

bulletin du comité de liaison enseignants et astronomes

Les Cahiers Clairaut

Lect
pour
et se
his
Re
d'o
Ar
fo
Réfle
deb
Info
élève
Vie
Tex
exerc
Articles
Les potins de la Voie lactée



numéro 97 - PRINTEMPS 2002

ISSN 0758-234X

Comité de liaison enseignants astronomes

Le CLEA

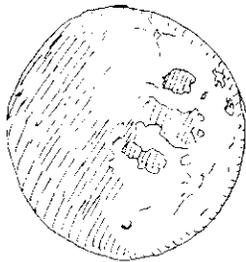
Le CLEA, Comité de Liaison Enseignants et Astronomes, est une association déclarée (loi de 1901). Elle réunit des enseignants et des astronomes professionnels qui veulent ensemble promouvoir l'enseignement de l'astronomie à tous les niveaux de l'enseignement et dans les organismes de culture populaire.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

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

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

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

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



Pour toute information s'adresser au siège du CLEA
Laboratoire d'Astronomie, bât. 470
Université Paris Sud 91405 Orsay cedex
Tel / Fax : 01 69 15 63 80
Adresse électronique : clea.astro@astro.u-psud.fr
Le CLEA est présent sur internet à l'adresse :
<http://www.ac-nice.fr/clea>

Bureau du CLEA pour 2002

Présidents d'honneurs

Jean-Claude Pecker et Evry Schatzman

Présidente

Lucienne Gouguenheim

Vice-Présidents

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

Rédactrice en chef

Martine Bobin

Rédacteur associé

Frédéric Dahringer

Trésorière

Béatrice Sandré

Secrétaires

Martine Bobin et Catherine Vignon

Comité de rédaction des Cahiers Clairaut

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

EDITORIAL

Tout d'abord un grand merci à Jacky Dupré sans qui ce numéro n'aurait pas pu voir le jour, le "mac" du CLEA nous ayant causé quelques soucis.

Nous avons perdu une militante et une amie en la personne de Claude Gayet, décédée prématurément. Nous lui rendons hommage ici.

Vous constaterez que la rubrique "Vie associative", particulièrement développée cette fois-ci, témoigne de la vitalité du CLEA.

Elisabeth Vangioni-Flam, Michel Cassé et Jacques Paul nous font partager leur passion dans un très bel article sur l'astrophysique nucléaire. Quant à Georges Paturel, il s'attaque au mur de la recombinaison, permettant ainsi à tous d'avoir un résumé de la conférence présentée à Lyon, exposé très vivant, qui avait suscité beaucoup d'intérêt et de questions.

Francis Berthomieu, Marie-Agnès Lahellec et Jean-luc Fouquet alimentent la rubrique "Avec nos élèves" qui fait la spécificité de notre bulletin et qui est si utile à chacun de nous dans sa vie professionnelle.

Colette le Lay et Pierre Lerich continuent à nous proposer des articles d'histoire originaux.

Les lectures de Gilbert Walusinski les potins de Lucette Bottinelli et les remue-méninges de Pierre Causeret donnent la touche finale à ce numéro de printemps.

Daniel Bardin nous propose comme chaque année un nouveau dessin de couverture et, nouveauté, le commente avec des propositions de questions pour les élèves.

L'appel aux lecteurs du numéro 96, nous ayant permis de recevoir quelques critiques constructives et une proposition d'article, nous le renouvelons.

Bonne année 2002 et bonnes lectures à tous.

La Rédaction

Les Cahiers Clairaut

Printemps 2002 n° 97



Article de fond

Astrophysique nucléaire
p. 2

Le mur de la recombinaison
p. 11



Avec nos élèves

Pour un peu plus de science à l'école (niveau primaire)
p. 15

Magnitude et humilité (niveau lycée)
p. 18

Physique en seconde
p. 20



Histoire

Lectures du procès de Galilée
p. 23

Le sourire de Copernic
p. 25

Remue-méninges



La vitesse de l'ombre
p. 27

Lectures pour la Marquise



p. 29

Vie associative

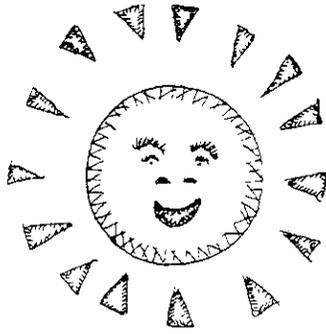


p. 31

Les potins de la Voie lactée



p. 39



Astrophysique nucléaire

Elisabeth Vangioni-Flam, Michel Cassé et
Jacques Paul, I.A.P.¹

ARTICLE DE FOND

Cet article nous fait prendre conscience de l'importance de l'astrophysique nucléaire dans la compréhension de notre Univers.

Il y est question de la nucléosynthèse stellaire, responsable de la majorité des espèces atomiques et de la nucléosynthèse spallative, à l'origine des noyaux de lithium, béryllium et bore.

Les auteurs développent l'astronomie gamma nucléaire et présentent la mission INTEGRAL-Curie.

Introduction.

L'existence des atomes, la spécificité de leurs noyaux ainsi que leurs sources sont désormais solidement établies. En effet, l'une des plus grandes découvertes du 20^e siècle est que les atomes qui constituent le support matériel de toute chose, y compris de nous-mêmes, sont essentiellement le fruit du labeur de générations et de générations d'étoiles.

La source de chaque espèce nucléaire est clairement identifiée : Les noyaux les plus simples, tels l'hydrogène (76% de la matière ordinaire) et l'hélium (24% en masse) ainsi qu'une pincée de lithium, ont émergé du Big-Bang voici quelque 15 milliards d'années et servent ensuite de combustible aux réacteurs nucléaires que sont les étoiles.

Les atomes de la vie tels, carbone, azote, oxygène, calcium et fer, sont le fruit des fusions thermonucléaires successives dans les creusets stellaires. Les éléments plus lourds, comme l'uranium et le plutonium sont produits au cours de l'explosion

des étoiles massives à travers des captures de neutrons par des noyaux complexes (essentiellement le fer). Une fois synthétisés et éjectés dans le milieu environnant, les noyaux s'entourent d'électrons pour devenir atomes, qui eux-mêmes se structurent en molécules.

De leur côté, le lithium (pour une partie), le béryllium et le bore, ont une origine non stellaire. Ils sont engendrés par un processus de brisure des noyaux d'azote, de carbone, d'oxygène, appelé "spallation".

Aujourd'hui, après quinze milliards d'années d'évolution, la matière ordinaire, sous forme d'atomes, est composée de 70% d'hydrogène, 28% d'hélium ; seuls 2% de la matière originelle ont été transformés en éléments plus complexes (fig. 1 ci-contre).

Ainsi, le moteur essentiel de la complexification de la matière, nécessaire à la vie, est nucléaire. La physique nucléaire est par conséquent l'une des clés de la compréhension du monde, de son origine et de son devenir. En effet, l'Univers est en

évolution dans toutes ses régions sous l'influence de processus qui impliquent en particulier les noyaux d'atomes.

Aujourd'hui, l'activité nucléaire de la Galaxie n'est pas éteinte ; les indices les plus probants en sont :

- i) la présence d'étoiles massives (de courte durée de vie), lieu privilégié de transmutation des éléments dans le disque de notre Galaxie,
- ii) l'émission gamma (fig.2 et encadré 1) en provenance des noyaux radioactifs fraîchement synthétisés dans les étoiles et expulsés dans le milieu environnant. C'est pourquoi, les indices observationnels de l'activité nucléaire présente du ciel sont à rechercher dans le domaine spécifique des rayons gamma. Le satellite européen INTEGRAL-Curie est destiné à ouvrir largement ce champ de connaissance (voir encadré 2). Il devrait notamment permettre d'accéder à la compréhension fine des événements cosmiques les plus énergétiques, telles les explosions d'étoiles.

Nécessité d'une source d'énergie nucléaire

Dès la fin du XIX^e siècle, l'étude de la radioactivité naturelle de la Terre a fourni des indices sur l'âge de notre planète. A partir de la désintégration de l'uranium en plomb, les géophysiciens calculèrent que la Terre avait quelques milliards d'années. Les physiciens du début du XX^e siècle, pensaient que le Soleil tirait son énergie d'une combustion chimique ou d'une lente contraction gravitationnelle, mais ces dernières se révélèrent incapables d'assurer la longévité requise.

La solution du problème résidait en fait dans un mécanisme d'une toute autre nature : la fusion nucléaire. Ce mécanisme mettait en jeu une échelle de temps de quelques milliards d'années compatible avec le calcul des géophysiciens alors que les processus chimique et gravitationnel invoqués se limitaient à quelques millions d'années.

La source d'énergie de type nucléaire qui sévit au sein des étoiles est considérablement plus puissante que celle qu'offre la chimie. Une réaction chimique fait intervenir les électrons

Logarithme des abondances dans le système solaire

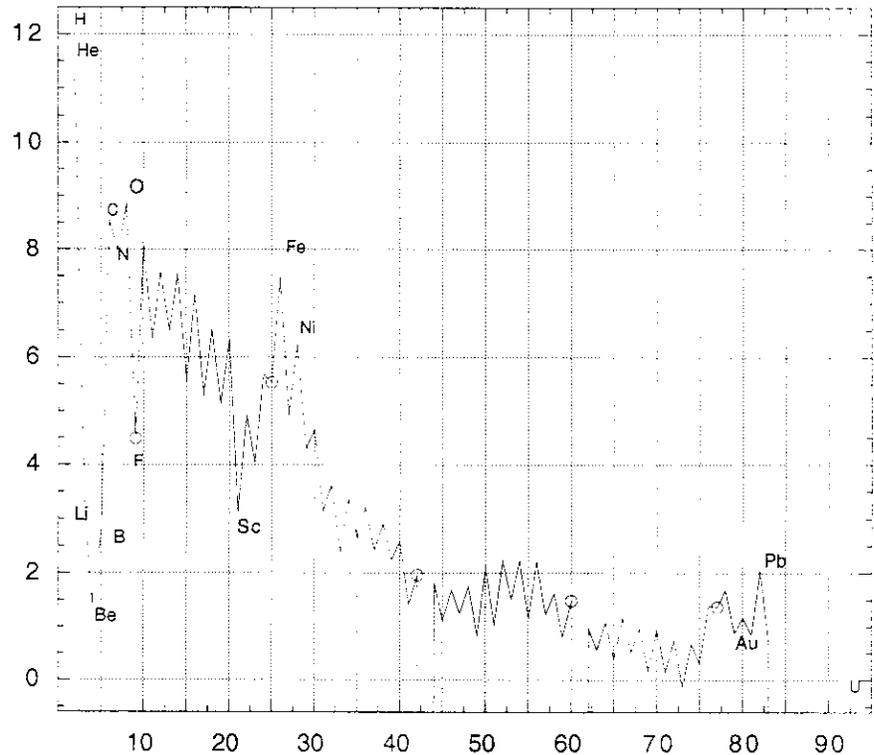


Fig.1. Répartition de l'abondance des éléments dans le Système Solaire. Ce diagramme porte pour chaque élément, en abscisse le numéro atomique et en ordonnée le logarithme de l'abondance, normalisé à 10^{12} atomes d'hydrogène. Les éléments légers, Lithium, Béryllium et Bore montrent une grande déficience qui s'explique par leur fragilité nucléaire. D'une façon générale, les noyaux les plus abondants sont aussi ceux qui ont un noyau solidement lié.

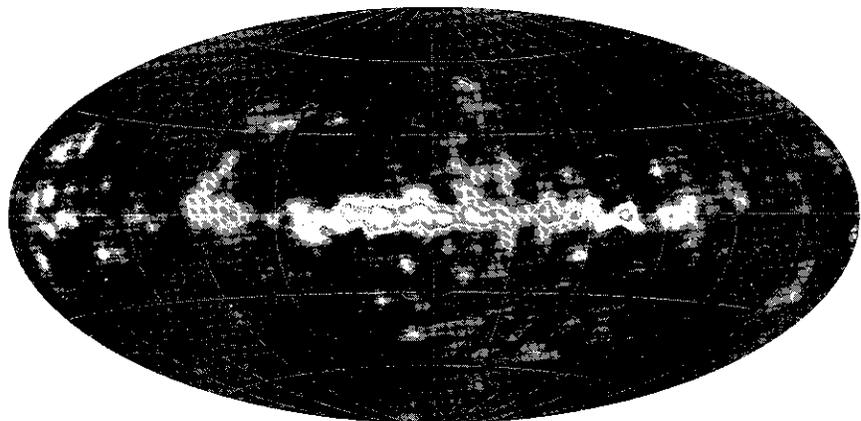


Fig. 2. Distribution le long de la Voie Lactée de l'émission gamma produite par désintégration de l'aluminium 26, bâtie à partir des données recueillies par l'expérience COMPTEL à bord du Compton Gamma-Ray Observatory dans une bande d'énergie de 200 keV centrée sur 1,8 MeV.

périphériques des atomes sous l'action de la force électromagnétique. Une réaction nucléaire implique le noyau de l'atome et ses constituants, les neutrons et les protons ; les modifications au sein du noyau s'effectuent par le truchement de l'interaction nucléaire forte.

L'interaction nucléaire faible vient parfaire la stabilité de la structure nucléaire nouvellement élaborée. La masse des produits de réaction est inférieure à celle des réactifs : l'excès de masse est converti en énergie, selon la célèbre formule $E = mc^2$; c'est pour cela que les étoiles brillent.

Les réactions nucléaires produisent environ un million de fois plus d'énergie que les réactions chimiques. L'unité d'énergie nucléaire est le méga-électron-volt (MeV).

Une étoile comme le Soleil, âgée de 4,6 milliards d'années, qui brûle de l'hydrogène selon ce principe de fusion nucléaire, possède une réserve suffisante pour encore 5 milliards d'années, environ.

Les êtres vivants sont eux-mêmes constitués des cendres des combustions nucléaires. Tous les noyaux d'atomes fabriqués dans la nature correspondant à des éléments chimiques qui trouvent leur place dans la table périodique dite de Mendeleïev. La fusion nucléaire, de surcroît, approvisionnant les étoiles en énergie pendant des milliards d'années sans interruption, donne à la vie et à l'intelligence le temps de se développer.

Synthèses successives des noyaux d'atomes dans les étoiles.

Aux températures stellaires (quinze millions de kelvins au centre du Soleil par exemple), les atomes perdent leurs électrons. La vitesse thermique des protons permet de circonvenir leur répulsion coulombienne (électrique), si bien que le rapprochement de quelques-uns d'entre eux permet la manifestation des interactions nucléaires forte et faible, de très courte portée ; ainsi, la fusion opère pour donner des noyaux plus complexes.

Par une suite de réactions nucléaires opérant dans le cœur de l'étoile, quatre noyaux d'hydrogène fusionnent en un noyau d'hélium avec émission de deux positons et deux neutrons et de l'énergie sous forme de photons gamma. Ces derniers, tout en se propageant vers l'extérieur de l'étoile, interagissent continuellement avec les électrons du milieu et perdent ainsi de l'énergie, passant du statut de photons gamma à celui de photons X, UV, visible et infrarouge, au terme d'environ 300 000 années. Ce sont ces derniers rayonnements qui s'échappent de l'étoile et elle apparaît alors lumineuse dans ces gammes d'énergie. Après la longue étape de fusion de l'hydrogène, pendant laquelle l'hélium s'accumule dans le cœur, l'étoile change en ses tréfonds : son cœur se contracte et s'échauffe. La température et la densité augmentent jusqu'à ce que la pression thermique s'oppose à la contraction gravitationnelle. La région centrale devient de plus en plus dense et chaude. La fusion nucléaire de l'hélium s'amorce ainsi. La collision de deux noyaux d'hélium produit d'abord le béryllium 8, instable. Un autre noyau d'hélium peut entrer en collision avec cette cible de courte durée de vie : un noyau de carbone se forme. Cette collision fructueuse a une probabilité extrêmement faible de se produire. Cependant, une concordance subtile entre les énergies de l'hélium, du béryllium instable et du carbone ainsi produit, permet la création de ce dernier. Tandis que le cœur se contracte, les couches externes enflent, jusqu'à atteindre 50 fois le rayon initial, environ. Une étoile de la taille du Soleil se transforme alors en une géante rouge, plus froide dans sa périphérie, et plus lumineuse.

Au-delà de la fusion de l'hélium, les étoiles de type solaire mettent un terme à leur existence en laissant s'enlever leur enveloppe. Le phénomène, visible dans le ciel, porte le nom de nébuleuse planétaire ; cette appellation ancienne est un abus de langage pour la raison que les dites nébuleuses sont le fruit de l'évolution des étoiles et non des planètes. Le cœur dénudé apparaît alors sous la forme d'une naine blanche, petite étoile compacte et chau-

de. Les nébuleuses planétaires disséminent ainsi dans l'espace l'hélium, l'azote et le carbone produits dans le cœur des petites et moyennes étoiles.

Les étoiles plus massives que le Soleil (plus de dix fois la masse de notre astre) atteignent en leur centre des températures de plusieurs dizaines (voire plusieurs centaines) de millions de kelvins. Elles sont capables de déclencher des fusions nucléaires faisant intervenir des noyaux toujours plus lourds, tels le carbone, l'oxygène, le néon et le silicium. Dans ces objets rares mais efficaces, l'ensemble de l'œuvre nucléaire, fusion de l'hydrogène comprise, s'effectue en un temps très court (quelques millions d'années) comparé à celui du soleil (10 milliards d'années).

La fusion du silicium étant engagée, le fer s'accumule au cœur de l'étoile : c'est l'agonie car il est incombustible. En effet, c'est le noyau d'atome dont la cohésion est la plus grande. Sa fusion est endothermique. L'équilibre entre la pression thermique, entretenue par les réactions nucléaires et la gravitation est rompu. Dès lors, le cœur de l'étoile est tyrannisé par la gravitation ; il est condamné à s'effondrer pour devenir une étoile à neutrons : la matière est alors on ne peut plus compacte ; elle atteint la densité des noyaux d'atomes. Ce cœur poussé à ses extrêmes limites, subit une détente brutale, engendrant une onde de choc qui balaie l'étoile ; Les couches extérieures sont alors expulsées violemment : l'implosion se double d'une explosion, une supernova fleurit dans le ciel. Il ne s'agit pas d'une étoile de plus, mais d'une étoile de moins.

L'onde de choc engendrée par l'explosion rallume les réactions nucléaires dans les couches externes de l'étoile, les réactions produisent à nouveau le fer, ou plus exactement son père radioactif, le nickel-56. Les neutrons libérés, se greffant sur le fer préexistant, produisent toute la succession des noyaux lourds jusqu'à l'uranium. Ce stade est qualifié de nucléosynthèse explosive.

Pendant quelques semaines, la supernova brille comme des milliards de soleils. Ces explosions de supernovae sont les moteurs principaux de la

complexification nucléaire dans l'univers, car elles inséminent le cosmos de leurs noyaux fraîchement synthétisés. Ces noyaux sont donc éjectés dans le milieu interstellaire, milieu à partir duquel se formeront de nouvelles étoiles et planètes. C'est ainsi que les supernovae jouent un rôle crucial en particulier dans la formation et l'éjection des noyaux radioactifs qui peuvent justement être détectés par les instruments dévolus à l'astronomie gamma.

Spécificité des atomes lithium, béryllium, bore.

Comme on vient de le voir, la nucléosynthèse stellaire est responsable de la majorité des espèces nucléaires mais certaines d'entre elles - très rares - échappent à sa juridiction.

Le lithium, le béryllium et le bore, Li-Be-B, dont les noyaux sont plus légers que celui du carbone, sont très peu liés et ne résistent pas aux températures stellaires. La quantité de ces trois éléments est faible dans la nature en raison de la fragilité de leur structure nucléaire (figure 1). De fait, leur origine n'est pas la fusion thermonucléaire, mais au contraire la brisure (spallation) de noyaux plus lourds (C, N, O). La synthèse des noyaux lithium, béryllium et bore est imputée à l'interaction entre noyaux rapides et le milieu interstellaire, comme par exemple l'interaction du Rayonnement Cosmique Galactique, RCG (protons et noyaux d'hélium d'environ 1 GeV par nucléon, 1 milliard d'électron-volts par nucléon) avec le milieu interstellaire diffus. Il faut noter que le ${}^7\text{Li}$ est un noyau d'origine multiple ; outre cette formation spallative, il est aussi engendré au cours de la nucléosynthèse du Big-Bang (un noyau de ${}^7\text{Li}$ pour 10 milliards d'atomes d'hydrogène) et dans les phases avancées de la nucléosynthèse stellaire (un noyau de ${}^7\text{Li}$ pour un milliard de noyaux d'atomes d'hydrogène).

La physique qui nous intéresse ici est celle des accélérateurs d'ions. Elle implique un faisceau de noyaux rapides (injecté puis accéléré), une cible et une interaction entre les deux. Le résultat

de la collision du projectile et de la cible dépend :

- i) de la composition du faisceau de noyaux rapides,
- ii) de la probabilité d'occurrence des diverses réactions nucléaires, laquelle dépend de la vitesse relative des noyaux projectile et cible et donc du spectre d'énergie du faisceau,
- iii) de la composition de la cible.

Par opposition à la nucléosynthèse stellaire impliquant des basses énergies (1 keV-100 keV) et des hautes densités (10^2 - 10^9 g cm $^{-3}$), la nucléosynthèse spallative implique des hautes énergies (1 MeV-100 GeV) et des basses densités (1 - 10^3 atomes cm $^{-3}$).

Le Rayonnement Cosmique Galactique (RCG, seul échantillon de matière provenant de l'extérieur du système solaire, est composé de particules très rapides, essentiellement protons et particules alphas (α / p vaut environ 10%). Sa densité d'énergie (1 eV.cm $^{-3}$ environ), semblable à celle de la lumière des étoiles et du champ magnétique galactique en fait une composante importante pour la dynamique de la Voie Lactée.

Le spectre d'énergie du RCG se laisse décrire par une loi de puissance en énergie (flux proportionnel à $E^{-2.7}$ au-dessus de quelques GeV/nucléon). Au-dessous de 1 GeV/nucléon, les noyaux sont repoussés par le vent solaire et il est difficile de restituer le spectre en dehors de la cavité solaire.

Ce RCG, en percutant les noyaux de carbone, d'azote et d'oxygène du milieu interstellaire est à l'origine des noyaux légers, Li-Be-B, du disque galactique.

De façon symétrique, lorsque des noyaux de He, C et O sont éjectés à des énergies de 10 à 30 MeV / nucléon par des étoiles massives (étoiles Wolf-Rayet et / ou supernovae), leur fragmentation sur l'hydrogène et l'hélium circumstellaires peut produire ces mêmes éléments légers. A tout instant, le flux de He, C et O rapides est proportionnel au taux de supernovae, et, dans ce cas, les noyaux cibles sont H et He, hérités du Big Bang. Ce processus est responsable de la formation du

Lithium-Béryllium-Bore dans les premières étapes de l'évolution de la Galaxie lorsque le milieu interstellaire est encore pauvre en éléments C, N, O.

Astronomie gamma nucléaire.

L'astronomie gamma nucléaire se donne pour but l'étude détaillée de la production des noyaux atomiques par voie thermique (fusion thermonucléaire, capture radiative de neutrons, photodésintégration dans les étoiles, novæ et supernovae) et par voie non-thermique (spallation, fragmentation) dans les milieux interstellaire et circumstellaire. L'intensité et le profil des raies permettent d'identifier sans ambiguïté les isotopes émetteurs, d'estimer leur abondance et d'accéder à la connaissance des conditions physiques du milieu source (vitesses d'ensemble, potentiel gravitationnel, densité et température, géométrie du champ magnétique, spectre des particules énergétiques).

Les raies gamma sont le résultat de la désexcitation de niveaux nucléaires préalablement excités, lesquels sont peuplés, soit par la désintégration d'une espèce radioactive parente fraîchement synthétisée dans les étoiles et éjectée par leurs vents et / ou explosions, soit par collision noyau-noyau dans le milieu interstellaire.

La condition sine qua non pour que brillent les sources gamma nucléaires est que le rayonnement gamma ne soit point converti en quelque forme moins énergétique et donc que les noyaux émettent leurs photons dans des milieux de basse densité (enveloppes, débris d'étoiles ou milieu interstellaire). Cette condition est satisfaite par deux types de nucléides :

- a) les noyaux radioactifs de vie suffisamment longue pour être portés loin de leurs sources par les vents et explosions d'étoiles, ceci avant de se désintégrer (voie thermique).
- b) Les noyaux stables excités par collision nucléaire dans les milieux de basse densité (voie non thermique). Ce mode de production de raies gamma met en jeu des faisceaux de noyaux énergétiques naturels, analogues à ceux

que produisent par exemple les éruptions solaires.

Si le Soleil est opaque aux rayons gamma issus des réactions thermonucléaires centrales, il n'exerce aucune censure sur ceux qui sont produits par des phénomènes éruptifs dans son atmosphère ténue qui libère des particules de relativement haute énergie (au delà du MeV), lesquelles interagissent avec la matière environnante.

Les raies gamma résultent de collisions entre particules accélérées et noyaux au repos dans les couches externes du Soleil. Les protons et noyaux d'hélium rapides excitent les noyaux de C, O, Ne, Mg, ... Fe ; inversement ces mêmes espèces présentes dans la population des noyaux accélérés s'excitent en vol par collision avec les noyaux d'hydrogène (protons) et d'hélium au repos.

La désexcitation en vol produit des raies larges (par effet Doppler), la désintégration des espèces au repos produit des raies plus fines.

Les éruptions stellaires offrent l'archétype de l'excitation nucléaire et de l'émission gamma qui s'ensuit.

Au delà de l'exemple solaire, la spectroscopie nucléaire offre des perspectives prometteuses sur la compréhension des processus physiques de haute énergie dans le cosmos. Le satellite INTEGRAL-Curie (voir encadré 2) fleuron de l'astronomie spatiale européenne est dévolu à cette tâche et l'on espère recueillir une moisson de résultats à court terme.

Conclusion

L'astrophysique nucléaire est l'une des plus belles sciences qui soit, car elle jette une passerelle entre le microcosme subatomique et le macrocosme céleste et statue sur l'origine des éléments qui composent le réel immédiat, du plus simple, l'hydrogène jusqu'au plus complexe, l'uranium. Son ambition est encore plus vaste car son but est non seulement de déterminer l'origine mais aussi l'évolution des éléments chimiques dans le cosmos. Il a été montré au vingtième siècle que la complexification nucléaire est un phénomène universel qui concerne toutes les galaxies, la nôtre y compris.

De générations en générations d'étoiles, une galaxie ne cesse de s'enrichir en éléments chimiques complexes. Le recensement de ces derniers au moyen des plus grands instruments astronomiques est engagée, cela à différentes époques de l'évolution cosmique, de notre proche environnement jusqu'aux plus lointains nuages pré/proto galactiques. La détermination du rythme de transformation des atomes simples en atomes complexes mobilise tous les efforts, afin de retracer l'histoire chimique globale de l'univers.

En partant d'une substance simple (pour ne pas dire élémentaire), composée de photons, électrons, neutrinos, neutrons et protons, la nature construit tous les éléments de la table périodique et leur confère leurs propriétés chimiques distinctives, et à partir de celles-ci, elle forme les molécules simples comme l'eau (H₂O), le monoxyde de carbone (CO) et les molécules plus complexes à base de carbone, nécessaires à la vie sur Terre. L'ADN n'est, à tout prendre, qu'un arrangement particulièrement heureux d'électrons, de protons et de neutrons. En somme, la composition de la Terre et des hommes sur cette Terre est une conséquence naturelle de la production des éléments chimiques au sein des étoiles par le travail incessant des forces nucléaires ainsi que des vagues successives de formation et de disparition de générations entières d'étoiles dans les galaxies.

L'astrophysique nucléaire nous ouvre ainsi à l'histoire universelle de la matière. Ce champ de recherche s'enrichit au fil des découvertes. Aujourd'hui l'ère de l'astronomie gamma porte des promesses de moisson abondante. La détection de rayons gamma émanant de sources cosmiques, souvent violentes, au moyen du satellite INTEGRAL est désormais attendue avec fébrilité.

Note : Michel Cassé et Jacques Paul travaillent aussi au Service d'Astrophysique DSM/CEA, Orme des Merisiers, 91191 Gif-sur-Yvette.

Table 1. Origine des éléments chimiques

Processus	Site	produits
Nucléosynthèse primordiale	Big-Bang	H, ⁴ He traces de D, ³ He, ⁷ Li
fusion de l'hydrogène	Etoiles	⁴ He, N
fusion de l'hélium	Géantes Rouges	C
fusion de l'hélium fusion du carbone fusion de l'oxygène	Supergéantes	O, C, Ne, Na, Mg, Si
fusion du silicium	Supernovae	Fe, Co, Ni
capture lente de neutrons	Géantes rouges	Cu, Zn, Pb
capture rapide de neutrons	Supernovae	Au, Pt, U
spallation	Interaction de noyaux rapides avec le milieu interstellaire	Li, Be, B

La radioactivité de la Galaxie

Il existe plusieurs types de radioactivité. Celle qui nous concerne est liée au fait que certains noyaux éjectés par les astres et éparpillés dans le milieu interstellaire sont riches en protons, trop riches pour être stables. Ces noyaux ont tendance à transformer en leur sein un proton en neutron. Le noyau résultant est la plupart du temps dans un état excité et recouvre l'état fondamental en émettant un photon de haute énergie appelé photon gamma. Rappelons que les photons sont les particules associées au rayonnement électromagnétique. Il existe des photons de toute énergie, depuis les photons radio (les moins énergétiques) jusqu'aux photons gamma (les plus énergétiques) en passant par les photons infrarouge, visibles, ultra-violet et X. Chaque gamme d'énergie peut être observable par des instruments astronomiques appropriés et l'on peut alors mettre en évidence différentes facettes du cosmos tant au plan du contenu que des processus physiques mis en jeu. En particulier, l'astronomie gamma nous ouvre aux événements les plus violents qui se produisent dans l'Univers.

Comme on l'a déjà mentionné, une étoile massive connaît plusieurs stades d'évolution. L'une des premières phases correspond au stade Wolf-Rayet, du nom de leurs découvreurs, (W-R). Ces étoiles entretiennent un vent puissant chargé de noyaux radioactifs comme l'aluminium-26 produit par la réaction $^{25}\text{Mg} + p \rightarrow ^{26}\text{Al} + \gamma$ dans le cœur de l'étoile. Ce dernier est mis à nu par le vent qui emporte cet isotope au loin et le dépose dans le milieu interstellaire où il se désintègre (période de l'ordre de 1 million d'années) par radioactivité β^+ en magnésium-26 excité, lequel recouvre l'état fondamental en émettant un rayon gamma caractéristique (1,809 MeV). Les étoiles W-R sont présumées être en partie responsables de l'émission gamma de la Galaxie à cette énergie (fig. 2).

Les supernovae correspondent de leur côté à la phase ultime de l'évolution de deux catégories d'étoiles. Leur luminosité augmente très rapidement lors de l'explosion.

Les supernovae dites de type Ia mettent en jeu des étoiles de petite masse en système double tandis que les supernovae dites de type II incriminent des étoiles massives. Dans les deux cas, cette explosion se solde par l'éjection de noyaux radioactifs.

Comment différencier les supernovae de type Ia et les supernovae de type II ? Si le spectre d'une supernova arbore les raies de l'hydrogène, elle est classée II, dans le cas contraire elle appartient au type Ia. Mais cette classification spectroscopique se voit avantageusement remplacée par une classification physique. Il est, en effet, préférable de distinguer les explosions d'après le mécanisme qui les provoque, thermonucléaire (Types Ia) ou gravitationnel (Type II).

Dans les couples serrés d'étoiles dont l'un des membres est une naine blanche (étoile compacte dont la masse est inférieure à 1,4 fois la masse du soleil - M_{\odot}) la substance aspirée par la naine blanche l'alourdit et l'entraîne à dépasser une certaine masse critique dite de Chandrasekhar. L'étoile entière est détruite dans une gigantesque explosion nucléaire. Une bonne moitié est incinérée et transformée en ^{56}Ni radioactif, lequel se désintègre successivement en ^{56}Co et ^{56}Fe (environ 0,6 masse solaire de fer), avec émission concomitante de rayons gamma.

Les SNII (gravitationnelles) sont imputées à l'implosion soudaine du cœur des supergéantes (étoiles de masse supérieure à $8 M_{\odot}$). Une étoile à neutrons se forme au centre alors que l'enveloppe de la supergéante est éjectée à une vitesse de 10^4 km par seconde environ. L'énergie cinétique de la matière expulsée (10^{51} erg ; un erg correspond à une énergie de 10^{-7} Joule) est une faible fraction de celle qui est libérée sous forme de neutrinos (10^{53} erg).

Si l'on se rapporte précisément à la théorie de la nucléosynthèse explosive, les isotopes du pic du fer ne sont pas produits en tant que tels, mais sous la forme de leur générateur radioactif riche en protons. Par exemple, le fer synthétisé de manière explosive sous la forme de Nickel-56, est éjecté dans l'espace. En l'occurrence, six mois après l'explosion de la supernova SN1987A (voir encadré 3), ont été mis en évidence les rayons gamma émis lors de la décroissance du Cobalt-56 en Fer-56 selon la chaîne : $^{56}\text{Ni} \rightarrow ^{56}\text{Co}$ (par capture électronique). puis $^{56}\text{Co} \rightarrow ^{56}\text{Fe}$ (ici un proton se transforme en neutron, c'est la radioactivité β^+).

La quantité estimée de ^{56}Ni synthétisée au cours des explosions respectives est de 0,6 masse solaire pour les SNIa contre 0,1 masse solaire environ pour les SN II. D'autre part, les masses des enveloppes éjectées étant très différentes les SNIa deviennent transparentes aux rayons gamma bien plus vite que les SNII car i) elles sont moins massives et présentent aux rayons gamma une quantité moindre de matière absorbante (1,4 masse solaire pour les SNIa contre environ 10 masses solaires pour les SNII) et ii) elles se diluent plus vite que les SNII car leur vitesse d'expansion est plus grande. De ce fait, il est prédit que les SNIa sont bien plus lumineuses dans le domaine gamma que les SNII.

Finalement, les explosions de supernovae laissent des traces de deux sortes : une étoile à neutrons qui est le résidu compact de l'étoile initiale (dans le cas des SNII) ainsi qu'une enveloppe de matière en expansion appelée vestige ou reste de supernova, qui contient entre autres les éléments radioactifs forgés au cours de la nucléosynthèse explosive ; dans le cas des SNIa, seul le reste de supernova persiste car l'étoile a été totalement volatilisée au cours de l'explosion.

La mission INTEGRAL - Curie

La mission d'astronomie gamma INTEGRAL (International Gamma-Ray Astrophysics Laboratory), dont l'objectif principal est l'exploration approfondie des sites célestes émissifs dans la bande spectrale de 15 keV à 10 MeV, est la prochaine grande mission astronomique de l'Agence Spatiale Européenne (ASE). Le satellite INTEGRAL (fig. 3) utilise une plate-forme spatiale du même type que celle de XMM/Newton, le satellite européen d'astronomie X lancé avec succès en décembre 1999. Le lancement du satellite est prévu à l'automne 2002 ; il sera assuré par une fusée PROTON fournie par l'Agence Spatiale Russe. La mission est conçue pour durer au moins cinq ans.

Le télescope français SIGMA à bord du satellite russe GRANAT a démontré dans le passé que la pratique des ouvertures codées est bien adaptée aux observations dans la bande des rayons gamma de basse énergie. La charge utile de la mission INTEGRAL (fig. 4) a donc été fondée sur l'utilisation simultanée de deux dispositifs à ouverture codée : IBIS (Imager on Board the INTEGRAL Satellite), apte à fournir des images à haute résolution angulaire et une information spectrale à moyenne résolution, et SPI (Spectrometer for INTEGRAL) chargé de la spectroscopie gamma à très haute résolution. La mission INTEGRAL inclut également deux instruments complémentaires : JEM-X (Joint European Monitor) et OMC (Optical Monitor Camera), opérant respectivement dans la bande des rayons X au-delà de 2-3 keV et dans le domaine visible, de 550 à 850 nm. La nature observatoire de la mission repose sur l'ISDC (INTEGRAL Science Data Center situé près de Genève) qui permettra aux non-spécialistes de mener des observations avec INTEGRAL.

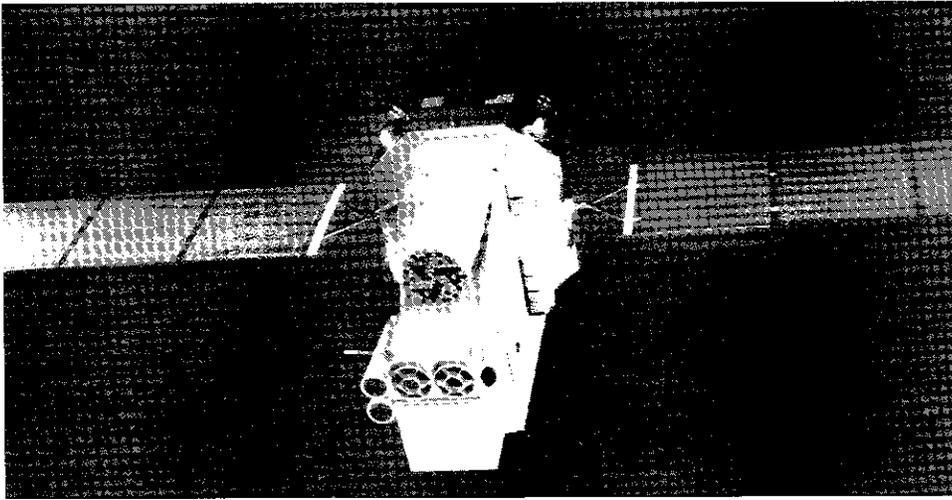
C'est par le truchement du spectromètre SPI que la mission INTEGRAL se propose de répondre aux nombreuses interrogations soulevées dans cet article. Fruit d'une vaste collaboration internationale¹, le spectromètre SPI est réalisé sous la maîtrise d'œuvre du Centre National d'Études Spatiales (CNES). Forts des résultats récents sur l'émission à large échelle de la Voie lactée produite par désintégration de l'aluminium 26, les concepteurs de SPI ont adopté un champ de vue le plus vaste possible au détriment du pouvoir séparateur, l'effort portant avant tout sur la résolution en énergie dans la gamme 15 keV-10 MeV. Le plan détecteur de SPI est donc constitué d'un réseau hexagonal de 19 semi-conducteurs de germanium couvrant une surface utile de 500 cm². Les détecteurs en germanium sont montés dans un cryostat qui les maintient à une température de 85 kelvins par une combinaison de dispositifs réfrigérants actifs et passifs. Ils confèrent à SPI un pouvoir de résolution $E/DE \approx 650$, ceci à une énergie de 1,33 MeV, quinze fois meilleur que celui du spectromètre OSSE à bord de l'Observatoire de Rayons Gamma Compton. L'aptitude du spectromètre SPI à produire des images à grand champ repose sur son ouverture codée à base d'éléments de tungstène montés à 1,7 m du

plan de détection. Ce dispositif lui procure un pouvoir séparateur assez modeste (~ 2 degrés), bien meilleur toutefois que celui du spectromètre OSSE, ainsi qu'un champ de vue à mi-sensibilité de 490 degrés carrés.

A l'instar de la plupart des nouvelles branches de l'astronomie, celle des rayons gamma doit se pratiquer pour l'essentiel à bord de véhicules spatiaux, car en dépit de leur grand pouvoir de pénétration, les rayons gamma sont totalement absorbés par l'atmosphère terrestre. Les télescopes gamma et les véhicules spatiaux où ils sont embarqués sont de ce fait exposés aux particules d'origine cosmique ainsi qu'à celles qui sont piégées dans les ceintures de radiation de la Terre. Le bruit de fond intense qui en résulte est fort difficile à atténuer, même au prix de blindages massifs. Afin de réduire le bruit de fond de SPI, bouclier adapté enveloppe complètement le dispositif de détection. On peut envisager ainsi une sensibilité de détection des raies gamma les plus fines accrue de plus d'un ordre de grandeur par rapport à celle du spectromètre OSSE embarqué sur le satellite Compton GRO. En se prolongeant loin au-dessus du plan de détection, ce blindage actif contribuera également à réduire la susceptibilité du spectromètre aux rayonnements émis en dehors du champ de vue de l'appareil.

Une fois monté dans les locaux du Centre Spatial du CNES à Toulouse, le spectromètre SPI a été l'objet d'une campagne intensive d'étalonnage. Il n'est en effet pas possible d'estimer la réponse instrumentale des télescopes gamma avec les seuls photons émis par les sites cosmiques eux-mêmes. Les sources gamma célestes émettent en effet beaucoup trop peu de photons et sont pour la plupart d'entre elles beaucoup trop variables pour garantir un étalonnage satisfaisant des télescopes. Avant la mise en orbite, il est donc nécessaire de mesurer la réponse instrumentale du spectromètre en l'exposant à des faisceaux de rayons gamma produits au sol. Les étalonnages de SPI ont été menés en avril 2001 au Centre d'Études Nucléaire de Bruyères-le-Châtel au moyen de sources radioactives, dont certaines, très intenses, ont été disposées à grande distance de l'instrument pour simuler l'effet d'une source cosmique située à l'infini. Le spectromètre a été également exposé à des faisceaux de photons gamma monoénergétiques obtenus en bombardant une cible mince faite d'un matériau donné avec des protons accélérés à des énergies judicieusement ajustées, ce qui a pour effet d'exciter les noyaux du matériau cible. Par retour à l'état fondamental, ces noyaux émettent alors par désexcitation nucléaire les photons gamma monoénergétiques dans une gamme d'énergie s'étendant jusqu'au seuil haut du spectromètre SPI.

INTEGRAL est un observatoire ouvert à une très large communauté scientifique. En dépit de la spécificité des équipements, l'accès aux paramètres physiques des



Vue d'artiste
du satellite
INTEGRAL
en orbite.

sources observées sera ouvert à tous. Une partie du temps d'observation sera toutefois réservée aux groupes impliqués dans la réalisation de la mission. Ce temps garanti sera dévolu pour l'essentiel à un balayage de la Voie lactée incluant une observation approfondie des régions centrales de la Galaxie et de la région des Voiles (Vela).

Ainsi, sans conteste, les rayons gamma, qui sont comme on l'a vu les photons les plus énergétiques du spectre électromagnétique, constituent l'indice le plus direct des mécanismes de synthèse fraîche des noyaux d'atomes dans l'Univers. En effet, l'énergie précise des rayons gamma est une signature indubitable des noyaux radioactifs émetteurs et cela parce que les raies ne sont pas modifiées par la traversée du milieu interstellaire. Par ailleurs, les noyaux incriminés sont de vie relativement courte par rapport à l'âge de la Galaxie. Par conséquent ils révèlent les phénomènes les plus actuels.

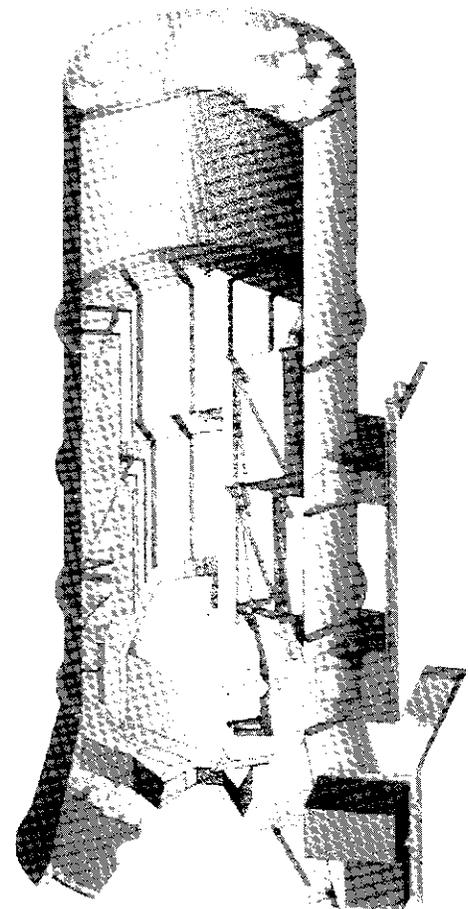
L'objectif essentiel du spectromètre d'INTEGRAL est de détecter et mesurer les raies gamma émanant de sources cosmiques. La spectroscopie gamma devrait permettre de découvrir des indices récents de nucléosynthèse et de situer ses foyers dans notre Galaxie et au-delà, et de mesurer la quantité de divers isotopes radioactifs libérés par les explosions d'objets célestes, supernovae de tous types et novæ ainsi que par le vent des étoiles massives dans la phase Wolf-Rayet.

Note :

Centre d'Etude Spatiale des Rayonnements, Toulouse, Service d'Astrophysique du Commissariat à l'Energie Atomique, Saclay, France ; Max Planck Institut für Extraterrestrische Physik, Garching bei München, Allemagne ; Université de Valence, Espagne ; Instituto di Fisica Cosmica e Tecnologia Relative, Milan, Italie ; Université de Louvain-la-Neuve, Belgique ; Université de Birmingham, Royaume-Uni ; Université de Californie, San Diego, Université de Berkeley, Nasa Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Etats-Unis.

Fig.4. Spectromètre INTEGRAL SPI

Le spectromètre SPI de haute résolution spectrale est composé d'un masque codé situé au sommet de l'appareil permettant de définir la position angulaire des sources. Les photons atteignent ensuite un plan composé de 19 détecteurs de germanium. Là s'effectue la mesure d'énergie. Afin de ne prendre en compte que les rayonnements ayant traversé le masque, un détecteur appelé blindage actif forme le corps cylindrique du spectromètre.



SN 1987A et les supernovae de type II

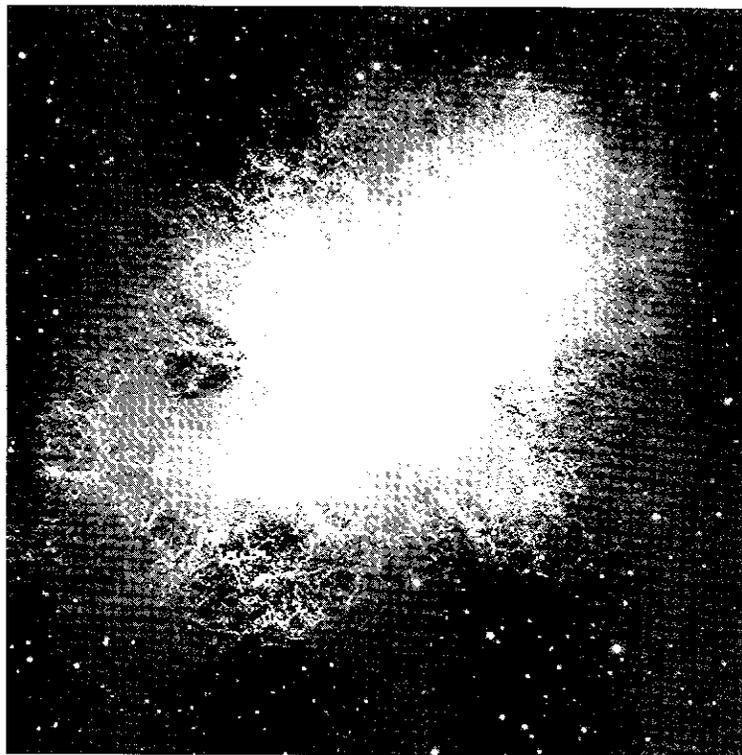
A la Renaissance, Tycho Brahé et Johannes Kepler furent chacun les témoins émerveillés de l'apparition d'une supernova. Le télescope n'était pas encore inventé. En 1987 une supernova visible à l'œil nu se présenta à nous, dans le Grand Nuage de Magellan, galaxie satellite de la nôtre, située à 170 000 années-lumière. Le déclin de son éclat et les moindres inflexions de son rayonnement furent analysés en détail par les grands télescopes. Les gigantesques détecteurs de neutrinos, à l'affût sous terre, capturèrent son signal. Ses rayons X et gamma furent enregistrés par des dispositifs satellisés.

Le message de la supernova magellanique arrivait au bon moment: celui où les hommes s'étaient donné des modèles physiques et des ordinateurs capables de restituer l'évolution des étoiles. Message différé de 170 000 ans, certes, mais message exact : les neutrinos arrivèrent avec quelques heures d'avance sur la lumière et avec le nombre attendu. La brillance de l'objet dans le ciel déclinait au rythme de décroissance d'un certain isotope radioactif qu'on eut tôt fait d'identifier au cobalt-56, fils du nickel-56 et père du fer-56. Et fut vérifiée cette prédiction extravagante : le fer, roi de la création nucléaire, le plus solide des noyaux d'atomes, n'est pas créé en tant que fer, mais en tant que nickel radioactif. Ainsi fut confirmée la théorie de la nucléosynthèse explosive des étoiles massives.

Rappelons que les supernovae de type II résultent de l'explosion d'astres dont la masse est supérieure à 8 masses solaires. Faute de réactions nucléaires exothermiques, le cœur de fer (dont la masse dépasse la limite de Chandrasekhar) s'effondre soudainement pour atteindre l'incompressibilité (la densité est alors supérieure à celle du noyau de l'atome). Ce cœur, protoétoile à neutrons, se refroidit en émettant en une dizaine de secondes une formidable bouffée de neutrinos et antineutrinos. En se détendant, ce cœur hyperdense engendre une onde de choc à laquelle les neutrinos impriment une impulsion supplémentaire. Cette onde de choc, réchauffe la matière dans son sillage et rallume les réactions nucléaires dans les couches profondes du manteau produisant tout un cortège d'éléments parmi lesquels les isotopes radioactifs qui intéressent l'astronomie gamma nucléaire. Se dispersent alors manteau et couches supérieures de l'étoile. L'intense émission lumineuse qui s'ensuit (jusqu'à un milliard de luminosités solaires) est la signature visible de l'événement "supernova". Au bout de quelques jours, la radioactivité interne prend le relais de l'onde de choc pour nourrir l'éclat de la supernova. Comme la décroissance du Cobalt-56 en est le moteur principal, le déclin de luminosité suit celui de cet isotope radioactif dont la vie moyenne est de 79 jours, puis vient le tour du ^{57}Co (271 jours) et enfin celui du ^{44}Ti (68 ans).

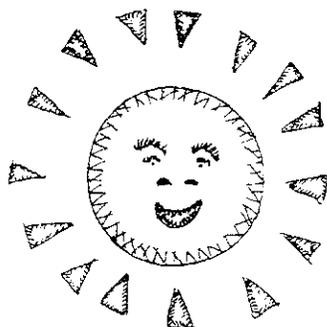
Quelques mois plus tard, l'enveloppe, diluée par l'expansion, devient transparente aux rayons gamma et donc potentiellement observable par les télescopes appropriés, pour peu que la supernova ne soit pas trop distante. Ainsi l'émission gamma de la supernova de 1987 put-elle être enregistrée, confirmant la chaîne de raisonnement développée ci-dessus.

Les radio-isotopes de vie plus longue que ceux du cobalt (^{44}Ti , et ^{26}Al) également produits par l'explosion se désintègrent dans un milieu très dilué parfaitement transparent aux rayons gamma.



**Fig. 5 La nébuleuse du Crabe (VLT-ESO).
Vestige d'une supernova gravitationnelle .**





Le mur de la recombinaison

G. Paturel, Observatoire de Lyon

ARTICLE DE FOND

Lors de l'assemblée générale du CLEA, ce dernier 18 novembre, Georges nous a offert cette conférence.

Se plaçant dans le cadre de l'expansion de l'Univers il nous informe des dernières découvertes sur la constante de Hubble. Il traite en particulier de la "re"combinaison des électrons et des protons pour donner les atomes d'hydrogène. Il conclut en évoquant la récente résurgence de la constante cosmologique dans les recherches actuelles.

Le spectacle "lointaines galaxies", présenté au planétarium de Vaulx-en-Velin, nous a montré comment l'utilisation des lois de la physique, permettait de connaître des grandeurs inaccessibles à l'expérience. Un exemple était donné par l'estimation du nombre approximatif d'étoiles contenues dans une galaxie : 100 à 300 milliards d'étoiles... Si nous voulions les dénombrer, une à la seconde, il nous faudrait compter, sans relâche, pendant trente siècles.

Mon but, dans cette conférence de l'assemblée générale du CLEA, était justement de montrer comment on pouvait obtenir des résultats encore plus époustouflants : calculer l'âge de l'Univers et déterminer l'époque à laquelle celui-ci est devenu observable. Je ne sais pas si le but a été atteint, mais la rédaction du résumé de la conférence m'offre une deuxième chance.

Je voudrais aussi profiter de ce texte pour donner quelques détails sur la façon dont les idées naissent et évoluent. C'est un sujet passionnant dont la cosmologie offre, de par sa complexité, de nombreux exemples. Je conclurai par quelques idées

personnelles.

Comme le dirait notre ami Gilbert Walusinski, commençons par le début, ce qui nous permettra de terminer par la fin.

L'expansion de l'Univers.

Einstein a publié sa théorie de la relativité générale où il suppose qu'un champ de gravitation est équivalent à un champ d'accélération¹. De plus, il impose qu'aucun observateur n'a de position privilégiée, tout point de l'univers est équivalent aux autres. Enfin, il suppose que la matière est distribuée uniformément. Notons à quel point cette dernière hypothèse était audacieuse pour l'époque. En effet, en 1915, aucune observation ne militait pour une distribution uniforme de la matière. Les galaxies n'étaient pas encore reconnues comme des objets extérieurs à notre Galaxie et la distribution des étoiles dans notre Galaxie n'était visiblement pas homogène, la voie Lactée semblait nous le prouver.

W. de Sitter trouva une solution aux

équations de la relativité générale, mais dans cette solution l'univers n'était pas statique. Einstein jugea cette solution non physique et pour maintenir ses hypothèses d'homogénéité et de stationnarité il modifia ses équations en introduisant la "constante cosmologique". On peut penser que cette façon de procéder est arbitraire mais il faut savoir que l'addition de cette constante donne simplement une solution plus générale, exactement comme une constante d'intégration dans le calcul d'une primitive. Tout au plus peut-on dire que cette constante a été introduite pour une mauvaise raison (forcer l'univers à être statique). Nous reviendrons sur cette constante car elle a fait une nouvelle entrée remarquée sur la scène de la cosmologie.

Vous voyez déjà comment avance la science. Elle progresse en zigzags : il y a des erreurs, des corrections, des hypothèses hardies, des a priori, mais la trajectoire s'affine progressivement. Finalement, c'est l'expérience qui a le dernier mot. C'est ce qui va se produire pour le sujet qui nous occupe. L'astronome E. Hubble démontra en 1922 la nature "extragalactique" des galaxies. Mais il alla plus loin. Il observa que plus une galaxie était lointaine, plus son spectre montrait des raies spectrales décalées vers les grandes longueurs d'ondes, exactement comme si les galaxies étaient animées d'une vitesse de fuite, les éloignant de nous, d'autant plus rapidement qu'elles sont plus lointaines. C'est la fameuse loi de Hubble : $V = H.D$, où D est la distance de la galaxie, V sa "vitesse" cosmologique et H la constante de Hubble. A ce point je veux faire une remarque que je trouve importante : ce que les astronomes mesurent, ce n'est pas une vitesse, mais un décalage spectral. Bien sûr, le phénomène physique le plus simple qui explique un tel décalage est l'existence d'une vitesse entre la source et l'observateur. Mais cette vitesse n'est pas une vitesse au sens habituel du terme, même si elle en a toutes les caractéristiques. Nous appelons cette vitesse une "vitesse cosmologique" par opposition à la vitesse "propre", habituelle.

Faisons une nouvelle remarque sur l'évolution des idées. Connaissez-vous K. Lundmark ? Probablement non, et pourtant cet astronome suédois avait trouvé l'expansion des galaxies avant Hubble. Sans doute l'idée était-elle dans l'air à cette époque là, mais l'histoire ne retiendra que le nom de Hubble, qui eut l'audace de proposer une loi simple pour décrire cette expansion, malgré la mauvaise qualité des mesures disponibles. Il n'est pas rare en science de voir une idée germer indépendamment en plusieurs endroits.

L'âge de l'Univers.

L'homme guéri de son "anthropocentrisme" devait-il à nouveau se croire au centre de l'univers puisqu'il semblait placé au centre de ce mouvement de fuite générale des galaxies. Non, bien sûr. La relativité générale stipule qu'aucun observateur n'a de place privilégiée. Pour faire comprendre, je voudrais donner une analogie que j'aime bien, même si elle est critiquée par les puristes. C'est la fameuse image du ballon sphérique qui se gonfle. Dans ce schéma,

nous serions des êtres infiniment plats, courant sur la surface du ballon. Notre univers serait la surface du ballon. Si j'aime bien cette analogie, c'est parce qu'elle reproduit assez bien la méthode que l'on emploie pour établir la relation entre les coordonnées d'espace et de temps, sous les hypothèses vues plus haut. Dans le calcul plus rigoureux, la sphère peut avoir un rayon infini voire même imaginaire. Cette relation fixe ce qu'on appelle la métrique, en l'occurrence la métrique dite de Robertson-Walker. Le rayon variant avec le temps, la distance entre deux points immobiles sur le ballon va varier. En supposant que le rayon varie proportionnellement à un paramètre t , que nous appellerons le temps cosmologique, i.e. $R = a.t$, on trouve que la "vitesse" entre deux points, immobiles sur la sphère, est proportionnelle à la distance D qui les sépare (attention, la distance doit se mesurer à la surface sur un arc de grand cercle). Plus précisément on trouve : $V = (R'/R).D$, où R' est la dérivée de R par rapport au temps t . En comparant à la loi de Hubble, on voit que la constante de Hubble est $H = R' / R$.

L'âge de l'univers est défini comme le temps t_0 qui s'est écoulé depuis l'origine $t = 0$ jusqu'à l'instant présent. Il est facile d'établir, à partir des relations données ci-dessus, qu'il est égal à l'inverse de la "constante" de Hubble. Dans le modèle Einstein-de Sitter que nous mentionnons en note², on trouve plus précisément $t_0 = 2 / (3H)$.

La loi de Hubble selon ce schéma est donc :

$$c . \Delta\lambda / \lambda = (R' / R) . D \quad (1)$$

où c est la vitesse de la lumière et D la distance de la galaxie considérée.

Au passage, nous allons établir une relation qui nous servira plus loin. Quand R croît, les longueurs sur la surface croissent aussi. Si on imagine les extrémités d'une "règle" de longueur L , sous-tendues par un même angle au centre, on établit que R / L est une constante. Il en va de même pour les longueurs d'ondes. R / λ est une constante. On établit ainsi qu'à deux instants différents t_0 et t on a les relations suivantes (toujours en adoptant le modèle EdS) :

$$R / R_0 = \lambda / \lambda_0 = (t / t_0)^{2/3}. \quad (2)$$

Si t_0 est le temps qui s'est écoulé depuis le début de l'univers (c'est à dire l'âge de l'univers) et t le temps auquel une source a émis un rayonnement, alors le rayonnement est reçu avec un décalage spectral $\Delta\lambda / \lambda = (\lambda_0 - \lambda) / \lambda$ tel que :

$$t = t_0 / [1 + (\Delta\lambda / \lambda)]^{3/2}. \quad (3)$$

Inversement, le décalage relatif $\Delta\lambda / \lambda$ mesuré nous donne directement le temps, compté depuis le début de l'univers, auquel la source a émis le rayonnement.

Si pour mesurer H , donc t_0 , il est facile de mesurer le décalage spectral, $\Delta\lambda$, observé pour une galaxie, en revanche, la distance D qui nous sépare des galaxies est très délicate à obtenir.

En 1977, B. Tully et R. Fisher ont trouvé une relation, la relation TF, qui relie la vitesse de rotation d'une galaxie à sa luminosité. Une telle relation, comme nous l'avons montré à plusieurs occasions dans les Cahiers Clairaut (CC 34 et CC 82), permet de mesurer la distance d'une galaxie.

Pour la petite histoire des sciences, J. Heidmann et ses collaboratrices, L. Gouguenheim et L. Bottinelli, utilisaient cette relation dès les années 1970. M.S. Roberts, un autre pionnier dans ce domaine, avait également pressenti l'usage d'une telle relation. Mais le formalisme était compliqué. Tully et Fisher simplifièrent l'usage de cette relation. On parle maintenant de la relation TF.

Tout paraît résolu. Il semble qu'il n'y ait qu'à appliquer la relation TF pour mesurer les distances des galaxies, et déduire la fameuse constante H. Mais la réalité est bien différente. Pour une même vitesse de rotation les galaxies n'ont pas toutes exactement la même luminosité. Il y a une certaine dispersion intrinsèque. Pour prendre une comparaison, tous les enfants d'un âge donné n'ont pas la même taille, même s'il y a bien une relation certaine entre l'âge et la taille. Le problème avec les galaxies est que, au-delà d'une certaine distance, on ne voit plus les galaxies de faible luminosité. L'échantillon est donc progressivement biaisé. C'est le biais compris par le Suédois Malmquist. Je me promets depuis fort longtemps de rédiger un article dans les Cahiers Clairaut pour expliquer ce biais subtil. Patience... Pour les galaxies, un autre astronome nordique, Pekka Teerikorpi, un finlandais né de père suédois, a sans doute été le premier à comprendre clairement les subtilités de ce biais. Il nous a aidé à comprendre.

Par la prise en compte de ce biais, la valeur de la constante de Hubble fut divisée par deux et l'âge de l'univers multiplié par deux. On estime aujourd'hui que la constante de Hubble a pour valeur $H = 60 \text{ km.s}^{-1}\text{Mpc}^{-1}$. Converti en unités plus classiques, l'inverse de H vaut 17 milliards d'années et l'âge de l'univers 11 milliards d'années dans le modèle EdS. Pour les figures ci-après nous avons adopté la valeur de 15 milliards d'années.

La recombinaison.

L'univers se dilate. On suppose que, comme pour un gaz qui se détend, la température moyenne de l'univers va en diminuant. Plus on regarde loin dans les profondeurs de l'espace, plus la température moyenne du milieu ambiant visé est grande. A la limite, la région visée est si chaude, que les atomes se cassent pour donner un mélange de particules, protons et électrons libres. Mais qui dit électrons libres dit absorption des ondes électromagnétiques, donc de la lumière. Par exemple, une plaque métallique sur laquelle les électrons de conduction circulent librement, absorbe les ondes. C'est cette propriété qui explique la cage de Faraday ou la réflexion de la lumière par un miroir métallique (cf. CC 87).

Mais alors, cela signifie qu'on ne voit plus rien au-delà

de cette distance où il fait si chaud que les atomes se décomposent. Hélas, oui, c'est le mur de la recombinaison que nous ne pourrions franchir, dans l'état de nos connaissances, qu'avec les neutrinos ou les ondes gravitationnelles.

Les astronomes ont l'habitude de prendre le problème dans l'autre sens. Ils partent de l'univers de jadis, très chaud, et ils imaginent ce qui se passe lors du refroidissement dû à l'expansion. Ils savent que les éléments chimiques se forment dans les étoiles à partir de l'hydrogène. Ils en déduisent qu'à l'origine il devait y avoir exclusivement, ou presque, de l'hydrogène, c'est à dire des protons et des électrons, mais dans une chaleur telle, qu'ils ne pouvaient pas se combiner. Nous pourrions envisager de remonter encore plus avant dans le temps en parlant de la soupe primitive de quarks qui va donner les protons et les électrons. Mais nous ne goûterons pas à cette soupe pour le moment.

Nous imaginons donc les protons et les électrons virevoltant les uns à côté des autres à grande vitesse. Puis, la température diminuant, les vitesses vont se réduire, et, à un moment précis, un proton pourra retenir un électron. Il y aura "combinaison". Je ne comprends pas pourquoi on appelle ce phénomène la RE-combinaison car les particules primordiales se combinent pour la première fois, de mémoire d'homme. Mais c'est ainsi, et nous ferons comme tout le monde.

Ce phénomène de la recombinaison entre un électron (e) et un proton (p) s'étudie avec les lois de la physique-chimie. Le proton et l'électron se combinent pour donner un atome d'hydrogène et de l'énergie sous forme de photon (hv).

L'équilibre $p + e \leftrightarrow H + hv$, est régi par la loi de Saha. Arrêtons-nous un instant sur cette loi. La physique statistique nous dit que la concentration [x] d'une particule x est une fonction qui dépend de la température T, du potentiel chimique, de la masse de la dite particule et de quelques constantes fondamentales.

Le rapport des concentrations $[H] / [p].[e]$ s'écrit donc comme une fonction de la température et de la densité totale. C'est normal, les protons et les électrons se combinent plus ou moins facilement selon leur densité et leur vitesse (température). Par ailleurs, les potentiels chimiques interviennent dans le calcul sous la forme de l'énergie libérée lors de la combinaison proton-électron. Cette valeur est connue : $hv = 13,6 \text{ eV}$. Si on calcule maintenant la concentration en électrons (relativement à celle des protons), on trouve qu'elle passe très brutalement de la valeur "un" à la valeur "zéro". En d'autres termes on passe très vite d'un univers totalement ionisé (un électron pour un proton) à un univers où tous les électrons sont combinés. La transition est si brusque (cf. fig. 1) qu'elle se produit dans une étroite plage de température, typiquement à 3600 degrés K. C'est à cette température que l'univers est devenu transparent.

A ce moment là, l'univers est partout baigné du rayonnement à 3600 degrés Kelvin. Quand cela s'est-il produit ? C'est ce que nous allons voir.

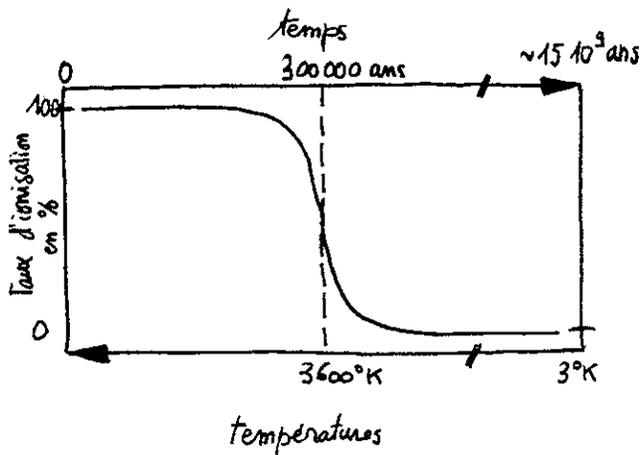


Figure 1

Vers les années 1970, deux ingénieurs de la Bell-Company, Penzias et Wilson, cherchaient à produire un récepteur radio aussi parfait que possible. Malgré leurs efforts ils ne parvinrent pas à supprimer un bruit de fond parasite. Ils réalisèrent bientôt que ce bruit était un signal venu de l'univers. En 1978, ils reçurent le prix Nobel de physique pour cette découverte. La mesure de la longueur d'onde au maximum permet de dire que ce signal correspondait à celui qu'émettrait un corps "chauffé" à une température de 3 degrés Kelvin. La thermodynamique nous apprend en effet qu'un corps à la température T émet principalement à la longueur d'onde λ , qui satisfait à la relation $\lambda.T = \text{constante}$.

Si on suppose que ce rayonnement provient de très loin, il a du subir le décalage spectral. La longueur d'onde devait être beaucoup plus courte dans le passé et donc la température beaucoup plus grande. En identifiant ce rayonnement à celui produit lors de la recombinaison protons-électrons, on en déduit que le rapport des longueurs d'ondes est dans le rapport des températures, c'est à dire de $3600 / 3$. Le décalage spectral qui résulte est $1 + \Delta\lambda / \lambda = 3600 / 3$.

D'après la relation établie plus haut (relation 3), on calcule ainsi que la recombinaison s'est produite au temps :

$$t = (2 / (3H)) / (1 + (\Delta\lambda / \lambda))^{3/2} \quad (4)$$

soit environ 270 000 ans, en adoptant $H = 60 \text{ km.s}^{-1}\text{Mpc}^{-1}$, et en gardant le modèle Einstein-de Sitter.

Conclusion.

L'histoire de la physique ne se conclura sans doute jamais. Notre conclusion n'est donc que provisoire. Mais le résultat que l'on vient de trouver est quand même époustouflant. Imaginez une corde de 11 mètres de longueur qui matérialiserait les 11 milliards d'années de notre univers. L'Homo habilis ne serait apparu que deux millimètres avant l'une des extrémités de la corde et par son intelligence des lois de la nature il pourrait analyser des phénomènes qui se

seraient produits à l'autre extrémité, à seulement 0,3 millimètres du début de la corde.

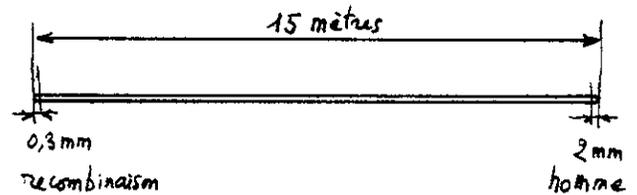


figure 2

Rien n'est jamais terminé. Plusieurs expériences récentes tendent à confirmer que l'univers est plat (notre sphère aurait un rayon infini et plutôt que de parler de rayon $R(t)$ on préfère alors parler de paramètre d'échelle). Mais l'autre hypothèse du modèle EdS n'est pas confirmée. La constante cosmologique n'est pas nulle. L'univers serait bien en expansion mais une expansion accélérée.

Tous ces merveilleux résultats nous pousseraient facilement à nous auto-proclamer les rois de l'Univers comme étant les êtres les plus aboutis, les rois des contrées inaccessibles, les rois des connaissances ultimes ... Ne serions nous pas en train de répéter l'erreur si souvent commise en nous pensant au centre du monde. Ce n'est plus de l'anthropocentrisme géométrique mais de l'anthropocentrisme culturel.

Si on essaye de prendre du recul sur nous même en regardant l'évolution de la matière depuis l'énergie primordiale et les quarks, on est frappé par les changements de phases successifs, chaque phase ayant des propriétés nouvelles que n'avaient pas les phases précédentes. Les atomes se sont formés, d'abord simples puis de plus en plus lourds et complexes. Dans les régions les plus froides les molécules, combinaisons des atomes précédents, se sont formées à leur tour, d'abord simples et de plus en plus complexes, jusqu'à donner les premières briques dont la matière vivante est constituée. Ne serions nous pas simplement une étape de cette évolution grandiose ? Vous voyez qu'on passe vite à des idées subjectives hors du cadre rigoureux des sciences. Mais n'est-ce pas ainsi que la cosmologie a commencé ?

Notes :

1 - Comme me l'a fait remarquer un collègue, Y. Baryshev, cette hypothèse n'est que pour les masses non chargées.

2 - Dans le cas du modèle de Einstein-de Sitter (EdS), on trouve que $R = t^{2/3}$. Ce résultat s'établit en résolvant les équations de la relativité générale dans le cas où la partie spatiale de l'Univers est sans courbure et où la constante cosmologique est nulle.





Pour un peu plus de science à l'école

Jean-Luc Fouquet

Vous allez certainement lire avec intérêt la mise en scène du trio ombres / lumière / couleurs relatée ci-dessous.

Mais Jean-Luc nous fait bien sentir tant dans son introduction sur ses objectifs que dans les pistes évoquées ensuite que ce n'est qu'un point d'orgue dans la partition qu'offre l'enseignement des sciences à l'école et au collège.

Les animateurs du Centre de Culture Scientifique du Muséum d'Histoire Naturelle de La Rochelle ont été sollicités comme intervenants extérieurs pour participer à une "opération de promotion" des sciences à l'école.

Chaque groupe scolaire pouvait proposer pour se prêter à ce jeu trois classes représentant chacune un cycle différent.

Plusieurs objectifs ont émergé dans l'élaboration de ce travail :

- travail sur une démarche scientifique, avec sur deux thèmes donnés deux séances de 45 à 80 minutes suivant l'âge des élèves, par demi-classe avec des petites expériences successives répondant progressivement aux interrogations des participants.

- Travail sur le compte-rendu scientifique, parfois illustré de photos numérisées prises pendant la séance, par les élèves et leur enseignant, puis mise en commun des synthèses rédigées sur un site Internet.

- Travail de suivi des thèmes abordés, avec

des propositions de soutien et de prêt de livres, de petits matériels, de valises pédagogiques ... de la part du Centre de Culture Scientifique qui reste disponible pour répondre aux questions des enseignants et les aider à prolonger les thèmes abordés par d'autres ateliers en classe.

L'une des études proposées était centrée sur les jeux de lumières et de couleurs, pratiqués dans une salle obscure avec deux projecteurs, des filtres et des boules peintes à la gouache. En voici quelques péripéties ...

Aujourd'hui, rouge sera mon ombre

Pièce en un acte.

Avec, dans les rôles principaux :

- le professeur Murex, joué par un adulte ou par un grand.
- la petite Garance
- Minium, le minimum
- et son assistant Maxime Leplomb, joués par des élèves pouvant s'aider et se remplacer souvent.

Prologue :

Le professeur demande aux spectateurs s'ils ont déjà aperçu leur ombre, quelle est sa taille le midi ou le soir, si elle est du côté du Soleil et quelle est sa couleur ...

Scène 1 :

Murex et Garance, dans une classe bien sombre ...

Les deux personnages se placent dans un faisceau de lumière blanche, à même distance du projecteur et d'un grand mur clair.

Murex : "Est-ce possible que ton ombre devienne très grande et fasse peur à la mienne ?"

Garance hésite, se rapproche du projecteur sur les conseils du public, lève les bras et pousse un rugissement.

Murex : "Mon ombre a peur, mais la tienne est trop floue. Ton ombre, pour faire peur, pourrait être plus petite peut-être, mais plus nette et surtout toute rouge !"

Le professeur demande au public si on peut aider Garance à colorer son ombre

Scène 2 :

Minium (entrant, côté jardin) : "J'ai une idée !..."

Certains, comme Minium, dans le public pourront proposer de colorier l'ombre avec un feutre rouge, ou de disposer un écran rouge sur le mur, ou d'habiller Garance d'un pull vert...ce qui conduit à bien des déceptions. A vrai dire, chacun broie du noir.

Le professeur tend à Minium une boule rouge qu'il faut déplacer devant l'écran : l'objet paraît bien sombre dans l'ombre de Garance, presque comme si on avait éteint la lumière. La nuit, tous les chats sont gris.

Murex, qui paraît à court d'arguments, remet alors un petit fromage

rond habillé d'un papier transparent rouge à Minium qui a vite l'idée de placer l'emballage dans la lumière crue du projecteur. Il dit avoir "fabriqué de la lumière rouge". Garance, dont le pull vert a bien perdu de son éclat, paraît rouge dans cette nouvelle lumière, mais son ombre est désespérément noire !

Scène 3 :

Maxime Leplomb, l'assistant de Minium, entrant côté jardin encore : "C'est l'ombre de Garance qu'il faut éclairer avec cette lumière rouge !"

Il faut laisser à sa place le premier projecteur pour que Garance garde son ombre, et en disposer un deuxième muni du filtre rouge à 3 ou 4 mètres du premier.

"Ça le fait, l'ombre est rouge !" poursuit l'assistant très fier.

Mais Garance, très intriguée, s'est déplacée vers cette ombre rouge qui alors disparaît, et une ombre nouvelle très pâle apparaît, éclairée sans doute par la lumière blanche du premier projecteur, lumière vive dont il faut se débarrasser. Murex place devant le premier projecteur une feuille de plastique verte (un filtre) et aussitôt l'ombre de garance devient verte.

Scène 4 :

Garance fait maintenant les cent pas devant le mur, et alternativement des ombres rouges et vertes naissent puis se fondent dans le noir. Puis Garance se fige dans les deux faisceaux de lumière, contemplant sur le mur ses deux ombres colorées.

Le professeur donne à Minium un chapeau pointu en carton blanc, trop petit pour la tête de Garance, avec pour consigne de trouver l'endroit où il faut le placer pour que l'une des ombres se pare d'un chapeau rouge de taille normale. Minium finit par placer l'objet près du projecteur vert (mission réussie) puis par amusement sur la tête de Garance qui est surmontée alors

d'un ridicule petit chapeau jaune, les deux ombres ayant alors une petite coiffe pointue de leur couleur.

Murex : "Pourquoi cette couleur jaune sur le chapeau ?"

Pour convaincre son auditoire, Murex éteint l'un des projecteurs et place devant l'autre un filtre jaune. Le chapeau prend facilement une couleur jaune, mais n'a qu'une ombre bien noire. On trouve rapidement dans le public que la lumière jaune est un mélange de lumières rouges et vertes, mais que pour voir deux ombres, il faut allumer deux projecteurs. Murex raconte alors que lorsqu'il regarde un match de foot en direct le soir à la télé, chaque joueur est suivi par quatre ombres, parce qu'il y a quatre grands pylônes de lumière à chaque coin du terrain. Et il donne la date de la prochaine retransmission.

Scène 5 :

Le professeur Murex est désormais seul en scène, tout près du projecteur 1, le seul allumé. Dans ses poches, des filtres ronds rouge, vert et jaune, un prisme en verre et un CD-ROM usagé...

Murex, au public : "Ces lumières colorées rouges, vertes, font-elles partie de la lumière blanche du projecteur ? Ou bien, est-ce ce papier rouge qui "transforme" la lumière blanche en lumière rouge ?"

Des expériences sont faites avec le projecteur muni d'un filtre tout d'abord rouge, puis vert, puis jaune, ...puis enfin blanc. Dans chaque faisceau de lumière colorée, on intercale les filtres ronds tour à tour. Seuls, le filtre rouge semble arrêter la lumière verte et le filtre vert la lumière rouge en donnant une ombre ronde et noire sur l'écran. Un rond rouge apparaît avec le filtre rouge dans la lumière jaune ou blanche, etc ...

Enfin, le professeur sort de sa poche un prisme en verre et le fait tourner dans le faisceau de lumière. Un "arc-en-ciel" apparaît dans une gran-

de exclamation générale non dissimulée. Murex se prend un temps pour le magicien des couleurs. Ainsi, toutes ces lumières rouges, vertes, violettes étaient bien contenues dans la lumière blanche, triées et séparées par le morceau de verre ! Et le CD-ROM, dans le faisceau, fait miroiter les mêmes couleurs ...

Epilogue :

A la fin de cette courte pièce, bien d'autres ateliers viennent à l'esprit : comment fabriquer des arcs-en-ciel, comment mélanger les lumières, pourquoi les mélanges de peintures sont différents ... On pourrait évoquer aussi les illusions d'optique, la vision en relief, les couchers de Soleil ...

Une valise pédagogique " lumière " a été fabriquée : elle contient un livret pédagogique distinguant une multitude de petites expériences suivant les trois cycles, et une progression. Elle est évolutive, les fiches étant enregistrées sur des CD-ROM réinscriptibles, et les ateliers proposés peuvent être préparés et discutés à l'avance avec l'aide des animateurs du Muséum.

On peut espérer que les enfants, naturellement curieux à cet âge, gardent l'envie de poursuivre l'aventure.

D'autres auteurs ...

En complément de ces expériences à l'école, une classe de quatrième de mon collège a pu s'engager cette année dans un projet d'action culturelle (PAC) dont le thème est la lumière et les couleurs.

Leur objectif est l'élaboration d'un CD-ROM fait de travaux d'écriture, d'épreuves de dessins et de peinture, reproduction de maquettes, comptes rendus d'observations, ... des explications sur la lumière entièrement composées par eux, les grands, pour les plus petits des trois cycles de l'école primaire.

La préparation consiste en un atelier scientifique : choix d'expériences

les plus marquantes à l'aide des fiches pédagogiques de la "valise lumière". Puis trois domaines d'étude et de réalisations sont proposés, avec en français, un travail sur la typologie des textes (invention de contes, de saynètes, de nouvelles, de poèmes, d'intrigues policières dont la trame est le texte explicatif scientifique précédent) et avec en arts plastiques et en mathématiques les mêmes prolongements : perception visuelle et techniques de création en art (aquarelle, impressionnisme, illusions d'optique...) et histoire des mesures de distances (et observations) liant géométrie et astronomie.

Mais l'objectif caché est peut-être la rencontre, les échanges de vive voix entre "petits" et "grands" sur la fin du printemps ...

D'autres horizons :

De façon plus générale, l'enseignement des sciences à l'école pourrait évoluer assez sensiblement dans les prochaines années. La présentation d'un plan de rénovation est disponible depuis quelques semaines, proposant des démarches expérimentales s'appuyant sur des observations de quelques phénomènes ancrés dans le monde réel, et prolongeant ainsi l'impulsion forte donnée par l'opération "Main à la pâte".

Le thème "lumière et couleurs" en constitue la partie "optique", mais d'autres domaines sont tout aussi intéressants, comme bien sûr le paragraphe "astronomie". Dans ce cadre, quelques questions encore sensibles concernent la formation continue des enseignants qui n'ont pas tous pu acquérir le bagage scientifique nécessaire, ainsi que la disponibilité des éventuels intervenants extérieurs.

Sans prétendre combler les "vides" éventuels, des relations qui se noueraient entre enseignants d'un collège ou d'un lycée et ceux des écoles environnantes pourraient s'avérer très fructueuses, avec échange de conseils, d'idées et de matériels, même s'il manquera comme toujours pour se faire un facteur prédominant : le temps !

Éléments de bibliographie :

Parmi les nombreux documents mis à la disposition des élèves, on pourrait citer :

● quelques ouvrages leur permettant de conforter leurs connaissances :

- aux éditions Gallimard, la collection "Passion des Arts" (avec "la couleur" ou "l'impressionnisme") ou la collection "Passion des Sciences" (avec "la Lumière, du visible à l'invisible" (1993)).

- ou plus récemment (nov. 2000) "Couleurs et lumière" (de C Zananiri dans la collection Ellipses)

● quelques ouvrages leur permettant d'imaginer les expériences :

- "Le Monde fantastique de la couleur" (de S et A Morgan) dans la collection "les sciences" des éditions Gamma (1993)

- ou "Copain du ciel" de C et J-M Masson aux éditions Milan (fin 99)

● quelques ouvrages cités en exemple pour les travaux d'écriture :

- "Le magicien des couleurs" (de A Lobel) à l'École des Loisirs

- "Mais pourquoi le ciel est-il bleu ?" aux éditions du petit musc chez Flammarion

- ou encore le célèbre "Petit bleu, petit jaune", et d'autres encore...

● quelques vidéos :

- essentiellement de la collection "Palettes" aux éditions Montparnasse (Seurat, Vermeer, Monet, ...)

● quelques logiciels installés dans les ordinateurs du CDI :

- "le secret des couleurs" (CNDP 1997)

- "au cirque avec Seurat" (CNDP 1996)

- "Pompéi, nature, sciences et techniques" (Palais de la Découverte, 2001).



Magnitude et humilité

Francis Berthomieu

Dans notre numéro de septembre, nos fiches pédagogiques présentaient, entre autres choses, une formule, dite "formule de Pogson" reliant la magnitude d'une étoile et son éclat. Une fort malencontreuse erreur s'y glissa sournoisement. Cet article voudrait apporter quelques éclaircissements au lecteur sur ce sujet, tout en lui présentant nos excuses.

Devinette.

C'est une très vieille histoire : celle d'un remarquable mathématicien et, bien sûr, brillant astronome.

S'il naquit, semble-t-il, dans la bonne ville de Nicée, en Bythinie, au deuxième siècle avant notre ère, c'est à Rhodes qu'il mena la plupart de ses travaux.

Il posa les bases de la trigonométrie, introduisant en Grèce la division du cercle en 360 degrés d'angle, de chaque degré en 60 minutes et de chaque minute en 60 secondes et proposant les premières tables trigonométriques.

Observateur plus précis et plus méthodique que ses contemporains ou prédécesseurs, on peut le considérer comme fondateur de l'astronomie de position. C'est aussi un théoricien de génie : Pour expliquer le mouvement des planètes et l'inégalité des saisons, il proposa une théorie alliant excentriques et épicycles, que Ptolémée reprendra, bien plus tard, en l'améliorant un peu...

C'est à lui que l'on doit l'explication des éclipses, la détermination de la distance Terre-Lune, l'invention de l'astrolabe, la mesure de l'obliquité de l'écliptique, la découverte de la précession des équinoxes, l'utilisation des parallèles et des méridiens pour les mesures sur Terre... et un catalogue du ciel décrivant les constellations et un bon millier d'étoiles, soi-

gneusement classées selon leur éclat...

Vous l'avez bien sûr reconnu : c'est HIPPARQUE de Nicée.

Grandeur et ... magnitude.

Evidemment, pour construire son catalogue, Hipparque ne disposait d'aucun instrument et a classé son millier d'étoiles à l'œil nu. Il a défini six familles, allant des astres les plus brillants aux plus ténus. Quel bonheur de vivre à Chypre à cette époque ! De nos jours, la pollution lumineuse interdit à un citadin de voir des étoiles au-delà de la troisième famille d'Hipparque... Maigre consolation : les étoiles de notre ciel sont d'autant plus nombreuses que leur éclat est faible. Il est donc aisé de connaître les étoiles les plus brillantes, donc les moins nombreuses : ce sont celles qui ont servi de base au tracé des dessins de nos constellations. Quand l'occasion se présente de découvrir la voûte céleste dans une parfaite obscurité, nous sommes souvent bien en peine de nous reconnaître dans un labyrinthe devenu inextricable...

Revenons au classement d'Hipparque : Les étoiles les plus brillantes sont pour lui des étoiles de première grandeur, les suivantes de deuxième grandeur, et ainsi de suite... jusqu'à la sixième famille, celle qui abrite des étoiles à peine perceptibles.

Chaque famille se voit ainsi attribuer un numéro, de 1 à 6, d'autant plus grand que l'éclat de l'étoile est faible. C'est une curiosité pour le néophyte, qui préférerait souvent voir varier ce nombre dans le même sens que sa sensation visuelle. On ne réécrit pas l'Histoire !

De nos jours, la mesure de la lumière qui nous parvient depuis une étoile peut se faire plus objectivement à l'aide d'instruments appelés capteurs de lumière, et l'on peut connaître précisément la puissance transférée sur une unité de surface du récepteur : c'est ce que l'on appelle "éclat" de l'étoile.

Vers le milieu du XIX^e siècle, on a donc cherché à définir avec rigueur une autre "grandeur" mesurable, associée à un astre donné, dont la valeur correspondrait avec l'estimation visuelle imposée par l'Histoire : c'est la "magnitude visuelle apparente" de l'astre.

De l'œil au capteur...

Une première contrainte est de se limiter à la mesure de l'énergie lumineuse transmise dans le domaine "visible" par l'œil humain, car les détecteurs actuels sont souvent sensibles à des fenêtres plus larges de longueur d'onde : cela impose d'utiliser un filtre qui limite la longueur d'onde à un intervalle allant de 500 à 600 nanomètres environ.

La deuxième contrainte est de simuler mathématiquement la réponse du détecteur "œil". C'est un outil particulièrement performant, capable de supporter sans sourciller la clarté du grand jour, la lueur de la pleine Lune mais aussi de distinguer sans peine une minuscule étoile. Fixons les idées : il faut multiplier l'énergie reçue depuis une étoile de "troisième" grandeur par un million pour obtenir celle que nous envoie la Lune ! La différence est prodigieuse, mais notre œil parfaitement adapté : c'est un détecteur "logarithmique". Ce que nous percevons comme une progression "arithmétique" correspond en fait à une évolution "géométrique" de l'énergie reçue. En utilisant des valeurs conformes au classement d'Hipparque, on constate qu'une différence de 5 unités dans l'échelle des magnitudes correspond à un facteur 100 dans l'échelle des éclats. On en déduit que si la différence de magnitude de deux étoiles est 1, le rapport entre leurs éclats est $100^{1/5} = 2,512$. Le tableau ci-dessous illustre cette définition, et l'on peut voir qu'il y a un écart de 15 magnitudes entre la pleine Lune et une étoile de magnitude 3...

Différence de magnitude	0	1	2	3	4	5	10	15
Rapport des éclats	1	2,512	6,309	15,85	39,81	100	10^4	10^6

Quelle est donc la magnitude visuelle apparente de la Lune ?

Des étoiles et des maths.

En termes mathématiques, et pour deux étoiles A et B, dont les caractéristiques sont définies ci après, on peut formuler ces relations simplement :

Etoile (A ; B) ; Magnitude (m_A ; m_B) ; Eclat (E_A ; E_B)

$$E_A / E_B = 2,512^{(m_B - m_A)}$$

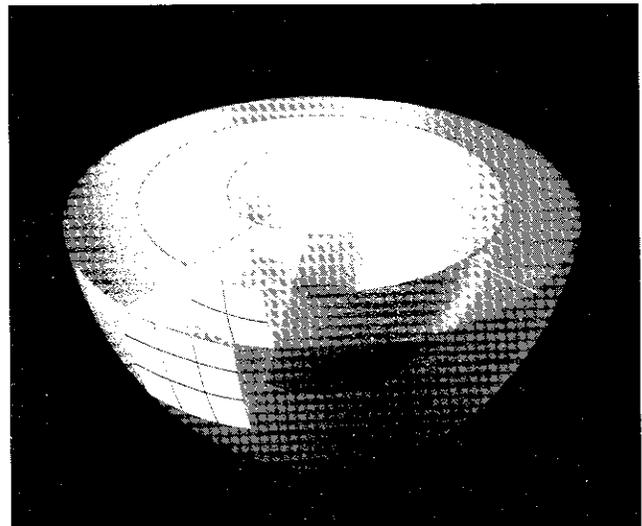
d'où l'on tire assez aisément en se souvenant que $2,512 = 100^{(1/5)} = 10^{(2/5)}$

$$(m_B - m_A) = 2,5 \log (E_A / E_B)$$

C'est cette formule que l'on connaît sous le nom de "Formule de POGSON".

Il y a "magnitude" et "magnitude"...

Ce n'est pas parce qu'une étoile a une forte magnitude (puisque nous recevons d'elle peu de lumière) qu'elle est une étoile intrinsèquement faible. La distance qui nous en sépare peut fort bien être la cause de cette apparence. Nous savons que si nous observons deux objets de même luminosité depuis des distances dont le rapport est 10, l'éclat du plus proche paraîtra 100 fois supérieur à celui qui est le plus éloigné, puisque la puissance reçue sur une unité de surface dépend du carré de la distance à l'objet, comme le montre clairement le schéma suivant :



<http://www.astroex.org>

Notre Soleil, si éblouissant qu'il peut nous rendre aveugle si nous le fixons droit dans les yeux, (et dont la magnitude apparente est $-26,8$!), n'est pourtant pas exceptionnel dans l'Univers. Ce n'est qu'une étoile "ordinaire" comme tant d'autres qui nous entourent. Si nous voulons comparer les luminosités réelles des étoiles, il faut définir une "magnitude absolue" en imaginant que toutes sont situées à la même distance de la Terre. C'est ce que font les astronomes, qui calculent la magnitude qu'aurait l'étoile si elle était à 10 parsecs de nous (soit environ 33 années de lumière pour fixer les idées) : notre si brillant Soleil n'a plus alors qu'une magnitude absolue de 4,8 à comparer avec la si timide étoile Polaire, dont la magnitude absolue est pourtant $-3,2$, ou la rouge Bételgeuse dans la constellation d'Orion, qui atteint $-5,6$...

Une belle leçon d'humilité...



Physique en 2^{de}

Considérations personnelles et un exemple de progression

Marie-Agnès Lahellec

Cette année, pour plusieurs raisons, j'ai revu ma progression. Le nouveau programme me pose beaucoup de problèmes dans son contenu et son application.

Le contenu en physique, au début du programme, s'apparente pour moi à du pointillisme puisqu'il faut inculquer des méthodes. Il n'y a pas d'autre fil directeur.

L'application de ce programme doit se faire sous forme d'activités, puisqu'il s'agit de méthodes justement. Mes élèves réclament un cours et "structuré" s'il vous plaît... Si je me laisse aller, je vais leur faire un cours sur la mesure des distances dans l'Univers. Lucienne au secours !

Un exemple de progression.

J'ai choisi de dérouler le fil d'Uranie dès le début du programme de seconde en forçant sur l'astronomie au moment des synthèses sur les T.P.

J'aborde la question du temps au cours du deuxième T.P. alors que les autres années (deux ans, déjà, car notre établissement a "expérimenté") je l'abordais après l'étude des mouvements. Et avant de passer à l'optique (réfraction et spectres) les élèves font le T.P. sur le pendule.

En effet, il m'avait semblé, au moment de traiter la mesure de la Terre par Eratosthène, que les élèves se repéraient assez mal sur le globe terrestre et que la notion de solstice et donc d'équinoxe était, pour certains, nébuleuse.

Evidemment, il serait préférable comme nombre de mes collègues de faire la manipulation de l'équinoxe (site web du CLEA), mais (entre autres raisons) je suis à Paris, dans un établissement exigu où il n'est pas possible de laisser un cadran solaire.

Le T.P. "midi au soleil" permet de pré-

ciser les notions d'une façon relativement parlante, avec un calendrier des Postes. Nous avons même pu comparer deux calendriers l'un en heures T.U., l'autre en heures légales qui permet de repérer le passage aux heures d'été et d'hiver. Ce T.P. permet également de réinvestir les connaissances sur la mesure et la précision.

Le T.P. sur le pendule est introduit par le problème de la longitude.

Cela me fait revenir ensuite sur la mesure. En effet, il y a eu une controverse sur la définition du mètre puisqu'il était question de se fonder sur la longueur du pendule battant la seconde à 45° de latitude (Picard).

Voici la progression des 10 premiers T.P. de physique. Les T.P. de chimie sont en alternance.

1^{er} T.P. La mesure. Ordre de grandeur, chiffres significatifs, précision etc....

2^e T.P. "Midi au soleil". Mes élèves se débrouillent bien sur Excel (ils ont été formés en 3^e, en technologie).

3^e T.P. Parallaxe.

- 4^e T.P. Diamètre d'un cheveu : mesure mettant en jeu le phénomène de diffraction.
- 5^e T.P. Ordre de grandeur de la dimension d'une molécule.
- 6^e T.P. Le pendule.
- 7^e T.P. Lois de la réfraction.
- 8^e T.P. Dispersion de la lumière, spectroscopie.
- 9^e T.P. Spectre du Soleil, classification des étoiles.
- 10^e T.P. Relativité du mouvement, rétrogradation de Mars.

Après, la progression est plus classique.

Je trouve qu'il y a un décalage entre les T.P., qui quelquefois prennent une tournure folklorique et la concrétisation en astronomie, obligatoire pour donner une certaine consistance à toute cette partie.

Cela nécessite des calculs, (avec des angles, des fonctions trigonométriques) des représentations dans l'espace...

Je me demande si d'autres collègues ont la même impression. À ce propos avez vous lu l'article de notre collègue Anne-marie Louis dans le BUP n°836 (été 2001) ?

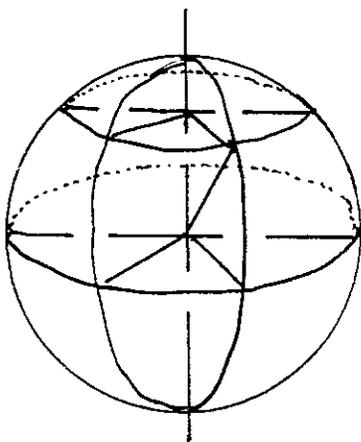
Voyage avec le Bureau des Longitudes.

Cet exercice a fait partie d'un contrôle. Le T.P. "midi au soleil" ayant été fait.

Sur le site Internet du Bureau des Longitudes, on peut trouver les heures T.U. de lever, coucher, passage au méridien du Soleil en beaucoup d'endroits (à condition que la latitude soit inférieure à 70°).

Le document joint a été obtenu grâce à un traitement par un tableur des données concernant Brazzaville (Congo) et Paris (France).

Les heures T.U. sont celles du méridien de Greenwich.



1- Sur le schéma ci-dessus de la Terre mettre une légende : l'axe de rotation Nord Sud, parallèle, méridien. Figurer la latitude et la longitude. Quelles sont les origines choisies pour la latitude et la longitude ?

2 - On donne les heures de lever et coucher du Soleil le 21 mars 2001 à Paris en heure T.U.

Lever 5h 53 et coucher 18h 04.

Déterminer l'heure de passage du Soleil au méridien. Faire figurer ces données sur les courbes.

3 - Montrer que l'on peut identifier des saisons à Paris alors qu'on ne le peut pas à Brazzaville. Indiquer les saisons sur le document.

4 - Soit la courbe dite "de l'équation du temps".

a) La forme de la courbe est-elle différente à Brazzaville et à Paris ? Dire la différence entre les deux courbes.

Donner la date à laquelle le Soleil passe le plus en retard au méridien par rapport à l'heure moyenne .

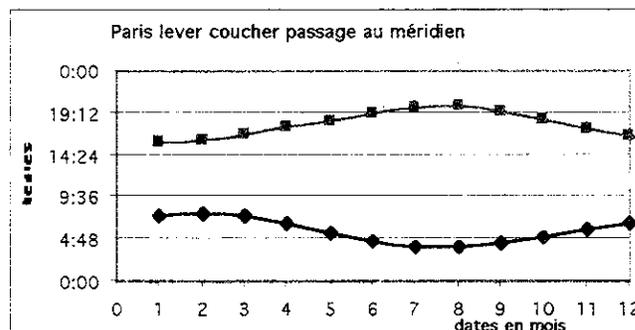
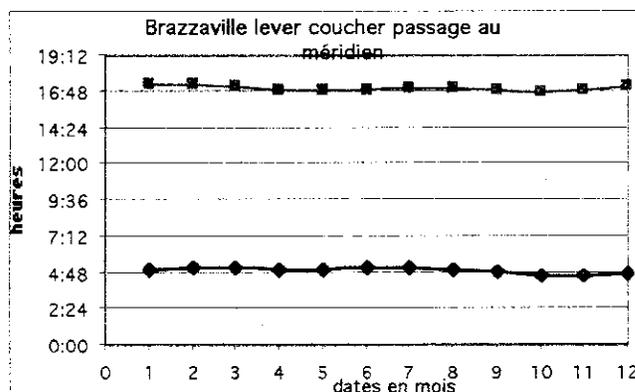
Quelle est la valeur du retard maximum ? Que conclut-on de l'existence de cette courbe ?

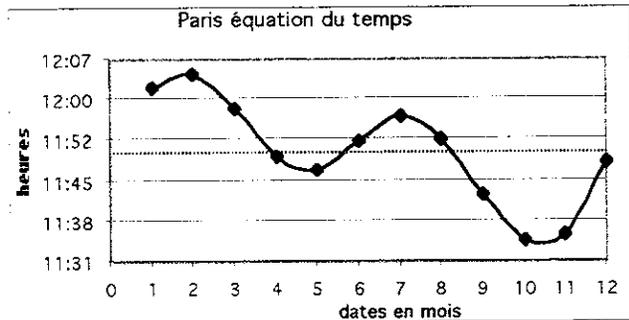
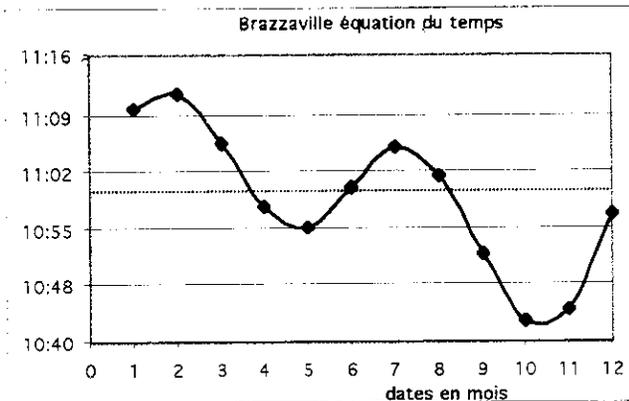
5 - On donne l'heure moyenne de passage du Soleil au méridien : à Paris : 11h 50, à Brazzaville : 10h59

Déduire de ces valeurs la longitude de chacune de ces villes.

6 - Paris est à 49° de latitude Nord et Brazzaville à 4° de latitude Sud.

Placer approximativement ces deux villes sur le schéma de la Terre.





2 - Heure de passage du Soleil au méridien :

$$(5h 53 + 18h 04) / 2 = 11 h 58.$$

3 - Il faut raisonner sur les courbes de lever et coucher du Soleil et s'intéresser à la durée de la journée.

Pour Paris on voit des variations nettes alors qu'à Brazzaville la durée de la journée est pratiquement constante.

4- On remarque que la forme de la courbe est la même à Brazzaville et à Paris. La différence entre les deux courbes réside dans l'heure moyenne de passage au méridien. Paris et Brazzaville ne sont pas sur le même méridien. C'est en février que le Soleil passe le plus en retard au méridien par rapport à l'heure moyenne. Le retard maximum vaut 15 min. Cette courbe montre qu'on ne peut pas se fier sans précaution à un cadran solaire pour connaître l'heure.

5 - Les heures T.U. sont celles du méridien de Greenwich. La Terre effectue un tour, soit une rotation de 360° sur elle même en 24 h. Donc une heure de décalage horaire correspond à un décalage de 15° en longitude. L'heure moyenne de passage du Soleil au méridien : à Paris : 11h 50 soit 10 min d'avance par rapport à Greenwich. Paris est à $2,5^\circ$ de longitude Est ($15 / 6$). Pour Brazzaville : 10h59 ; donc 1 h et 1 mn d'avance par rapport à Greenwich. Brazzaville est à 15° de longitude Est ($15 / (60 / 61)$).



Pour explorer l'Univers numérique, l'Europe lance un projet d'observatoire virtuel d'astrophysique.

L'Europe lance une nouvelle initiative baptisée Observatoire virtuel d'astrophysique (AVO), qui offrira aux astronomes des possibilités de réaliser de nouvelles découvertes. Grâce à cet observatoire, les scientifiques pourront en effet combiner des données d'observations recueillies par des télescopes spatiaux et au sol et couvrant l'éventail complet des longueurs d'onde. Avec l'AVO, les astronomes pourront instantanément accéder aux immenses bases de données actuellement mises en place par les observatoires du monde entier et reconstituer ainsi le ciel "en version numérique".

De nos jours, les observatoires scrutent le ciel en continu, alimentant de façon massive les archives de données numériques. Compte-tenu du rythme de croissance impressionnant de ces archives, les scientifiques disposent d'ores et déjà de plusieurs centaines de téraoctets de données. Ils se trouvent en présence d'une quantité écrasante de données et d'informations extrêmement complexes.

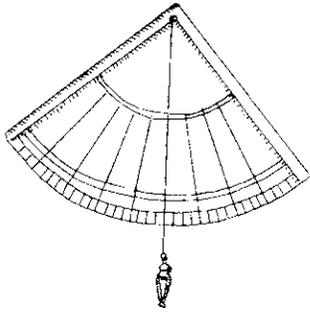
La question se posait donc de savoir comment gérer, diffuser et analyser ces données foisonnantes. Ce défi, l'Europe compte le relever avec l'Observatoire virtuel d'astrophysique, qui permettra aux astronomes de "mettre l'Univers en ligne".

Financé par la Commission européenne dans le cadre de son plan de recherche et développement technologique (TRD), le projet triennal AVO a pour objectif de concevoir et réaliser un observatoire virtuel au profit des astronomes européens. La Commission a passé un contrat de 4 M € pour mener à bien ce contrat qui a démarré le 15 /11/2001. Par comparaison, toute recherche similaire fondée sur l'observation du "vrai ciel" serait d'un coût prohibitif et durerait plus longtemps.

Le projet AVO a noué des liens de partenariat étroits avec NVO (projet d'observatoire virtuel de la National Science Foundation (Etats-Unis) et à terme un observatoire virtuel mondial est souhaitable.

Le projet AVO réunit plusieurs partenaires travaillant sous la direction de l'organisation européenne de recherches astronomiques dans l'hémisphère austral (ESO), installé à Munich : l'agence spatiale européenne (ESA), le consortium ASTROGRID (Royaume-Uni), le centre de données astronomiques de Strasbourg (CDS), qui dépend du CNRS, le centre de données astronomiques Terapix, entité également rattachée au CNRS mais implantée à l'Institut d'Astrophysique de Paris et l'Observatoire de Jodrell Bank à l'Université de Manchester.

site web du projet AVO : <http://www.eso.org/projects/avo/index/html>
(D'après un communiqué de Presse de l'ESA, transmis par Francette Delmas)



Quelques lectures du procès de Galilée dans les livres de vulgarisation de l'astronomie du XIX^e siècle

Colette le Lay

A toute époque, y compris la nôtre, le procès de Galilée a fait couler beaucoup d'encre. Nous nous intéresserons dans les lignes qui suivent à la manière dont quelques tenants de la "science catholique" du XIX^e siècle réécrivent l'histoire pour disculper leur hiérarchie. En réaction, les militants laïcs font du grand savant toscan le symbole du combat de la vérité contre l'obscurantisme.

Au XVIII^e siècle, les hommes d'Eglise qui mettent l'astronomie "à la portée des gens du monde" ont fort à faire pour concilier l'héliocentrisme avec les Saintes Ecritures. L'une des parades consiste à présenter tous les systèmes du monde comme des hypothèses équivalentes et celui de Copernic comme la plus simple de toutes. Ainsi fait l'abbé Pluche quand il parle de Galilée dans son *Spectacle de la Nature*, l'un des grands succès éditoriaux de l'époque :

"Mais imitons sa modestie ; ce qu'il ne donna que comme une hypothèse satisfaisante, ne l'avancions nous même que comme une hypothèse." ¹

Pour les Encyclopédistes et leurs émules, Galilée fait figure de précurseur : c'est un homme des Lumières avant l'heure. Louis-Benjamin Francœur, professeur de mathématiques et auteur de manuels scolaires de qualité, illustre cette manière d'appréhender le procès de Galilée comme un jalon dramatique dans la marche inéluctable vers le progrès :

"Quand on lit aujourd'hui les ouvrages de Riccioli, et qu'on étudie le procès intenté par l'Inquisition contre Galilée, on a

peine à croire qu'on ait pu se jouer de la raison, avec autant de sottise et d'animosité." ²

Dans la suite, il n'échappe pas au traditionnel cliché et fait montre d'un grand optimisme :

"Et pourtant elle se meut (e pur si move) dit-il, en se relevant et frappant la terre du pied ! Aujourd'hui que ces excès sont généralement blâmés, et que Rome ne combat plus le système de Copernic, il serait bien temps de reprendre cet étrange procès, et de montrer au public éclairé, la cause des erreurs qui ont été commises par les juges, et de prouver que le mouvement de la Terre n'est point en contradiction avec les Livres Saints."

Sous la Restauration, l'Eglise retrouve une partie de ses prérogatives, notamment dans le domaine de l'enseignement, pris en charge par le Ministre des Affaires Ecclésiastiques et des Cultes. Peu à peu, l'affaire Galilée donne lieu à une lecture officielle des autorités catholiques dont Desdoutis, chargé par le ministère de l'examen des "bons" manuels scolaires, se fait l'écho :

"D'abord on a fait un roman sur les souffrances et les horreurs de la prison de Galilée ; car on sait fort bien, par les lettres de Galilée lui-même, que tout cela se réduisit aux arrêts qu'on lui imposa dans un magnifique et délicieux séjour, qu'il fut même libre de quitter au bout de très peu de temps. En second lieu, la décision du tribunal qui condamna le philosophe était bien dépourvue d'autorité, puisque bientôt à Rome, et peu après dans tout l'univers catholique, l'opinion que les juges de Galilée avaient flétrie, se trouva adoptée et défendue unanimement par le clergé lui-même. Il ne faut donc pas, comme on le fait souvent par ignorance ou mauvaise foi, confondre avec un jugement de l'Eglise l'arrêt porté par quelques inquisiteurs auxquels l'opinion catholique refusa de s'associer ; et encore paraît-il résulter assez clairement de l'analyse de cette affaire, que le jugement et la condamnation portés par le tribunal romain étaient bien moins dirigés contre l'opinion du philosophe florentin que contre sa personne, et qu'on voulut frapper en lui, non le défenseur de Copernic, mais l'homme arrogant dont l'orgueil avait excité des haines et suscité des troubles au sein des écoles d'Italie." ³

Nous retrouvons cette version édulcorée chez Audoinaud, professeur de mathématiques à Poitiers, qui publie dans la célèbre Bibliothèque d'Education et de Récréation de Hetzel :

"Était-ce la personne de Galilée que l'on attaquait ? Evidemment non ; ses juges étaient ses amis, et on n'ignore pas les ménagements dont ils l'entourèrent pendant le procès." ⁴

Certains auteurs vont même bien au-delà. Tel est le cas de Frédéric Petit, directeur de l'observatoire de Toulouse :

"Un siècle après, la sentence de l'Inquisition qui condamnait l'ouvrage de Galilée était annulée par le pape Benoît XIV ; et les consciences catholiques jouissaient dès lors d'une liberté complète d'appréciation. (...)

Comment Galilée, par exemple, quand ses travaux scientifiques l'entouraient déjà d'un si brillant prestige, put-il descendre jusqu'à la dissimulation, afin de parvenir à publier un livre, assez médiocre d'ailleurs, et qui n'était

pas indispensable à la science." ⁵

C'est la première fois, à notre connaissance, que le Dialogo est qualifié de "livre, assez médiocre d'ailleurs". Il faut que Petit soit bien ignorant du contenu de l'œuvre de Galilée, ou aveuglé par des prises de positions partisans, ou les deux à la fois, pour préférer de telles énormités. La plupart de ses contemporains reconnaissent dans le Dialogo un chef d'œuvre littéraire et pédagogique. Ils savent aussi que Galilée y jette les bases de la mécanique rationnelle développée par Newton, puis par les grands géomètres et analystes des XVIII^e et XIX^e siècles. Les auteurs catholiques qui, comme Desdouts, font campagne contre Galilée mettent en avant son arrogance, ou minimisent les conséquences du procès, mais aucun ne s'attaque à l'œuvre du savant.

Dans les années 1860-1880, plusieurs vulgarisateurs professionnels prennent part à la lutte pour l'avènement d'un enseignement public laïc. Camille Flammarion, président de la section parisienne de la Ligue de l'enseignement, retrouve les accents des philosophes du XVIII^e : le procès de Galilée est "dans l'histoire du progrès un drame épouvantable." ⁶

Son concurrent, Amédée Guillemin, auteur phare des éditions Hachette, tient les mêmes propos :

"Galilée, plus hardi, lutta, mais en vain ; malgré l'abjuration solennelle qu'il fut tenu de prononcer à genoux, il se vit au déclin de sa vie, abreuvé d'amertume et de dégoût, condamné à une détention perpétuelle." ⁷

Peu à peu, le discours laïc gagne de l'audience et les portraits hagiographiques fleurissent, y compris dans les ouvrages "dédiés à la jeunesse chrétienne", tels l'Astronomie d'Emile Darcey, publiée dans la Bibliothèque morale de la jeunesse. Au long des six pages qu'il lui consacre, l'auteur dresse la statue de Galilée dont il justifie l'"entêtement" :

"On lui fit jurer de ne plus chercher à propager, soit de vive voix, soit par écrit, les enseignements de Copernic. Galilée le jura. Mais une des plus

fortes passions est l'amour de la vérité dans le cœur d'un homme de génie. Plein de l'enthousiasme qu'une grande découverte lui inspire, il brûle de la répandre, et les obstacles que lui oppose l'ignorance ne font que l'irriter et accroître son énergie." ⁸

Galilée demeure néanmoins un personnage controversé. Lorsqu'ils se choisissent un héros, de nombreux vulgarisateurs lui préfèrent Kepler dont Paul Couderc écrit :

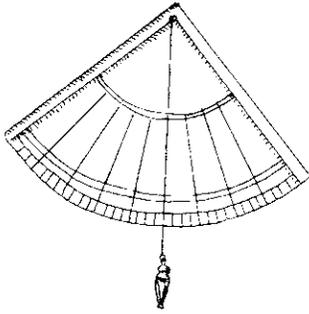
"Voici le romantique de l'astronomie : par sa richesse créatrice, par les images de son style, par la projection de ses états d'âme au milieu des ouvrages les plus abstraits ; les pages où s'exalte la joie de ses découvertes sont justement célèbres." ⁹

Il suffit de voir l'abondante littérature que l'auteur du Dialogo suscite encore pour comprendre que le débat sur le procès de 1633 est loin d'être clos. Pussions-nous grâce aux travaux de tous les chercheurs dépasser les images d'Epinal !

Références

- 1 - Abbé Pluche, Le Spectacle de la Nature, tome IV, Paris, Veuve Etienne, 1^e édition : 1736).
- 2 - L.B. Francœur, Uranographie, Paris, Bachelier, 1837 (p. 339). (1^e édition : 1813).
- 3 - M. Desdouts, Leçons élémentaires d'astronomie, Tours, Mame, 1844 (p. 336-337).
- 4 - M. Audoinaud, Entretiens familiers sur la cosmographie, Paris, Hetzel, sans date (1876 ?), (p. 60).
- 5 - F. Petit, Traité d'astronomie pour les gens du monde, Paris, Gauthier-Villars, 1866 (tome II, p. 218-219).
- 6 - C. Flammarion, Astronomie populaire, Paris, Marpon et Flammarion, 1881 (p. 739). (1^{ère} édition : 1879).
- 7 - Amédée Guillemin, Eléments de cosmographie, 2^{ème} édition, Paris, Hachette, 1867 (p. 53).
- 8 - E. Darcey, L'Astronomie, Rouen, Mégard, 1878 (p. 333).
- 9 - P. Couderc, Les étapes de l'astronomie moderne, Paris, PUF, 1948 (p. 87).





Le sourire de Copernic

Pierre Lerich

HISTOIRE

Le livre "Des Révolutions des orbes célestes" comporte une préface présentée comme une lettre au pape Paul III¹. Cette "lettre - dédicace" est bâtie comme un château-fort du moyen-âge au sommet d'un piton rocheux inaccessible : chaque mot est pesé pour repousser un ennemi, contrer une attaque ou prévenir une objection. Comme l'ont souligné les biographes, Copernic vieillissant devenait de plus en plus secret, méfiant et même misanthrope, toujours sur la défensive (la meilleure défense étant l'attaque). Le livre ne serait sans doute jamais sorti sans l'insistance acharnée de l'unique disciple, le jeune Rhéticus.

A ceux qui seraient choqués qu'on ose contredire la vénérable tradition issue de Ptolémée, Copernic répond par avance : l'astronomie est pleine d'incertitudes et de contradictions. Par exemple, on voit bien que le calendrier ne correspond plus aux saisons depuis longtemps. Il faudrait le réformer, mais pour cela il faudrait connaître la longueur exacte de l'année, mesurée en jours, heures, minutes. Or, depuis qu'on en discute, on n'a guère avancé (la réforme grégorienne aura lieu 40 ans plus tard). Pour les positions planétaires, chaque astronome a sa méthode personnelle, sa combinaison particulière d'excentriques, d'épicycles et d'équants pour essayer de les prévoir. Mais tout ce bric-à-brac ne donne que des résultats médiocres, à quelques degrés près. Imaginons qu'on réunisse des pieds, des mains, une tête, tous très beaux mais pas faits pour aller ensemble : on aurait fabriqué un monstre. C'est ainsi que Copernic représente l'astronomie de son temps : elle est incohérente, et ce sera justement sa fierté de donner à l'astronomie nouvelle une cohérence comparable à celle d'une grande horloge.

C'est la première apparition de cette métaphore appelée à un brillant avenir

(jusqu'à l'apparition de l'idée moderne de chaos).

L'antiquité elle-même est bien loin d'être rassemblée autour de Ptolémée. L'idée d'une rotation diurne ou annuelle (ou les deux) de la Terre apparaît chez plusieurs auteurs antiques, mais aucune de leurs œuvres ne nous est parvenue. Nous connaissons leur existence par des témoignages, par exemple celui d'Archimède pour Aristarque de Samos, qui enseignait le double mouvement de la Terre, sur son axe et autour du Soleil. Comment était-il arrivé à ces conclusions, nous ne le saurons jamais. Copernic se déclare donc l'héritier d'une idée antique restée à l'état d'ébauche faute d'une démonstration connue. Qui sait si une telle démonstration n'est pas partie en fumée avec les 500000 volumes de la bibliothèque d'Alexandrie incendiée plusieurs fois dans les premiers siècles de notre ère ? On ne saura jamais quels trésors de la culture grecque ont dû être péniblement redécouverts après des siècles de barbarie et d'obscurantisme. Au total pour Copernic, ni l'astronomie antique (ce qui nous en est parvenu) ni celle de son temps ne mérite un respect aveugle.

L'adversaire suivant, ce sera l'Eglise. Il faut s'y préparer. Quand Josué, après la prise de Jéricho, demande à Dieu d'arrêter la lune et le soleil, pour avoir le temps d'exterminer tous les ennemis, Dieu accède à sa demande : la lune et le soleil s'arrêtent "pendant un jour entier" (?) (Ancien Testament, Livre de Josué, X, 12). Si le soleil s'arrête, c'est donc qu'il était en mouvement. Que répondre à cela ? Copernic en effet ne répond pas grand-chose, sinon que Lactance, un des premiers auteurs chrétiens (260-325) s'est ridiculisé en estimant totalement impossible que la Terre soit sphérique. Ceux qui liront le livre des Révolutions seraient bien inspirés de méditer cet exemple s'ils ne veulent pas se ridiculiser eux aussi. Cet avertissement n'a pas été compris. Pas comprise non plus la formule "les choses mathématiques s'écrivent pour les mathématiciens", qui était pourtant claire : on ne voit pas au nom de quoi un théologien serait apte à juger d'un problème d'astronomie. Que chacun s'occupe de ce qu'il connaît et comprend. Tout cela a débouché, un demi-siècle plus tard, sur le désastreux procès de Galilée.

Il faut s'attendre enfin à beaucoup d'incompréhension et de moquerie du public en général. L'idée que notre bon vieux "plancher des vaches" puisse bouger sous nos pieds se prête à toutes sortes de plaisanteries autour du personnage éternel de savant un peu dérangé, sinon complètement fou. Là aussi Copernic attaque à titre préventif. Le public est surtout composé de gens qui ne veulent faire aucun effort intellectuel, sauf quand il y a de l'argent à gagner. L'astronomie n'est pas faite pour eux. Il faut la mériter par un

amour sincère des "choses très belles et dignes du savoir", par un goût de l'étude désintéressée, et aussi par des aptitudes suffisantes. Ceux qui, pleins de bonne volonté, s'agitent beaucoup et ne comprennent rien, sont "comme des frelons parmi les abeilles". On ne saurait être plus aimable... Copernic estime que les pensées du philosophe ne sont pas soumises aux jugements de la foule". L'opinion du grand public est ainsi disqualifiée par avance. Mais alors pour qui ce livre est-il écrit ? Copernic explique qu'il aurait préféré transmettre oralement les résultats de ses recherches à quelques disciples choisis qui les auraient transmis à leur tour, comme jadis les pythagoriciens, adeptes du secret. Plus loin dans le livre, il revient sur l'exemple de Pythagore comme pour souligner qu'il ne voulait pas publier sa théorie, qu'il ne l'a fait que sous la pression de quelques amis (et de Rhéticus). Pendant trente-six ans, il avait gardé ses idées pour lui, à l'exception des quelques pages manuscrites du "commentariolus" et du résumé diffusé avec succès par Rhéticus sous le titre "narratio prima". L'Europe cultivée attendait avec curiosité la grande œuvre annoncée, mais Copernic savait bien que la publication donnerait aussi le signal des hostilités. Le caractère provocateur et agressif de cette lettre-préface, un peu choquant par son élitisme virulent bien éloigné de l'esprit de l'humanisme et de la renaissance, s'explique sans doute par une grande répugnance à l'idée d'affronter la bêtise, la paresse et les préjugés. En outre Copernic ne pouvait pas ignorer que la précision des positions planétaires calculées d'après son système, ne marquait pas un progrès spectaculaire par rapport à

Ptolémée et à ses successeurs (Kepler trouva des erreurs de 4° dans le cas de Mars). Il restait donc beaucoup de travail pour les générations suivantes, d'où les réticences de l'auteur.

Quand le livre est sorti des presses, Copernic vieux et malade, n'avait déjà plus toute sa tête. Il n'a rien su des réactions du public ni en bien ni en mal, mais il avait eu raison d'être très méfiant ; car cinquante ans après sa mort, Galilée écrivait dans une lettre à Kepler : "(...) notre maître qui, s'il acquit une gloire immortelle auprès de certains, reste pour une multitude infinie (tel est le nombre des sots) un objet de ridicule et de dérision". Etre encore ridicule pour la grande majorité cinquante ans après sa mort, c'est exactement ce que Copernic avait prévu, d'où cette lettre pleine de sarcasmes que l'âge et le mauvais caractère ne suffisent pas à expliquer.

Copernic s'est sûrement retourné dans sa tombe bien souvent en écoutant ce qui se disait de sa théorie. Heureusement, il avait tout prévu de son vivant, répondant par avance à toutes les bêtises possibles ; il pouvait donc se rendormir aussitôt avec un sourire un peu dédaigneux.

Note bibliographique.

Le texte de cette préface est trop long pour être publié intégralement et on ne peut en extraire une partie centrale méritant d'être expliquée en détail. On le trouvera dans l'incourtournable ouvrage de Jean-Pierre Verdet "Textes essentiels", Larousse 1993, p.205 à 208.



Appel à contribution

Un prochain numéro de la revue Aster, revue de didactique des sciences expérimentales de l'INRP, sera consacré à la didactique de l'astronomie. La recherche en didactique vise à produire des connaissances utiles pour comprendre les phénomènes d'apprentissage et pour améliorer l'enseignement. Cette recherche se nourrit à son tour de questions issues de la pratique d'enseignement. C'est cette rencontre entre les points de vue et les travaux d'orientation théorique et ceux issus de la pratique qu'Aster cherche à favoriser.

Un appel à contribution sera accessible sur le site de l'INRP courant avril : <http://www.inrp.fr/publications/aster/>

Les articles doivent concerner bien sûr l'enseignement de l'astronomie, à tous les niveaux, mais conformément aux objectifs de la revue rappelés plus haut, ils doivent s'inscrire dans une perspective de recherche didactique.

Les propositions d'articles sont demandés pour septembre 2002.

NDLR : si vous écrivez pour la revue Aster, pensez aussi aux Cahiers !



La vitesse de l'ombre

Pierre Causeret

REMUE-MÉNINGES

Solution du n°96 : l'obliquité de l'écliptique

Ami(e)s lecteurs (lectrices), écrivez-moi pour me donner la solution des problèmes ! C'est bien reposant, cela m'évite de la rédiger. Je vous propose la solution de Dominique Ledoux :

"Pour une fois, j'ai pris le temps de m'adonner au remue-méningses. Voici les résultats de mes réflexions :

En supposant que l'image se forme sur le négatif dans le plan focal de l'objectif, la hauteur de la photo correspond à un angle de $71,5^\circ$.

En prenant comme repère commun aux deux clichés, la rupture de pente de la toiture, les deux hauteurs sont de 14,5 cm et 2 cm par rapport à ce repère. La quantité $h_1 - h_2$ correspond donc à une distance sur les clichés de 12,5 cm.

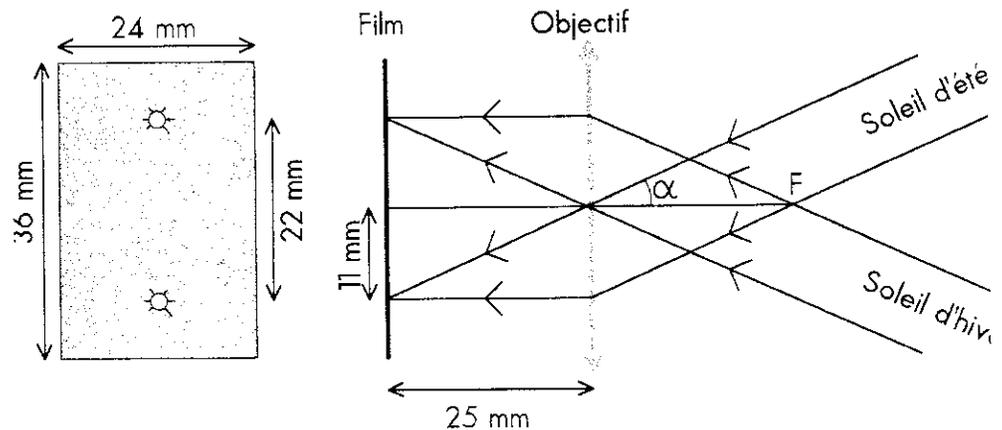
La hauteur de la photo étant de 19 cm, les 12,5 cm représentent donc un écart angulaire de 47° . En divisant par 2, on obtient l'obliquité de l'écliptique soit $23,5^\circ$!!!!

Je crois que j'ai eu un peu de chance lors de l'estimation de la position du Soleil sur les photos."

Je trouve aussi. D'autant plus que je me suis aperçu que j'avais fourni des photos légèrement tronquées, la hauteur totale de la photo publiée correspond à un peu moins de 70° . En reprenant mes diapositives originales, j'ai vérifié que les photos à la même échelle auraient dû mesurer dans les 20 cm de haut au lieu de 19. J'ai refait les calculs de manière plus rigoureuse à partir de trigonométrie, les longueurs mesurées sur la photo n'étant pas proportionnelles aux angles. La position du Soleil reste difficile à repérer.

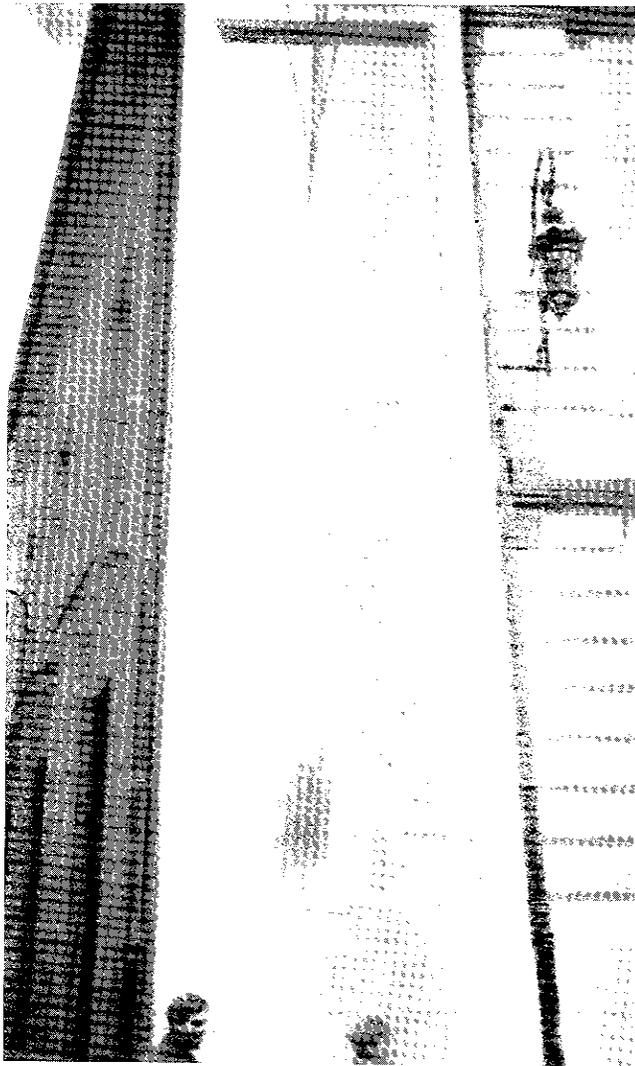
Entre la hauteur du Soleil d'hiver et celle du Soleil d'été, j'ai mesuré 12,2 cm. 12,2 cm pour 20 cm, cela correspond à 22 mm pour 36 mm, la taille de la diapositive. Comme les deux soleils sont à peu près symétriques par rapport au centre de la photo, j'ai pris 11 mm de chaque côté.

La focale de l'objectif était de 25 mm, le Soleil est considéré à l'infini, donc le film est au foyer, à 25 mm de l'objectif. Un simple calcul de trigonométrie donne $\tan \alpha = 11/25$ d'où $\alpha \sim 23,7^\circ$. On trouve $23,7^\circ$ de chaque côté, ce qui correspond à une obliquité de l'écliptique de $23,7^\circ$ au lieu de $23,4^\circ$. Pas si mal...



Vitesse de l'ombre rue de la Porte aux Lions

Nous avons la chance de posséder à Dijon plusieurs méridiennes. Celle qui est présentée ici (au coin de la rue de la Liberté et de la rue de la porte aux Lions) possède une table de 7 mètres de haut ! Les personnages au bas de la photo (prise presque au solstice d'été) montrent bien sa taille. Cette méridienne est en cours de rénovation grâce à René Faugère, un dijonnais amoureux de toutes les sortes de cadrans solaires (et membre du CLEA).



On se doute qu'avec ces dimensions, l'ombre du "soleil" placé à l'extrémité de la tige se déplace à grande vitesse et permet donc de trouver le midi solaire avec une grande précision. La question est justement celle-ci :

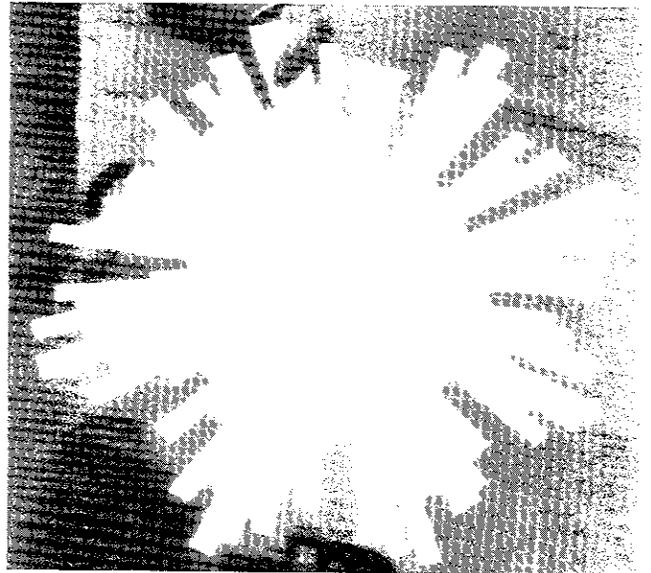
A quelle vitesse se déplace l'ombre (et la tache lumineuse centrale) à midi solaire le jour du solstice d'été ?

Vous pourrez en déduire la précision de cette horloge solaire (on peut lire la position de la tache centrale à moins d'un centimètre près).

On supposera que l'ombre à midi varie de 7 mètres entre les deux solstices. Autre donnée : la ville de Dijon est située à 47° de latitude nord.

On pourra aussi calculer les dimensions de la tache lumineuse au solstice d'été à midi.

Une méridienne sert à indiquer le midi solaire vrai, c'est à dire l'instant du passage du Soleil dans le plan du méridien (le plan vertical nord-sud, celui qui contient l'observateur et l'axe de la Terre). Elle servait à remettre sa montre ou son horloge à l'heure.



Pour avoir une bonne précision, il est préférable d'utiliser une plaque percée, comme le soleil percé de notre méridienne présenté sur la photo ci-dessus, qui donne une tache lumineuse dont la position se lit plus facilement que celle d'une ombre sombre.

Le deuxième élément d'une méridienne, c'est la table, qui peut être verticale comme ici ou horizontale. Pour construire une méridienne verticale, il suffit de tracer une droite verticale et de placer l'oeilleton au bon endroit, ce qui est le plus délicat : il faut que le plan contenant la verticale et l'oeilleton soit le plan méridien, donc qu'il soit exactement orienté nord sud. Le plus simple est de calculer à quelle heure légale il est midi au Soleil et de placer correctement l'oeilleton à ce moment là. Je vous rappelle la formule :

Heure légale du midi solaire = 12 h + décalage en longitude + équation du temps + 1 heure en hiver (ou 2 heures en été). Le décalage en longitude est compté par rapport à Greenwich, négativement vers l'est et positivement vers l'ouest, à raison de 4 minutes de durée par degré d'angle.

Plus simplement, on peut aussi trouver sur le site du bureau des longitudes (www.bdl.fr) l'heure du passage du Soleil au méridien pour la plupart des villes de France.

Le tracé d'une méridienne horizontale est un peu plus délicat car il faut que la droite soit orientée très précisément nord-sud, ce qui n'est pas toujours évident. Les méridiennes sont souvent graduées en date, utilisant les variations de hauteur du Soleil.

(Pierre.Causeret@wanadoo.fr) ■



Je ne les ai point assez lus Dictionnaire culturel des sciences

LECTURES POUR LA MARQUISE

Je ne les ai point assez lus

"Je ne relis point les ouvrages de Sénèque sans m'apercevoir que je ne les ai point encore assez lus"

Denis Diderot

Au beau temps de la dissertation française du baccalauréat, la remarque suivante d'André Gide fut proposée à la réflexion des candidats : *"l'important n'est pas de lire les grandes oeuvres mais de les relire."* Un bon collègue me fit part de sa satisfaction quand il lut, sous la plume d'un candidat, *"C'est une pensée de vieillard. Comment voulez-vous, à dix-huit ans, que je relise Montaigne, Rousseau et Chateaubriand. Ce serait déjà beau d'avoir réussi à les lire."*

Ce candidat avait plus de bon sens que l'organisateur de l'examen. André Gide avait pourtant raison et vous avez lu, plus haut que Diderot était du même avis. L'expérience, c'est à dire la vieillesse et la fuite du temps, m'a permis de vérifier la richesse et la jubilation qu'apporte la relecture des oeuvres qui m'ont marqué lorsque je les ai découvertes. Dans tous les genres, depuis les *Souvenirs d'enfance et de jeunesse* d'Ernest Renan jusqu'aux *Leçons sur la théorie des fonctions* d'Emile Borel (mon exemplaire date de 1935 mais la première édition remontait à 1898 et elle avait dû faire du bruit et du mouvement, à l'époque, dans le petit monde de l'analyse mathématique).

Le hasard de rangements dans ma bibliothèque m'a fait remettre la main sur quatre livres qui firent ma première véritable initiation à l'astronomie (après le premier aperçu que furent les leçons de cosmographie du programme de terminale en 1932). Ce sont trois livres de Georges Bruhat et un livre de Paul Couderc que je

manipule ce soir avec respect :

1- **Le Soleil**, édition Alcan 1931 (je dispose maintenant de l'édition de 1951 qui avait été revue par Lucien d'Azambuja).

2 - **Les étoiles**, édition Alcan 1939 (cadeau reçu en mai 39).

3 - **Les planètes**, édition PUF 1952 (Evry Schatzman avait accepté de rééditer le cours professé par Bruhat en 1939, en le remettant à jour).

4 - **L'architecture de l'Univers**, par Paul Couderc (édition Gauthiers-Villars 1941). La préface de Jean Perrin commençait ainsi : *"C'est une bien faible lumière qui nous vient du ciel étoilé. Que serait pourtant la pensée humaine si nous ne pouvions pas percevoir ces étoiles ?"*

Reprendre ces livres, les feuilleter, les rouvrir au hasard, il me semble qu'ils s'ouvrent naturellement aux pages les mieux lues. Et puis, émotion supplémentaire, souvenir des Auteurs... Georges Bruhat avait été un de mes examinateurs à l'oral du certificat de physique générale (selon l'appellation de 1935) et j'eus l'occasion fortuite de le rencontrer une dernière fois en 1943. Quand j'appris sa déportation, d'où il devait ne pas revenir, comment ne pas penser que la guerre aura empêché Georges Bruhat de participer, avec toute sa compétence, aux progrès de l'astronomie depuis les années 50.

Son livre sur les planètes me fait revoir en souvenir ma première rencontre avec Evry Schatzman, dans le bureau de Paul Couderc, rencontre sérieuse puisqu'il s'agissait d'organiser une série de conférences pour mes collègues professeurs de mathématiques.

J'ai donc repris ces livres, je les relis avec plaisir. Il me semble que si je les ai bien compris à la première lecture, j'en

apprécie mieux les qualités pédagogiques. Je noterai quelques traits.

La prudence de Bruhat dans son livre sur les étoiles : "*Volontairement, j'ai laissé de côté des questions telles que l'état intérieur des étoiles, l'âge de la Voie lactée, l'évolution de l'Univers ; ce sont là des questions qui échappent actuellement à la recherche expérimentale et au contrôle de l'observation.*" Cela me convenait bien, dans mon initiation. J'avais surtout besoin de connaissances solides et de méthodes bien assurées, ce que je trouvais dans les chapitres de photométrie stellaire, dans celui sur les spectres stellaires. Surtout, j'étais passionné par les mesures de distances et ce merveilleux prodige des Céphéides qui permet de déduire une distance (non atteignable par les mesures trigonométriques) et une magnitude absolue d'une période.

Bien sûr, dans le livre sur les planètes, on se retrouve au temps où Saturne n'avait que neuf satellites. C'est plus tard que Pecker nous promit les découvertes dues aux Observatoires spatiaux (éd.PUF 1969).

Réflexion faite, les cours de Bruhat, repris dans ces trois livres pour l'information d'un plus large public (en particulier celui des professeurs de mathématiques chargés d'un vieux programme de cosmographie), avaient l'avantage de la clarté et de la solidité des méthodes expérimentales invoquées pour justifier et expliquer les observations. C'est seulement beaucoup plus tard qu'avec ses **Méthodes de l'astrophysique** (éd.Hachette 1981) Lucienne Gouguenheim nous faisait retrouver le contact direct avec les problèmes de l'astronomie vivante, comme si on revivait une école d'été du CLEA.

En 1941, quand parut **L'architecture de l'Univers**, je n'imaginai pas ce que pourrait être une école d'été ou toute autre forme de formation permanente des enseignants. Je n'ai jamais su, plus tard, comment Paul Couderc réussit à publier ce livre écrit et conçu alors que Jean Perrin était le premier ministre chargé de la recherche scientifique (1936-37). Donc, bien avant ces années 42-44 au cours desquelles mon exemplaire passa de main en main parmi mes collègues enthousiastes de

Poitiers. Nous découvrons amas globulaires et amas de galaxies.

Heureux hasard du rangement qui m'a fait retrouver ces vieux livres. C'est vrai, je ne les avais point assez lus.

K. Mizar

Dictionnaire culturel des sciences

Sous la direction de Nicolas Witkowski, éd. Seuil et Regard 2001, 443 p., format 23 / 31, 72 euros.

Dictionnaire, les entrées sont rangées dans l'ordre alphabétique. Dictionnaire culturel, tout dictionnaire l'est à sa manière car, dès qu'il y a ensemble de connaissances, il y a au moins, commencement d'une culture. Mais ici, ce dictionnaire culturel des sciences l'est en tordant le coup à cette vieille opposition supposée entre culture scientifique et culture artistique ou littéraire.

Pour Nicolas Witkowski et la centaine de spécialistes qu'il a su choisir et associer à l'entreprise (sans oublier François Arago et Bernard Shaw), il n'y a pas deux cultures, une scientifique étrangère à l'autre, l'artistique. Il y a la culture vivante, riche de tous les apports, ceux du passé, ceux de toutes les civilisations. Attendez-vous à trouver une rubrique sur Hilbert, l'apôtre de l'axiomatique aussi bien qu'une rubrique sur Seurat, le peintre pointilliste.

Ne soyez donc pas surpris qu'en appelant William Herschel, vous tombiez sur une lettre de Joseph Haydn, le musicien, racontant la visite qu'il vient de faire à son confrère qui était aussi constructeur de télescopes et découvreur d'Uranus.

Vous ne lisez pas un dictionnaire comme un roman policier, mais ici vous êtes le détective à l'affût de toutes les pistes, vous explorez de rubrique en rubrique, poussé par les renvois, aiguillonné par votre curiosité et votre fantaisie. Euler vous renvoie aussi à π , à Périclès, et à religion, où, justement, un texte d'Arago vous rappelle que si Euler était très pieux, sa religion ne brimait ni son génie scientifique ni son amour de la nature.

Astronome, vous vous demandez si le concept de trou noir peut trouver sa place dans un dictionnaire culturel. La rubrique que lui consacre Jean-Pierre Luminet est riche de neuf renvois dont un à Gérard de Nerval, le poète visionnaire.

Le dictionnaire est aussi une manière discrète de citer quelques savants et écrivains qui furent à leur façon prophètes de la vraie culture, la vivante, sans frontière : Le Lionnais, dont l'ouvrage "Les grands courants de la pensée mathématique" m'enthousiasma en 1948, le chimiste Show, l'écrivain Périclès, héraut de l'Oulipo, Primo Levi, le chimiste et maître écrivain. La notice Berthelot a bénéficié du meilleur analyste, le chimiste Jean-Jacques que ce dictionnaire aurait ravi.

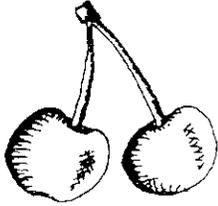
Lévy-Leblond, auteur de maintes rubriques sur le quantique et autour du quantique, rend justement hommage à on, cet anonyme qui a contribué à toutes les recherches, "on observe que ...", "on détermine ainsi ...". Il faut rendre justice au savant inconnu.

Autre qualité du dictionnaire, la place importante qu'il fait à l'histoire des sciences. En s'intéressant à la genèse des concepts, y compris aux difficultés et aux erreurs des commencements, on donne une juste compréhension de la portée des grandes découvertes et inventions. j'aurais préféré que Hilbert renvoie à Bourbaki plutôt que l'inverse mais je salue la parfaite notice de Giordano Bruno.

Le travail d'ensemble d'un tel dictionnaire me remplit d'admiration pour son principal auteur, Nicolas Witkowski. Il a su coordonner le travail de presque cent spécialistes inscrits au générique de l'ouvrage. Il y a, derrière ces 443 pages, des années de travail. l'auteur a su garder son calme et nous livrer maintes notices sérieuses et pourtant marquées par un humour sain.

Voltaire disait "*un dictionnaire sans citations est un squelette*". Ce dictionnaire culturel des sciences est un ouvrage musclé, bien vivant, plaisant, qu'on aura plaisir à rouvrir souvent.

Gilbert Walusinski ■



Compte-rendu de l' AG 2001 ESO, les 1 et 2 décembre 2001 Hommage à Claude Gayet Ecole d'été août 2002 A propos de la couverture

AG 2001

L'Assemblée générale du CLEA s'est déroulée à Lyon le 18 novembre 2001. Cette rencontre, très réussie grâce aux organisateurs, nous a redynamisés et donné l'envie de poursuivre plus activement.

Ceux d'entre nous qui ont pu venir tôt le samedi 17 ont pu bénéficier de la visite guidée de l'horloge astronomique de la cathédrale Saint-Jean par l'horloger Eric Demarquet, d'une part, et des traboules du Vieux Lyon par l'architecte Denis Eyraud, d'autre part. Ce programme a été organisé par Charles-Henri Eyraud à qui nous devons une description très détaillée de la partie astronomique de l'horloge (CC n° 94).

Le samedi soir, nous nous sommes tous retrouvés au planétarium de Vaulx en Velin, invités par Lucienne et Gilbert pour fêter le prix "Paul Doisteau-Emile Blutet" de l'Académie des Sciences (CC 96). Gilbert n'a pas pu se déplacer pour des raisons de santé mais nous a transmis un joli texte et a été très présent dans nos esprits.

Belle fête et joie des retrouvailles, mais peu de jeunes dans cette assemblée qui a réuni une soixantaine de personnes.

Philippe Merlin, astronome chargé de diffusion des connaissances, a accueilli le soir les personnes intéressées à l'observatoire de Saint-Genis-Laval.

Dominique Abouaf, Geneviève Kowalewski et Claude Piguët, militantes bien connues du CLEA, ont été les organisatrices de ces deux jours, aidées par leur jeune collègue Thierry Collin, chargé des clés, des alarmes et de la technique. Georges Paturel a été très présent en plus de ses interventions.

L'accueil au planétarium de Vaulx en Velin (le samedi soir et le dimanche matin) a été assuré par son directeur Patrick Millat et son jeune directeur technique Walter Guyot.

Le repas et l'après-midi du dimanche se

sont déroulés au lycée Robert Doisneau de Vaulx en Velin, grâce à l'efficacité et la gentillesse de Mme Fante, intendante. Le discours de madame Laroche, proviseure depuis un an et demi, nous a enthousiasmés : elle nous a parlé avec fierté et respect des lycéens, pour la plupart de nationalité française mais d'origines très diverses, élèves de milieu défavorisé qui se sont approprié un lycée construit il y a 5 ans et toujours comme neuf. Elle a mis en valeur le travail des personnels et en particulier des enseignants depuis la création du lycée.

La journée du dimanche s'est structurée de la façon suivante :

- les affaires du CLEA
- la séance de planétarium
- les interventions des militants et les ateliers
- la conférence de Georges Paturel.

Le CLEA Etat des lieux et projets

Notre trésorière Béatrice Sandré a présenté le bilan financier, proposé des simplifications pour les comptes et soumis au vote les nouveaux tarifs. Les comptes ont été approuvés à l'unanimité des 52 présents.

Abonnements et adhésions.

Les dépenses pour les CC (n°92 à 95) s'élèvent à 107 295,99 F :

impression : 90 044,25 F

routage : 8085,32 F

affranchissements : 9166,42 F.

Les recettes proviennent de 733 abonnés à 140 F soit 102 620,00 F.

Donc les Cahiers sont légèrement déficitaires.

A cela il faut ajouter les adhésions (491 adhérents à 50 F soit 24 550 F).

Nous avons donc proposé d'augmenter légèrement le prix de l'abonnement (25 €) et de diminuer celui de l'adhésion (5 €).

Les nouveaux tarifs ont été votés à l'unanimité.

Organisation.

Catherine Vignon, après avoir aidé Gilbert plusieurs années pour les envois, a assuré pendant 4 ans à la fois l'envoi des productions et la trésorerie, ce qui était particulièrement lourd. Depuis un an, c'est Béatrice Sandré qui est trésorière. Annie Mercier, secrétaire du labo d'astronomie s'est occupée des commandes pendant un an. Elle est relayée depuis décembre par Dominique Balin (que certains d'entre nous ont rencontré ainsi que son épouse dans les écoles d'été de Formiguères), qui a accepté de faire cet énorme travail. Les Hors-séries et les fascicules réalisés par des membres du CLEA sont très demandés en raison de leur originalité et leur qualité. Mais de plus en plus, les personnes qui se les procurent nous considèrent comme des prestataires de service et ne s'impliquent pas dans l'association. Ceci pose problème car nous sommes tous bénévoles et n'avons pas les moyens d'une maison d'édition.

Il importe donc de simplifier le plus possible le travail :

- un seul tarif pour les productions.
- suppression de l'abonnement de deux ans.
- suppression dans les tarifs de cotisation du soutien financier. Béatrice signale que chaque année presque la moitié des abonnés oublie de se réabonner en janvier, malgré le bel encart de réabonnement, accompagné d'une enveloppe à fenêtre, réalisé par Jacky Dupré. Cela est à la fois une perte de temps pour Béatrice et Jacky, et d'argent car l'oubli est répercuté au numéro suivant (l'envoi en nombre coûte moins cher que l'envoi individuel). La bonne volonté attentive de tous les abonnés, voilà un soutien qui nous serait précieux.

D'où vient l'argent et comment l'utiliser ?

Les comptes sont bien garnis :
265 002,96 F sur le compte postal
266 291,24 F sur le livret A.
L'argent vient de la vente des productions (cette année il y a eu peu de retirages et on a utilisé les stocks) et de la rémunération venant de la formation CNED.

Lucette Bottinelli, Michèle Gerbaldi et Lucienne Gouguenheim ont réalisé deux formations pour le CNED (que certains d'entre nous ont suivies) ; l'argent, pour ne pas être perdu à cause des délais administratifs, a transité par le CLEA. Sur les 200 000 F (225 000 F moins 25 000 F de frais occasionnés par la formation) qui restent, 150 000 F seront alloués à la réalisation d'un projet de CD Rom pour le CNED (d'un coût de 700 000 F), le reste étant offert au CLEA. Cette proposition a été acceptée à l'unanimité.

Le principe d'une contribution par le CLEA à l'organisation (par Jean Ripert) d'une école d'été en août 2002 a été voté à l'unanimité. Dans la mesure où il y a peu de chances que le ministère accorde des crédits, nous avons pensé faire comme jadis : volontaires bénévoles et participation de tous aux frais d'hébergement. L'école d'été est le moyen le plus efficace pour préparer l'avenir : c'est là que nous pouvons joindre des jeunes et futurs adhérents.

Evolution du CLEA.

Le CLEA vieillit et il faut penser à l'avenir. Dans ce but, Lucienne annonce sa décision d'être remplacée, en tant que présidente, dans un an. Les anciens, tout en continuant à militer pour le CLEA, espèrent que se mette en place progressivement une équipe nouvelle et rajeunie. Nous sommes tous convaincus que le CLEA a encore un rôle très important à jouer dans la diffusion de l'astronomie avec son approche pédagogique originale.

Les Cahiers Clairaut.

Martine Bobin se désolé de l'érosion lente du nombre d'abonnés (733 + 56 VIP, soit à peine 800) non compensée par de nouveaux arrivants. Elle remercie Francette Delmas de la mettre en contact avec des astronomes de l'I.A.P., ce qui permet de nourrir la rubrique "article de fond". Elle demande une participation du plus grand nombre à la rubrique "avec nos élèves" qui fait la spécificité des Cahiers. Le Comité de rédaction fonctionne bien mais il travaille parfois à flux tendu et ce n'est pas facile d'équilibrer les rubriques dans chaque numéro.

Nous lancerons, dans un prochain

numéro, un questionnaire qui permette de mieux cerner vos besoins. Nous vous demandons, pour contribuer à cette démarche recrutement / rajeunissement, de nous envoyer des adresses de personnes (collègues, enseignants de vos enfants, de votre région) à qui nous puissions offrir des exemplaires d'anciens numéros. Nous comptons vivement sur votre participation et vos avis, conditions sine qua non de notre vie associative

Les réalisations des membres du CLEA.

Le CD Rom sur le programme de physique de seconde a eu un énorme succès et a été fort bien accueilli par les IPR. Francis Berthomieu est prêt à le rééditer en l'améliorant encore.

Un projet de CD Rom sur l'école élémentaire se met en place (Pierre Causeret, Jean-Luc Fouquet, Liliane Sarrazin, Daniel Toussaint).

Enfin Liliane Sarrazin et Pierre Causeret ont pu dédicacer les exemplaires apportés de leur beau livre sur les Saisons, recensé dans le n° 96.

Le planétarium de Vaulx en Velin

Dans son discours d'accueil, Patrick Millat nous présente le planétarium dont il est directeur.

Ouvert 7 jours sur 7 depuis octobre 95, le planétarium reçoit 440 000 visiteurs par an. Rayonnant sur l'agglomération lyonnaise mais aussi sur toute la région Rhône-Alpes, l'équipe d'animation participe activement aux efforts très importants de la ville de Vaulx en Velin en matière d'éducation, de culture, de vulgarisation scientifique. Ce développement est une orientation majeure de la politique culturelle intégrée dans les objectifs de la politique de la ville.

Ces efforts se mesurent au nombre de services et d'associations travaillant dans le même sens et multipliant les initiatives : Ademir, association de promotion de l'informatique pour tous ; Ebulliscience, salle de découvertes scientifiques ; Inopole, maître d'oeuvre des classes "la main à la pâte" implantées dans 130 classes du primaire et dont Vaulx en Velin est site pilote. La

dernière fête de la science, coordonnée par le planétarium, a rassemblé 17 structures vaudaises et touché 2500 personnes en un week-end.

Le planétarium, centre de diffusion culturelle, est aussi et d'abord un formidable outil d'une pédagogie vivante au service des élèves et de leurs enseignants. En plus des séances d'astronomie, le planétarium propose des ateliers, des parcours scientifiques, un hall d'exposition et une logistique d'accueil des classes.

"Lointaines Galaxies"

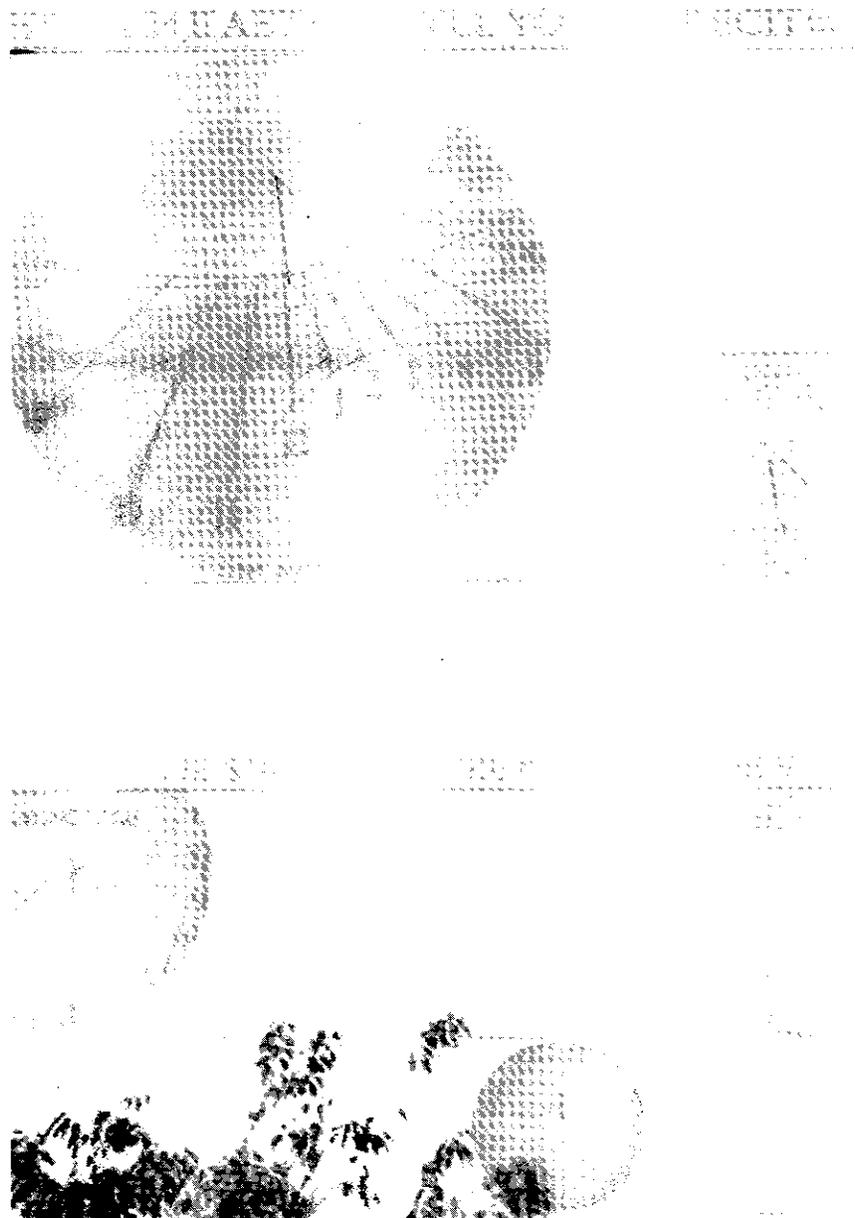
Nous avons pu admirer ce spectacle, réalisé par Georges Paturel et l'équipe du planétarium, qui présente l'image d'un ciel de galaxies.

Les images sont de belle qualité (Digistar) la Voie lactée est représentée à l'aide de 10 000 points correspondant à 10 000 étoiles. Le ciel de galaxies correspond à de vraies galaxies (à partir d'une base de données de $2,2 \times 10^6$ galaxies, on a choisi les plus proches en prenant leur position en 3 dimensions puis leur vitesse radiale). En surimposant des galaxies et en changeant d'échelle, on donne une impression de vitesse qui permet de faire apparaître la rotation différentielle des galaxies. Ce spectacle plaît beaucoup au grand public et est proposé aux élèves, à partir de la 4^e, accompagné d'un livret pédagogique. Il permet beaucoup d'interrogations et comporte des passages difficiles qui conviennent mieux aux élèves de lycée.

Les cadrans solaires du lycée Robert Doisneau

Sur la façade sud, à l'entrée du lycée sont installés 7 cadrans solaires circulaires et une ligne de texte. Cet ensemble aux couleurs superbes a été réalisé par Jean-François Gavotti, dans le cadre du "1% culturel". Le plus grand cadran, au centre, est calculé en fonction des coordonnées géographiques de Vaulx en Velin. Trois cadrans, vers l'ouest, indiquent l'heure moyenne sur les fuseaux horaires d'Halifax, Chihuahua et Anchorage. Trois cadrans, vers l'est, indiquent l'heure des fuseaux d'Assouan, Novosibirsk et Shanghai. Les varia-

tions de hauteur des cercles évoquent les écarts de latitude et les variations d'écartement évoquent les longitudes. Le texte qui court sur la ligne qui lie les 7 cadrans est écrit en grec ancien, français, anglais, russe, arabe, chinois : "je suis en mesure de vous faire le récit que vous attendez, dit l'ombre".



Les ateliers et les interventions

● Pendant la pause du dimanche midi les réalisations de membres du CLEA permettent des échanges fructueux entre les participants : les superbes images de spectro solaire réalisées par Roger Meunier dans le cadre de son club d'astronomie ; les astrolabes fabriqués par Charles-Henri Eyraud ; la maquette Soleil-Terre-Mars présentée et vendue par l'Observatoire de Lyon sous forme d'un grand poster (<http://www-obs.univ-lyon1.fr/fc/maquette.htm>) ; le manège des étoiles, créé par Annie Pincaut, représentation en 3 D de l'ensemble des étoiles proches visibles à l'oeil nu depuis la Terre, respectant les différentes classes spectrales.

● Daniel Bardin nous présente, de la part de Marie-France Duval, les nouveautés à Marseille : planétarium de 6 m pouvant accueillir 30 adultes ou 35 enfants, et préparation de la commémoration du tricentenaire de l'observatoire de Marseille en 2002.

● Frédéric Dahringer parle de la prochaine Université d'été de l'EAAE (cf. CC n° 96).

● Pierre Causeret obtient un franc succès en présentant un dispositif permettant de montrer les différences d'éclairement du Soleil l'été et l'hiver à midi. Deux lampes de poche dont les faisceaux sont plus ou moins inclinés éclairent chacune une petite plaquette de chocolat. L'une fond nettement plus vite que l'autre. On peut retrouver la description de cette expérience et de bien d'autres dans le livre sur les Saisons cité plus avant.

● Charles-Henri Eyraud présente un site en cours de réalisation qui est une base de données sur les cadrans solaires (cours, bases de données, maquettes, animation).

<http://www.ens-lyon.fr/relie/cadrans>
charles-henri.eyraud@lyon.iufm.fr

● Michel Vignand, de La Réunion, nous a envoyé le texte suivant :

"L'année 2001 est très riche à La Réunion : en plus des événements astro classiques, nous avons eu ou aurons :

- éclipse de Soleil partielle au couchant à La Réunion (grosse opération avec les média + Audouze + Pain, 90 000 lunettes distribuées) et totale à Madagascar (action de coopération avec la province de Fianarantsoa et l'alliance française)

- anniversaires de l'AAR (15 ans) et de l'observatoire (10 ans) que nous fêterons avec JP Luminet les 21 et 22 septembre (il est invité par une association qui nous a proposé de le recevoir),

- "euroconférence sur les galaxies" du 16 au 21 octobre (150 astrophysiciens) avec 2 conférences publiques, des rencontres avec des collégiens et des lycéens, une formation parallèle sur le système solaire et un concours de créativité.

Je prépare en outre un voyage en Afrique du Sud pour décembre 2002, date de la prochaine éclipse totale. Ouf, pas le temps de s'ennuyer, ni d'écrire aux copines..."

Martine Bobin.



Conseil du CLEA pour 2002

(47 voix pour 47 votants)

Agnès ACKER (Strasbourg) ; Daniel BARDIN (Aix-Marseille) ; Francis BERTHOMIEU (Nice) ; Martine BOBIN ; Michel BOBIN ; Lucette BOTTINELLI ; André BRAHIC ; Pierre CAUSERET (Dijon) ; Jean CHAPELLE (Clermont-Ferrand) ; Frédéric DAHRINGER (Rennes) ; Jacques DUPRÉ ; Bernadette DURIEUX (Nancy-Metz) ; Marie-France DUVAL (Aix-Marseille) ; Jean-Luc FOUQUET (Poitiers) ; Christiane FROESCHLÉ (Nice) ; Joël GAUDRAIN (Rouen) ; Cécile FERRARI ; Michèle GERBALDI ; Lucienne GOUGUENHEIM ; Édith HADAMCICK (Créteil) ; Éric JOSSELINE (Montpellier) ; Marie-Agnès LAHELLEC ; Christian LARCHER ; Lucette MAYER (Orléans-Tours) ; Georges PATUREL (Lyon) ; Jean-Claude PECKER ; Claude PIGUET (Lyon) ; Annie PINCAUT (Reims) ; Jean RIPERT (Toulouse) ; Béatrice SANDRÉ (Versailles) ; Nicole SANGLERAT ; Liliane SARRAZIN VILLAS (Bordeaux) ; Évry SCHATZMAN ; Claudine SÉMERJIAN ; Josée SERT (EAAE) ; Daniel TOUSSAINT (Reims) ; Victor TRYOËN ; Michel VIGNAND (La Réunion) ; Catherine VIGNON (Paris) ; Denise WACHEUX (Lille) ; Gilbert WALUSINSKI.

Réunion des 1 et 2 décembre 2001 à l'E.S.O., Garching (Munich)

Lors de l'AG, Michèle Gerbaldi nous a informés d'une enquête de l'ESO en direction des enseignants européens : quels documents l'ESO pourrait-elle produire ? Lucienne a rappelé qu'au CLEA nous militons pour une éducation qui forme l'individu et que nous ne sommes pas des consommateurs de produits finis. Nous souhaitons que soit laissée aux enseignants la maîtrise des outils proposés ; les images doivent être pensées en fonction de leur utilisation. Le risque d'uniformisation est grand si s'organise une diffusion européenne de CD "clefs en mains".

Josée Sert et Francis Berthomieu se sont rendus à Munich en tant que membres de l'EAAE pour une rencontre entre enseignants et membres de l'ESO.

Richard West, en charge du département "Education" de l'E.S.O. (European Southern Observatory), introduisait cette réunion en ces termes :

"Les Ministres de l'Education Européens sont conscients du problème de la désaffection des jeunes pour les études et les métiers scientifiques constatée dans tous les pays (nous ajouterons que c'est particulièrement marqué pour les filles) ; parallèlement, les jeunes deviennent en proportion moins nombreux dans la population. L'ensemble de la société européenne risque d'une part de manquer de scientifiques, d'autre part d'être globalement désarmée pour réfléchir sur des choix de société qui font intervenir de plus en plus un contexte scientifique. Ils ont donc manifesté l'intention de soutenir davantage les établissements scolaires et les enseignants en ce domaine. C'est dans ce contexte que sept organismes internationaux (dont l'E.S.O., l'E.S.A., le C.E.R.N.) ont décidé de travailler ensemble pour construire et fournir des ressources adaptées aux besoins des enseignants des différents pays, et que l'E.S.O. a chargé une enseignante autrichienne, Arntraud Bacher, de bâtir un service éducatif en son sein."

Quatorze enseignant-e-s avaient été

invité-e-s par l'E.S.O. à présenter les grandes lignes de l'enseignement de l'Astronomie dans leur pays et à donner leur avis sur ce que l'E.S.O. pourrait apporter pour le développer (dont 12 de l'E.A.A.E., tou-te-s intervenant-e-s dans les Ecoles d'été), venant d'Allemagne, Autriche, Belgique, Danemark, Espagne, France, Hollande, Italie, Luxembourg, Portugal, Suède. Pour la France, nous étions deux : Francis Berthomieu et Josée Sert. Nous avons insisté sur les tendances qui se retrouvent maintenant à tous les niveaux du Collège et du Lycée à intégrer dans l'enseignement obligatoire des parcours pluridisciplinaires visant à rendre l'élève acteur et autonome dans la construction de son savoir (Itinéraires de découverte, Travaux Personnels Encadrés, classes à Projet Artistique et Culturel - où la Culture Scientifique et Technique prend sa place dans les douze domaines retenus...). Nous avons souligné l'intérêt d'un partenariat entre des enseignants et des organismes scientifiques disposant de données, en particulier récentes, d'une grande richesse et pouvant apporter des participations d'astronomes en activité sur des sujets de recherche divers. Tout en précisant les conditions d'un partenariat réussi : que chacun affirme, et conserve sa spécificité (les un-e-s, la pédagogie, les autres la compétence scientifique), et que la maîtrise du projet pédagogique reste aux équipes éducatives (seules à même d'apprécier la pertinence d'activités - appréciation pouvant être différente d'ailleurs suivant les pays).

Sans préjuger des décisions que prendra l'E.S.O. à la suite de cette consultation, deux directions de travail apparaissaient :

- l'édition de fiches d'activités à partir de données ou documents de l'E.S.O. en collaboration avec l'E.A.A.E. : pour des niveaux différents, elles pourraient comporter des documents, des pistes d'exploitation, des éléments théoriques pour l'enseignant (nous pensons de notre côté que ces documents devraient pouvoir rendre l'enseignant-e capable de bâtir sa propre activité pour les élèves et ne devaient pas être des exercices fournis clefs en main). Ils doivent être publiés

dans plusieurs langues (le plus possible), avec une introduction adaptée à chaque pays, et mis à disposition sur le Web.

- des formations de formateurs : nous avons été plusieurs à dire que ces formations n'avaient pas à prendre la place des Ecoles d'été de l'E.A.A.E. ou des Universités d'été du C.L.E.A. L'objectif en est complètement différent. Il s'agirait d'utiliser les ressources ou les compétences propres à l'E.S.O. pour proposer une formation plus théorique, de type scientifique ou technique : sur les télescopes et leur fonctionnement (optiques adaptatives par exemple), sur les types d'observations conduites, le traitement d'images, l'exploitation des données, sur les développements récents de la recherche : ce qu'apportent ces observations dans la connaissance de l'Univers et en quoi les derniers résultats confirment, remettent en question, font avancer... les théories actuelles. Des ateliers pratiques sur la construction d'exercices à partir de données de l'E.S.O. pourraient se tenir avec des participants des différents pays et l'aide d'astronomes. Une durée de 3 jours paraîtrait intéressante, dans les locaux de l'E.S.O. Les personnes ayant participé à cette formation s'engageraient à impulser (ou à renforcer) des formations dans leur propre pays : qui ne seraient pas des répétitions de ce qui aurait été fait à l'E.S.O. mais qui utiliseraient la compétence acquise, qu'elles soient organisées par des Ministères de l'Education, des groupes nationaux de l'E.A.A.E., ou des associations comme le C.L.E.A. (qui est cité comme référence par beaucoup d'enseignant-e-s étranger-e-s !) ...

Comme toujours, les échanges avec des enseignant-e-s de pays différents sont passionnants, et nous avons eu l'impression d'être très écoutés par l'E.S.O. Les pistes de collaboration qui ont été amorcées entre l'E.S.O. et l'E.A.A.E. autres que sur les projets intégrés aux semaines européennes de la Science nous ont paru susceptibles de renforcer l'E.A.A.E., dont le seul groupe réellement actif est jusqu'à maintenant le W.G. 3 animé par Rosa Maria Ros (que le C.L.E.A. connaît bien)...

Josée Sert et Francis Berthomieu.

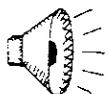
Claude GAYET (1944-2001)

Son métier, sa passion étaient de communiquer, d'enseigner ; échanger des idées et des connaissances avec elle était toujours un plaisir. Plaisir partagé avec les adultes et les enfants : Claude était Professeur d'Ecole spécialisée pour les enfants en difficultés à l'école Révolution à Marseille. Elle avait rejoint le monde des passionnés d'Astronomie en 1989 en adhérant à l'Association ANDROMEDE (Observatoire de Marseille). Elle s'est très rapidement intégrée à l'équipe et pendant 12 années a animé avec chaleur et sourire les soirées d'observation, le planétarium de l'association, et participé à l'élaboration des nombreuses expositions réalisées.

Elle était de toutes les manifestations et l'on pouvait toujours faire appel à elle.

Durant les universités d'été du CLEA organisées par notre groupe elle a animé de nombreux ateliers, groupes de travail, et a souvent fait des exposés sur l'histoire de l'astronomie. Sa disponibilité et sa gentillesse nous manquent cruellement.

Le CLEA et tous ses amis d'ANDROMEDE assurent sa famille de leurs condoléances attristées.



Ecole d'Été d'Astronomie réservée aux Professeurs des Ecoles, des Collèges et des Lycées.

Gap du 22 au 29 août 2002

Cette école d'été organisée par le Comité de Liaison Enseignants Astronomes (C.L.E.A), se déroulera au centre d'oxygénation du Col Bayard (Gap), arrivée le jeudi 22 août au soir et départ le jeudi 29 au matin.

Comme toutes les Ecoles et Universités d'Été organisées par le CLEA depuis 1978, elle comportera des cours, des groupes de travail et des observations.

Les thèmes proposés en astronomie aborderont plus particulièrement le programme des écoles (plan de rénovation de l'enseignement des sciences à l'école), les itinéraires de découverte en collège et le programme de seconde.

Le nombre de places sera limité à 40. Ne pouvant obtenir aucune subvention, le CLEA prendra en charge une grande partie des frais (organisation, transport de matériel, documentation, remboursement des déplacements et d'une partie de l'hébergement). Les participants paieront une somme de 150 € à 200 € (dépendant du type d'hébergement : chambre à 2 ou à 3).

Inscription : Demander la fiche de pré-inscription à : Françoise DELMAS, Institut d'Astrophysique de Paris, 98bis, Bd. Arago 75014 PARIS (Fax : 01 44 32 80 01 ; e-mail : delmas@iap.fr), Cette fiche se trouve également sur le site du CLEA.

Renseignements : <http://www.ac-nice.fr/clea/> ou jripert@ac-toulouse.fr

L'astronomie dans les programmes

Au lycée le programme de seconde (cf CC n° 88) et les TPE (pensez à décrire vos expériences dans les Cahiers) sont mis en place depuis deux ans.

Au collège, les itinéraires de découverte : ils seront obligatoires en cinquième à la rentrée 2002 et en quatrième en 2003 (démarche voisine de celle des TPE, mais les sujets sont imposés par les profs). Dans ce cadre, l'astronomie apparaît au niveau des exemples proposés dans deux des quatre domaines obligatoires (nature et corps humain ; arts et humanités ; langues et civilisations ; création et techniques).
Création et techniques : les calendriers et les instruments de mesure du temps.
Nature et corps humain : lire le ciel.

A l'école : le PRESTE (plan de rénovation de l'enseignement des sciences à l'école). Une des 8 parties du programme de science s'appelle "le ciel et la Terre" décomposée en 7 points : la lumière et les ombres ; les points cardinaux et la boussole ; le mouvement apparent du Soleil. La durée du jour et son évolution au cours des saisons ; la rotation de la Terre sur elle-même et ses conséquences ; le système solaire et l'Univers ; mesures des durées, unités ; manifestations de l'activité de la Terre (volcans, séismes).

L'enseignement obligatoire des sciences doit se faire dans l'esprit de la "main à la pâte", à partir d'expériences.

Voilà du travail en perspective pour le CLEA, que ce soit dans les stages, dans la prochaine école d'été ou dans la production de documents ou d'articles.

Chers amis du CLEA,

J'ai fait, l'autre nuit, un cauchemar aussi affreux que stupide. Je ne trouvais plus la traduction du sigle CLEA et imaginer Cauchemar Libidineux des Eléphants Arthritiques ne pouvait être la solution (dans mon cauchemar, je gardais une lueur de raison).

Mais Colloque de Lecture des Ecrivains Aphones me sembla devoir être écarté, de même que Commission

de Lancement des Enormités Audaieuses, idées saugrenues qu'interpréterait sans doute un psychanalyste. Je crus avoir trouvé avec Cercle des Labyrinthes Ensemencés d'Asphodèles. Mais non vraiment, je m'égarais.

Un effort de méthode : pour commencer Comité de Liaison me parut un bon début. Mais qu'est ce qui pouvait bien relier ce Comité ? Ni des écrivains, ni des éléphants, ni des asphodèles.

Alors, la digestion dut reprendre son cours normal, ma nuit s'éclaircissait, je me retrouvai un matin de 1984 à Formiguères et la liaison devenait évidente entre Enseignants et Astronomes.

Tout à fait réveillé, je me souviens de la question de Jean-Pierre Changeux : "Pourquoi n'existe-t-il pas un CLEB, Comité de Liaison Enseignants Biologistes ?"

Pas compétents pour répondre au biologiste, reconnaissons, ce que nous savons bien, c'est que le CLEA existe et pourquoi il est né. S'il n'avait pas été couvé, lors d'une belle journée de septembre 1976 à Grenoble, par l'équipe du Laboratoire d'Astronomie d'Orsay, nous ne serions pas, physiquement ou par la pensée ce soir du 17 novembre 2001 à Lyon.

Chers Amis, vive la fraternité enseignante et astronomique.

K. Mizar

A Propos de la couverture

Le bandeau supérieur :

Le numéro de l'année 2002 est palindromique, d'où le prétexte à dessiner "en miroir" le second "2".

Saturne et Jupiter sont à l'honneur : la plus grande ouverture des anneaux de Saturne est atteinte cette année. Chacune des deux géantes est 13 fois en conjonction avec la Lune (une fois par lunaison), mais surtout notre satellite occulte 3 fois Jupiter et 5 fois Saturne (même si ces phénomènes ne sont pas tous observables depuis nos régions). Quant à la Lune, elle figure dans les deux zéros de 2002 : le diamètre apparent maximum (le 27.02) et le minimum (le 14.03) sont tracés à la même échelle donc comparables. Le 14 mars est la date de la plus grande dis-

tance Terre-Lune pour tout le 21ème siècle !

Le reste de la page :

Un paysage à l'horizon bien dégagé avec le ciel du 14 mai en début de nuit. Au sol, à gauche, tous les amis du CLEA auront reconnu Lucienne, à l'oculaire de la lunette, et Gilbert en montreur de planètes. Était-il pensable de ne pas les honorer (après l'Académie des Sciences) sur la couverture de nos chers Cahiers ? Ils nous ont si bien montré le chemin. Merci.

Dans le ciel, quelques repères : l'équateur, l'écliptique, le méridien de 6 heures ; le Soleil (sous l'horizon) et les planètes, petites cibles entourées de rayons. Dans l'ordre, en montant : Mercure, Saturne, Mars, Vénus, Jupiter ; la Lune, proche de Mars et de Vénus et, à gauche de ce groupe, un point entouré d'un petit carré...

Suggestions :

En utilisant, par exemple, les éphémérides 2002 de la Société Astronomique de France, nos collègues peuvent construire, à partir de cette image, de petits problèmes pour les élèves :

- à quelle latitude se trouve l'observateur ?
- quelle est l'échelle moyenne du dessin ?
- quel est l'azimut du milieu de l'horizon ?
- peut-on retrouver la date de la scène et le nom des planètes ?
- la Lune, presque sur l'écliptique est-elle au nœud ascendant ou descendant de son orbite ?
- toutes les étoiles du dessin sont elles observables dans ce crépuscule ?
- quel est donc cet objet figuré par le point entouré du carré, non loin de Vénus ?

Les amoureux des nombres pourront se plonger dans la suite des années écrites sous forme de palindromes, de l'an 11 jusqu'en 2002 et au delà, et explorer les récurrences entre les intervalles...

Pour finir, je rappellerai l'adage souvent cité par l'ami Victor Tryoën : "les Gémeaux se lèvent couchés et se couchent debout".

Bon courage à tous.

Daniel Bardin.

Réponse aux lecteurs :

Nous avons reçu une lettre de Mr. Pascal, de Forges les Bains, faisant des critiques et des remarques très intéressantes sur l'article "Testons la vitesse de la lumière" de G. Paturel et P. Valvin (CC96). Nous ne reproduisons pas in extenso la lettre qui est très longue (3 pages) mais un des auteurs (GP) répond.

1) "Mesurons la vitesse de la lumière" n'aurait-il pas été un meilleur titre ?

La vitesse de la lumière étant fixée par convention nous avons préféré dire "testons".

2) Pourquoi les auteurs mettent-ils une incertitude sur cette valeur ?

C'est juste. L'incertitude est celle d'avant la convention.

3) Un tout petit peu d'Histoire n'aurait pas nui dans l'introduction.

Nous avons consacré trois articles (CC 83, 84 et 85) sur le sujet. Nous n'avons pas voulu nous répéter.

4) J'aurais aimé savoir toutes les caractéristiques. Quel laser, quelle longueur d'onde, quelle puissance, pourquoi un laser, jusqu'à quelle fréquence est-il modulable ? [Pour] le récepteur, quelle photodiode ? Quel est son courant d'obscurité, sa capacité parasite ? [Pour] l'oscilloscope : quel temps de montée, vitesse maxi de balayage ? A-t-il une entrée synchro ? Notre but était de donner envie aux lecteurs de faire l'expérience eux-mêmes,

mais pas nécessairement avec le même matériel. Je vous donne néanmoins les quelques caractéristiques que je connais (une partie du matériel ne nous a été prêté que le temps d'une soirée).

Laser : Vector Technology. Longueur d'onde : 660-690 nm, puissance 3 mW, fréquence maximale de modulation : 50 MHz, collimaté par une lentille ajustable. Le laser, acheté pour une autre manip, devait nous permettre d'avoir une longue portée.

Diode réceptrice : Photodiode PIN BPX 65, Courant d'obscurité et capacité : 5nA et 15pf sous 20V.

Oscilloscope : 2 voies 100 MHz

5) Description de l'expérience. Un dessin vaut mieux qu'un long discours.

Vous avez tout à fait raison. Je donne donc ci-dessous un dessin inspiré de celui que vous suggériez.

6) [Améliorations :] Il ne faut pas utiliser des transistors 2N2222 ... mais un amplificateur opérationnel... [un miroir] 'œil de chat'... un petit télescope... la photodiode de réception étant mise à la place de l'oculaire.

Vos suggestions sont toutes excellentes, en particulier le montage de la photodiode réceptrice combinée à une optique aurait été très bénéfique. Nous avons pensé à certaines de vos suggestions, malheureusement, nous manquions de temps et d'aide technique.

7)[La] valeur ne correspond pas au résultat trouvé.

Il y a effectivement quelques erreurs. Tout d'abord la longueur du trajet

optique est 2L2-L1, car L1 était mesurée de l'émetteur au récepteur (le trajet n'étant pas un simple aller-retour mais une réflexion sur un dièdre). Quant aux décalages publiés, je ne peux malheureusement pas les vérifier facilement. S'il n'y a pas eu de faute de recopie de ma part, la valeur finale serait 270000 ± 60000 km/s. L'erreur est l'erreur sur la valeur moyenne, c'est à dire l'écart type divisé par la racine carrée du nombre de mesures. Notons qu'il s'agit d'une erreur interne qui ne prend pas en compte les erreurs systématiques de la méthode.

8) Les auteurs donnent 2 chiffres après la virgule pour Δt et 6 chiffres significatifs pour la vitesse. Les articles devraient être d'une rigueur irréprochable.

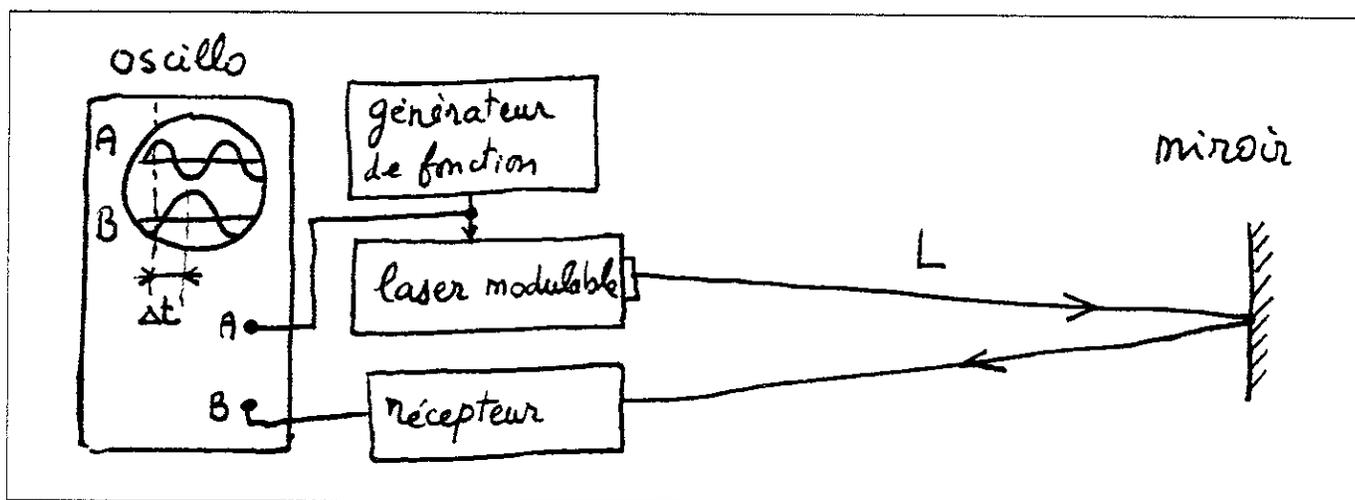
C'est effectivement incorrect et d'autant plus maladroit qu'un arrondi puissant aurait donné l'illusion d'une mesure plus précise $300\ 000 \pm 60000$ km/s.

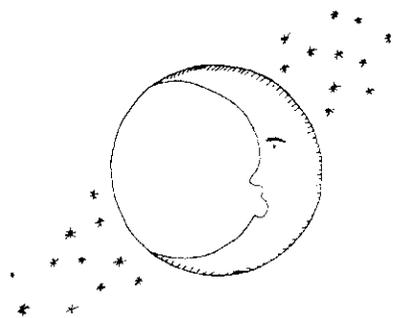
Je ne peux qu'être d'accord avec la recherche de rigueur, surtout si elle n'engendre pas la lourdeur.

Voilà pour les critiques. L'auteur de la lettre nous reconforte un peu en concluant : "malgré ses quelques imperfections, je trouve ce genre d'article extrêmement intéressant et digne de figurer dans les Cahiers Clairaut".

Merci. Votre lettre nous encourage à essayer de faire mieux la prochaine fois. Les réactions des lecteurs sont effectivement très stimulantes.

G. Paturel.





Les quasars les plus lointains révèlent l'Univers à l'époque de sa réionisation

Lucette Bottinelli

LES POTINS DE LA VOIE LACTÉE

Une nouvelle avancée en cosmologie : la spectroscopie à haute résolution de quasars de décalage spectral relatif z supérieur à 5,5 permet de mettre en évidence pour la première fois l'effet Gunn-Peterson prédit il y a plus de 35 ans et de cerner l'époque où les objets primordiaux de l'Univers se sont formés et ont enclenché une nouvelle phase d'ionisation du milieu intergalactique d'hydrogène neutre.

En 1965, deux ans après la découverte des quasars et la reconnaissance de leur grand éloignement (déduit de leur grand décalage spectral z), James Gunn et Bruce Peterson avaient attiré l'attention sur une particularité qui devrait être observée dans leur spectre au voisinage de l'intense raie en émission Lyman alpha qu'ils émettent dans l'ultraviolet ; on rappelle que cette raie correspond à la transition de l'atome d'hydrogène neutre entre le niveau fondamental et le premier niveau excité (longueur d'onde au repos $\lambda_e = 121,6$ nm). Compte tenu de la présence d'un milieu intergalactique constitué essentiellement d'hydrogène neutre entre le quasar et l'observateur, le rayonnement du quasar doit être affecté par une absorption continue tout au long de son trajet et l'intensité du rayonnement du quasar devrait montrer une nette diminution au-delà de la raie Lyman alpha du côté des plus courtes longueurs d'onde ($\lambda < 121,6$ nm). On désigne cette propriété du nom : "effet Gunn-Peterson". Or depuis 35 ans que l'on observe des spectres de quasars, un tel effet n'a jamais été décelé, ce qui conduit à penser que l'hydrogène intergalactique est en fait essentiellement sous forme ionisée. Des observations toutes récentes de quasars, les plus éloignés connus à ce jour, viennent de mettre en évidence pour la première fois, l'effet Gunn-Peterson tant recherché et de préciser que l'époque de réionisation se situe au voisinage de $z = 6$.

Evolution de l'Univers et phase de réionisation

Rappelons la définition du décalage spectral relatif z (ou "redshift") dont il est question. Compte tenu de l'expansion de l'Univers, un rayonnement émis par un quasar à une longueur d'onde λ_e (mesurée dans un système lié à l'astre émetteur) est perçu par l'observateur à une longueur d'onde λ_o (mesurée dans un système lié à l'observateur) et le décalage spectral relatif est défini par la relation : $z = (\lambda_o - \lambda_e) / \lambda_e$. La valeur de z est d'autant plus élevée que l'époque d'émission est reculée dans le temps, si l'on compte à partir de l'époque actuelle ($z = 0$) en remontant dans le temps. Cela signifie aussi qu'observer à des z plus élevés, conduit à observer l'Univers à une époque plus proche du début (le "big bang") de son histoire. Rappelons également les grandes lignes de l'évolution de l'Univers depuis le big bang, à mesure que l'expansion se poursuit : formation des particules élémentaires, puis des noyaux d'hydrogène et d'hélium, phase d'un Univers (matière ionisée) dominé par le rayonnement, transition vers un Univers dominé par la matière neutre et transparent au rayonnement, au voisinage de $z = 1100$ (c'est de cette époque que nous parvient le rayonnement cosmologique de fond de ciel à 2,7 K), enfin formation des structures de l'Univers et des galaxies avec formation des étoiles dans les galaxies. On estime

que l'époque de formation de la première génération de galaxies et de quasars, se situe dans le domaine de z entre 6 et 15 environ. C'est alors qu'entrent en action les premières sources de rayonnement UV qui permet d'ioniser de nouveau le milieu intergalactique ; il s'agit là d'une nouvelle transition - on parle de phase de "réionisation"- avec passage d'un Univers neutre à un Univers essentiellement ionisé. On comprend que la mise en évidence de l'effet Gunn-Peterson nécessite que l'on puisse observer des quasars assez lointains, ayant un z supérieur à celui z_r correspondant à la phase de réionisation.

La chasse aux quasars lointains

Les possibilités des grands télescopes ont permis depuis 1999, de reculer la frontière observationnelle vers les grands décalages spectraux ; ainsi les détections toutes récentes de spectres de quasars présentant les décalages suivants : $z = 5,73$; $5,82$; $5,99$; $6,28$. Les décalages sont si importants que l'émission de la raie Lyman alpha qui se produit dans l'UV est observée dans le spectre optique du côté du proche infrarouge ; pour les quasars cités cela se situe de $\lambda_o = 818$ à 885 nm environ. La limite de la série de Lyman ($\lambda_e = 91,2$ nm) est observée dans le spectre optique de $\lambda_o = 613$ à 664 nm environ. Un premier travail de fond a consisté à découvrir des nouveaux quasars à grand z avant d'en faire l'analyse spectrale détaillée. Depuis 2 ans a été mené un relevé systématique du ciel (appelé SDSS pour "Sloan Digital Sky Survey") en utilisant un télescope de $2,5$ m (dédié à cette tâche) et une caméra CCD grand format pour réaliser des images dans 5 bandes (centrées à $\lambda = 355,1$; $468,6$; $616,6$; $748,0$; $893,2$ nm), couvrant $10\,000$ degrés carrés sur le ciel et à haute latitude galactique ; ce télescope est situé au Nouveau Mexique (Apache Point Observatory). L'extraction des quasars potentiels parmi toutes les sources recensées se fait par une analyse des magnitudes et des couleurs, des observations photométriques et enfin par des observations spectroscopiques pour mesurer le décalage spectral. Ainsi plus de 200 quasars ayant des z supérieurs à $3,5$ ont été

découverts jusqu'à présent, notamment les 4 quasars à grand z cités précédemment, et en principe cette technique devrait permettre de découvrir des quasars jusqu'à $z = 6,5$ environ. Par ailleurs, des spectres à haute résolution ont été obtenus à partir de spectrographes associés au télescope Keck dans le domaine couvrant 550 à 950 nm.

Absorption Lyman alpha

Un Univers en expansion rempli d'hydrogène neutre constituerait une barrière opaque aux photons émis avec une longueur d'onde λ inférieure à $121,6$ nm (ce qui correspond à des énergies supérieures à la valeur $10,2$ eV, énergie associée à la transition de la raie Lyman alpha). Même un petit résidu d'hydrogène neutre sur le trajet entre la lumière intense en Lyman alpha émise par le quasar et l'observateur est une barrière d'absorption efficace. Sur la ligne de visée on rencontre, compte tenu de l'expansion, de l'hydrogène neutre présentant tous les décalages z compris entre z_q (le "redshift" du quasar) et $z = 0$ (l'observateur) ; ainsi le résultat global de cette absorption affectera toutes les longueurs d'onde plus courtes que $121,6$ nm observées dans le spectre du quasar. C'est ce que prédit l'effet Gunn-Peterson : on s'attend à une chute brutale du niveau de flux au-delà de raie Lyman alpha du côté des plus petites longueurs d'onde.

Par ailleurs, les photons ultraviolets d'énergie supérieure à la limite de la série de Lyman (soit $13,6$ eV) peuvent ioniser les atomes d'hydrogène neutre. Comme cela a été dit précédemment le phénomène sera efficace dès la formation des premières protogalaxies et quasars, marquant l'époque de réionisation de l'Univers (repérée par z_r). Le milieu intergalactique étant alors devenu essentiellement ionisé, l'absorption par l'hydrogène neutre décrite précédemment ne sera plus efficace et l'effet Gunn-Peterson sera négligeable pour les émetteurs avec z inférieur à z_r .

Spectre des quasars

La spectroscopie détaillée des quatre quasars cités précédemment met en évidence pour la première fois le

phénomène attendu (chute brutale de flux) mais révèle aussi une situation plus complexe sur la structure du milieu intergalactique.

La première étude faite avec le quasar dont $z = 5,73$, à partir d'une pose de $5,5$ h avec le télescope de 10 m Keck II (situé sur le Mauna Kea à Hawaii) indique un flux pratiquement nul pour λ_o supérieur à 755 nm, alors que l'émission du quasar est nettement détectée au voisinage de la raie Lyman alpha (noter que cette raie en émission du quasar est centrée à $\lambda_o = 818$ nm). La région d'absorption (λ_o supérieur à 755 nm) correspond à $z > z_{abs}$ avec $z_{abs} = (755 - 121,6) / 121,6 = 5,3$. Compte tenu de la présence d'un très petit nombre de régions étroites non absorbées dans la partie $\lambda_o > 755$ nm du spectre, les auteurs concluent qu'il s'agit là de la signature de la fin de l'époque de réionisation ; cette phase s'étendrait en fait de $z = 6$ environ à $z = 5,3$.

La seconde étude concerne les 3 autres quasars, de plus grands décalages et montre clairement la présence d'un effet Gunn-Peterson à part entière, causé par l'absorption par l'hydrogène neutre pour le quasar dont $z = 6,28$. Dans ce cas l'absorption totale apparaît pour $\lambda_o > 845$ nm (ce qui correspond à $z_{abs} = 5,95$). Un autre résultat important est qu'il y a une évolution rapide de l'absorption moyenne dans ces quasars à grands z avec une augmentation très brutale de celle-ci au-delà de $z = 5,8$. L'interprétation des auteurs est que l'ionisation diminue significativement entre $z = 5$ et $z = 6$, l'Univers doit être très proche de l'époque de réionisation à $z = 6$.

Cette étape marque une découverte très importante pour la cosmologie et ouvre la voie à l'étude observationnelle de l'Univers à l'époque de réionisation, à partir de quasars de décalages encore plus élevés et de l'analyse à haute résolution de leur spectre. Ainsi le relevé SDSS devrait permettre de découvrir une vingtaine de quasars de z supérieur à 6 . Un autre aspect important sera aussi la détection directe des sources lumineuses responsables de la réionisation à ces décalages élevés et la détermination de leurs caractéristiques. ■

**Transparents animés
pour rétroprojecteurs**
(8 €)

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

Filtres colorés

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

CD Rom CLEA 2000

Sciences physiques en seconde
Programme 2000 (8 €)

DIAPPOSITIVES

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

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

Publications du **CLEA**

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



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

Chèques à l'ordre du CLEA.

Les fiches d'activités pédagogiques du CLEA

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

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

Cours photocopiés d'astrophysique

Maîtrise de l'université
Paris XI Orsay

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

CONDITIONS D'ADHESION ET D'ABONNEMENT POUR 2002

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

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

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

Publications

FASCICULES POUR LA FORMATION DES MAITRES EN ASTRONOMIE

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

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

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

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