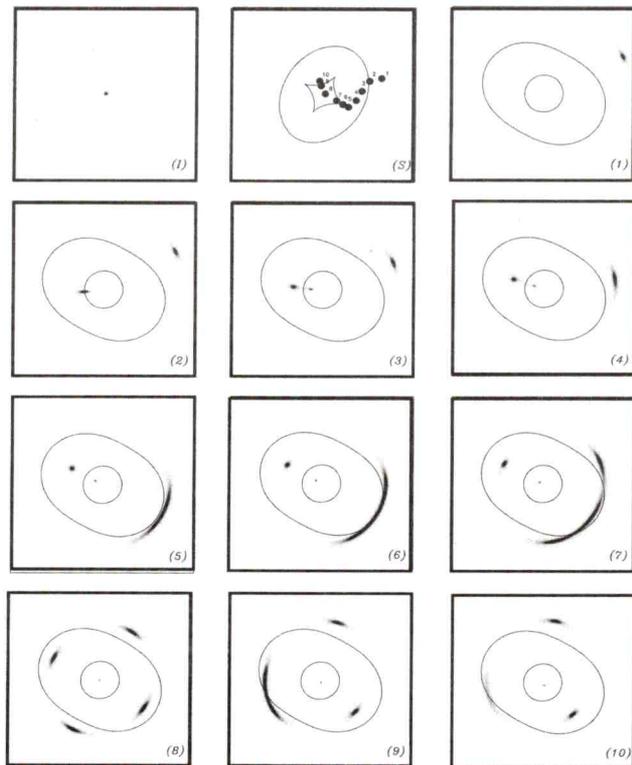


Figure 5 :

Cette séquence d'images (numéros 1 à 10) montre comment apparaît l'image d'une galaxie lointaine suite à un effet de lentille gravitationnelle suivant sa position par rapport à l'amas de galaxies qui constitue la lentille (qui n'est pas représentée ici). La première image (1) montre la galaxie lointaine telle qu'elle serait vue sans la lentille, et l'image (S) montre les 10 positions différentes utilisées pour générer les 10 images qui suivent.

Les effets faibles.

Très vite les astronomes ont cherché à mesurer des effets de lentille gravitationnelle de plus en plus faibles, afin de sonder la matière de plus en plus loin des amas de galaxies, pour pouvoir voir des grumeaux de matière de plus en plus petits jusqu'à la taille d'une galaxie ! Le problème c'est que plus on s'éloigne d'un amas de galaxies, et plus l'effet de lentille devient faible, donc plus il est difficile à mesurer. On voit très bien ce qui se passe sur la simulation numérique montrée sur la figure 6.

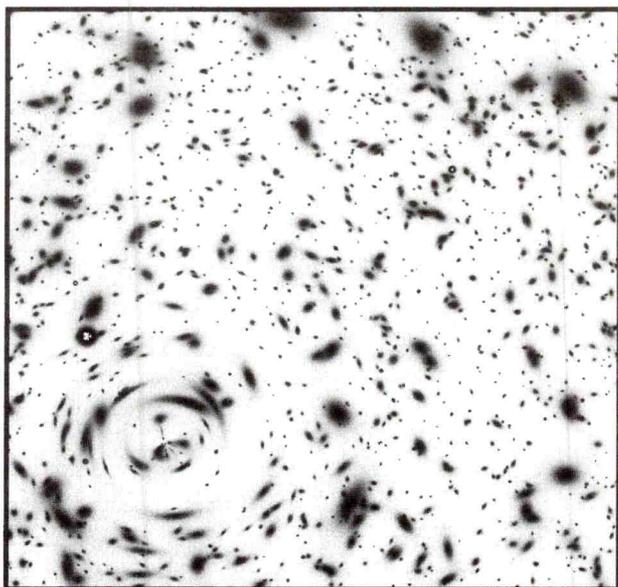
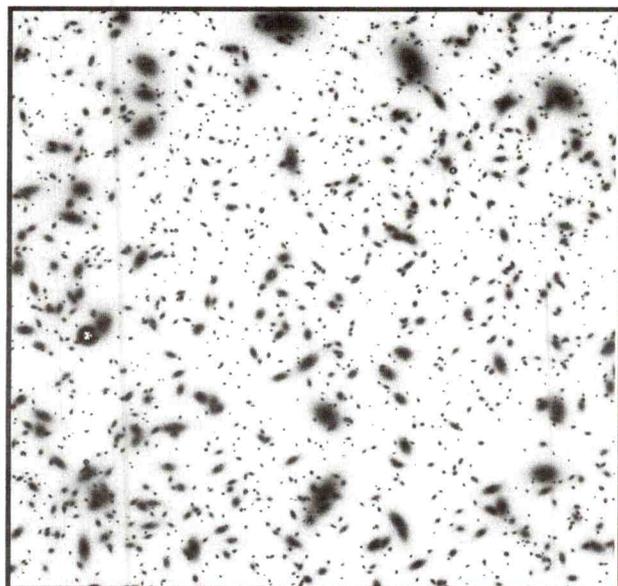


Figure 6 :

Ces images sont des simulations numériques qui montrent (en haut) un champ de galaxies lointaines telles qu'on pourrait les voir si on ne place pas de lentille gravitationnelle devant, et en bas, le même champ de galaxies lointaines vue à travers un amas de galaxies très massif. Cet amas (qui n'est pas dessiné ici) est situé en bas à gauche de l'image du bas, et on voit facilement que juste autour du centre les galaxies lointaines sont fortement déformées, puis plus on s'éloigne du centre de l'amas et moins l'effet de lentille gravitationnelle est fort, donc moins les galaxies sont déformées. En bordure du champ, en haut à droite de l'image du bas, les galaxies ne sont presque pas déformées.

Près de l'amas de galaxies (qui n'est pas représenté sur la figure), les galaxies lointaines sont fortement distordues, donnant lieu à la formation d'arcs gravitationnels, on se

retrouve dans le cas précédent des effets forts. Plus loin de l'amas (vers le haut à droite) l'effet est trop faible pour être identifié à l'œil sur un seul objet. On ne peut le mettre en évidence que par une étude statistique qui consiste à mesurer la forme moyenne d'un grand nombre de galaxies : c'est par cette méthode qu'on arrive à montrer que les galaxies lointaines sont de préférence alignées les unes par rapport aux autres, trahissant la présence de matière, un peu comme la limaille de fer trahit la présence d'un champ magnétique en s'alignant le long des lignes de champ.

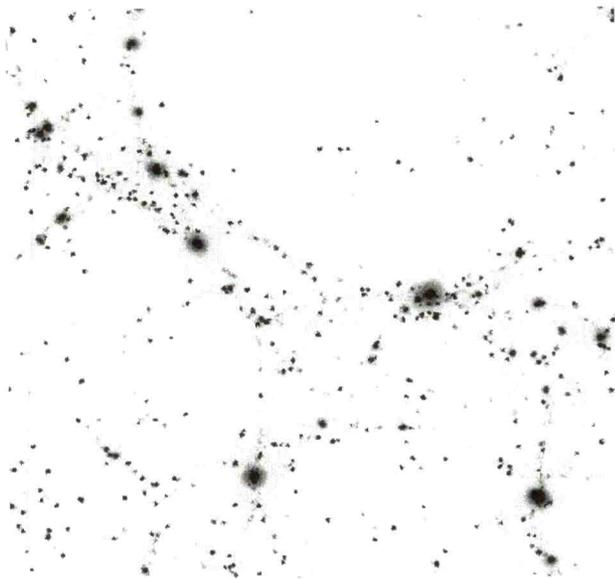


Figure 7

Cette simulation représente une tranche d'Univers de 100 Mégaparsecs de côté. Il s'agit d'une représentation en négatif : les zones les plus denses en matière sont foncées. Les gros noeuds de matière à l'intersection des filaments sont des amas de galaxies. La mesure des effets de lentille gravitationnelle à grande échelle devrait permettre d'obtenir des cartes de masse de l'Univers telle que cette simulation.

Cet effet, prédit il y a une dizaine d'années, n'a été mesuré pour la première fois que l'année dernière, et confirmé simultanément par 4 équipes internationales. L'une de ces équipes est celle de Yannick Mellier basé à l'Institut d'Astrophysique de Paris, qui a fait sa découverte grâce au télescope Franco-Canadien-Hawaïen de 3,6 mètres installé au sommet du Mauna-Kea à Hawaï. On peut maintenant étudier la distribution de matière dans l'Univers, non seulement dans les amas massifs de galaxies, mais aussi partout ailleurs ! Les mesures récentes de cet effet nous ont déjà permis de mesurer la densité moyenne de l'Univers et de confirmer certains résultats obtenus précédemment par la mesure de la distribution des galaxies et du fond de rayonnement cosmologique. Cette concordance de résultats est bien sûr une très bonne nouvelle pour le big-bang. Mais il est évident

qu'à terme l'intérêt de la méthode est la cartographie de la matière noire à toutes les échelles. Il est probable que les premiers résultats arriveront d'ici 2 ou 3 ans. En attendant, il faut se contenter de simulations numériques, qui sont par ailleurs indispensables pour comprendre et résoudre les difficultés techniques qui ne manqueront pas d'arriver. Les zones du ciel que l'on cherchera à cartographier couvriront un millier de fois la surface apparente de la Lune, ce qui sera très gourmand en temps de télescope.

La figure 7 montre une simulation du résultat attendu : si les modèles cosmologiques actuels sont corrects, on s'attend à trouver que la matière est distribuée sous la forme d'une mousse de savon, avec de grosses concentrations que sont les amas, des longs filaments et murs de matière entre eux, et des grandes bulles de vide ailleurs.

Des télescopes de plus en plus gros et de plus en plus hauts

L'observation de ces effets nécessite de gros moyens observationnels. Pour cartographier de grandes zones du ciel, il faut que le champ du télescope couvre au moins un degré carré, ce qui suppose que l'on sache construire de grandes caméras CCD. Au télescope Franco-Canadien-Hawaïen de 3,6 mètres, il y aura dans 2 ans une caméra de 18000 x 18000 pixels pouvant couvrir le degré carré du foyer primaire. Les Very-Large-Telescopes installés au Chili, de 8 mètres de diamètre, ne seront pas en reste, une fois qu'une caméra grand champ y sera installée, probablement cette année. Tout un ensemble de nouveaux télescopes de la classe des 8 mètres va se lancer dans ce programme dans les années à venir, mais la révolution la plus spectaculaire viendra probablement des futurs télescopes spatiaux. Parmi eux, le NGST (New Generation Space Telescope, prévu pour 2009) sera un télescope spatial de 6 mètres et pourra observer en 10 minutes ce qu'un télescope au sol de 8 mètres pourra faire en une heure. Mais il aura un champ relativement petit, et ne pourra observer des effets de lentilles gravitationnelles qu'à petite échelle. On s'attend cependant à observer des effets de lentille gravitationnelle partout sur le ciel, grâce à son puissant pouvoir collecteur, et cela devrait révéler que les effets de lentille gravitationnelle forts existent partout dans l'Univers, à condition de pouvoir regarder assez profond en redshift.

Il y a aussi un projet de télescope spatial de 2 mètres, en orbite autour de la Lune avec un champ de un degré carré qui révolutionnera probablement notre vision de l'Univers lointain car il devrait être destiné à faire un relevé complet du ciel jusqu'à des magnitudes de l'ordre de 28 ou 30. Ce dernier instrument devrait être lancé après 2010.

Conclusion : qu'est-ce que la matière noire ?

Observer la matière noire ne dit pas ce qu'est la matière noire. Les effets de lentille gravitationnelle sont produits par toute forme de matière sans distinction sur sa nature (neutri-

nos, leptons, baryons, etc...). Si l'on veut avoir une connaissance physique de l'Univers, il est essentiel de connaître également la nature de ses constituants. Ce dont on est quasiment certain aujourd'hui c'est que la matière noire ne peut ne peut pas être sous forme de matière ordinaire (c'est-à-dire la matière qui constitue tout ce qui nous entoure et qui a été observée dans les accélérateurs de particules : protons, neutrons, électrons, quarks, etc...). On peut estimer de manière très précise la quantité de matière ordinaire. Voici comment : à l'origine l'Univers était trop chaud pour permettre aux noyaux atomiques d'exister, car à peine formés, ils étaient immédiatement cassés par des collisions avec des photons ou des particules énergétiques. A cette époque l'Univers était une soupe homogène de photons, de quarks, de leptons et d'autres particules élémentaires. En se dilatant, il s'est refroidi, et les protons et neutrons ont pu se former sans être détruits par le bain de particules environnantes. Juste après, les premiers noyaux atomiques ont pu se former, mais seuls les noyaux les plus légers ont eu le temps de se former (hydrogène, hélium, lithium, béryllium et bore) avant que l'Univers ne devienne trop froid et trop dilué pour permettre des interactions efficaces pour la formation de noyaux plus lourds. Cette histoire nous a amené à quelques minutes après le big-bang : c'est la nucléosynthèse primordiale. Certains des éléments légers ainsi formés ne peuvent pas être créés de manière stable dans les étoiles (deutérium, hélium 3 et lithium 7), donc la mesure de leur densité actuelle nous renseigne directement sur l'abondance de ces éléments au moment de la nucléosynthèse. Ces éléments sont véritablement des reliques de la physique de l'Univers primordial, et des traceurs de la matière ordinaire. Or il se trouve que l'on a mesuré avec précision l'abondance de ces éléments : on connaît donc avec la même précision la quantité de matière ordinaire présente dans l'Univers. Grande surprise pour les cosmologistes : le maximum de matière ordinaire autorisé est presque 10 fois plus faible que le minimum de matière noire mesuré par les effets de lentille gravitationnelle ! Si les effets de lentille gravitationnelle sont incapables de nous dire ce qu'est la matière noire, ils nous apprennent au moins ce qu'elle n'est pas : de la matière ordinaire.

Nombre de physiciens spéculent aujourd'hui sur ce que pourrait être cette matière inconnue. Il faut se tourner vers la physique des particules de haute énergie pour avoir quelques indices. Il s'agit de la branche de la physique qui traite de l'interaction des particules à des énergies proches de celles qui régnaient dans l'Univers primordial. Si une matière inconnue existe vraiment, elle doit jouer un rôle important dans ces interactions. On ne peut pour l'instant que spéculer sur ce que seraient les lois physiques à de telles énergies aussi élevées car nous ne savons pas encore les produire dans nos accélérateurs de particules : l'identité de cette nouvelle matière reste au-delà de nos capacités d'investigation.

Certaines théories prédisent depuis longtemps l'existence de particules exotiques. C'est le cas par exemple de la "supersymétrie" (inventée dans les années 70) qui postule que toute particule ordinaire posséderait un double dont toutes les propriétés quantiques seraient identiques sauf une

liée à son moment cinétique intrinsèque (le spin). Certains de ces "doubles supersymétriques" seraient stables et beaucoup plus massifs que leurs partenaires ordinaires : ce sont de bons candidats comme constituants de la matière noire. L'intérêt de la supersymétrie pour les physiciens est avant tout théorique : cette théorie présente un haut degré de symétrie et de simplification comparée à toutes les autres, et elle résout un grand nombre de difficultés en physique des particules. Si la supersymétrie s'avère exacte cela représentera une avancée dans notre compréhension de la Nature au moins aussi importante que la découverte des interactions faible et forte (forces responsables respectivement de la radioactivité et de la cohésion des protons). La cosmologie est pour l'instant l'unique moyen de tester le zoo de ces théories physiques fondamentales, mais pour peu de temps en ce qui concerne la supersymétrie : l'accélérateur de particules du Fermilab (Chicago) – qui a découvert il y a six ans le dernier membre des familles de quarks prédits par la théorie standard – pourrait d'ici 2 ans atteindre les énergies requises pour voir des effets indirects de la supersymétrie. Un événement important attendu avec impatience.

A l'opposé, la jeune théorie des supercordes, qui a l'ambition d'unifier mécanique quantique et relativité générale, est probablement encore pour plusieurs siècles très loin de nos domaines d'investigation expérimentaux, mais elle fait des prédictions sur l'Univers primordial dont certaines peuvent être directement testées à l'aide de la cosmologie observationnelle. Pour donner un ordre de grandeur, il faudrait atteindre des énergies de l'ordre de mille milliards de fois celles obtenues dans les meilleurs accélérateurs actuels pour tester la théorie des supercordes directement, soit l'équivalent d'un accélérateur linéaire de particules qui traverserait notre galaxie. Nous entrons dans une période d'exploration passionnante où l'observation de l'Univers (effets de lentille gravitationnelle, fond de rayonnement diffus, distribution des galaxies, rayonnement X, radio et millimétrique, etc...) et la physique des particules ont des préoccupations de plus en plus proches, et où chacune a beaucoup à apprendre dans son propre domaine grâce à l'autre.

Note :

Je remercie Francis Bernardeau et Jean Paul Kneib pour l'emprunt de certaines figures, ainsi que Benoîte Pfeiffer pour sa lecture critique du manuscrit.

Pour en savoir plus :

"L'Univers et la lumière. Cosmologie classique et mirages gravitationnels",

par Laurent Nottale, éd. Champs Flammarion.

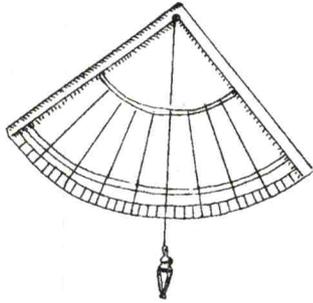
"Chronique de l'espace-temps : du vide quantique à l'expansion cosmique",

par A. Mazure, G. Mathez, Y. Mellier, B. Fort, éd. Masson.

"Les mirages gravitationnels"

par Christian Vanderriest, CC n° 18.





Les articles d'astronomie dans l'Encyclopédie de Diderot et d'Alembert

Colette Le Lay

Entre 1751 et 1772 paraissent les dix-sept volumes de texte et onze volumes de planches de l'Encyclopédie, le monument des Lumières. L'article qui suit se propose de survoler les articles d'astronomie en s'intéressant à leurs auteurs et à l'image qu'ils donnent de la science du milieu du XVIII^e siècle.

L'Encyclopédie étant un dictionnaire alphabétique, la porte d'accès à notre étude est la lecture de l'article ASTRONOMIE. Le chemin est ensuite tracé par les quarante-quatre renvois, pourvus eux-mêmes de renvois. Que le lecteur se rassure, la boucle se ferme sur une centaine d'articles dont certains ont un caractère trop général (NATURE, MATHÉMATIQUES) ou trop mécanique (ATTRACTION, CENTRIFUGE), pour être envisagés ici. Nous nous concentrerons donc sur la vingtaine d'articles dont le caractère astronomique est patent.

Les articles décrivant les instruments (QUART DE CERCLE, SECTEUR, TELESCOPE), généralement dus à Jean Baptiste Le Roy (1720-1800), membre de l'Académie des sciences et chargé du cabinet de physique du roi, ont tous le même plan : un bref historique, des directives de construction et d'utilisation accompagnées de planches, suivies des contributions de l'instrument aux découvertes récentes. Remarquons au passage que Le Roy ne fait pas de distinction entre lunette et télescope.

Les articles portant le nom des cinq planètes connues (JUPITER, MARS, MERCURE, SATURNE et VENUS) sont rédigés, au moins en partie, par Jean Henri

Samuel Formey (1711-1797), secrétaire perpétuel de l'académie de Berlin, ou Louis de Jaucourt (1704-1779), travailleur modeste et infatigable doté d'une grande culture et d'une vaste bibliothèque. Sans ce dernier, l'Encyclopédie n'aurait pas été menée à terme puisqu'il est l'auteur de 28 % du texte ! Les cinq articles respectent également un plan commun : description chiffrée, phases, taches et bandes, irrégularités du mouvement, satellites, et astronomie comparée, c'est-à-dire ce que verrait un hypothétique habitant de la planète. Les chiffres fournis pour la période de révolution, la moyenne distance et l'inclinaison sur l'écliptique sont corrects. Les valeurs relatives des diamètres sont plus sujettes à caution. En ce qui concerne la rotation axiale, seules sont exactes les valeurs attribuées à Mars et Jupiter. Pour Mercure et Saturne, aucune rotation n'a pu être décelée faute de taches sur la planète. La valeur complètement fautive assignée à Vénus est due au repérage de taches non situées sur la planète mais dans sa haute atmosphère. En ce qui concerne les satellites, seuls sont connus les galiléens de Jupiter et les cinq satellites de Saturne découverts par Huygens et Cassini. D'Alembert est convaincu que Mars n'a pas de satellite et doute de l'existence de celui de Vénus que

Cassini pense avoir observé. J. H. S. Formey est aussi l'auteur de la première partie de l'article ASTRONOMIE, consacrée à l'histoire. Ses longues pages, truffées de citations des Anciens, se révèlent fastidieuses pour le lecteur des années 2000. Mais la lectrice y trouve, avec plaisir, un paragraphe consacré aux dames de l'astronomie (Hypathie, Jeanne Dumée, Marie Cunitz, Maria Kirch). D'Alembert prend alors le relais pour proposer diverses classifications (astronomie physique / mathématique ; astronomie ancienne / moderne). Finalement, l'intérêt de ASTRONOMIE n'est pas dans son contenu propre mais dans les portes qu'il nous ouvre sur les autres articles.

La plupart des autres articles d'astronomie sont rédigés par d'Alembert lui-même (1717-1783). Entré à l'Académie des sciences en 1741 au titre d'adjoint astronome, il est déjà célèbre pour son Traité de dynamique, ses travaux mathématiques, ses recherches sur la précession et le problème des trois corps. Scientifique éminent, d'Alembert est aussi un philosophe des Lumières qui utilise les articles d'astronomie à des fins militantes. Ainsi fustige-t-il les géocentristes attardés dans l'article TERRE, les tenants de l'astrologie dans l'article du même nom ou l'Eglise et l'Inquisition dans l'article COPERNIC. Un autre de ses chevaux de bataille est l'élaboration d'une éthique scientifique fidèle à l'enseignement de Newton : distinguer les phénomènes observés des conjectures, se garder des généralisations hâtives et refuser l'esprit de système. L'essentiel du contenu des articles n'en demeure pas moins astronomique et d'Alembert s'applique particulièrement à la rédaction des articles dans lesquels il peut faire état de ses propres contributions. Dans NUTATION, après avoir attribué à Bradley la primauté de l'observation du phénomène, il revendique le mérite de l'explication théorique. Le procédé est le même dans PRECESSION. L'article d'astronomie le plus important de toute l'Encyclopédie est sans conteste FIGURE DE LA TERRE. D'Alembert en était particulièrement fier car il incite Voltaire à le lire. Fait très rare, l'article est daté (mai 1756). Il y relate la

manière dont son siècle a fait la preuve de la figure aplatie au pôle contre l'hypothèse d'une Terre allongée soutenue par les cartésiens. S'étendant dans une première partie sur les observations et expériences, il rend compte de la découverte de l'allongement du pendule par Richer à Cayenne en 1672, mais surtout des diverses mesures de degrés de méridiens, de celle de Picard en 1670 entre Paris et Amiens à celle de Lacaille au Cap de Bonne Espérance en 1752, en passant par les expéditions au Pérou et en Laponie décidées par l'Académie des sciences. La deuxième partie théorique, faisant appel aux principes d'hydrostatique, est d'une lecture plus difficile. D'Alembert y fait une large place à ses propres travaux mais rend également hommage à deux de ses contemporains, Mac-Laurin et surtout Clairaut dont la théorie de la figure de la Terre est parue en 1742. En conclusion, il reconnaît que, malgré les importants progrès réalisés, le problème n'a pas trouvé de solution complète :

"Quel parti prendre jusqu'à ce que le temps nous procure de nouvelles lumières ? Savoir attendre et douter".

L'article LUNE est, comme le précédent conçu en deux parties, l'une descriptive et l'autre théorique. Mais le ton en est bien différent. En effet dans la deuxième partie, d'Alembert aborde le problème des trois corps pour lequel sa solution est en concurrence avec celles d'Euler et de Clairaut. L'article rédigé en 1759, année du retour de la comète de Halley, porte les stigmates de la querelle violente qui a opposé les trois hommes. D'Alembert a le sentiment d'avoir été victime d'une injustice de la part des partisans de Clairaut :

"J'ai eu plus de part à la théorie de la Lune que certains mathématiciens n'avaient voulu le faire croire."

Ce climat de règlement de compte nuit à la qualité de l'article, dont la teneur scientifique est par ailleurs remarquable.

Le corpus des articles d'astronomie dresse-t-il un panorama fidèle des connaissances de l'époque ? Telle est la question à laquelle nous allons tenter de répondre maintenant.

On sait que le domaine stellaire est alors peu accessible et l'Encyclopédie reflète bien la préoccupation quasi

exclusive pour les astres du système solaire. L'article ETOILE est, malgré tout, une bonne surprise. Après l'historique et l'inventaire des récents catalogues (Halley, Flamsteed, Lacaille), il fait un bilan précis et modeste de ce que l'on sait à l'époque. En dehors de la figure de la Terre et de la théorie de la Lune, l'une des principales directions de recherches de la période est la détermination des parallaxes solaire et lunaire dans le but de passer des distances relatives aux distances absolues. Malheureusement, l'article PARALLAXE nous semble confus et ménageant peu de place à la contribution du siècle. Terminons par COMETE qui, du fait de l'ordre alphabétique a été rédigé en 1753, c'est-à-dire cinq ans avant la grande effervescence suscitée par le retour de la comète de Halley. La tonalité de l'article est donc très newtonienne, les thèses du maître n'ayant pas encore été complétées. Qu'aurait fait d'Alembert de cet article s'il l'avait écrit après 1759 ?

En conclusion, d'Alembert a pris en charge la rédaction de la plupart des articles et leur apporte sa caution scientifique. Ses collaborateurs, peu nombreux, n'ont pas réellement marqué leurs articles d'une empreinte personnelle. Ainsi l'ensemble des articles d'astronomie constitue-t-il un tout homogène et non pas "un habit d'Arlequin" comme Voltaire qualifie l'Encyclopédie. Les combats des Lumières pour le système de Copernic et une éthique scientifique inspirée par Newton, et contre l'astrologie et les abus de pouvoir de l'Eglise sont présents dans la plupart des articles. D'Alembert, acteur de la science astronomique du XVIII^e siècle, sait la plupart du temps rendre compte de l'apport de ses contemporains aux progrès de la connaissance, tout en faisant la part belle à ses découvertes propres. Malheureusement, le sens de la polémique l'emporte parfois sur l'esprit scientifique, nuisant à la clarté de l'argumentaire et éclaboussant les rivaux. Comme le dit Joseph Bertrand, son biographe :

"La géométrie respecte toujours la logique ; les géomètres l'oublient quelquefois."



Cahier pédagogique

CC 95 automne 2001

AVEC NOS ÉLÈVES

De l'intérieur et de l'extérieur

niveau collège, p. II à V.

Un simulateur du mouvement du Soleil et des étoiles

niveau collège, p. VI à VIII.

Rosa Maria Ros,
Universitat Politècnica de Catalunya

Comment se retrouver dans le labyrinthe des constellations ?

niveau primaire p. IX à XI.

Classer les étoiles selon leur éclat

niveau lycée p. XII.

Observer une étoile variable

niveau lycée p. XIII.

Francis Berthomieu

Mesure de la distance de Vénus au Soleil

niveau lycée p. XIV.

Jean-Yves Le Goff et Patrice Buffet
Lycée Kerneuzec, Quimperlé

Calcul de la distance Terre-Mars

niveau lycée p. XV à XVII.

Club du lycée G. Bachelard de Chelles

La chute de la Lune

niveau lycée p. XVIII à XX.

Jean Ripert

Nous trouvons dans ce cahier :

des extraits des travaux menés à Barcelone par Rosa Maria Ros proposant des maquettes inédites pour mieux se repérer et comprendre les mouvements apparents ;

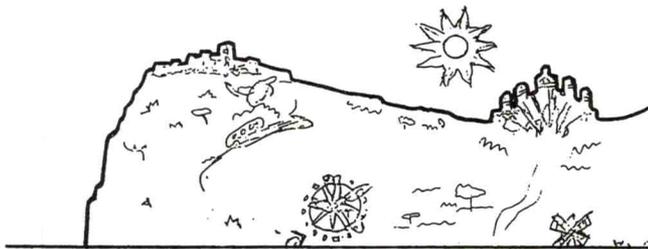
des propositions d'observations qui permettent de prolonger le simple apprentissage des Constellations pour découvrir la variabilité de δ Céphée ;

une activité originale sur la distance de Vénus ;

un joli travail sur la mesure de la distance de Mars, mettant en évidence tout l'intérêt de l'utilisation des nouvelles technologies d'observation et aussi celui des ateliers de pratique scientifique ;

un TP approfondi sur la chute de la Lune, accompagné d'une vérification expérimentale.

rents repères géographiques de leur village. Par exemple, nous utilisons un prospectus des fêtes de Barcelone avec l'horizon de la ville pour jouer avec les étudiants sur les différentes possibilités concernant les positions du Soleil, de la Lune et de quelques constellations par rapport à l'horizon. Les deux montagnes que nous voyons sont à peu près en position opposée, Nord-Sud, alors le Soleil peut être près de l'une, mais ne peut pas être près de l'autre.



Les étudiants ne voient pas de différence. Ils connaissent la théorie, mais la pratique que nous avons faite n'est pas suffisante.

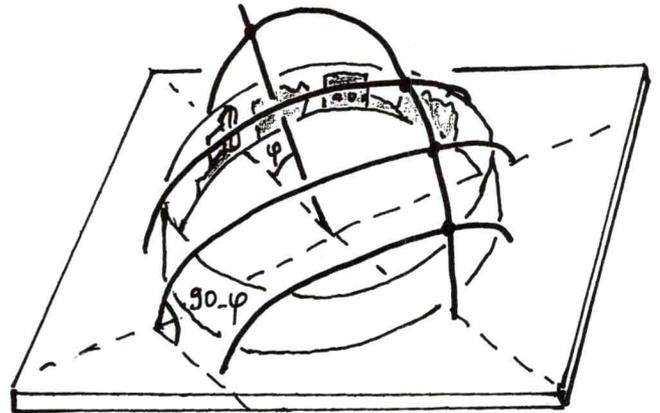
La solution que nous avons choisie est de construire un modèle destiné à résoudre ces difficultés et qui a permis de résoudre beaucoup d'autres questions, qu'il n'était pas possible d'imaginer au début.

Le modèle

Images de l'horizon.

On commence par prendre des photographies de l'horizon. Avec un appareil photo monté sur un trépied (dont on note bien la position) il est très facile de prendre un ensemble de photographies de l'horizon à partir d'un endroit de la cour de l'école si l'horizon y est bien dégagé dans toutes les directions (ou choisir un autre lieu adéquat). Il est très important de très bien sélectionner cet endroit, parce que l'idée est d'y situer le modèle pendant chaque observation. En prenant chaque photographie, il faut inclure une zone de recouvrement pour relier entre eux les tirages sur papier et obtenir l'horizon comme une chaîne continue de photographies. Une fois les photographies développées, nous pouvons les assembler l'une à la suite de l'autre, en formant un cylindre. On fixe le cylindre sur un cadre de bois à l'endroit que nous avons choisi pour faire les photographies. Il est très important de

disposer toutes les photographies bien orientées par rapport à l'horizon.



L'axe de rotation de la Terre

D'abord, on introduit l'axe de rotation de la Terre. Il y a deux possibilités : donner aux élèves la valeur de la latitude locale et introduire un fil de fer ayant cette inclinaison, ou, ce qui est préférable, déterminer l'inclinaison avec un instrument simple (à fabriquer avec une règle, un rapporteur et un fil à plomb). Il suffit de mesurer la hauteur de l'étoile Polaire, qui est égale à la latitude du lieu ϕ (fig. ci-dessus). Avec cette donnée, il devient possible de fixer l'axe de rotation du modèle. Comme le modèle est orienté par rapport à l'horizon, le prolongement du fil de fer permet de visualiser l'axe et de voir le Pôle Nord, où est l'étoile Polaire, et d'imaginer la position du point cardinal Nord. Il est ensuite facile d'introduire le point cardinal Sud. On peut ensuite matérialiser la droite Nord-Sud sur le modèle et aussi sur le sol de la cour (avec le procédé normal de détermination de la droite Nord-Sud). Ceci est très important parce que chaque fois que nous allons utiliser le modèle il faudra l'orienter. (On peut aussi déterminer la direction du Nord avec une boussole, mais ce n'est pas une très bonne idée de commencer en parlant de la déviation magnétique du Pôle, c'est au professeur de juger).

Le méridien.

L'objectif suivant est de situer le méridien du lieu. Le méridien local est très facile à définir, mais il n'est pas très simple pour les étudiants. Nous pouvons fixer un fil de fer qui passe par les points cardinaux Nord et Sud et l'axe de rotation de la Terre. Ce fil de fer est la matérialisation du méridien du lieu dans le modèle et permet d'imaginer sur le ciel la ligne du méridien local. C'est très facile à imaginer parce qu'il commence aux mêmes points que l'étudiant peut voir dans le modèle. Il commence sur la même maison que sur la photographie, mais sur l'horizon réel et après être passé au-dessus de la tête, il finira sur la même maison que celle que nous voyons sur le fil de fer sur l'horizon en photographie.

L'équateur.

Pour introduire l'équateur, c'est plus difficile. Une possi-

bilité est de dessiner sur la planche de bois du modèle la ligne perpendiculaire à la ligne Nord-Sud, qui est la ligne Est-Ouest. Cette solution est facile, mais n'est pas très intéressante pédagogiquement. Pour l'enseignement, il est préférable d'utiliser à nouveau la photographie. Nous pouvons replacer l'appareil photographique sur son trépied dans la même position (pour cette activité, il est important de connaître exactement la position initiale de l'appareil photo) et prendre une photographie au moment où le Soleil se lève et au moment où il se couche le premier jour du printemps ou de l'automne. Nous connaissons alors la position exacte des points cardinaux Est et Ouest dans l'horizon des photographies et évidemment dans l'horizon réel.

L'équateur est un fil de fer dans le plan orthogonal à l'axe de rotation de la Terre. Mais cette orthogonalité n'est pas facile à réaliser, parce que l'axe de rotation est incliné. En fait, les élèves peuvent observer l'inclinaison de l'équateur. Si nous considérons le Soleil comme une étoile (il est très important pour nous parce qu'il est le plus proche, mais son comportement n'est pas différent de celui des autres étoiles), il est possible d'obtenir l'inclinaison de la trajectoire des étoiles quand elles se lèvent et quand elles se couchent, en prenant deux photographies dans la direction du point cardinal Est et dans celle du point cardinal Ouest.

Il n'est pas possible de faire ces deux photographies à Barcelone ou en ville à cause de la pollution lumineuse. Il faut aller à la campagne, photographier avec un trépied, avec une durée d'exposition de 10 minutes, en utilisant un déclencheur souple. Il est très important que l'appareil photographique soit bien parallèle à l'horizon (utiliser un niveau pour cette opération).

Avec les deux photographies des points cardinaux Est et Ouest, on peut déterminer l'inclinaison des étoiles sur l'équateur et il est alors possible de bien placer le fil de fer de l'équateur. Nous connaissons les deux points où le fixer et aussi l'inclinaison ; on a fixé le fil de fer sur la planche en bois et il est fixé aussi sur le méridien local.

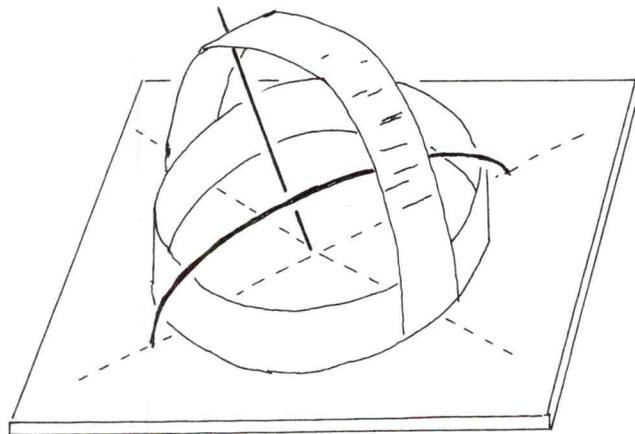
Les étoiles au méridien.

Je conseille de profiter de l'opportunité pour obtenir quelques photographies supplémentaires : par exemple, photographier la région de l'étoile polaire, pendant une quinzaine de minutes, puis la zone au-dessus et celle encore au-dessus (cette zone est l'équateur), et ainsi de suite, jusqu'à obtenir toute la région du méridien local (bien sûr, le méridien local du lieu où nous avons décidé de faire les photographies n'est pas le même que le méridien local de l'école ou du lycée, mais les élèves peuvent facilement comprendre le degré d'approximation de cette différence).

Quand nous avons obtenu toutes ces photographies, les étudiants peuvent construire une bande du méridien. Avec cette bande, ils peuvent mieux comprendre et traiter le mouvement de la sphère céleste autour de l'axe de rotation de la Terre. Il est très joli de voir que pour le même temps d'exposition, la trajectoire marquée par l'étoile change de longueur. Elle est minimale autour de l'étoile Polaire et maximale à l'équateur. Et la forme change aussi. A l'équateur la trajectoire a la forme d'une ligne droite. Au voisinage de la polaire les lignes sont courbes concaves et au-dessous de l'équa-

teur, elles sont courbes convexes. Si nous faisons des tirages photographiques plus grands, nous avons, à la reproduction, un ensemble que l'étudiant peut mettre au-dessus de sa tête : il peut ainsi mieux comprendre le mouvement.

Il est, bien entendu, également possible d'introduire sur le modèle la série de photographies correspondant au méridien local. Il suffit de faire quelques photocopies sur papier, et de faire un trou pour introduire le fil de fer de l'axe de rotation et voir que la ligne de l'équateur peut correspondre au fil de fer que nous avons comme équateur dans le modèle



L'idée est d'offrir en permanence avec le modèle les deux possibilités de visualiser la sphère céleste depuis l'intérieur et depuis l'extérieur.

Les tropiques.

Il est intéressant que les étudiants puissent observer que le Soleil ne se lève pas et ne se couche pas toujours au même endroit. Il y a beaucoup de livres qui disent que le Soleil se lève à l'Est et se couche à l'Ouest chaque jour ! Ils peuvent voir que ce n'est vrai que deux fois par an, mais pas le reste du temps.

Si nous faisons deux nouvelles photographies le premier jour de l'hiver et le premier jour de l'été, quand le Soleil se lève et se couche, les étudiants peuvent voir que les situations extrêmes sont très différentes. La différence entre l'une et l'autre est très surprenante. Et nous pouvons aussi fixer les parallèles du Cancer et du Capricorne avec des photographies en utilisant à nouveau l'inclinaison de l'équateur, parce qu'ils sont parallèles. Avec un simple rapporteur, il est possible de vérifier que l'angle au centre entre le parallèle du Cancer et l'équateur est à peu près 23° , de même que celui entre l'équateur et le parallèle du Capricorne.

Ainsi les élèves peuvent voir pratiquement et simultanément, la sphère depuis l'intérieur (la sphère réelle) et aussi depuis l'extérieur (le modèle). Avec le modèle, les étudiants comprennent aussi mieux leur entourage, et les activités par rapport à l'orientation de l'école dans la cité changent vraiment. Tous peuvent voir la zone du mouvement du Soleil, entre les parallèles, que le mouvement se fait de la zone Est à la zone Ouest en passant par le Sud, et à quelle zone cela

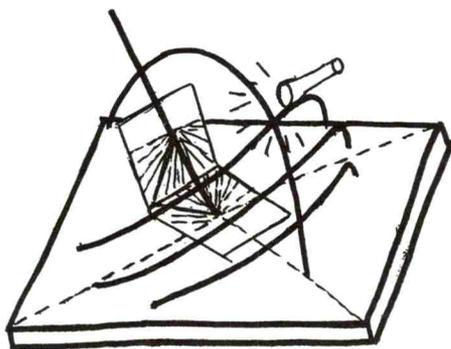
correspond dans l'horizon réel de la cité. Il n'y a pas de problèmes. L'orientation est devenue un jeu d'enfant...

Quelques prolongements

Les cadrans solaires.

Mais après cela, il y a encore de nouvelles possibilités du modèle, qui aident à améliorer la qualité de l'enseignement. Le modèle est un cadran solaire ! Il est fantastique pour exprimer simplement la construction d'un cadran solaire, à partir de l'horizon et du mouvement du Soleil. En premier lieu, il est très facile de voir que l'axe de rotation de la Terre devient le gnomon du cadran solaire.

Si nous matérialisons un plan équatorial et déplaçons une lampe de poche le long du tropique du Cancer, nous pouvons voir que l'ombre du gnomon (le fil de fer de l'axe de rotation) se forme sur le plan du cadran équatorial ; mais quand nous déplaçons la lampe le long du tropique de Capricorne, l'ombre se forme sur le dessous du plan.



Mais que nous prenions le plan équatorial, le plan horizontal ou le plan vertical orienté est-ouest, nous pouvons voir qu'il est la même heure sur tous les cadrans. Il est possible de voir les heures du matin et de l'après-midi pour le même gnomon. Les trois cadrans indiquent la même heure. Il est très facile de voir que la position des heures du matin et de l'après-midi est différente dans le cadran horizontal et dans le cadran vertical orienté. (Tous les professeurs ont eu l'expérience de mauvaise graduation des heures sur un cadran ; après cette expérience, la situation changera).

L'été et l'hiver.

Si nous déplaçons la lampe sur le tropique du Cancer et sur le tropique du Capricorne il est très facile de voir que le même faisceau lumineux de la même lampe produit différentes sections sur le plan horizontal. Depuis le tropique du Cancer, la section est plus proche d'un cercle que dans l'autre cas, où elle est bien elliptique. Les étudiants peuvent alors comprendre que le rayonnement est plus concentré dans la première situation, c'est-à-dire que la température superfi-

cielle est plus grande en été ; il est aussi évident dans le modèle que le nombre d'heures d'insolation du Soleil est plus grand : ainsi, l'été est plus chaud que l'hiver.

En conclusion.

Ce modèle est utile pour exprimer la situation locale de la sphère céleste aussi bien pendant la journée que pendant la nuit, pour comprendre la situation du Soleil, ainsi que celle de toutes les planètes et de la Lune : leurs mouvements se font à peu près dans la même zone. Les étudiants peuvent comprendre facilement que Vénus ne peut jamais être à côté de l'étoile polaire. Le professeur en aura fini avec ce type de questions, parce qu'il devient évident pour les élèves que c'est complètement impossible, et si un étudiant disait une chose pareille, le reste des élèves rectifieraient rapidement, ayant très bien compris.

L'orientation dans la ville.

Nous avons parlé de l'orientation dans la cour de l'école et de l'horizon de la zone où elle est située. Mais il est très intéressant de généraliser cette situation à toute la ville en utilisant la carte de cette ville. Notre première intention est de relier l'orientation de la cour avec la ligne Nord-Sud. En deuxième lieu, de faire une relation plus générale ; chercher un bâtiment, une rue, le port (s'il y en a un) ou une construction faite par l'homme, en considérant l'orientation Nord-Sud ou Est-Ouest.

Par exemple, le modèle présenté a été construit par un groupe d'étudiants de la ville de Barcelone et plus particulièrement du quartier de l'Eixample. Tout le quartier fut dessiné par l'architecte Ildelfons Cerdà, pendant la deuxième moitié du XIX^e siècle, comme une grande collection géométrique de carrés, ressemblant à une grande plaque de chocolat. La diagonale des carrés est orientée dans la direction nord-sud. Dans cette situation, tous les appartements ont la possibilité d'avoir le Soleil ou bien le matin ou bien l'après-midi. Toutes les maisons furent construites avec une partie intérieure et une partie extérieure, avec vue sur la rue. La partie de l'appartement à l'extérieur a du Soleil pendant le matin, et la zone intérieure de l'appartement a du Soleil pendant l'après-midi.

Il y a aussi une rue sur la carte de Barcelone qui s'appelle "la Méridienne" et qui donne exactement la direction du méridien local (la droite Nord-Sud). Il y a aussi une autre rue qui s'appelle "Parallèle", mais qui ne coïncide pas avec lui.

Cet exemple est très particulier à la cité de Barcelone, mais on peut chercher d'autres possibilités dans toutes les villes. Nous pouvons suggérer que la majorité des églises romanes sont orientées Est-Ouest : l'abside vers le lever du Soleil, à l'Est, et la porte vers l'Ouest. Un autre exemple sont les grandes maisons de la campagne, avec la façade principale au sud, pour avoir le plus grand nombre d'heures de Soleil. Peut-être êtes-vous dans votre ville près d'un bâtiment qui fut construit pour avoir la meilleure orientation, et vous pourrez le découvrir avec vos élèves. Jouer au détectif est parfois très amusant...

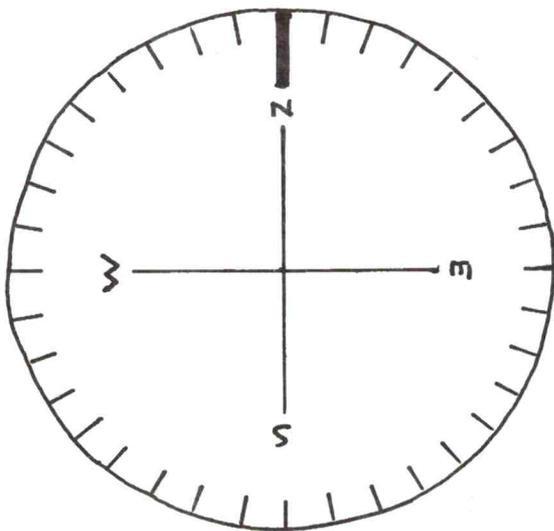
Un simulateur du mouvement du Soleil et des étoiles

Il est possible de construire un modèle très simple, montrant le mouvement du Soleil et des étoiles, pour différentes latitudes, et pour les différentes saisons. Il est possible de visualiser le Soleil de minuit, ou la situation à l'équateur, sur Terre, où toutes les étoiles se lèvent et se couchent, mais il est également très facile de rendre ce modèle plus général, sans horizon.

On peut faire un découpage en carton pour le mouvement du Soleil, pièce principale du simulateur solaire (fig.1 page suivante).

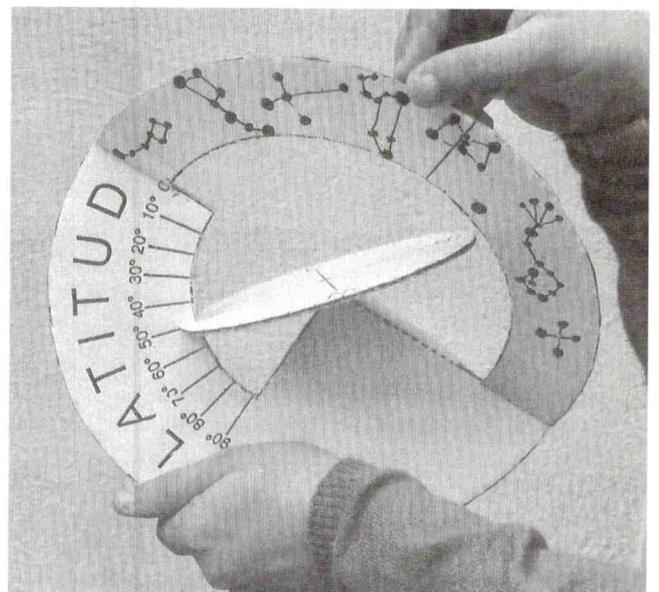
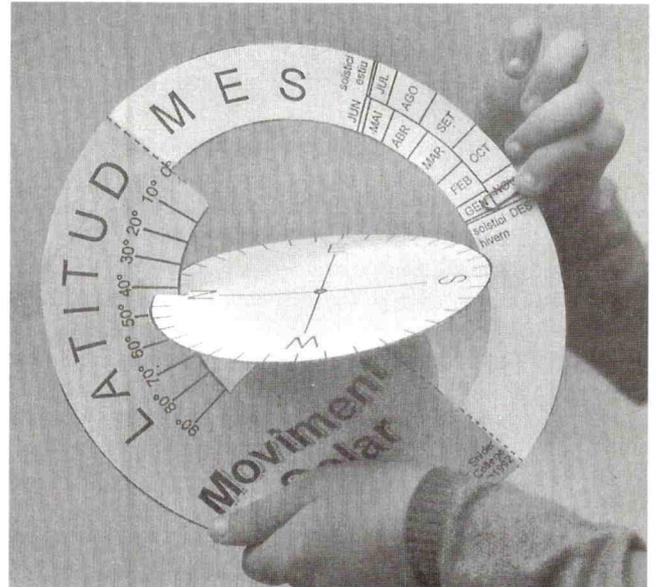
Et un autre pour le mouvement des étoiles, pièce principale du simulateur d'étoiles (fig.2 page suivante).

Le cercle de l'horizon est le même pour les deux (fig.3 ci dessous).



Il faut coller les trois figures sur un carton avant de commencer à découper pour obtenir un modèle plus solide. Une fois construit, ce simulateur du mouvement du Soleil ou des étoiles nous permet de voyager à la surface de la Terre, depuis l'équateur jusqu'au pôle.

Il faut tenir la pièce principale de la main gauche, introduire la latitude du lieu choisi, en déplaçant le cercle de l'horizon jusqu'à obtenir la latitude désirée. Alors, avec la main droite, on fait tourner le demi-cercle avec le Soleil (ou les constellations) de droite à gauche, tout en observant la trajectoire du Soleil (ou des constellations) au-dessus de l'horizon.



Si nous utilisons le simulateur du mouvement du Soleil, nous pouvons voir, pour le mois choisi, où le Soleil se lève et où il se couche, la longueur de sa trajectoire au-dessus et au-dessous de l'horizon. En fonction de la latitude considérée, il est possible de voir un autre phénomène inhabituel pour nous.

Par exemple si la latitude est 0° , quand nous sommes à l'équateur de la Terre, le Soleil se lève et se couche toujours perpendiculairement à l'horizon et la distance entre le point du lever, le premier jour de l'été et le premier jour de l'hiver est minimale (seulement 2 fois $23^\circ,5$). A d'autres latitudes la

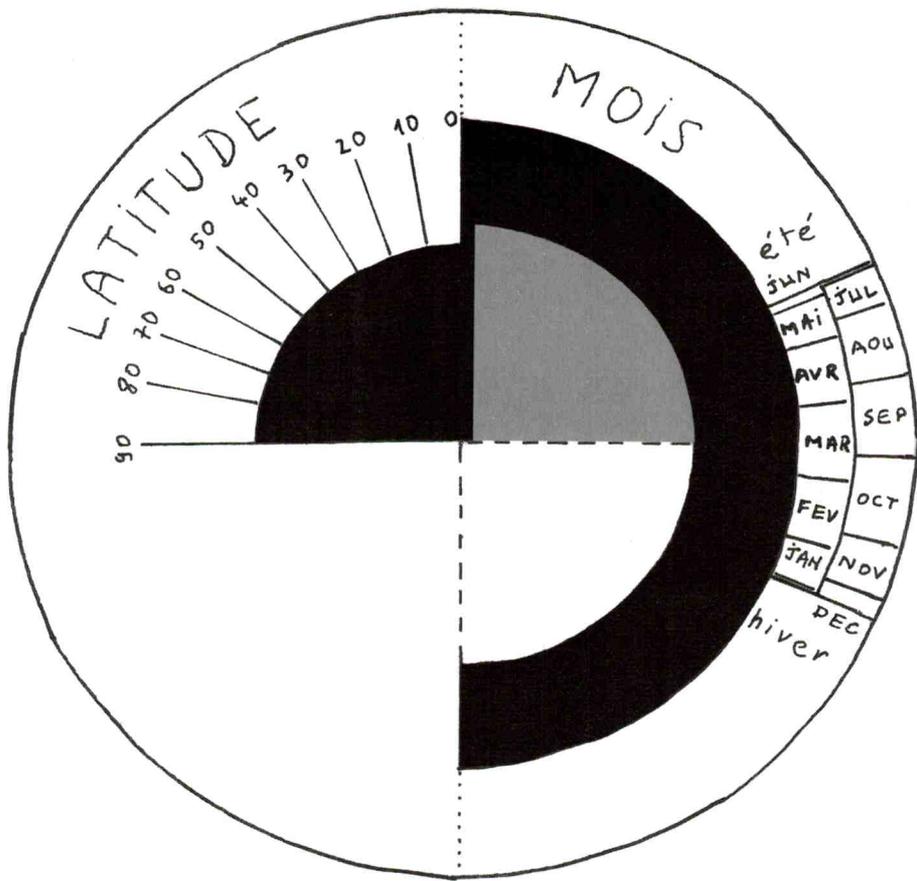


fig. 1

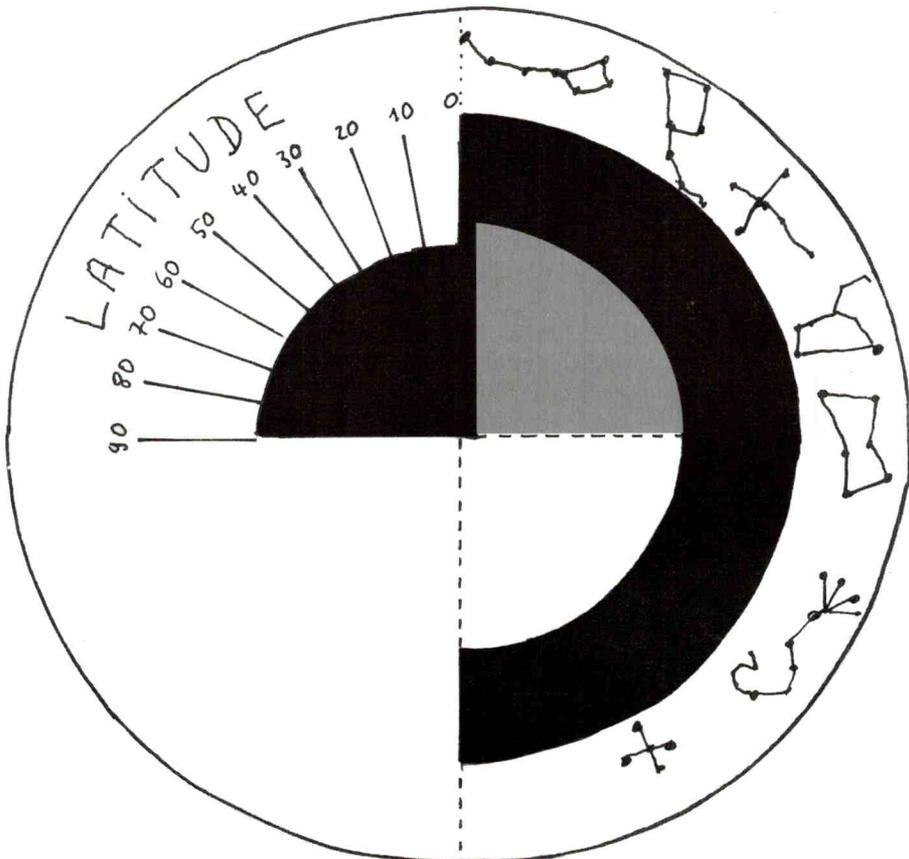


fig. 2

distance est plus grande. Mais la situation est très spéciale si nous sommes un phoque vivant au pôle Nord. Si notre latitude est de 90° , nous pouvons voir sur le modèle que le Soleil durant tout le printemps et l'été est toujours au-dessus de l'horizon, et nous pouvons voir aussi que le Soleil est durant l'hiver et l'automne au-dessous de l'horizon. Alors les élèves peuvent très bien comprendre que le phoque ait eu de la lumière solaire pendant six mois, et qu'il soit dans la nuit pendant les autres six mois. Nous pouvons aussi parler du Soleil de minuit quand la latitude est proche du pôle Nord mais n'est pas exactement 90° .

Si la latitude est 0° , si nous sommes à l'équateur, les étudiants peuvent voir que la trajectoire solaire est perpendiculaire à l'horizon, et en conséquence la durée du crépuscule est plus courte.

Le mouvement des étoiles.

Quand nous utilisons le simulateur d'étoiles à notre latitude, nous pouvons observer qu'il y a des constellations qui se lèvent et se couchent comme le Soleil, mais que les constellations voisines de l'étoile polaire, comme par exemple la Petite Ourse ou la Grande Ourse, sont circumpolaires, et qu'il y a aussi des constellations comme le Scorpion qu'il n'est pas possible de voir complètement, et d'autres comme La Croix du Sud, qui sont toujours invisibles pour nous. Si nous allons à l'équateur de la Terre, il est très facile de voir que toutes les constellations sont visibles avec lever et coucher, et que leur trajectoire est perpendiculaire à l'horizon. Si nous étions à nouveau avec notre phoque, il serait seulement possible de voir les constellations au-dessus de l'équateur céleste, c'est-à-dire jusqu'à la Ceinture d'Orion. Toutes les constellations comme les Ourses, le Cygne et le Lion sont circumpolaires, il n'y a pas de constellations qui se lèvent et se couchent. Toutes les constellations de l'hémisphère nord sont circumpolaires et toutes les constellations de l'hémisphère sud sont invisibles pour le phoque qui vit au pôle Nord.

Il faut dire que le simulateur d'étoiles a été construit sans considérer les différentes ascensions droites des étoiles ; on a seulement considéré la déclinaison des constellations qui sont dessinées. Il faudrait construire différents simulateurs d'étoiles si nous voulions considérer aussi l'ascension droite. Par exemple on pourrait faire quatre simulateurs différents, un pour chaque saison, ou un pour chaque zone de 20° d'ascension droite ; mais se pose alors le problème que les constellations correspondant à peu près à la même zone de déclinaisons peuvent être moins importantes et moins facilement connues des étudiants. L'information est plus exacte mais probablement moins claire.

L'objectif du simulateur est simplement que les étudiants puissent considérer un jeu de 6 ou 7 constellations très importantes et vérifier si elles sont visibles ou non en différents lieux de la Terre.

Constructions des découpages

Simulateur du mouvement du Soleil (fig. 1) et des étoiles (fig. 2).

- a) Faire une photocopie des figures 1 (ou 2) et 3 sur carton ou sur un papier qu'on collera ensuite sur un carton un peu dur.
- b) Découper les deux pièces formant le simulateur en suivant la ligne continue (fig. 1 (ou 2) et 3).
- c) Eliminer la zone noire de la pièce principale (fig. 1 ou 2).
- d) Replier la pièce principale (fig. 1 ou 2) suivant la ligne de pointillés. Il est bon de le faire plusieurs fois pour faciliter l'utilisation ultérieure.
- e) Faire une petite incision en face du N du disque de l'horizon (fig. 3), assez grande pour qu'on puisse y passer le carton.
- f) Coller le cadran nord-est du disque de l'horizon (fig. 1 ou 2) sur le cadran gris de la pièce principale (fig. 1 ou 2) ; il est très important que la ligne nord-sud soit en accord avec la ligne double de la pièce principale et que le point cardinal W soit situé en face de la marque de latitude 90° . Il faut coller les deux pièces très soigneusement pour obtenir une bonne précision.
- g) En introduisant l'incision N du disque de l'horizon (fig. 3) dans les marques de la latitude, il faut que le disque reste bien perpendiculaire à la pièce principale.
- h) Il est très important d'effectuer toutes les opérations avec soin et précision pour obtenir un bon simulateur.

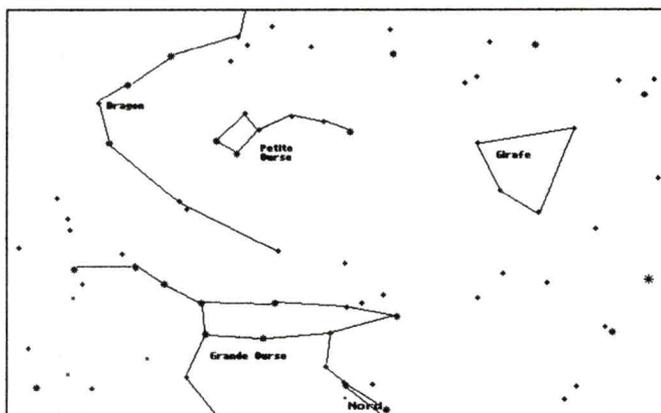
Bibliographie pour les deux articles de R. M. Ros.

- Bonvehí, L., Capell, A., Colom, J., Ros, R.M., El planisferi, una eina per a l'ensenyament de l'Astronomia, Recerca i innovació a l'aula de Ciències de la Naturalesa, 457, 462, Museo de Geologia, Universitat Politècnica de Catalunya, Manresa, 1998.
- Fraknoi, A. et al. , The Universe at Your Fingertips, Astronomy Society of the Pacific, San Francisco, 1995, ISB.
- Ros, R.M., Lanciano, N., El horizonte en la Astronomía, Astronomía Astrofotografía y Astronáutica. 76, 12, 20, Barcelona, 1995.
- Ros, R.M., Laboratorio de Astronomía, Tribuna de Astronomía, 154, 18, 29, Madrid, 1998.
- Ros, R.M., Orientation inside and outside the celestial sphere, Proceedings of "2nd EAAE International Summer School", 159, 166, Barcelona, 1998.
- Ros, R.M., Simulador del movimiento de las estrellas, Boletín de ApEA, 9, 12, 14, Zaragoza, 2000, ISSN.
- Valbuena, X., Simulador del movimiento aparente del Sol, Boletín de ApEA, 8, 6, 10, Zaragoza, 2000.
- Warland, W., Solving Problems with Solar Motion Demonstrator, Proceedings of "4th EAAE International Summer School", 117, 130, Barcelona, 2000.

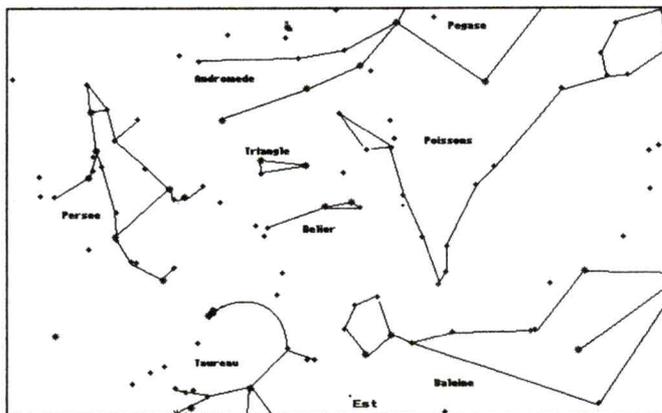
Comment se retrouver dans le labyrinthe des constellations ?

En ce début d'automne, tournons nos regards vers le ciel :

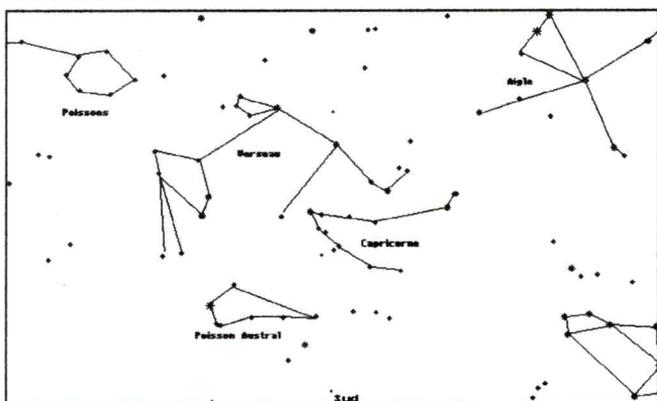
Vers le Nord...



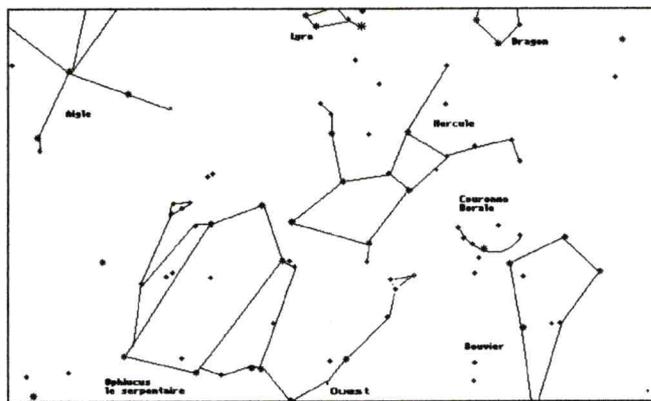
... Vers l'Est...



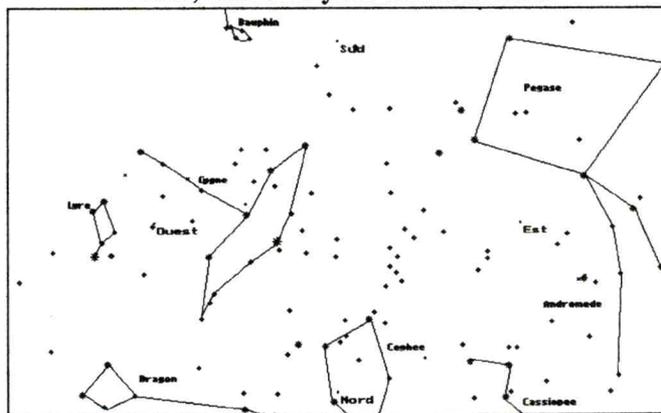
Vers le Sud ...



... ou vers l'Ouest !



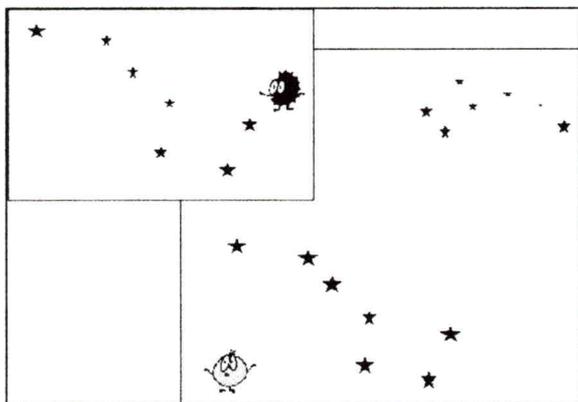
Enfin, levons les yeux vers le zénith...



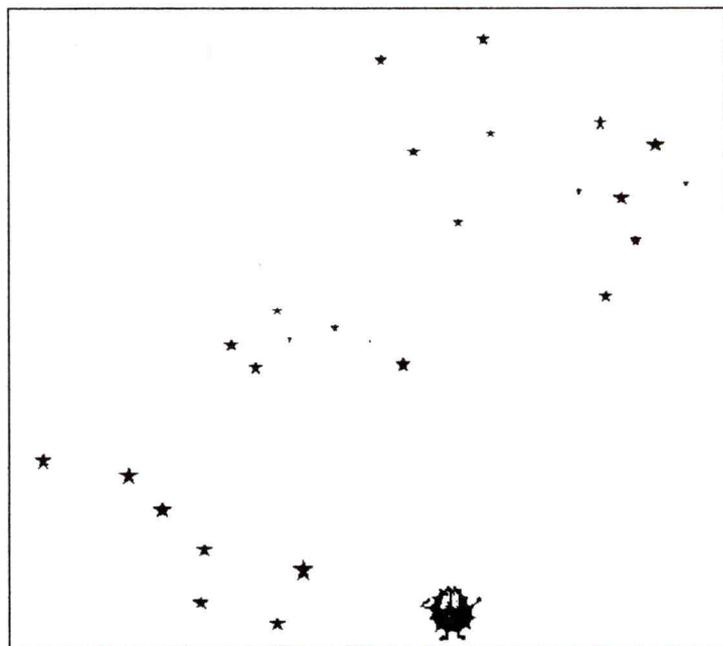
Ciel d'Automne...

Et maintenant, retrouvez et redessinez les constellations du ciel d'Automne !

Inévitablement, le voyage commence par la Grande Ourse...

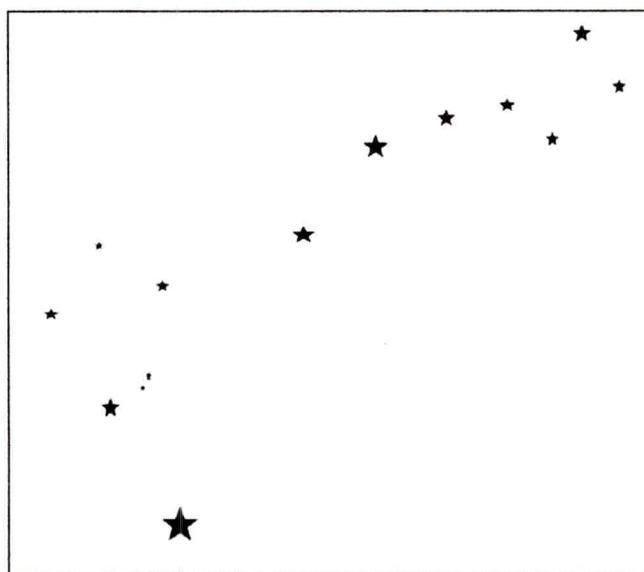
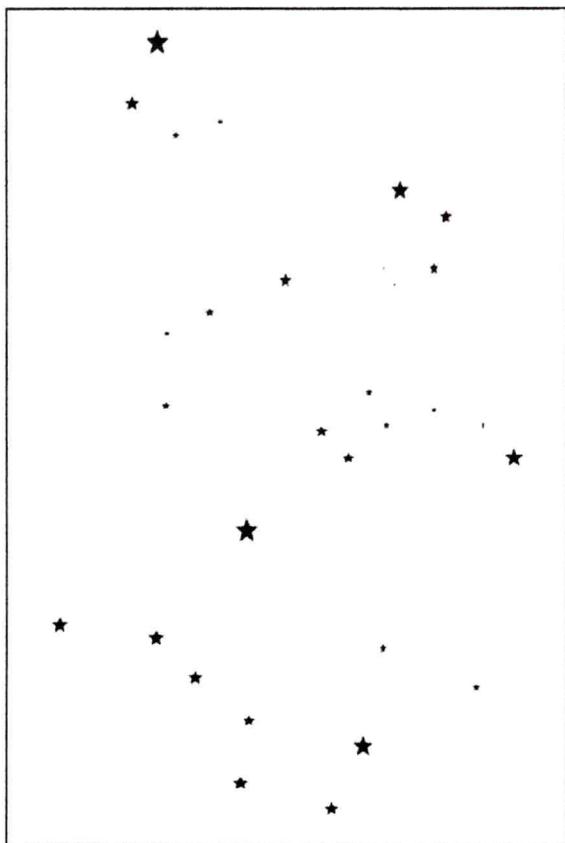


... Et son inséparable petite soeur



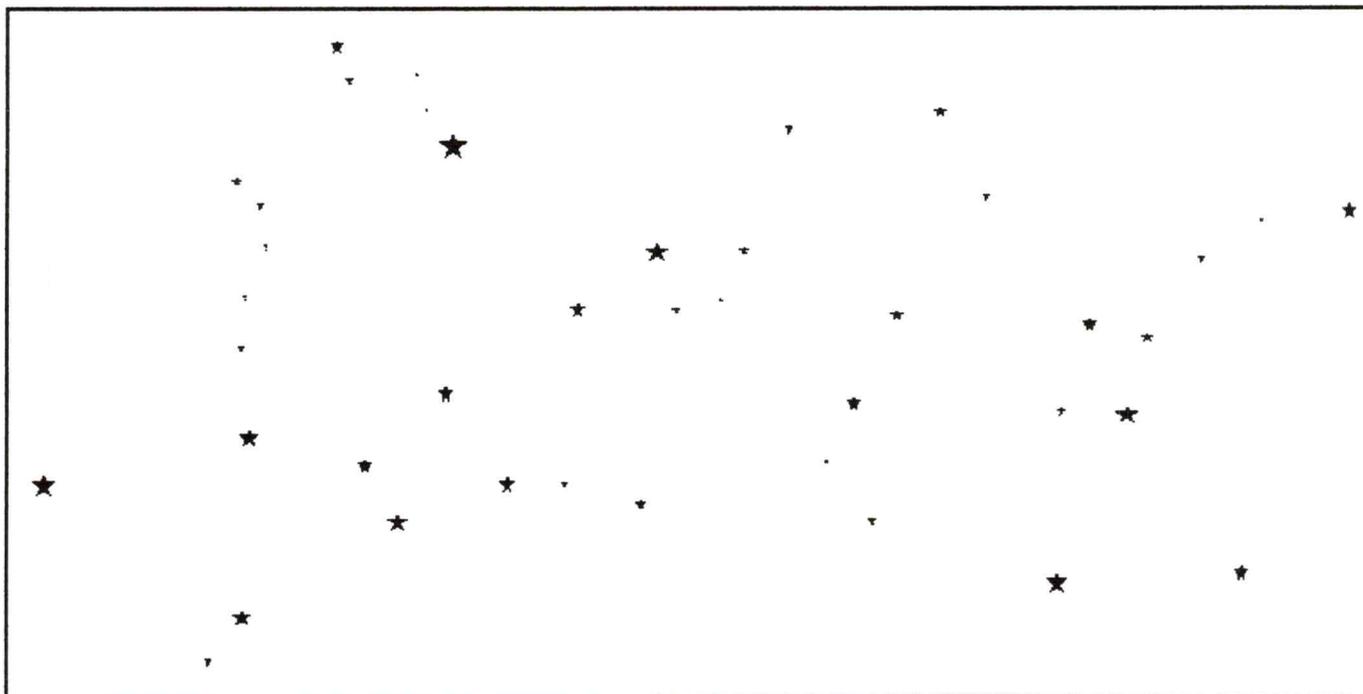
Sans supplément de prix, voici Céphée et Cassiopée !

Le Dragon serpente entre les deux...



... Et voici le Bouvier, gardien des Ourses !

Ici vous découvrirez Hercule, écrasant de son pied la terrible tête du Dragon...
Mais aussi la timide Lyre, avec sa brillante Véga !

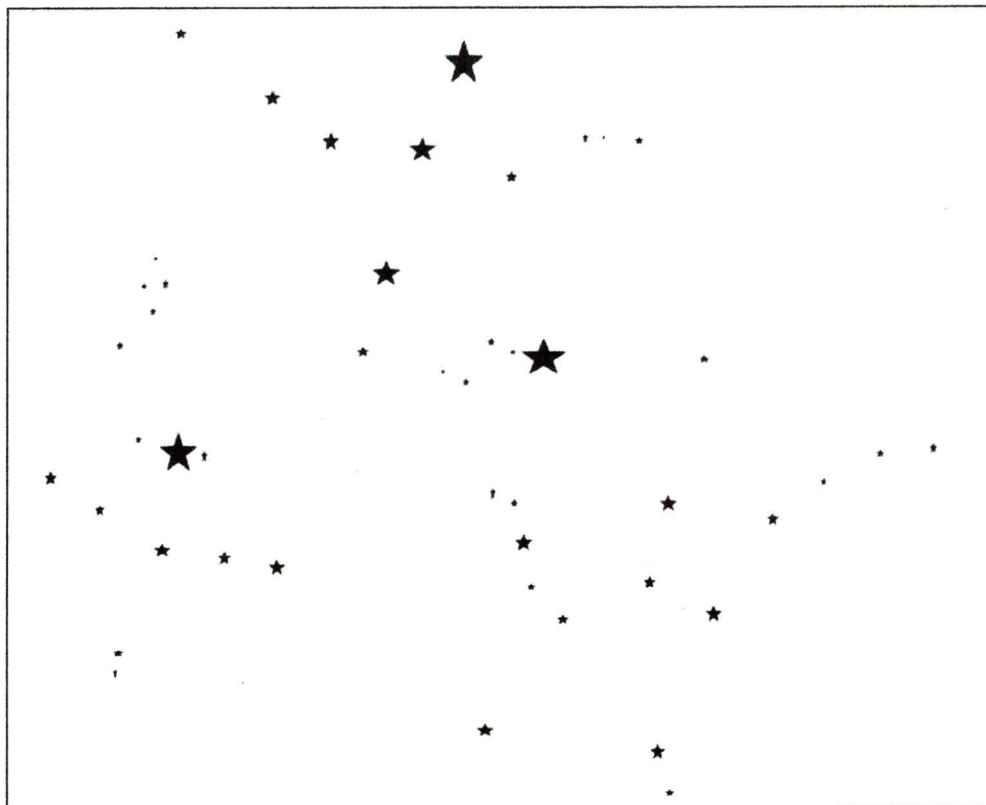


Et voilà les trois "Stars" de l'été : elles forment un triangle célèbre.

Ce sont Véga de la Lyre, Deneb, la queue du Cygne, et Altaïr, de l'Aigle !

Bien sûr, tout ce beau monde est sous la garde vigilante d'Hercule.

Mais avez vous bien regardé ? Il y a un petit animal fort sympathique dans les parages : c'est le Dauphin !



Et si vous voulez en savoir plus, deux solutions :
- les diapositives du CLEA, "D4 -. Initiation aux constellations"
- Le site du CLEA : <http://www.ac-nice.fr/clea>

Classer les étoiles selon leur éclat

Voici une activité astronomique à pratiquer en ce début d'automne :

Les trois dessins ci-contre vous permettront de reconnaître trois constellations essentielles de notre ciel et d'y repérer quelques étoiles, indiquées par des lettres.

A vous de les classer par ordre décroissant d'éclat : la plus brillante sera la première, et ainsi de suite...

Si par hasard deux étoiles semblent avoir la même brillance, il sera possible de les placer ex-aequo dans votre palmarès (B = D par exemple !).

N'oubliez pas de noter le lieu et la date de vos observations ainsi que les heures de début et de fin de votre classement...

Magnitude :

Cette grandeur mesure l'éclat d'une étoile. Dans l'Antiquité, les étoiles avaient été classées en "grandeurs", en fonction de leur éclat. Les plus brillantes étaient de "première grandeur", les plus faibles pour l'oeil nu étaient de "sixième grandeur".

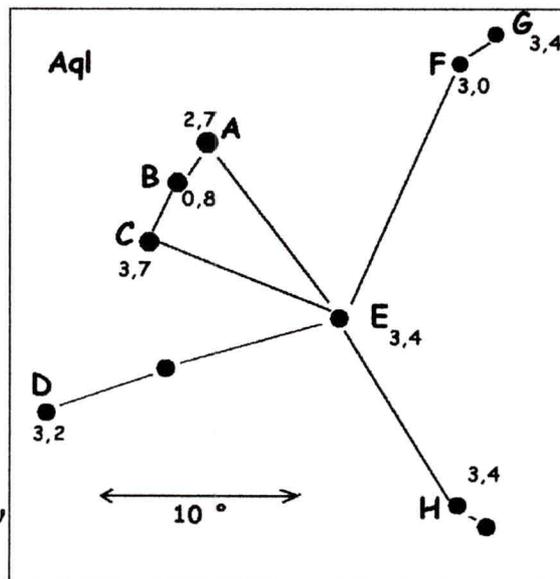
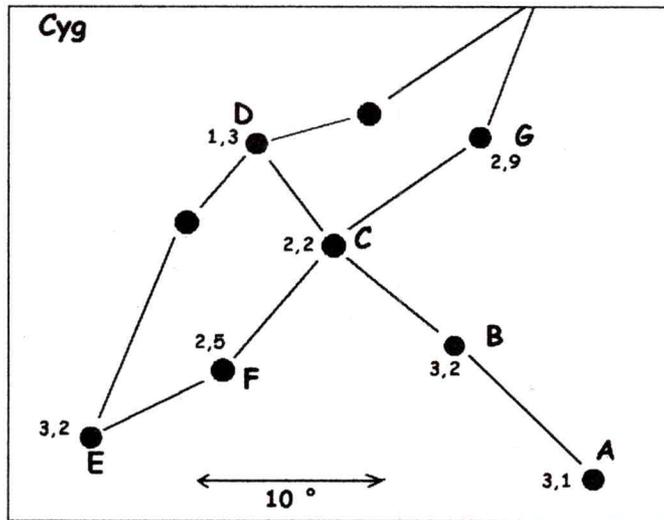
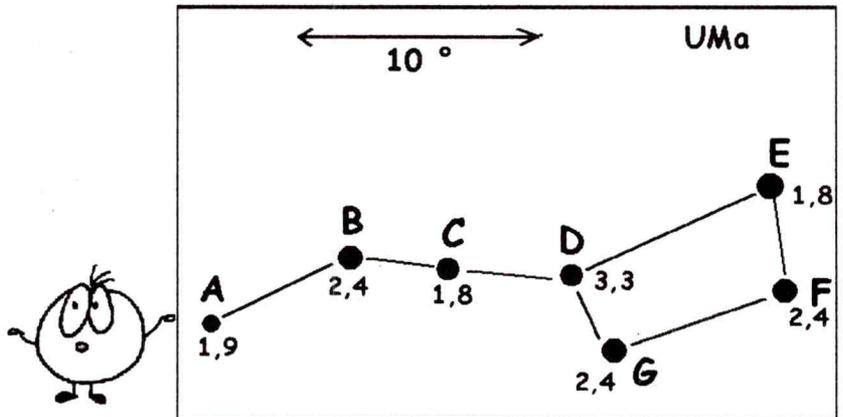
De nos jours, cette échelle a été modifiée et a reçu une définition scientifique rigoureuse, établie en 1856 par Norman Pogson : la différence entre les magnitudes m_1 et m_2 de deux étoiles est liée aux intensités lumineuses E_1 et E_2 que nous en recevons par une relation mathématique :

$$m_1 - m_2 = -2,512 \log (E_2 / E_1)$$

En termes plus simples, cela signifie qu'une étoile de magnitude 6 est 100 fois plus faible qu'une étoile de magnitude 1.

Comparez ensuite vos mesures avec celles des astronomes !

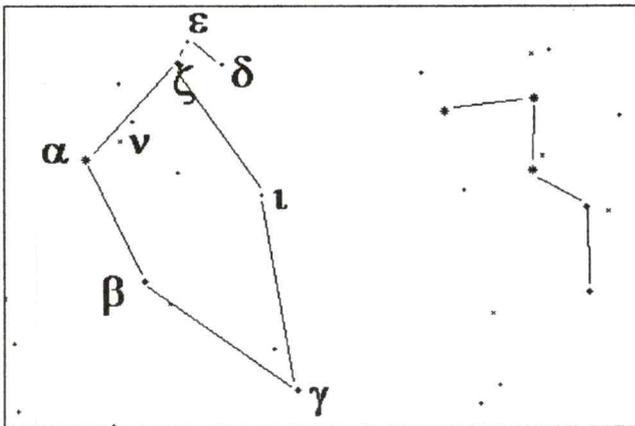
Remarque : les dessins ci-contre donnent les mesures des astronomes et on donne aux élèves des dessins vierges.



Observer et étudier une étoile variable

L'automne est particulièrement favorable pour étudier facilement une étoile variable. Reconnaissez-vous les deux constellations présentes sur cette carte du ciel ?

L'étoile variable que nous vous proposons d'observer s'appelle δ Céphée. Vous devrez tout d'abord bien repérer la constellation dans le ciel : juste au dessus de la Grande Ourse et de la Petite Ourse, tout près de Cassiopee, l'épouse de Céphée...



Repérez aussi chacune des étoiles de la constellations et observez bien leur luminosité : vous allez devoir mesurer plusieurs jours consécutifs la magnitude de δ Céphée en la comparant avec celles de ses voisines, en appliquant par exemple la méthode des degrés d'Argelander.

Surprise, c'est une étoile VARIABLE !

Etoile	α	β	γ	ϵ	ι	ν	ζ
Magnitudes	2,46	3,15	3,21	4,20	3,50	4,46	3,62

Détermination de magnitudes : degrés d'Argelander.

Pour tracer ce que l'on appelle la courbe de lumière de l'étoile variable, nous devons connaître la date (abscisse) et la magnitude visuelle (ordonnée). Nous devons attribuer à l'astre étudié une magnitude apparente aussi précisément que possible, et si possible comparer nos résultats avec ceux d'autres observateurs.

Pour chaque astre dont la magnitude varie, nous choisissons deux étoiles de référence, situées dans son voisinage, et dont les magnitudes apparentes encadreront la variation que nous souhaitons observer. Si la variation de l'objet étudié est importante, nous pourrions considérer un ensemble d'étoiles, que nous désignerons par A, B, C, D... etc., choisies de façon à ce que A soit plus brillante que l'objet que nous voulons analyser quand il atteint son maximum, et que la dernière, par exemple E, soit moins brillante que l'étoile variable, au moment où on la voit le moins. Nous les choisirons par couples : si nous souhaitons par exemple étudier un minimum de luminosité, nous le verrons tout d'abord entre A et

B ; un peu plus tard, son éclat le situera entre B et C, puis entre C et D et enfin entre D et E. Si les variations sont de faible amplitude, il vaudra mieux se limiter à deux étoiles de référence A et B.

Il faut connaître les magnitudes apparentes respectives $m_A, m_B, m_C, m_D \dots$ des étoiles de référence, qui ne pourront en aucune manière être des étoiles variables. Voici comment nous établirons nos comparaisons entre les étoiles de référence (A et B) et l'objet variable (V) :

Nous comparerons d'abord l'étoile A et la variable et traduirons nos impressions visuelles selon les critères suivants :

A1 : hésitations entre A et la variable (pratiquement égales)
A2 : hésitations, mais en fin de compte A semble être plus brillante.

A3 : comparables, mais il est net que A brille davantage

A4 : de toute évidence, et dès la première observation, A est la plus brillante

A5 : disproportion accusée entre A et la variable.

Nous faisons ensuite la même opération pour l'étoile B et la variable.

1B : hésitations entre B et la variable (pratiquement égales)

2B : hésitations, mais en fin de compte B semble être moins brillante.

3B : comparables, mais il est net que B brille moins

4B : de toute évidence, et dès la première observation, B est la moins brillante

5B : disproportion accusée entre B et la variable.

Etudions par exemple, un cas concret : "A2V4B". Cela signifie qu'en comparant l'étoile variable V avec l'étoile A, nous avons quelques doutes, mais qu'en fin de compte A semble être plus brillante. En la comparant avec l'étoile B, nous voyons de toute évidence, et dès la première observation, que B est la moins brillante. Nous traduirons notre observation par une expression de la forme : "AaVbB" où a et b peuvent prendre les valeurs 1, 2, 3, 4 ou 5, selon l'appréciation de l'observateur.

Puisque les magnitudes m_A et m_B des étoiles de référence sont connues, (en prenant toujours $m_B > m_A$), nous pourrions calculer la magnitude m de l'étoile variable en utilisant la relation suivante :

$$m = m_A + a(m_B - m_A) / (a+b) = m_B - b(m_B - m_A) / (a+b)$$

Si l'astre étudié a de fortes variations, on utilise plusieurs références, en répétant l'opération avec B et C au lieu de A et B. On obtient l'expression "BbVcC" et l'on calcule la magnitude apparente m à partir des magnitudes connues m_B et m_C . On pourrait faire de même avec d'autres couples, comme C et D, ou D et E etc...

Et si vous appliquez cette méthode à la variable qui nous intéresse, δ Céphée, en prenant comme points de comparaison les étoiles qui l'entourent... vous saurez tracer la courbe de lumière de cette étoile !

Mesure de la distance de Vénus au Soleil

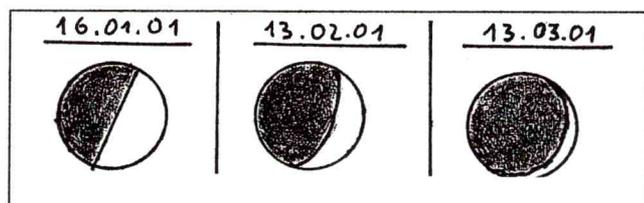
Cette activité est fondée sur une idée de Mogens Winther de l'EAAE (European Association for Astronomy Education), reprenant la méthode utilisée par Galilée vers 1610. Elle met bien en évidence des aspects successifs d'une démarche expérimentale.

Etape 1 : l'observation.

On observe la planète Vénus avec une lunette astronomique ou un télescope, un soir ou un matin. C'est assez facilement réalisable avec les élèves, en hiver, à la sortie ou avant l'entrée à l'école.

On constate que Vénus a l'aspect d'un croissant ou d'un disque pas vraiment circulaire : Vénus a des phases. Faire dessiner le plus précisément possible l'aspect de Vénus au moment de l'observation.

Voilà ce qu'on a pu obtenir cet hiver, respectivement de gauche à droite : le 16 janvier, le 13 février et le 13 mars 2001.



Etape 2 : les hypothèses.

On accepte l'idée d'un système solaire héliocentrique, les trajectoires des planètes étant circulaires, et on vérifie qu'effectivement, si Vénus a une trajectoire plus petite que celle de la Terre, elle nous apparaît de façon différente suivant les positions respectives du Soleil, de Vénus et de la Terre. On peut vérifier, que Mars dont la trajectoire est plus grande que celle de la Terre ne présentera pas de phases pour un observateur terrestre.

Etape 3 : recherche documentaire.

La position de la planète Vénus peut être repérée par l'angle α entre la direction du Soleil et celle de Vénus, vue de la Terre. Cet angle est mesurable en relation avec la rotation de la Terre sur elle-même. La Terre tournant sur elle-même en 24 h, la durée entre le passage au méridien du lieu d'observation du Soleil et de Vénus, permet de connaître l'angle cherché, sachant que pendant cette durée les positions respectives du Soleil de Vénus et de la Terre n'auront pratiquement pas changé.

Si Vénus est assez éloignée du Soleil, on peut espérer la voir en plein jour, même à l'œil nu, et donc repérer son passage au méridien, mais il vaut mieux faire la recherche par exemple sur Internet, sur le site, en France, du Bureau des Longitudes : www.bdl.fr (rechercher "Ephémérides" puis "lever et coucher des astres").

Heures de passage du Soleil et de Vénus au méridien de Greenwich, au début de l'année 2001 :

Dates	Soleil	Vénus
11 janvier	11 h 58 min	15 h 57 min
21 janvier	12 h 02 min	15 h 04 min
31 janvier	12 h 04 min	14 h 58 min
10 février	12 h 05 min	14 h 46 min
20 février	12 h 04 min	14 h 29 min
2 mars	12 h 03 min	14 h 02 min
12 mars	12 h 00 min	13 h 22 min
22 mars	11 h 57 min	12 h 29 min

Les heures de passage aux dates souhaitées peuvent être obtenues par interpolation.

Etape 4 : modélisation et mesure.

On construit un modèle expérimental, où le Soleil est une lampe et Vénus une orange. L'observateur, sur Terre est à la distance de 1 unité astronomique du Soleil, par exemple 2 m dans le modèle. On représente à l'aide de ficelles l'angle entre les directions du Soleil et de Vénus, et on bouge l'orange sur la direction Vénus-Terre, jusqu'à ce que la portion éclairée de l'orange ressemble à la phase observée de Vénus. (Il faut bien sûr être 2, un observateur et un manipulateur.)

On mesure alors la distance orange-lampe, qui compte tenu de l'échelle donne la distance Vénus-Soleil en ua.

Les résultats sont assez remarquables de précision, suivant les expérimentateurs, et la peau granuleuse de l'orange rend bien l'aspect de phase.

En faisant la mesure pour différentes phases de Vénus, donc pour différentes positions, on constate que la distance Soleil-Vénus reste constante, alors que la distance Terre-Vénus varie beaucoup. Vénus a donc bien un mouvement circulaire autour du Soleil.

Une étude plus complète dirigée par Mogens Winther (Danemark) et Alan Pickwick (Grande Bretagne) peut être consultée sur le site internet : www.amts gym-sdbg.dk/as/venus/ven-dist.htm

Calcul de la distance Terre-Mars

Ce travail consiste à déterminer la distance Terre-Mars par une mesure de parallaxe. Il faut pour cela observer Mars et les étoiles qui l'entourent, de deux points, sur Terre, éloignés l'un de l'autre.

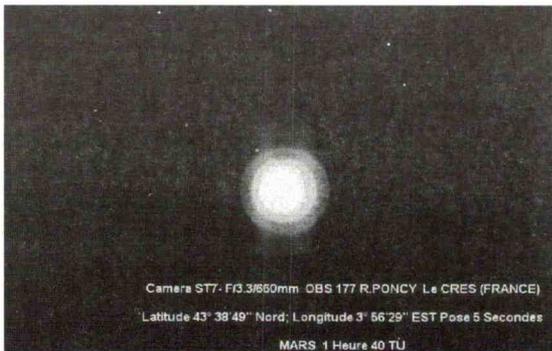
Des élèves du lycée Gaston Bachelard de Chelles ont initié ce projet qui a été réalisé avec la participation de Raymond Poncy, en France métropolitaine, et de Robin Chassagne, à Sainte Clotilde, dans l'île de la Réunion. Le compte rendu en a été fait par Vincent Marandon, élève de 1^{ère} S.

La rédaction des Cahiers Clairaut s'est permis d'introduire des intertitres et a apporté quelques rares modifications sans dénaturer le texte reçu.

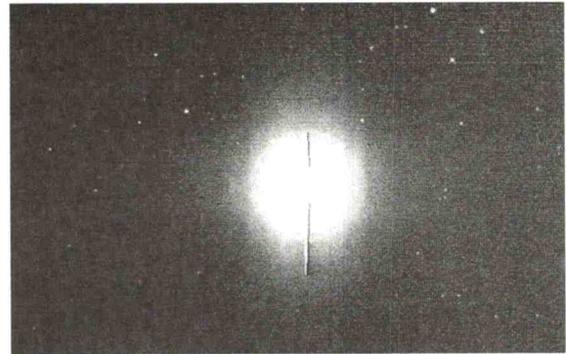
A la date de l'observation, le Bureau des Longitudes, donne la valeur 0,669 UA pour la distance Terre-Mars.

Nous avons calculé la distance Terre-Mars, avec le plus de précision possible, grâce à deux photographies prises au même moment à deux endroits différents avec des webcam, des caméras CCD ou des photos traditionnelles. Pour cette opération nous avons besoin de deux clichés pris de lieux assez éloignés l'un de l'autre, c'est la raison pour laquelle nous nous sommes mis en contact avec d'autres amateurs d'astronomie, par l'intermédiaire d'Internet, et soumis un protocole fait par notre club, où figuraient les meilleurs jours et heures pour les observations et les photos. Il y a eu plusieurs tentatives d'effectuées dont une au mois de Novembre avec une webcam qui a été fructueuse mais pour nous seuls hélas.

Voici des clichés qui nous ont permis de calculer la distance Terre-Mars ; ils ont tous les deux été pris le 29/04/2001 à 1h 40 TU. Un troisième partenaire, Pierre Dubreuil, a aussi réussi son cliché à Hyères dans le Var mais le manque de temps n'a pas permis de le prendre en compte.



**Cliché de Raymond Poncy
Le Crès (Hérault).**



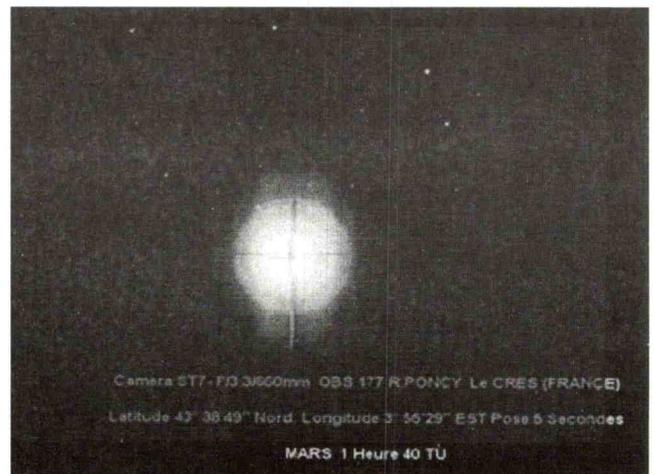
**Cliché de Robin Chassagne
Sainte Clotilde (La Réunion).**

Il est important de souligner que pour ce cliché, Mars était proche du zénith (déclinaison de $-24^{\circ} 3'$) ce qui va nous aider pour la suite des calculs.

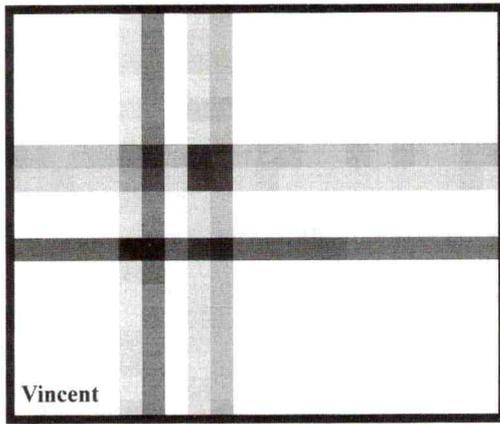
Etant donné que ces deux photos ont été prises au même moment, mais pas au même endroit, il y a un décalage entre les deux positions de Mars par rapport aux étoiles, qui elles, n'ont pas de décalage car trop éloignées.

Traitement informatique des clichés.

Grâce à des logiciels de retouche photographique, nous avons tous, dans notre club, mis l'image Chassagne à la même échelle que l'image Poncy, tracé le centre de Mars sur les deux clichés, superposé le tout par rapport aux étoiles avec une légère rotation. On a ainsi mis en évidence le décalage des deux centres.



**Résultat d'un élève à la fin de cette manipulation
se rapprochant le plus du résultat moyen.**



Gros plan sur "le centre" de l'image précédente où l'on distingue le décalage des centres des deux images de Mars.

Pour avoir l'angle du décalage il nous a fallu faire un étalonnage de la caméra, c'est à dire qu'il faut savoir le nombre de secondes d'arc par pixel. Raymond Poncy a fait un cliché de l'étoile double Epsilon 1 et 2 de la Lyre avec la même configuration que sa photo de Mars ce qui nous a permis de faire l'étalonnage des caméras des deux partenaires. On connaît l'écart entre Epsilon 1 et Epsilon 2, qui est de 3,5 minutes d'arc. Il fut obtenu aussi, mais à posteriori, avec notre matériel + webcam échantillonnés.

De plus on a le nombre de pixels d'écart (en agrandissant et en comptant), donc par une simple règle de trois on a obtenu 2,47 secondes d'arc par pixel comme étalonnage.

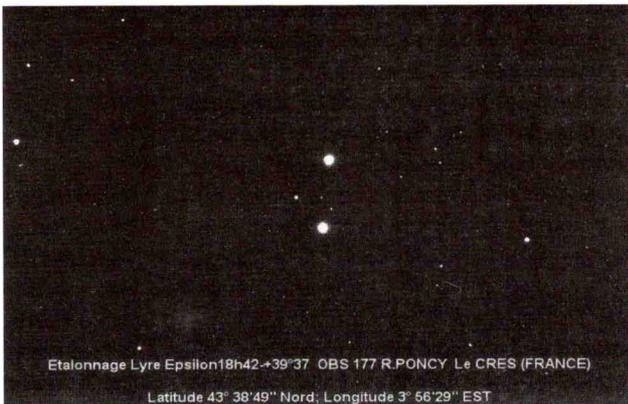


Photo ayant permis d'effectuer l'étalonnage.

D'après le calcul réalisé sur les deux clichés nous avons déterminé par 4 mesures indépendantes un décalage d'en moyenne :

- Verticalement : 4,25 pixels soit 10,5 secondes d'arc
 - Horizontalement : 3,25 pixels soit 8 secondes d'arc
- Les mesures effectuées sont de (3,3), (3,3), (3,4), (4,7) pixels.

D'après ces données on a calculé le décalage au niveau de l'hypoténuse grâce au théorème de Pythagore.

On obtient donc 13,21 secondes d'arc de décalage, angle que l'on notera : $\alpha = 13,21''$

Calcul de la distance entre les deux lieux d'observation.

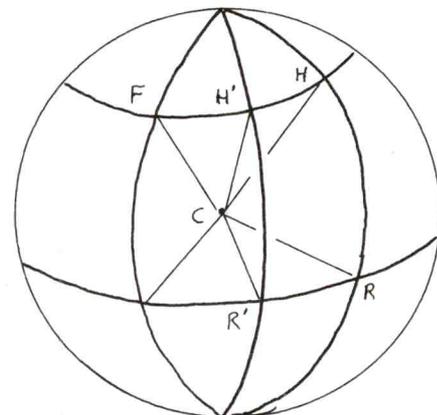
Nous connaissons maintenant l'angle qui nous permettra de calculer la parallaxe. Mais il nous faut aussi la distance entre les deux lieux d'observations. Nous devons donc utiliser les coordonnées des sites d'observations.

Le Crès (F) : lat. 43° 39' N et long. 3° 56,5' E
 Sainte Clotilde (R) : lat. 20° 54' S et long. 55° 30' E

Il est à noter que nous aurions pu en théorie effectuer les calculs des coordonnées des sites nous mêmes, car nous avons obtenu celles de notre lycée, mais dans un souci de simplicité nous avons préféré prendre les mesures données par nos partenaires.

Pour rendre les calculs plus simples, et utiliser des points dans un même plan, on dit que Chassagne et Poncy sont sur le même méridien. Donc on calcule les coordonnées des nouveaux points situés sur le méridien moyen entre les deux lieux d'observations :

$(3° 56,5' E + 55° 30' E) / 2 = 29° 43,25' E$
 H' : lat. 43° 39' N et long. 29° 43,25' E
 R' : lat. 20° 54' S et long. 29° 43,25' E



C est le centre de la Terre. Sont figurés ici les parallèles de F et R, ainsi que les méridiens de ces deux lieux d'observation et le méridien moyen. L'angle au centre H'CR' est appelé Δ .

Calcul de H'R' :

Il faut d'abord calculer l'angle $\Delta = H'CR'$.
 Δ est égal à la différence des latitudes respectives de H' (ou F) et de R' (ou R) :
 $\Delta = \text{lat. H}' - \text{lat. R}' = 43° 39' - (- 20° 54')$
 $\Delta = 64,55°$.

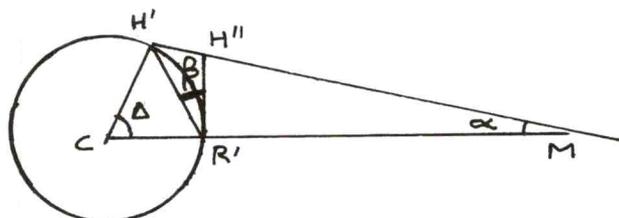
On peut maintenant calculer la distance $H'R'$. On sait que le triangle $H'CR'$ est isocèle car 2 de ses côtés sont des rayons terrestres. La longueur du troisième côté, $H'R'$, est donc :

$$H'R' = \text{Rayon terrestre} \times \sin(\Delta / 2) \times 2$$

$$H'R' = 6811,5 \text{ km.}$$

Calcul final.

Le schéma de principe est le suivant :



On connaît l'angle $R'MH'' = \alpha$ par mesure et l'angle $H'CR' = \Delta$ par calcul.

Nous allons calculer l'angle $H'RH'' = \beta$ pour pouvoir calculer ensuite la distance $R'H''$, puis la distance $R'M$ qui est la distance de Mars à la surface de la Terre.

Pour cela nous faisons les hypothèses simplificatrices suivantes :

1 - Mars est pratiquement au zénith de la Réunion (comparer la déclinaison de Mars à cette date et la latitude de Sainte Clotilde).

2 - La distance de Mars étant très grande par rapport aux dimensions de la Terre, le segment $H'H''$ est pratiquement parallèle au segment CR' , donc le triangle $H'R'H''$ est pratiquement rectangle en H'' .

Calcul de β :

$$\beta = 90^\circ - CR'H' \text{ et } CR'H' = (180^\circ - \Delta) / 2$$

$$D'où \beta = 90^\circ - (180^\circ - 64,55^\circ) / 2 = 32,275^\circ.$$

NDLR : $\beta = \Delta / 2$ (angle inscrit et angle au centre interceptant le même arc $H'R'$)

On peut maintenant calculer la distance "efficace" (base) de la parallaxe, qui est la longueur $H''R'$; compte-tenu des hypothèses précédentes : $H''R' = H'R' \times \cos \beta$.

$$H''R' = 5759,1 \text{ km}$$

Nous pouvons, maintenant calculer la distance de Mars :

$$R'M = H''R' / \tan \alpha$$

$$\text{Distance Terre-Mars} = 89\,924\,094,28 \text{ km}$$

$$\text{Distance Terre-Mars} = 90\,000\,000 \text{ km.}$$

Remarque : une mesure d'élève est assez différente des autres (4,7) car sa mesure s'est faite sur le disque blanc central de Poncy alors que sur celle de Chassagne, il a pris l'ensemble de la tache de diffraction. Par intégrité avec la méthode adoptée, elle a été prise en compte. Un calcul rejete

tant cette mesure donne une distance Terre-Mars égale à 107 308 700 km.

Nous réutiliserons cette dernière mesure l'an prochain pour calculer les distances des planètes du système solaire.

En conclusion, nous remercions toutes les personnes de bonne volonté qui nous ont aidés à monter ce projet et à le mener jusqu'à son terme, grâce à leur sérieux et au bon respect du protocole. En écrivant cela, je pense surtout aux astronomes amateurs qui se sont engagés à nous aider jusqu'au bout et à nous donner un peu de leur temps.

Remarques de Gilles Dodray sur l'atelier d'astronomie du Lycée Gaston Bachelard*

Le club astronomie existe depuis 10 ans et a évolué depuis quatre années en atelier scientifique : les élèves intéressés s'inscrivent pour une année scolaire à l'atelier. Le but et l'intitulé de notre projet est d'"arpenter l'Univers", c'est à dire de mesurer les distances des objets célestes avec nos seules mesures sans recours à des résultats extérieurs que l'on trouve généralement dans les livres. On a ainsi appris à se situer sur Terre (latitude et longitude), calculer le rayon terrestre, calculer la distance Terre-Lune avec l'éclipse du 11/08/1999, mesurer des hauteurs de reliefs lunaires, calculer des distances d'étoiles et de galaxies. Ce calcul présenté ici de la distance de Mars, nous permettra cette année 2001-2002 d'obtenir la distance Terre-Soleil et des autres objets du système solaire. Chaque année, nous préparons avec les élèves des projets de calculs de distances, et nous les réalisons malgré les aléas météo que l'on connaît à Paris.

Un astrophysicien, Dominique Proust du CNRS à Meudon, nous soutient et nous aide. Nous avons un très bon matériel d'observation (téléscope de 212 mm motorisé), avec tout ce qu'il faut pour faire de la photo autant traditionnelle que numérique avec une webcam. Le point de départ de nos mesures étant les images que nous pouvons réaliser. Chaque année, nous réalisons aussi une mission dans un grand observatoire où nous pouvons utiliser une caméra CCD entre autres.

L'atelier fonctionne comme un enseignement optionnel : tout élève intéressé peut s'y inscrire, quelle que soit sa section. L'atelier fonctionne de 17 h à 19 h un soir par semaine. On observe et photographie quand il fait beau. On prépare les projets, traite les images acquises, fait un peu de théorie quand le ciel est couvert. L'intérêt du traitement numérique des images est tel que nous faisons de moins en moins de cours théoriques.

L'objectif est de présenter les résultats que nous avons pu obtenir lors d'expositions ou dans des mémoires rédigés par les élèves, ou mieux, la rédaction d'un article pour publication comme c'est présentement le cas. Une dizaine d'élèves s'inscrivent chaque année, et suivent l'atelier plusieurs années consécutives.

*32 avenue de l'Europe. 77505 Chelles cedex.
<http://www.ac-creteil.fr/bachelardchelles/clubs>

La chute de la Lune

En classe de seconde, au lieu de faire des thèmes distincts, j'ai préféré approfondir certains domaines. Évidemment, l'astronomie ouvre quelques fenêtres vers lesquelles je me sens attiré. Après avoir traité avec les élèves le principe d'inertie, les forces, la gravitation, je leur propose une activité sur la "chute" de la Lune, activité qui se termine par une vérification expérimentale. Les textes ci-dessous donnent les documents élève et professeur.

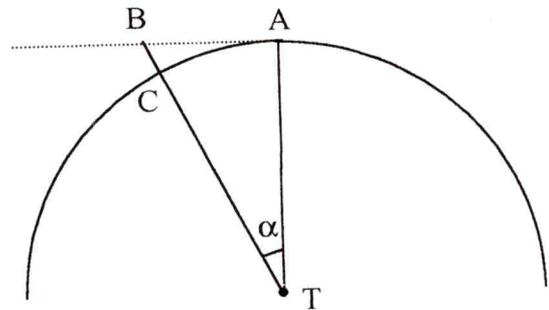
La démarche est la suivante :

Newton affirme que les forces qui régissent le mouvement des astres sont de même nature que celles qui attirent des corps vers le sol. La chute d'un corps à la surface de la Terre a pour cause la présence de la Terre (gravitation, force, modification de la vitesse), donc d'après Newton, le mouvement de la Lune autour de la Terre aurait la même cause.

- Constatons qu'au cours de son mouvement autour de la Terre, la Lune tombe.
- Calculons la hauteur de chute pendant une durée t .
- Supposons qu'un objet (une bille, une pomme), sans vitesse initiale, placé à la même distance soit attiré de la même façon.
- Calculons la hauteur de chute de cet objet s'il est placé à la surface de la Terre.
- Vérifions expérimentalement que c'est vrai.

1 - Dans les données de départ, on admet que la trajectoire de la Lune est un cercle (l'excentricité de sa trajectoire elliptique est 0,055) et que la valeur de sa vitesse est constante. A partir du rayon de l'orbite et de la période sidérale, il est possible de calculer la valeur de la vitesse par exemple au point A. Si on suppose que la Terre disparaît quand la Lune passe en A, alors le mouvement de la Lune est rectiligne et uniforme (principe d'inertie et en supposant l'absence du Soleil *) et il est alors possible de calculer la distance AB parcourue par la Lune en $t = 0,5$ s

2 - Mais si la Terre est présente, au bout de 0,5 s, la Lune ne se trouve pas en B, mais en C, que l'on impose comme l'intersection du segment BT avec l'orbite de la Lune. Si on impose ceci, on affirme que la longueur du segment AB est égale à celle de l'arc AC, ce qui n'est pas rigoureusement exact. Mais quelle est l'erreur commise ? Autrement dit, peut-on confondre l'angle α (dans le triangle TAB) et la valeur de l'angle α' (en radians) qui intercepterait l'arc AC dont la longueur serait rigoureusement égale à celle du segment AB.



Calcul de la tangente de l'angle α .

La distance parcourue en 0,5 s par la Lune peut être calculée à partir de la période sidérale et du rayon de l'orbite : en 27,32 jours elle parcourt $2\pi d_{TL}$; en 0,5 s elle parcourt AB, donc :

$$AB = (2\pi d_{TL} \times 0,5) / (27,32 \times 86400).$$

$$\text{D'où, } \tan \alpha = AB / TA = \pi d_{TL} / (27,32 \times 86400 \times d_{TL}) = \pi / (27,32 \times 86400).$$

Cette valeur est très petite : $1,33 \times 10^{-6}$ radians ; dans ce cas $\tan \alpha = \alpha$ (en radians). Donc $\alpha = 1,33 \times 10^{-6}$ radians.

Calcul de la valeur de l'angle α' en radians.

L'angle π radians intercepte un arc de longueur πd_{TL} et l'angle α' intercepte un arc de longueur AB.

$$AB = \pi d_{TL} / (27,32 \times 86400) \text{ donc } \alpha' = \pi / (27,32 \times 86400)$$

le calcul donne $\alpha' = 1,33 \times 10^{-6}$ radians donc $\alpha = \alpha'$

Il est donc tout à fait correct d'admettre que l'arc AC et le segment AB ont même longueur.

3 - L'effet de l'attraction de la Terre sur la Lune est donc de faire tomber la Lune de B en C. On peut calculer cette distance BC.

En effet $BC = BT - CT$ avec $CT = d_{TL}$ et dans le triangle TAB, rectangle en A : $BT^2 = AB^2 + AT^2$

La valeur trouvée est $BC = 3,4 \times 10^{-4}$ m soit 0,34 mm.

Donc d'après Newton, si on place une bille à la distance de la Lune, elle serait attirée par la Terre et tomberait en 0,5 s d'une distance $BC = 0,34$ mm, en faisant l'hypothèse que le mouvement est indépendant de la masse de l'objet.

Les élèves pensent souvent aux mouvements pour lesquels les forces de frottement dans l'air ne sont pas négligeables devant le poids de l'objet et ils ont donc du mal à accepter cette hypothèse. Il suffit de leur demander alors qui arrivera le premier au sol d'un stylo ou d'une feuille de papier s'ils sont lâchés sans vitesse initiale, de la même hauteur et au même instant ? La plupart répondent le stylo. Et à la question pourquoi ? , ils répondent car il est plus lourd ou sa masse est plus grande. Vérifier expérimentalement. Refaire l'expérience deux fois, trois fois, (ils ont raison), puis sans

rien dire, froisser la feuille et refaire l'expérience pour constater que les objets tombent pratiquement ensemble. Évidemment ceci n'est pas une démonstration, mais ils verront ceci en classe de première, en attendant c'est une première approche.

4 - Mais que se passerait-il si la bille était placée à la surface de la Terre c'est à dire 60 fois plus près puisque $d_{TL} \sim 60 R_T$?

La gravitation dépendant de l'inverse du carré de la distance, on s'attend donc à avoir au niveau de la Terre une distance égale à $60^2 \times BC$ soit 1224 mm.

5 - Vérification expérimentale.

Si Newton a raison et si l'hypothèse de dire que le mouvement ne dépend pas de la masse de l'objet, sur Terre, une bille devrait tomber d'environ 1,22 m en 0,5 s à condition qu'elle ne soit pas soumise à d'autres forces. Il est possible là de discuter avec les élèves de l'influence des forces de frottement dans l'air et donc du choix de la bille (diamètre, masse donc matière).

Il suffit alors d'utiliser un dispositif avec deux capteurs pour mesurer le temps mis par une bille pour parcourir 1,22 m. Il vaut mieux commencer à placer le second capteur à 1m-1,1m, puis autour de 1,35 m pour enfin le placer à 1,2 m. Les résultats sont très convenables et vérifient les hypothèses faites.

* Quand on fait l'hypothèse de la disparition brutale de la Terre, engendrant un mouvement rectiligne et uniforme pour la Lune, il faut également travailler en l'absence du Soleil. En effet l'attraction du Soleil sur la Lune est plus de 2 fois plus grande que celle de la Terre. Par comparaison la force exercée par le Soleil sur Europe est 12 fois plus faible que celle exercée par Jupiter sur son satellite.

C'est pour cela que l'ensemble Terre-Lune se comporte davantage comme une planète double que comme une planète avec son satellite. Ainsi dans un repère héliocentrique, l'orbite de la Lune présente toujours la même concavité vers le Soleil, c'est un cercle un peu "cabossé".

Gravitation

I - Historique.

En 1687, dans *Philosophia naturalis principia mathematica*, Newton publie la loi de la gravitation universelle et explique que les forces qui régissent le mouvement des astres sont de même nature que celles qui attirent des corps vers le sol.

Peut-on le vérifier ?

II - Données.

Supposons que la Lune se déplace autour de la Terre sur un cercle de rayon d_{TL} (distance Terre-Lune) et que sa vitesse conserve une valeur constante.

On donne :

masse de la Lune : $M_L = 7,38 \times 10^{22}$ kg

masse de la Terre : $M_T = 5,98 \times 10^{24}$ kg

période de révolution sidérale de la Lune : $T = 27,32$ jours

distance Terre-Lune : $d_{TL} = 60 R_T = 3,844 \times 10^5$ km

rayon de la Terre : $R_T = 6,38 \times 10^3$ km

III - Travail à faire.

1. Ouvrir le fichier "Excel".
2. Sur le schéma représenter le sens de la vitesse de la Lune quand elle passe en A.
3. Supposons que la Terre disparaisse quand la Lune passe en A. Quel type de mouvement aurait alors la Lune dans un référentiel géocentrique ? Pourquoi ?
Quelle serait alors sa trajectoire ? La représenter en pointillés.
4. Sur ces pointillés, placer le point B (point que la Lune atteindrait en 0,5 s).
5. Calculer la distance AB.
Aide : Quelle est la distance parcourue en 27,32 j = s ?
6. Si la Terre reste présente en T, est-ce que la Lune sera en B en 0,5 s ? Pourquoi ?
7. Quelle serait sa position ? Noter par C ce point.
8. Finalement on peut dire que la Terre fait tomber la Lune de B à C. Calculer la distance de chute BC. Pour cela utiliser le fichier du tableur Excel

Le travail fait nous permet-il d'affirmer qu'à la distance de la Lune, la Terre fait tomber un objet de la distance BC en 0,5 s ?
9. Tomberait-il de la même distance en 0,5 s à la surface de la Terre donc à la distance R_T du centre de la Terre ? Pourquoi ?
10. Calculer la distance de chute à la surface de la Terre en 0,5 s.
11. Peut-on vérifier expérimentalement ce résultat ? Si oui, comment ?

nom : _____ classe : _____

Chute de la lune

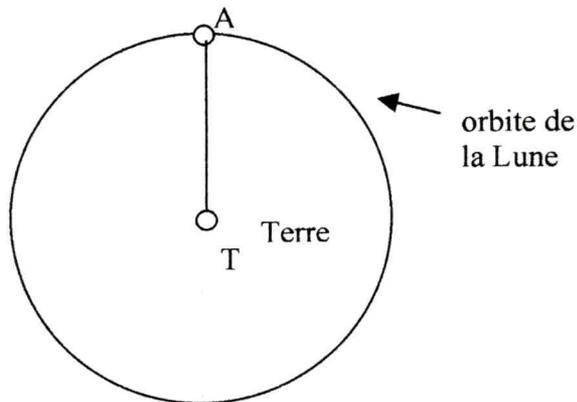
Données :

période de révolution sidérale de la Lune $T = 27,32 \text{ j}$
 rayon de la Terre : $R_T = 6378 \text{ km}$
 distance Terre-Lune $d_{TL} = 60 \times R_T$

Hypothèses :

On suppose que :
 la Lune se déplace , dans le sens direct, autour de la Terre sur un cercle de rayon d_{TL}
 sur le schéma, la Terre est immobile

B C cliquer pour déplacer



Période révol. Lune (s)	T		
rayon de la Terre (m)	R_T		
Circonf. orbite Lune (m)	L		
distance Terre-Lune (m)	d_{TL}		
distance AB (m)	AB		
distance TB au carré (m ²)	TB^2		Somme, carrés
distance TB (m)	TB		racine
distance BC (m)	BC		5 décimales

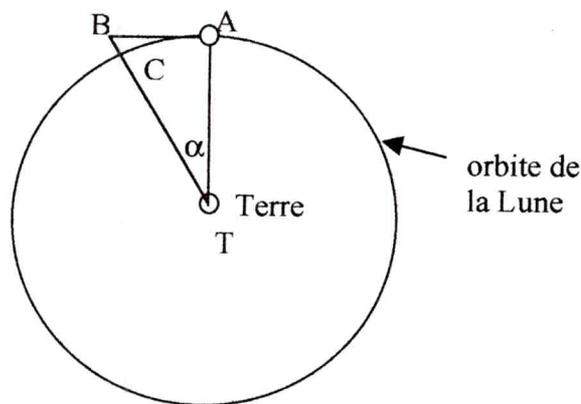
Chute de la lune

Données :

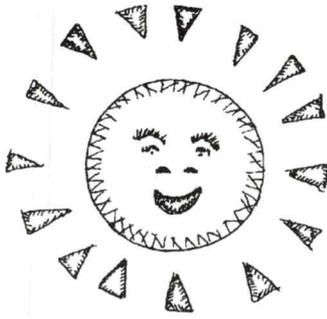
période de révolution sidérale de la Lune $T = 27,32 \text{ j}$
 rayon de la Terre : $R_T = 6378 \text{ km}$
 distance Terre-Lune $d_{TL} = 60 \times R_T$

Hypothèses :

On suppose que :
 la Lune se déplace , dans le sens direct, autour de la Terre sur un cercle de rayon d_{TL}
 sur le schéma, la Terre est immobile



Période révol. Lune (s)	T	2360448	$= (27.32 * 24 * 86400)$
rayon de la Terre (m)	R_T	6378000	
Circonf. orbite Lune (m)	L	2403230400	$= (B31 * 2 * 3,14 * 60)$
distance Terre-Lune (m)	d_{TL}	382680000,00000	$= (B31 * 60)$
distance AB (m)	AB	509,0623475	$= (B32 / B30 / 2)$
distance TB au carré (m ²)	TB^2	1,46444E+17	SOMME,CARRÉS (B32 :B34)
distance TB (m)	TB	382680000,00034	$= \text{RACINE}(B35)$
distance BC (m)	BC	0,00034	$= B36 - B33$
$\tan \alpha$		1,33025595141E-06	$= (B34 / B33)$
α (rad)		1,33025595141E-06	$= (\text{ATAN}(B39))$
AC (on supposant C sur TB)		509,06234748628	$= (B32 * B40 / 6.28)$
AD (déplacement en 0,5s sur l'orbite.)		509,06234748658	$= (6.28 * 0.5 * B33 / B30)$
erreur		5,89692E-13	$= ((B43 - B42) / B43)$



Le ciel de l'invisible

Philippe Laporte, CNES

Philippe Laporte achève maintenant le voyage commencé dans le numéro précédent. Cette promenade galactique atteint ici les plus courtes longueurs d'onde (ultraviolet, X et γ).

4 - L'ultraviolet.

C'est le domaine des hautes températures (plusieurs dizaines de milliers de kelvins). C'est dans ces longueurs d'ondes là que l'on voit aussi la recombinaison¹ des électrons dans les noyaux légers. Quelles applications pour l'astronomie ?

Grâce à des observations précédentes, on sait que l'espace interstellaire des galaxies contient du gaz chaud et du gaz froid. Cependant, sa distribution est mal connue, de même que le taux d'ionisation et la cinématique.

Le satellite FUSE a été lancé en 1999 pour observer ce milieu galactique dans la bande [91-120 nm], largement inexplorée. Cette lacune est évidente lorsque l'on cherche des cartes du ciel en ultraviolet : c'est une quête peu aisée. L'un des objectifs de cette mission est d'observer le disque et le halo de notre Galaxie pour répertorier et déterminer les structures de gaz chaud. Pour cela, le satellite va traquer en particulier les ions O VI, c'est-à-dire l'oxygène ionisé 5 fois !

Grâce à sa sensibilité élevée, les astronomes devraient pouvoir réaliser des observations dans les deux plus proches galaxies (nuages de Magellan) et comparer les données issues de notre Galaxie.

Un autre enjeu, plus médiatique, est l'origine et l'évolution de l'Univers. La théorie du big bang est un modèle qui per-

met de calculer l'état de l'Univers pour différents âges. Cette théorie est largement acceptée en raison du bon accord entre calculs et observations astronomiques. En résumé, tout commence au temps de Planck, à $T = 10^{-43}$ s (en deçà, nous ne connaissons pas la physique). Ici, les hypothèses sur l'origine de l'Univers se perdent dans divers scénarii quantiques. Jusqu'à 10^{-32} s, particules élémentaires et force unique sont de rigueur. La température est alors de l'ordre de 1027 K. Cependant, la décroissance de cette dernière va autoriser des brisures de symétrie, entraînant successivement l'apparition des quatre forces que nous connaissons aujourd'hui : nucléaire forte (liaison des quarks²), nucléaire faible (responsable de la radioactivité), électromagnétique et la gravitation. C'est aussi à ce moment que seraient apparues les particules élémentaires qui constituent la matière de notre Univers (quark, électron, neutrino). Il faut attendre 10^{-6} s pour que les quarks s'assemblent et forment protons et neutrons. La température n'est plus que d'un milliard de degrés. Une centaine de secondes plus tard, la dilatation de l'Univers a suffisamment fait chuter la température pour l'apparition d'un phénomène essentiel : la nucléosynthèse primordiale. Elle a engendré les noyaux atomiques les plus simples (légers) : deutérium, hélium, lithium, ainsi que leurs isotopes. Au cours de cette période, la température a diminué suffisamment vite pour arrêter prématurément la nucléosynthèse

primordiale, l'empêchant de terminer son travail et de tout transformer en fer. C'est en effet l'élément le plus stable, il ne fournit aucune énergie et les étoiles n'auraient alors jamais pu se former... 99% de la matière visible aujourd'hui provient de ce moment là. Elle est composée à 75% d'hydrogène et 25% d'hélium, la quantité des autres éléments étant dérisoire. C'est pourtant eux qui vont être des indices sur les conditions physiques qui régnaient durant cette période. Car le scénario du big bang est encore un peu flou. Les paramètres physiques sont mal connus alors que la quantité des éléments issus de la nucléosynthèse primordiale dépend fortement de ces mêmes paramètres. C'est pour cette raison que le deutérium peut apporter un début de solution.

Le deutérium est un élément de choix car il est détruit à une température de l'ordre de quelques millions de degrés. Ainsi, le deutérium présent dans les étoiles disparaît de l'Univers. Le big bang étant le seul mode de production connu, la quantité de cet élément doit, par conséquent, diminuer dans le temps. L'UV a ici un rôle à jouer car le deutérium (un proton et un neutron) est visible dans ce domaine de longueur d'onde. En observant des milieux de métallicité variés (milieu interstellaire, le halo, les nuages intergalactiques ou les comètes), on peut chercher dans quelle mesure la formation d'étoiles a modifié l'abondance initiale en deutérium. Par la suite, la confrontation des abondances actuelles de cet élément (formation d'étoiles) et des variations dues aux générations précédentes successives (comètes pour le système solaire par exemple) permettra de calculer l'abondance primordiale et contraindre un peu mieux les paramètres du modèle de notre Univers.

L'atmosphère est évidemment opaque aux rayons ultraviolets grâce à la couche d'ozone en particulier. Il faut donc aller au-dessus pour observer le ciel dans ce domaine. L'expérience FOCA a été réalisée dans ce but. Elle a été embarquée sous un ballon stratosphérique (altitude jusqu'à 40 km) plusieurs fois au cours des dernières années. FOCA est un télescope imageur de 40 cm qui fournit une image du ciel en une seule bande passante centrée à la longueur d'onde de 200 nm environ (largeur de la bande environ 15 nm). La résolution angulaire est de 12 à 20 secondes d'arc respectivement selon la focale de l'optique utilisée. Depuis une décennie, le télescope a fourni environ une dizaine de directions dont la profondeur n'est que marginalement égalée par HST (Hubble Space Telescope) sur quelques petits champs. L'expérience est donc considérée toujours en pointe dans son domaine. Les images obtenues par cette expérience fournissent une grande quantité de détails sur des objets comme les galaxies, les amas de galaxies ou les amas globulaires.

Une autre solution consiste à envoyer des satellites. Ils ont l'avantage de rester plus longtemps en l'air pour réaliser des mesures et permettent une cartographie du ciel. Parmi les satellites lancés pour observer ce domaine de longueur d'onde, citons IUE et EUVE grâce auxquels le ciel ultraviolet a pu être cartographié dans ses grandes lignes d'un bout à l'autre du spectre. L'un des résultats est une carte (fig. 8) des étoiles chaudes (20 000 à 30 000 K).

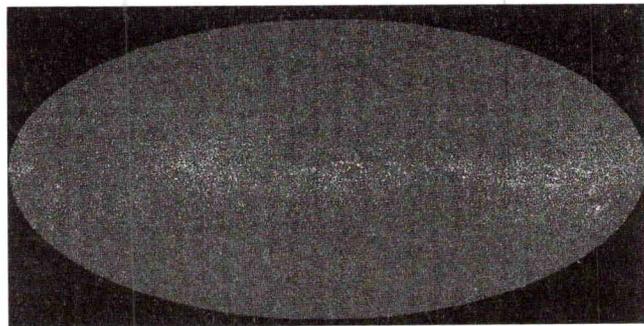


fig. 8 : Carte du ciel dans le proche ultraviolet. Ce sont les étoiles chaudes de type O et B (de 20 000 à 30 000 K) dont une grande partie de l'énergie est émise dans l'ultraviolet.

Dans la vie courante, les émetteurs d'ultraviolet sont assez rares. Il y a les anciennes lampes d'éclairage public et bien sûr le Soleil... Le monde serait donc bien sombre si nous ne voyions que dans ce domaine là !

5 - Les rayons X.

Nous entrons ici dans le domaine des hautes énergies (températures très élevées ou fort champ magnétique par exemple). Les objets concernés sont les disques d'accrétion autour d'objets compacts (étoiles à neutrons ou trous noirs), les restes de supernovae (la raie du ^{44}Ti dans Cass A, ...), les noyaux actifs de galaxies et le gaz intra - amas que nous avons déjà rencontré avec l'effet SZ.

L'émission X des disques d'accrétion provient de l'échauffement de la matière qui est arrachée à l'atmosphère de l'étoile compagnon et qui spirale autour de l'objet compact. Compte tenu de l'intense attraction gravitationnelle (40 millions de fois celle de la Terre à 1000 km), la matière est fortement accélérée entraînant des frottements visqueux important qui chauffent le disque. Les supernovae, quant à elles, sont le résultat de la fin de la vie d'une étoile de quelques masses solaires. En une gigantesque explosion (environ 10^{42} joules) l'étoile expulse son atmosphère, où une première nucléosynthèse due à la température, l'a enrichie en matériaux légers (jusqu'au fer qui est stable et ne fournit aucune énergie lorsqu'on le fissionne ou le fusionne). L'onde de choc est si forte qu'elle engendre d'autres réactions nucléaires, synthétisant les éléments les plus lourds (du fer jusqu'à l'uranium). C'est d'une mort similaire que proviennent les éléments dont est fabriquée la Terre... et nous ! Les noyaux actifs de galaxies se divisent en 6 catégories dues à leurs caractéristiques observationnelles. On y trouve les quasars, les blazars, les radiogalaxies, les QSO, et les galaxies de Seyfert (de type 1 et 2). Ces appellations nous viennent des astronomes, qui, en analysant les données obtenues avec les télescopes X, ont progressivement découvert de nouveaux objets. Ils ont tenté de les classer en plusieurs catégories, selon leurs capacité lumineuses. Il se trouve que les sources ainsi répertoriées en 6 catégories ne sont en fait

qu'un seul et même type d'objet mais vu sous des angles différents. En effet, la présence de matière (absorption de la lumière) ou de phénomènes relativistes (émission de la lumière selon des directions privilégiées) modifient souvent l'aspect d'une source lumineuse selon l'angle sous lequel on la regarde... Attention aux illusions ! Les modèles actuels proposent un trou noir gigantesque (plusieurs millions de masses solaires !) au centre d'une galaxie, nourri par un anneau dense de matière interstellaire. Le champ gravitationnel de tel objets, associé à la quantité de matière qu'ils engloutissent, produit une quantité d'énergie fabuleuse, grâce à laquelle nous pouvons les détecter, malgré la distance qui nous sépare d'eux.

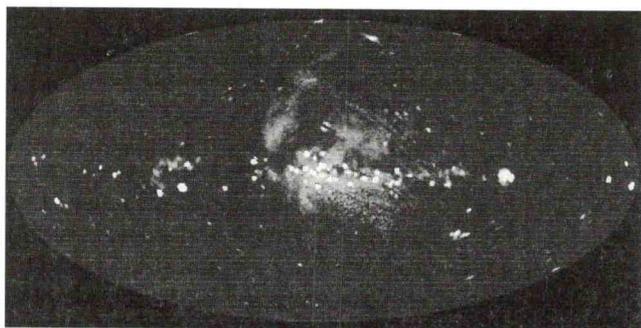


Fig . 9 : Le ciel en rayons X.

ROSAT est le satellite qui a permis de réaliser une cartographie du ciel en rayon X, dévoilant la population d'objets et leur répartition. La figure 9 montre le ciel à une énergie de 1 keV^3 . On y trouve de nombreux objets ponctuels, mais aussi un rayonnement diffus ... Certains astronomes ont tenté d'expliquer son origine, mais leur tentative était vaine. En effet, en 1999, deux satellites pour l'observation des rayons X ont été lancés. Le premier, en juillet 1999 se nomme Chandra (US) et le second, en décembre 1999, se nomme XMM (Europe). Leur particularité tient dans leurs performances nettement meilleures que ROSAT. Leur résolution angulaire (environ 5 secondes d'arc) et leur sensibilité vont transformer notre vision du ciel en rayons X. Les premiers résultats issus de l'analyse des données de Chandra montrent qu'au moins 75 % du rayonnement diffus est en fait constitué de sources ponctuelles non résolues à l'époque ! Ainsi, les galaxies lumineuses (en visible) produisent la partie dure du spectre (haute énergie), les objets faiblement lumineux la partie intermédiaire et les quasars, la composante faible (basse énergie). Les analyses préliminaires des données du satellite XMM, qui dispose d'une meilleure sensibilité, confirmeraient le résultat. A titre d'exemple, une zone du ciel de coordonnées $\alpha = 13\text{h}27$, $\delta = 0^\circ$ montre plus de 40 sources X là où il n'y en avait que 12 répertoriées avant le lancement du satellite !

Jusqu'à maintenant, les instruments qui permettaient d'observer les longueurs d'ondes étaient constitués, le plus souvent, par un réflecteur (miroir dans le cas du visible) et un détecteur (en silicium et refroidi à l'hélium liquide pour

l'infrarouge par exemple). Mais le pouvoir de pénétration des photons dans la matière est plus élevé lorsque son énergie augmente. Et nous atteignons une limite avec les rayons X : leur longueur d'onde est de l'ordre du nanomètre, c'est-à-dire à peu près la distance entre deux atomes ! Impossible d'arrêter efficacement les photons dans ces conditions. Notre grillage atomique n'est même plus assez petit...

C'est en 1913 qu'il faut chercher un début de solution. W.H. Bragg, avec l'aide de son fils, vient de développer une formule mathématique qui décrit un comportement particulier des rayons X en présence d'un cristal : la diffraction.

$$2d \cdot \sin \theta = n \cdot \lambda \quad \text{où}$$

d est la distance entre deux plans cristallins
 θ l'angle d'incidence du faisceau de rayons X
 λ la longueur d'onde
 n un entier, appelé ordre de la diffraction.

Cette formule géométrique donne une relation entre l'angle d'incidence que doit faire un faisceau de haute énergie et pour que la longueur d'onde λ soit déviée de manière cohérente. Il est ainsi possible d'infléchir la trajectoire des rayons X, un peu comme le ferait une lentille pour le visible. Mais cette équation est très sélective et la réalisation technique d'un anneau capable de répondre aux exigences théoriques n'a pu être effectuée que dans la dernière décennie. Ainsi, dans le cas de XMM, 58 cylindres concentriques, polis à l'angström près, constituent chacun des trois télescopes. C'est à ce prix que l'on peut focaliser le signal reçu sur un petit détecteur et augmenter la sensibilité des télescopes d'un à deux ordres de grandeur.

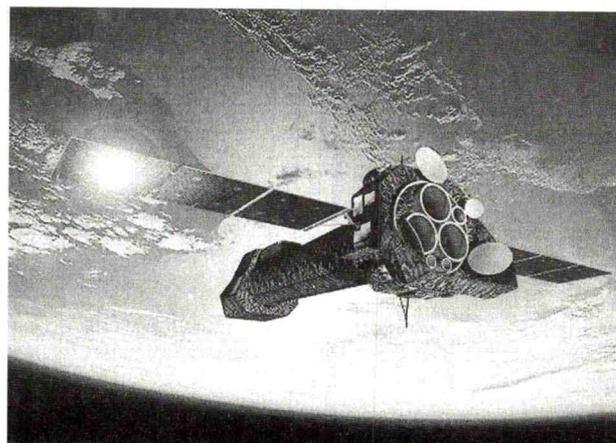


Fig. 10 : Vue d'artiste du satellite XMM en orbite autour de la Terre. Les trois ouvertures constituent l'entrée des trois télescopes.

Mais que verrions-nous avec des yeux regardant dans le X ? Pas grand chose, admettons-le, car il existe heureusement peu de sources de rayons X dans notre vie courante. Mais cela n'a pas toujours été le cas. Signalons que, dans les années 60, c'était le poste de télévision, mal blindé, qui émettait un peu de rayons X. Mais aujourd'hui, nous avons les

radiographies médicales qui comptent pour une part non négligeable dans la dose annuelle de rayonnements ionisants reçus. Cela dit, la majeure partie de la dose reçue est naturelle et provient du sol. Les habitants des régions granitiques sont ainsi plus exposés, en France, que les autres.

6 - Les rayons gamma.

Ce domaine d'énergie est réservé aux phénomènes les plus violents que l'Univers puisse produire. C'est dans cette gamme de longueur d'onde que nous allons voir les explosions nucléaires (novae et supernovae) et les objets exotiques, comme les sursauts gamma, tellement puissants, qu'un seul d'entre eux produit autant d'énergie que l'Univers entier durant une seconde ! Qui sont-ils ? Nul ne le sait. Découverts il y a près de 30 ans, on était sûr de peu de choses il y a encore quelques années. Leur répartition dans le ciel est uniforme, leur durée va de la fraction de seconde à quelques secondes, le spectre gamma présente diverses formes et surtout il n'y a jamais deux sursauts au même endroit. Deux théories s'affrontèrent donc pour expliquer cette répartition homogène :

- L'hypothèse d'objets proches, à l'intérieur de la galaxie. Elle a l'avantage de nécessiter peu d'énergie.
- L'hypothèse cosmologique, devant avancer des phénomènes comme la fusion de deux étoiles à neutrons en un trou noir pour expliquer la quantité phénoménale d'énergie nécessaire pour être si visible d'aussi loin.

En janvier 1999, le télescope spatial Hubble, grâce à une alerte donnée rapidement, pointe en direction d'un sursaut et en prend un spectre. Résultat : ce dernier comporte des raies d'absorption, dues à de la matière présente entre l'observateur et le sursaut, à $z = 1,6$! Cela porte les sursauts à plusieurs milliards de parsecs... rendant caduque la première hypothèse. Mais l'origine des sursauts et de la colossale énergie produite reste un mystère.

Les supernovae sont des objets extrêmement importants dans l'Univers car elles expulsent leur atmosphère riche en éléments lourds (numéro atomique supérieur à 4) et ensementent ainsi le milieu interstellaire de la galaxie hôte. C'est grâce à elles qu'existent tous les matériaux dont nous disposons sur Terre.

L'astronomie gamma constitue un outil formidable pour étudier ces objets et comprendre leur fonctionnement car les raies gamma observables sont les empreintes digitales des noyaux atomiques. De la même manière qu'un atome est reconnaissable aux raies UV et X de la couche électronique, les noyaux sont identifiables grâce aux raies gamma qu'ils émettent lorsqu'ils sont instables, c'est-à-dire radioactifs. Or, tous les noyaux instables ont une demi-vie, soit une durée au bout de laquelle la moitié des atomes se sont désintégrés (en émettant un photon gamma). Certaines demi-vies sont courtes (77 jours pour le ^{56}Ni), d'autres très longues (4.5 milliards d'années pour le ^{238}U). C'est pour l'astronomie gamma un avantage. Car détecter des noyaux radioactifs dont la

demi-vie est courte signifie qu'ils ont été synthétisés depuis peu dans la même zone. Cela permet d'estimer les quantités des divers éléments, leur rapport d'abondance et finalement contraindre fortement les modèles d'explosion.

Ainsi, la supernova SN 1987A, qui a eu lieu dans le nuage de Magellan, à seulement 170 000 années de lumière a permis d'invalider plusieurs de ces modèles. C'est aussi ces mêmes éléments radioactifs qui fournissent l'énergie à l'atmosphère éjectée, lui permettant ainsi de rayonner. La pente de la courbe de luminosité de la supernova en fonction du temps va donc dépendre de la demi-vie des éléments radioactifs et de leur quantité. Le principal apport d'énergie est fourni par le ^{56}Ni , puis la pente présente une cassure lorsque ce dernier a disparu pour moitié. C'est alors le ^{56}Co , de demi-vie plus longue qui prend le relais.

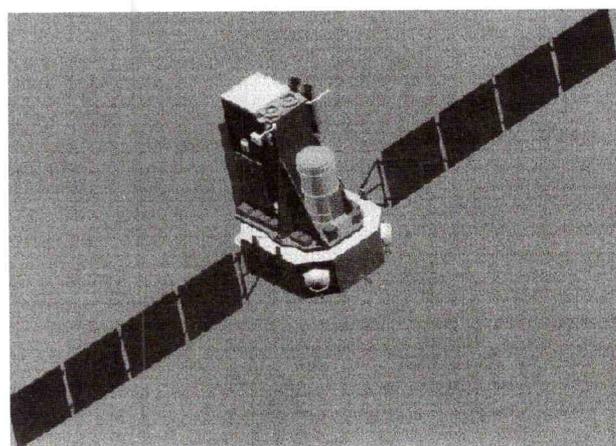


Fig 11 : Dessin du satellite INTEGRAL. Le cylindre en premier plan constitue le spectromètre SPI destiné à l'observation du ciel en gamma.

Le principal instrument d'observation dans ce domaine de longueur d'onde a été le satellite COMPTEL, embarquant à son bord quatre expériences différentes de manière à couvrir le plus large spectre possible. Après neuf années de fonctionnement, ce satellite a été volontairement détruit dans l'atmosphère terrestre avant qu'il ne devienne incontrôlable. Grâce aux centaines d'orbites réalisées, plusieurs cartes du ciel ont pu être réalisées (pour la répartition de ^{26}Al par exemple, figure 12), des milliers de sursauts gamma ont été répertoriés et il revient à CGRO la découverte des blazars.

La suite se nomme INTEGRAL (fig. 11), un observatoire européen disposant lui aussi de plusieurs instruments, permettant cette fois de couvrir des rayons X aux rayons gamma. Doté d'une meilleure sensibilité que CompTel, les limites de la zone observable devraient reculer, augmentant le nombre d'objets à étudier. A plus long terme, l'avenir se nomme CLAIRE. Car depuis peu, il est aussi possible de focaliser les photons gamma, grâce au même procédé que les rayons X. La difficulté provient de la finesse des réglages angulaires des cristaux. Un premier vol ballon a eu lieu en

juin 2000 pour vérifier le fonctionnement des équipements. Un second vol, prévu pour juin 2001, est nécessaire pour valider l'instrument. Si cela s'avère, plusieurs vols sont déjà prévus par les scientifiques pour élucider par exemple le mystère du grand annihilateur situé au centre de notre galaxie.



Fig. 12 : Répartition de ^{26}Al dans notre galaxie. C'est un élément radioactif de longue demi-vie (1 million d'années). Il a donc le temps de se disperser dans la galaxie et de se mélanger avec les restes d'explosions d'autres supernovae. Ses progéniteurs sont principalement les étoiles de type spectral O.

Conclusion

Notre voyage à travers les longueurs d'ondes est terminé. Retour dans le visible. Nous n'avons fait que survoler les différentes fenêtres, effleurer les techniques d'observation et les instruments qui existent. Mais on constate déjà qu'excepté le visible, l'exploration des domaines de longueur d'onde n'en est qu'à son début. Le fourmillement d'objets à étudier qui peuplent la voûte céleste va encore certainement nous surprendre et nous émerveiller. Mais nul besoin d'instruments gigantesques pour faire des découvertes sensationnelles. Car peut-être verrons-nous dans peu de temps une supernova exploser ? Alors à votre prochaine sortie nocturne, levez le nez, on ne sait jamais !

Notes

1 - Un atome est constitué d'un noyau (protons et neutrons) autour duquel des électrons forment un nuage électronique. Si l'un d'eux absorbe assez d'énergie, il peut s'éjecter de l'atome. Dans ces conditions, l'atome n'est plus neutre. L'opération inverse qui consiste à récupérer un ou plusieurs électrons s'appellent la recombinaison. L'électron doit alors libérer de l'énergie, sous forme d'un photon (UV ou X).

2 - Les quarks sont les plus petites briques actuellement connues et se classent en trois familles (électronique, muonique et tauique). Chacune est constituée de 4 membres :

2 quarks, 1 lepton et 1 neutrino. Cependant, la matière que nous connaissons et dont nous sommes fabriqués n'utilise qu'une seule famille (électronique) dans laquelle les quarks se nomment up et down. Ainsi, un proton est fabriqué à partir de deux quark up et un quark down. Ce sont les protons et les neutrons qui forment le noyau d'un atome. Enfin, l'électron et le neutrino électronique sont les autres particules élémentaires de cette famille.

3 - L'eV est l'unité d'énergie utilisée lorsque les quantités sont faibles. 1 eV correspond à l'énergie d'un électron sous une différence de potentiel de 1 volt. $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$. Dans le domaine des hautes énergies, les photons sont en général caractérisés par l'énergie qu'ils véhiculent et non par leur longueur d'onde. Il existe une relation de passage d'une unité à l'autre. L'énergie E (en joules) est donnée par :

$$E = h.c / \lambda = 1,988 \times 10^{-25} / \lambda.$$

où h désigne la constante de Planck, c la vitesse de la lumière et λ la longueur d'onde en mètres.

Note bibliographique :

Pour approfondir les thèmes abordés ici, je ne peux que conseiller ces deux excellents livres. Le premier est axé sur l'astrophysique et les connaissances actuelles. Idéal pour se rappeler des éléments essentiels (exercices à l'appui !) parfait pour rafraîchir ses connaissances en la matière. Le second illustre richement l'évolution du savoir en la matière au cours des âges. C'est un voyage dans le temps qui est proposé ! En vous souhaitant une bonne lecture !

Marc Seguin et Benoît Villeneuve, "Astronomie et Astrophysique", Ed. Masson, 1995.

J.P. Luminet et M. Lachièze-Rey, "Figures du ciel", Ed. Seuil/BNF, 1998.



Journées portes ouvertes à l'Observatoire de Bordeaux

L'Observatoire Astronomique de Bordeaux, laboratoire de recherche en Astrophysique, ouvre ses portes au public le **samedi 20 octobre 2001 de 9 h à 18 h**.

Tout au long de cette journée, le personnel de l'établissement (chercheurs, techniciens, ingénieurs) proposera des animations variées : conférences, visites d'instruments astronomiques, simulations informatiques, ateliers, posters thématiques...

Rendez-vous donc le 20 octobre à l'Observatoire de Bordeaux, 2 avenue de l'Observatoire, 33270 Floirac (rocade de Bordeaux sortie n° 23). Renseignements au 05 57 77 61 00 ou <http://www.observ.u-bordeaux.fr>

Entrée gratuite.



Notes sur le "commentariolus"

Pierre Lerich

Un mince manuscrit de six pages distribué à quelques amis : c'est le "Commentariolus" premier texte connu de Copernic, écrit peut-être vers 1512, peut-être vers 1535 (c'est l'opinion de Dreyer¹), des années en tout cas avant la parution en 1543 de l'oeuvre immortelle : "Des révolutions des orbes célestes".

Ces quelques pages contiennent toute l'astronomie future. Le passage choisi définit (sans aucune démonstration) les trois mouvements simultanés dont la Terre est animée.

1 - En même temps qu'il affirme sa thèse révolutionnaire (mouvement orbital de la Terre), Copernic maintient le dogme traditionnel du mouvement circulaire uniforme ("arcs égaux dans des temps égaux"). Depuis l'antiquité, les astronomes expliquent les avances et les retards du Soleil par rapport à son mouvement moyen par un décentrement du cercle parcouru : c'est le système de l'excentrique qui s'applique aussi bien avec la Terre au centre qu'avec le Soleil au centre, en donnant de bons résultats. La 25^e partie du rayon (la 24^e selon Ptolémée), correspond à 0,04, le rayon étant l'unité. Plus tard dans "Révolutions" ce nombre est ramené à 0,032 ; la meilleure approximation possible aurait été 0,034 : le double de l'excentricité de l'ellipse réelle : 0,017. En effet, la raison en est simplement que Copernic fait se déplacer la Terre à vitesse constante alors que pour Kepler la vitesse au périhélie est plus grande (deuxième loi de Kepler).

Mettre le Soleil au centre n'améliore pas les résultats numériques, qui étaient déjà satisfaisants au moins pour la Terre et le Soleil, mais c'est un progrès qualitatif considérable.

2 - Sous la coupole du planétarium, il est très facile de savoir si on est au centre ou quelque part sur un rayon. Par exemple, si on n'est pas au centre, les deux étoiles des Gémeaux, Castor et Pollux, vont se rapprocher ou s'écarter l'une de l'autre suivant la rotation diurne des constellations autour de la coupole.

Mais si on agrandit le planétarium jusqu'aux dimensions de l'Univers cet effet disparaît, on ne peut plus se situer et toute la difficulté de l'astronomie vient de là, comme Ptolémée l'avait déjà bien compris. A cause de la petite dimension de l'orbe terrestre (ou solaire), on ne peut donc pas savoir lequel des deux est au centre.

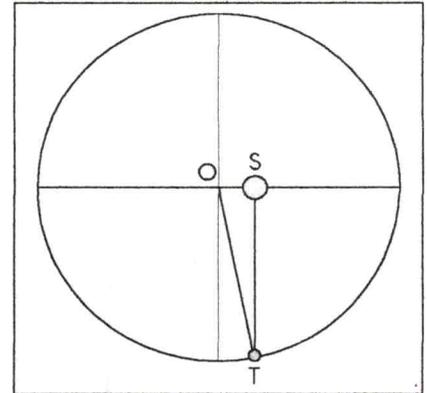
Le Capricorne et le Cancer sont des signes conventionnels (degrés 270 à 300, 90 à 120, du zodiaque). Quand Copernic veut parler de la constellation et non du signe, il précise : par exemple, quelques lignes plus bas, "la tête des Gémeaux". En pratique, on ne peut pas confondre 5° du Taureau (i.e. 35° de longitude céleste) et "l'Oeil du taureau" (i.e. l'étoile Aldébaran). Newton procédait encore ainsi et c'est Laplace qui a mis fin à cet usage archaïque.

Copernic. Commentariolus Des mouvements apparents relatifs au soleil

1 - La terre est mue circulairement d'un triple mouvement. Par le premier, elle tourne en un an, suivant l'ordre des signes, sur un grand orbe autour du soleil, décrivant toujours des arcs égaux dans des temps égaux : le centre de cet orbe est éloigné du centre du soleil d'une distance égale à la 25^e partie du rayon de l'orbe. **2** - Donc, puisque l'on admet que le rayon de cet orbe a une longueur insensible comparée à la hauteur de la sphère des étoiles, il s'ensuit que le soleil semble mû circulairement par ce mouvement, comme si la terre était placée au centre du monde, alors que pourtant ce phénomène résulte non pas du mouvement du soleil mais plutôt du mouvement de la terre, si bien que, par exemple, lorsque celle-ci est dans le Capricorne, le soleil est vu diamétralement opposé dans le Cancer, et ainsi de suite. **3** - Le soleil semblera aussi se mouvoir non uniformément avec ce mouvement, du fait de la distance qui le sépare du centre de l'orbe, comme on l'a déjà dit, d'où il résulte une équation maximale de $2 \frac{1}{6}^\circ$. **4** - D'autre part, le soleil s'écarte du centre du grand orbe en direction d'un point de la sphère des étoiles invariablement distant de 10° environ, à l'ouest, de la plus lumineuse des deux étoiles étincelantes de la tête des Gémeaux. Le soleil est donc vu à sa plus grande distance de la terre lorsque celle-ci se trouve au lieu opposé à ce point [de la sphère des étoiles], et que le centre de l'orbe est entre le soleil et la terre. **5** - Et par cet orbe, en vérité, ce n'est pas seulement la terre, mais en même temps tout ce qui est inclus dans l'orbe lunaire, qui est mû circulairement. **6** - Le deuxième mouvement de la terre est le mouvement de révolution diurne qui appartient tout à fait en propre à la terre et qui s'effectue autour de ses pôles selon l'ordre des signes, c'est-à-dire vers l'est : par ce mouvement le monde entier semble emporté dans un tourbillon impétueux. Ainsi donc la terre tourne avec, autour d'elle, l'eau et l'air tout proche. **7** - Le troisième mouvement est le mouvement en déclinaison. En effet, l'axe de la révolution diurne n'est pas parallèle à l'axe du grand orbe, mais il est incliné sur lui d'environ $23 \frac{1}{2}^\circ$ à notre époque. Par suite, tandis que le centre de la terre demeure toujours dans le plan de l'écliptique, c'est-à-dire sur la circonférence d'un cercle du grand orbe, ses pôles exécutent un mouvement de rotation, décrivant l'un et l'autre des petits cercles autour de centres [situés sur une ligne se déplaçant] parallèlement à l'axe du grand orbe. Et ce mouvement a une période de révolution d'un an à peu près, presque égale à celle du grand orbe. De fait, l'axe du grand orbe conserve par rapport à la sphère des étoiles une orientation invariable, en direction des points appelés pôles de l'écliptique. De même, le mouvement en déclinaison, combiné avec le mouvement de l'orbe, maintiendrait les pôles de la révolution diurne toujours dirigés vers les mêmes points du ciel, si ces mouvements avaient des périodes de révolutions exactement égales. **8** - Mais, en réalité, il a été montré, sur un long intervalle de temps, que la position [de l'axe] de la terre change par rapport aux configurations des étoiles fixes, et, pour cette raison, il a semblé à la plupart des astronomes que la sphère des étoiles elle-même est mue de quelques mouvements, dont la loi n'était pas encore bien comprise. Mais il est moins étonnant de faire résulter tous ces phénomènes du mouvement de la terre. **9** - A quoi sont rattachés les pôles, il ne m'appartient pas de le dire. Je vois bien, dans des matières plus communes, qu'une aiguille de fer frottée à un aimant tend toujours à s'orienter vers une même région du monde. Pourtant, il m'a semblé préférable de penser que ce mouvement de la terre est produit par quelque orbe, dont le mouvement entraîne les pôles eux-mêmes, et qui devra sans nul doute se trouver sous l'orbe de la lune.

Extrait de Textes Essentiels. Astronomie et astrophysique. JP Verdet.
Larousse, (p 193-194).

3 - L'équation maximale est l'écart angulaire maximal du Soleil vrai par rapport au Soleil moyen. La valeur $2^\circ \frac{1}{6}$, trop grande, est corrigée dans "Révolutions" qui propose, à la suite de plusieurs auteurs, diverses valeurs proches de la valeur correcte : $1^\circ 55'$.



L'équation est maximale quand la Terre est en T. On a alors :
 $\sin OTS = OS / OT = 1 / 25$
 D'où $OST \sim 2,3^\circ$.

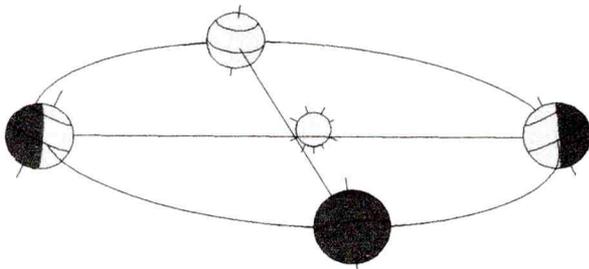
4 - La longitude du périhélie de la Terre est actuellement de 103° . La longitude écliptique de Pollux (β Gémeaux) est de 113° . Donc le périhélie est bien à 10° environ à l'ouest de Pollux. C'est avantageux de rapporter la longitude du périhélie (ou un autre angle) à une étoile fixe et non au point vernal car la valeur donnée échappe à la précession des équinoxes et reste valable beaucoup plus longtemps (mais pas éternellement).

5 - La Terre emporte dans sa révolution annuelle l'air, l'eau, les nuages, les oiseaux, les cailloux lancés en l'air ou lâchés du haut d'une tour etc... C'est la réponse à une objection archi-classique, remontant à Aristote et à Ptolémée. Il faut admettre cela pour entrer dans la "nouvelle astronomie".

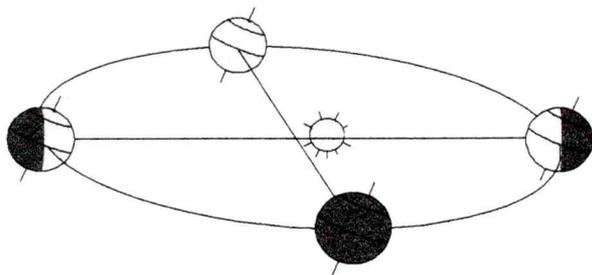
6 - La remarque précédente s'applique aussi au mouvement diurne. Avec une valeur acceptable du rayon terrestre, connue depuis l'Antiquité, il était facile de calculer la vitesse linéaire du déplacement d'un point de la Terre due au mouvement diurne : c'était la vitesse d'un boulet de canon, d'où l'idée d'un vent épouvantable, sauf si la Terre entraîne la couche d'air qui l'entoure.

7 - En "inventant" ce troisième mouvement, le but de Copernic est de maintenir l'axe de la Terre dans une direction à peu près constante. Pour Jacques Gapaillard², la raison de ce mouvement supplémentaire réside dans la croyance de Copernic en la matérialité des orbes célestes. Quand on essaie de construire un système solaire mécanique, on fixe la Terre sur un bras Soleil-Terre et il faut faire tourner l'axe de la Terre par rapport à ce bras pour qu'il garde une direction fixe dans l'espace. Ce n'est qu'une question de référentiel : ce troisième mouvement est mesuré par rapport à l'axe Soleil Terre et non par rapport aux étoiles.

Pour que l'étoile polaire reste bien au-dessus du pôle nord terrestre pendant que la Terre effectue sa révolution annuelle, il faut, selon Copernic, que l'axe de la Terre tourne en sens inverse de la révolution annuelle et de la même quantité. Par exemple, si la Terre en un mois a parcouru 30° de son orbite, il faut que le pôle nord ait tourné de 30° en sens inverse pour rester aligné sur la polaire. D'où ces deux "petits cercles" des pôles terrestres nord et sud autour de points situés eux-mêmes sur des cercles parallèles au "grand orbe". ce sont donc des épicycles et ce mouvement est expliqué de la même façon que celui des planètes, avec des combinaisons de cercles et d'épicycles. L'idée d'un axe de rotation restant parallèle à lui-même a paru inacceptable à Copernic parce que trop différent de tous les autres mouvements du système. C'est l'explication donnée par Dreyer.



Sans ce troisième mouvement pour Copernic, l'axe de la Terre serait lié au rayon Soleil Terre et la déclinaison du Soleil serait constante.



Si, avec ce troisième mouvement, on fait tourner l'axe de la Terre par rapport au rayon Soleil Terre avec une période d'un an, on retrouve un axe fixe par rapport aux étoiles.

C'est ce mouvement qui est la cause de la variation de la déclinaison du Soleil. Sans ce troisième mouvement, la déclinaison du Soleil serait fixe et il n'y aurait pas de saisons.

8 - Copernic constate l'invariance de deux pôles : le pôle de l'écliptique (le "grand orbe") et le pôle de l'équateur céleste (le mouvement diurne), non loin de l'étoile polaire. A l'échelle des siècles, le pôle de l'équateur, qui passe actuellement près de l'étoile polaire, décrit un grand cercle dans le ciel en 26000 ans, ce que Copernic explique par une petite différence entre la période du "grand orbe" et celle du petit cercle, un léger retard chaque année qui finit par s'accumuler. Donc, c'est bien la Terre qui est responsable de la précession des équinoxes.

Les deux premiers mouvements (diurne et annuel) sont bien argumentés dans "Révolutions". L'inutilité du mouvement en déclinaison apparaîtra par la suite avec la disparition des orbes matériels (Galilée). L'explication de la précession devra attendre Newton, un siècle et demi plus tard.

9 - La ligne des pôles terrestres est peut-être attirée par quelque chose, comme l'aiguille de la boussole. On voit qu'il manque à Copernic l'idée d'inertie, et qu'il aurait été bien étonné s'il avait pu voir fonctionner un gyroscope. Ne pouvant dire par quoi les pôles peuvent être attirés, Copernic préfère penser qu'ils sont attachés eux aussi à un "orbe", certainement très proche, quelque part entre la Terre et la Lune. Un orbe n'étant pas une trajectoire abstraite mais plutôt un espace entre deux enveloppes sphériques concentriques, où circule un fluide qui "propulse" les planètes, deux orbes ne peuvent pas empiéter l'un sur l'autre. Donc l'orbe des pôles, s'il existe, doit être sous l'orbe de la Lune.

Dans ce texte fondateur, on voit l'astronomie nouvelle se dégager avec peine de l'ancienne. Il manque des mots et des notions qui permettraient de fonder un édifice entièrement neuf. On pourrait même dire qu'il y a une louche de nouveauté dans un tonneau de tradition. Mais c'était suffisant pour causer beaucoup de scandale. Après un demi-siècle de rejet presque unanime (Copernic l'avait prévu) le nouveau système finit par séduire quelques esprits aventureux, de nouvelles preuves s'accumulèrent et le conflit avec l'Eglise devint inévitable.

Bibliographie :

- 1 - J.L.E Dreyer : "A history of astronomy from Thales to Kepler" ; éd. Dover, 1953
- 2 - Jacques Gapaillard : "et pourtant elle tourne !" ; éd. Seuil 1993.

Note de la rédaction :

Merci à Pierre Causeret pour ses illustrations et sa participation.



L'astronomie, de la préhistoire à nos jours Le calendrier, maître du temps Le procès des étoiles La carte du ciel

LECTURES POUR LA MARQUISE

L'ASTRONOMIE de la Préhistoire à nos jours.

Christian Nitschelm,
éd. Burillier, Vannes 2000,
255 p., 169 F.

Cette histoire de l'astronomie est issue d'un cours d'astronomie donné comme option en Deug A2, à la faculté des Sciences de l'Université de Dijon.

Ecrire une histoire de toute l'astronomie en 250 pages est un pari fort difficile et l'auteur a dû choisir et faire preuve de concision.

Cet ouvrage est une bonne introduction à l'histoire de l'astronomie et il a le grand mérite de consacrer une centaine de pages au XX^e siècle. Il existe en effet bon nombre d'ouvrages très approfondis sur l'histoire de l'astronomie jusqu'au XIX^e siècle mais, à ma connaissance, il n'y a, en langue française tout au moins, que des études partielles sur l'astronomie du XX^e siècle.

L'auteur montre bien que le XX^e siècle voit l'essor de l'astrophysique, née à la fin du XIX^e siècle et la naissance de la cosmologie moderne, et que les progrès de l'astrophysique sont fortement corrélés aux progrès de l'instrumentation.

La présentation est assez austère et les illustrations en noir et blanc. Une bibliographie importante va permettre d'approfondir les sujets préférés. Enfin un index des noms propres est un outil fort précieux pour connaître rapidement le rôle joué par telle personne dans le développement de l'astronomie.

Christian Nitschelm présente un catalogue chronologique des découvertes théoriques, observationnelles et instrumentales qui jalonnent l'histoire de l'astronomie.

Il s'agit d'une histoire linéaire et un peu

lisse : l'auteur s'intéresse assez peu aux difficultés, aux erreurs et aux controverses même s'il signale des hypothèses et théories qui ont été abandonnées. Il ne s'inscrit donc pas dans la mouvance des historiens des Sciences actuels.

Il n'en demeure pas moins que ce livre est une mine de renseignements utiles et a tout à fait sa place dans une bibliothèque universitaire ou dans un CDI de lycée ou d'IUFM.

Martine Bobin

Le calendrier, maître du temps ?

Jacqueline de Bourgoing,
Découvertes Gallimard n° 400, 144p.

La belle collection "Découvertes Gallimard", propose ici un excellent ouvrage d'initiation à la problématique du calendrier. L'auteur est agrégée de géographie et maître de conférences à l'Institut d'études politiques de Paris. Tout en mettant en place de manière simple les aspects scientifiques et techniques, Jacqueline de Bourgoing développe surtout l'histoire politique du calendrier et montre quelle importance il revêt dans l'identité des peuples. De très nombreux documents iconographiques éclairent et enrichissent cet exposé.

Dans le premier chapitre ("une très ancienne gageure") l'auteur met en place tous les éléments et les difficultés liés à la fabrication d'un calendrier. Elle explique clairement l'incommensurabilité entre l'année tropique, la lunaison et la durée du jour et donne des exemples de calendriers lunaires et solaires. Elle explicite la place particulière de la semaine et évoque la datation du temps dans la longue durée (cycles et ères).

Dans le deuxième chapitre ("le calendrier julien, de César à l'Eglise") elle explique comment on passe du calendrier lunisolaire de la république romaine à la réforme de César puis à l'appropriation du calendrier julien par l'Eglise, à partir du IV^e siècle. Le calendrier liturgique impose une façon de penser à l'ensemble de la société et structure la vie économique (interdiction de travailler les dimanches et les jours fériés). C'est l'Eglise qui maîtrise la mesure du temps, c'est elle qui calcule la date de Pâques et des cérémonies qui en découlent. L'apparition de l'ère chrétienne (datation à partir de la naissance du Christ mise au point par Denys le Petit), modifie la perception du temps : de cyclique le temps devient linéaire ce qui permet de distinguer passé, présent et futur.

Dans le Chapitre III ("un instrument de mesure"), Jacqueline de Bourgoing montre comment, à partir du XVI^e siècle, le calendrier civil commence à s'affranchir du calendrier religieux et qu'avec la réforme grégorienne l'Eglise réaffirme sa domination sur le temps. Jusqu'au début du XVIII^e les protestants "préfèrent être en désaccord avec le ciel plutôt qu'en accord avec le pape" (Kepler) et restent fidèles au calendrier julien. Les états orthodoxes ne se rallieront à ce calendrier qu'au début du XX^e. Le calendrier républicain est décrit ici.

Dans le dernier chapitre ("vers un calendrier universel ?") l'auteur explique les échecs des tentatives de remplacement du calendrier grégorien qui s'impose comme référence mondiale. Elle décrit l'éloignement de plus en plus grand du temps d'avec le temps naturel. Enfin elle montre que les particularismes calendaires coexistent avec le calendrier grégorien et sont un puissant marqueur de l'identité de chaque peuple.

Pour terminer l'auteur a sélectionné un ensemble de textes vivants, originaux et plaisants.

Certains témoignent des calendriers vécus dans lesquels chacun trouve ses propres repères. D'autres présentent des essais de redécoupage du temps (calendrier républicain, calendrier

d'Auguste Comte ou calendrier soviétique).

D'autres savoureux et satiriques prennent les almanachs pour cible tandis que les derniers dénoncent le rôle à la fois arbitraire et démesuré des siècles et des millénaires.

Martine Bobin

Le procès des étoiles

Florence Trystram,
éd. Seghers

Un livre passionnant...

Dans ma jeunesse je pratiquais la photométrie et j'utilisais la "loi de Bouguer" pour corriger les magnitudes de l'extinction atmosphérique (l'extinction, en magnitude, varie comme l'inverse du cosinus de la distance zénithale). J'ignorais tout de l'astronome Bouguer. Or, en fouinant chez un bouquiniste j'ai trouvé par hasard un livre qui parlait de Pierre Bouguer. J'ai découvert que cet homme avait participé à une expédition extraordinaire. Quand je dis "extraordinaire", c'est peu dire. Je devrais dire "une aventure grandiose", digne d'un film, dans les terres lointaines et dangereuses d'Amérique du sud, au 18^e siècle.

L'expédition était conduite par quatre savants, membres de l'Académie des sciences : Godin, Bouguer, Jussieu et La Condamine. Le but était de mesurer la longueur d'un arc de méridien, à l'équateur, pour en déduire la forme de la Terre (une expédition similaire fournissant la longueur d'un arc de méridien de l'hémisphère nord).

Nos savants et leur équipe vont connaître toutes les épreuves qui agitent habituellement les romans d'aventure : les querelles internes, les difficultés climatiques, les maladies, le manque de ressource financière (l'Académie des Sciences ayant décidé de couper les crédits), les problèmes sentimentaux, administratifs, politiques. Certains mourront, victimes d'accidents, d'assassinat, d'autres seront atteints de folie. Pour revenir en France certains devront descendre l'Amazone dans des pirogues. Aucun

secours de France n'était à espérer (un échange de lettre pouvait prendre deux années). Les notes précieuses du naturaliste Jussieu seront perdues. Mais, heureusement, Bouguer, avec une conscience professionnelle qui force l'admiration, réussira à mener à terme les calculs compliqués de triangulation. Il ramènera à l'Académie des Sciences, après environ dix ans d'expédition, la longueur d'un degré de latitude à l'équateur, soit 110598 mètres. La longueur vérifiée en 1924 fut trouvée égale à 110576 mètres.

Cette aventure m'a touché à plus d'un titre. Elle m'a rempli d'admiration pour nos glorieux prédécesseurs mais elle m'a aussi montré que l'histoire est une perpétuelle répétition. En effet, une aventure similaire est en train de se dérouler. Un relevé complet du ciel austral (un "survey", comme on dit dans le jargon astronomique) s'achève au Chili après une dizaine d'années de travail. C'est le survey infrarouge DENIS. Bien sûr les conditions ont changé. Il ne faut plus un an pour être à pied d'œuvre, 24 heures suffisent. Mais le parallèle est saisissant. On retrouve les mêmes ingrédients : difficultés techniques, financières, personnelles. Et pour corriger de l'extinction atmosphérique, les astronomes utilisent... la loi de Bouguer. (révérence pleine d'admiration).

Le livre est toujours disponible. Je vous le recommande.

Georges Paturel

La carte du ciel

Iliana Chinici, publication de l'Observatoire de Paris et l'Osservatorio Astronomico di Palermo.
1999 ; 475 p. ; 150 F

Cet ouvrage, illustré de 80 planches photographiques, rassemble toute la correspondance inédite et apporte une documentation fondamentale sur l'une des premières entreprises internationales de grand envergure, puisqu'elle concerne, autour de 1999, près de 20 observatoires répartis dans le monde entier.

Lucienne Gouguenheim ■

Documents pour les fiches CLEA BELIN

DCB : 20 exemplaires (70 F- 65 F)

Transparents animés pour rétroprojecteurs

(55F-50F)

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 (75 F- 65F)

CD Rom CLEA 2000

Sciences physiques en seconde
Programme 2000 (50 F)

DIAPPOSITIVES

Chaque série de 20 vues avec son livret
de commentaires (65F-55F)

- 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 35F-30F)
- D7** Taches solaires et rotation du Soleil
- D8** Comètes

Publications du CLEA

Pour chaque publication, le deuxième prix
est le tarif réduit pour les abonnés
Les prix indiqués le sont port compris



Chèques à l'ordre du CLEA

Les fiches d'activités pédagogiques du CLEA

- HS1** L'astronomie à l'école élémentaire
- HS2** La Lune niveau collège
- HS3** Le temps, les constellations, niveau lycée
- HS4** Astronomie en quatrième
(chaque HS 68F-48F)
- HS5** Gravitation et lumière, niveau terminale
(83F-63F)
- HS6** L'âge de la Nébuleuse du Crabe, niveau lycée,
avec 4 diapositives et 12 jeux de
2 photographies (110F-100F)
- HS7** Etude du spectre du Soleil
(58F-50F)
- HS8** Etoiles variables
(80F-70F)

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 (63F)

P2

Processus de rayonnement (30F)

P3

Structure interne
et évolution des étoiles (35F)

P4

Astrophysique solaire (35 F)

CONDITIONS D'ADHESION ET D'ABONNEMENT POUR 2001

Cotisation simple au CLEA pour 2001	50 F
Abonnement simple aux CAHIERS CLAIRAUT n° 93 à 96	140 F
Abonnement aux CAHIERS CLAIRAUT ET cotisation au CLEA pour 2001	190 F
Contribution de soutien au CLEA (par an)	50 F
Le numéro des Cahiers Clairaut	45 F

Possibilité de cotiser ou de s'abonner pour deux ans en doublant les tarifs précédents

COLLECTIONS DES **CAHIERS CLAIRAUT** des années antérieures :

90F par an jusqu'en 1997
110F par an à partir de 1998

Adresser adhésions,
abonnements ou commandes à

Chèque à l'ordre du CLEA

CLEA **Annie Mercier**
Laboratoire d'astronomie, bât 470
Université de Paris Sud
91405 ORSAY Cedex
adresse électronique : annie.mercier@df.cso.u-psud.fr

Publications

FASCICULES POUR LA FORMATION DES MAITRES EN ASTRONOMIE

1 - L'observation des astres, le repérage dans l'espace et le temps	43 F
2 - Le mouvement des astres	53 F
3 - La lumière messagère des astres	58 F
4 - Naissance, vie et mort des étoiles	63 F
6 - Univers extragalactique et cosmologie	58 F
7 - Une étape de la physique, la Relativité restreinte	108 F
8 - Moments et problèmes dans l'histoire de l'astronomie	68 F
9 - Le système solaire	88 F
10 - La Lune	63 F
11 - La Terre et le Soleil	78 F
12 - Simulation et astronomie sur ordinateur	48 F

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 (75 F)
 Commande à adresser au service librairie du Planétarium de Strasbourg

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

dépôt légal : 1^{er} trimestre 1979
 numéro d'inscription CPPAP : 61660
 prix au numéro : 45F