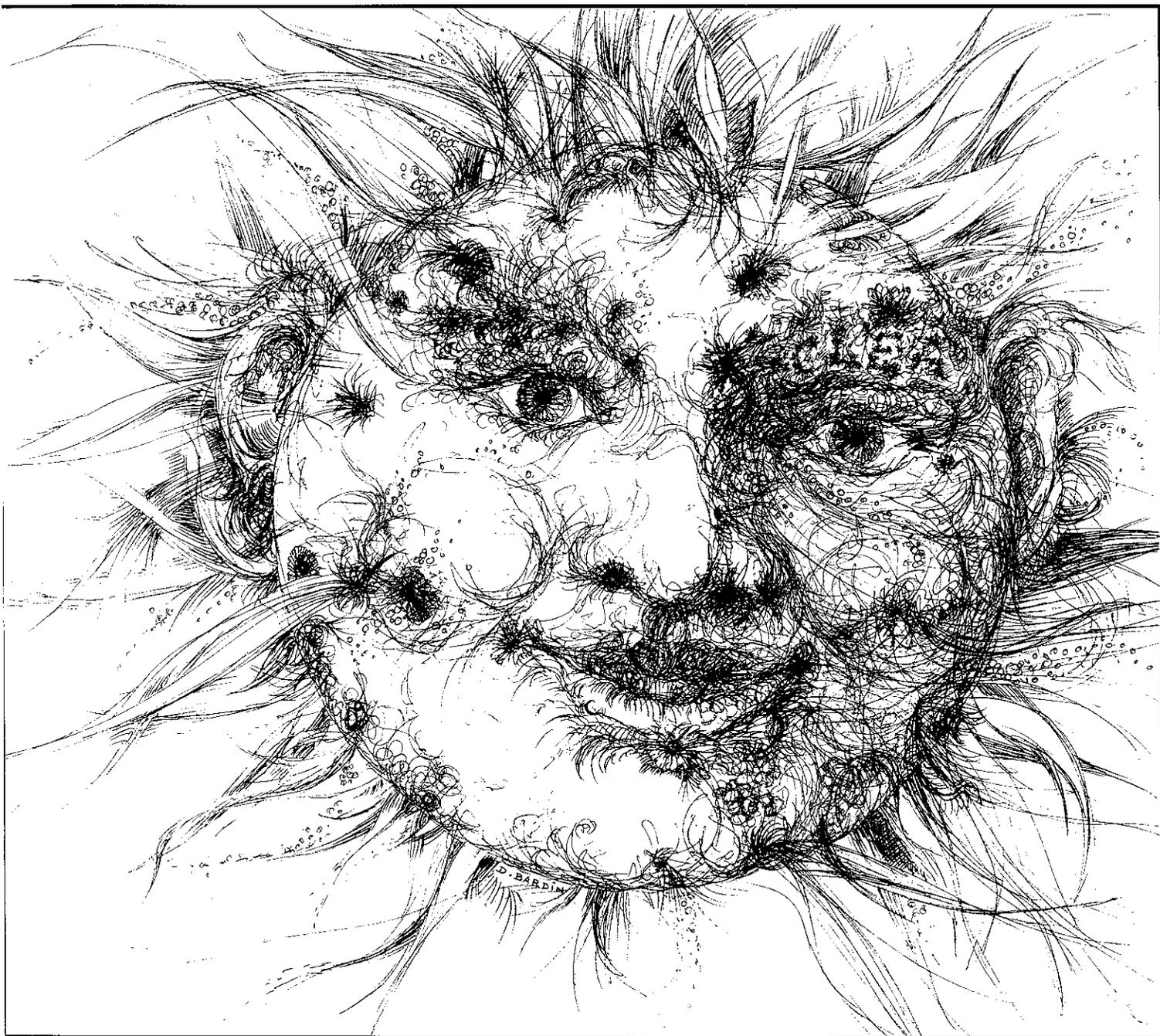


les cahiers clairaut

bulletin du comité de liaison enseignants et astronomes



N° 55 - AUTOMNE 1991

ISSN 0758-234 X

LE CLEA - COMITE DE LIAISON ENSEIGNANTS ET ASTRONOMES

Le C L E A, Comité de Liaison Enseignants et Astronomes, est une association séclarée (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 public et dans les organismes de culture populaire. En particulier, ils agissent dans le cadre de la formation initiale et continue des enseignants.

Le CLEA intervient par l'organisation de stages et par ses diverses publications.

Le CLEA organise des stages nationaux (universités d'été) et régionaux, éventuellement en liaison avec les Missions Académiques de Formation ou tous organismes de formation des enseignants. Ces stages sont ouverts aux enseignants de l'école primaire, du collège, du lycée et de l'IUFM. On s'efforce d'y conjuguer information théorique indispensable et travaux pratiques (observations, travaux sur documents, mise au point de matériels didactiques et bon usage de ces matériels).

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

La liste des publications du CLEA figure en pages 3 et 4 de la couverture.

Bureau du CLEA pour 1991

Présidents d'honneur : Jean-Claude Pecker

Evry Schatzman

Présidente : Lucienne Gouguenheim

Vice-Présidents : Agnès Acker

Alain Dargencourt

Marie-France Duval

Hubert Gié

Catherine Vignon

Secrétaire-trésorier : Gilbert Walusinski, 26 Bérengère, 92210 SAINT CLOUD
tél (1) 47 71 69 09

Comité de rédaction des Cahiers Clairaut : Daniel Bardin, Lucette Bottinelli, Jacques Dupré, Michèle Gerbaldi, Lucienne Gouguenheim, Jean-Paul Parisot, Georges Paturel, Jean Ripert, Daniel Toussaint, Victor Tryoën, Gilbert Walusinski.

LES CAHIERS CLAIRAUT

Automne 1991

	page
L'Equateur et les Pôles du Système Solaire.....	2
Les mots de l'Astronomie	8
Bonheur à l'ombre de la Lune	11
La perception des concepts astronomiques chez les élèves (suite et fin)	13
Enseigner l'astronomie à l'école primaire et au collège : pourquoi ?	18
Les potins de la Voie Lactée	21
L'oeuvre astronomique de Clairaut	25
De qui est-ce ?	30
Lectures pour la Marquise	31
Origines du Bureau des Longitudes	34
Chronique du CLEA - Courrier des Lecteurs	40
Retenez bien cette date	40

EDITORIAL

L'été a été riche en événements pour le CLEA : deux Universités d'été dont nous espérons quelques échos écrits pour le prochain numéro des Cahiers (mais les premiers échos par bouche à oreille sont très positifs...), une éclipse de Soleil dont Liliane Sarrazin nous raconte ici avec quel bonheur elle l'a vécue, une rencontre internationale pour Lucette Bottinelli, Michèle Gerbaldi et Lucienne Gouguenheim, à l'occasion de l'Assemblée Générale de L'Union Astronomique Internationale à Buenos-Aires... L'occasion d'apprendre que les collègues roumains souhaitent recevoir de la documentation - de préférence en langue française - pour travailler au mieux à la réintroduction de l'astronomie au lycée ; de découvrir le travail splendide de Julieta Fierro, au Mexique, et son TranSoLuTe géant dans le métro de Mexico.... Il y aurait un public de langue espagnole pour les Cahiers ... La première étape serait de traduire du français en espagnol les deux numéros hors-série. Tout hispanisant bénévole et candidat à la diffusion du CLEA en Espagne et en Amérique latine peut se faire connaître auprès de la rédaction des Cahiers : il sera très bien accueilli !

Il est aussi question de diffuser les diapositives et les transparents auprès de lecteurs de langue espagnole et anglaise : là encore, un appel aux traducteurs est lancé. Merci à l'avance.

La transition est facile, qui conduit à remercier une nouvelle fois Jacques Vialle pour les articles de Nussbaum et d'Estellela qu'il a traduits pour nous. Merci aussi à René Dumont, fidèle lecteur et auteur de l'observatoire de Bordeaux, à Danièle Fauque et à notre infatigable secrétaire-trésorier-rédacteur en chef, Gilbert Walusinski.

Le CLEA a toujours soutenu la décentralisation, comme en témoigne la composition de son Conseil ; un nouveau pas dans ce sens va être fait : c'est Marie-France Duval et l'équipe CLEA de Marseille qui vont organiser la prochaine Assemblée Générale du 16 novembre.

Bonne rentrée à tous.

La Rédaction

L'Equateur et les Pôles du Système Solaire

L'équateur et les pôles de la Terre sont des notions familières, bien matérialisées par les globes terrestres. La trace sur la sphère céleste du plan équatorial, et celle de l'axe des pôles, sont faciles à visualiser. Dans sa rotation, le Soleil a de même son équateur et ses pôles; chaque planète aussi.

Mais si on mélange le tout? Pour un ensemble déformable, aussi divers et changeant que l'est le système solaire, ces expressions ont-elles un sens?

Non seulement elles sont justifiées, mais dans l'extrême complexité des mouvements relatifs de tous ses composants, le seul îlot de simplicité, et d'invariabilité, réside dans l'équateur du système solaire, et dans la ligne de ses pôles qui lui est orthogonale.

Jupiter seul face au Soleil

Si le cortège planétaire du Soleil se réduisait à son élément le plus important - Jupiter - tout serait à la fois simple et immuable. Les deux astres tourneraient autour de leur centre d'inertie commun. La masse du Soleil valant 1047 fois celle de Jupiter, et leur distance valant 1118 fois le rayon r_{\odot} du Soleil, le centre d'inertie serait - de justesse - à l'extérieur du Soleil, juste au dessus de la photosphère. Comme les autres étoiles sont beaucoup trop loin pour perturber le couple (Jupiter est distant du Soleil de moins de 3/4 d'heure de lumière; les étoiles, de plus de 4 années), les centres des deux astres tourneraient dans un plan unique et invariable, qui serait l'équateur de ce système solaire fort appauvri. La normale à ce plan

issue du centre O d'inertie serait l'axe de révolution du couple; il percerait la sphère céleste en deux points, l'un au nord dans la constellation du Dragon, l'autre au sud dans celle de la Dorade, et ces pôles ne varieraient pas.

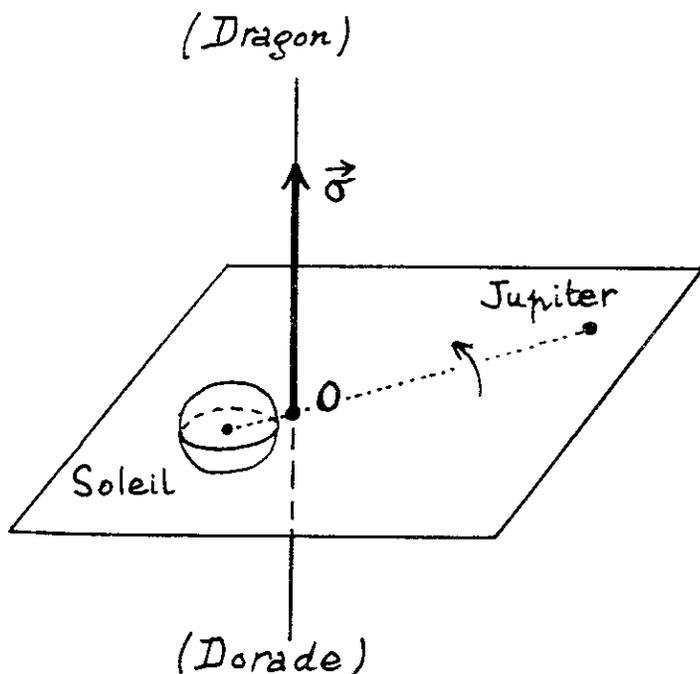


fig. 1

Le mouvement obéirait naturellement aux lois rappelées par M. Hubert Gié dans son excellent panorama du " moment cinétique à travers l'univers" (Cahier Clairaut de décembre 1987, n°39, p.9): les deux astres décriraient des ellipses de foyer commun O, les rayons vecteurs \vec{OS} et \vec{OJ} balayant des aires proportionnelles aux temps. Les quantités de mouvement

$$m_{\odot} \vec{v}_{\odot} \quad \text{et} \quad m_j \vec{v}_j$$

sans cesse variables, auraient des moments

$$\vec{OS} \wedge m_{\odot} \vec{v}_{\odot} = \vec{\sigma}_{\odot} \quad \text{et} \quad \vec{OJ} \wedge m_j \vec{v}_j = \vec{\sigma}_j$$

dont la somme, en l'absence d'actions extérieures, resterait constante (théorème du moment cinétique). Cette somme

$$\vec{\sigma} = \vec{\sigma}_{\odot} + \vec{\sigma}_j$$

serait un vecteur fixe, porté par l'axe et pointant le Dragon. Les distances et les vitesses resteraient toujours dans le même rapport que les masses; mais le Soleil n'ayant pour lui qu'un seul de ces trois facteurs, et Jupiter les deux autres, les contributions à σ seraient dans le rapport inverse des masses, et le Soleil posséderait donc moins du millième du moment cinétique global.

Avec en plus Saturne... et les autres

Que reste-t-il de cette simplicité képlérienne lorsque nous réintroduisons les autres planètes? La seule entrée en scène de Saturne, troisième corps dans la hiérarchie des masses, engendre déjà bien des complications. Les deux planètes orbitent dans des plans voisins, mais distincts (qui font un angle de plus de 1°). A une époque donnée, on peut encore regarder leurs trajectoires comme des ellipses, mais des ellipses qui se déforment lentement, à cause de leur attraction mutuelle. Quant à la trajectoire du Soleil autour du centre d'inertie, on

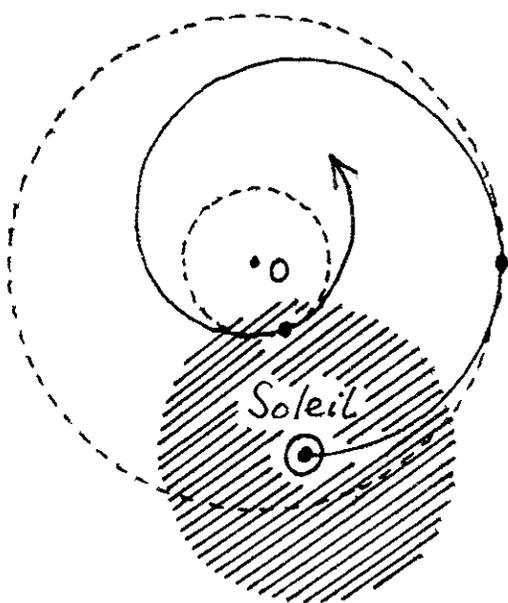


fig. 2

peut voir qu'elle n'a plus grand'chose de commun avec une ellipse. En effet, lorsque les trois astres sont alignés, le centre d'inertie, qui est toujours du côté de Jupiter, se trouve à $0,48 r_{\odot}$ du centre du Soleil si les deux planètes sont de part et d'autre, et à $1,65 r_{\odot}$ du centre du Soleil si elles sont d'un même côté.

Chacune de ces configurations se reproduit tous les 20 ans environ, après que Jupiter ait tourné de 1,68 tour et Saturne de 0,68 tour. L'orbite du Soleil autour de O comprend donc des points sur chacun des deux cercles concentriques de rayons $0,48$ et $1,65 r_{\odot}$; ces points sont alternativement sur le grand et sur le petit cercle, avec chaque fois un écartement angulaire de $1,68/2 = 0,84$ tour $\# 300^{\circ}$. La trajectoire solaire remplit d'entrelacs la couronne comprise entre

les deux cercles, avec en outre de petites oscillations perpendiculairement au plan de la fig. 2, puisque les deux planètes circulent dans des plans différents. Quant au vecteur moment cinétique total

$$\vec{\sigma} = \vec{\sigma}_{\odot} + \vec{\sigma}_j + \vec{\sigma}_s$$

il reste invariable en grandeur et en direction; la seule différence avec le cas précédent est que ses composants ne seront plus colinéaires (fig. 3).

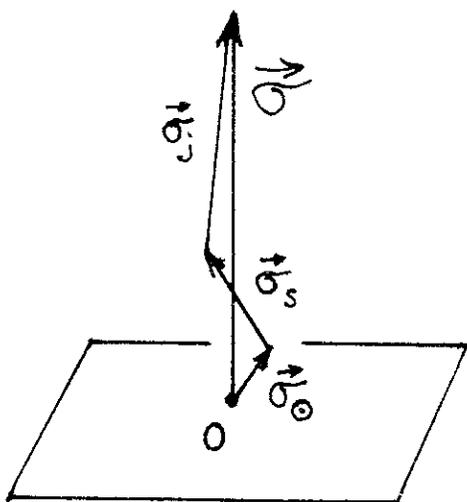


fig. 3

Il en va naturellement de même quand on tient compte de toutes les planètes: la résultante $\vec{\sigma}$ des moments cinétiques, qui varient tous, reste constante, et définit l'équateur et les pôles du système solaire. La simplicité de ce résultat contraste immensément avec la complexité des mouvements individuels, dont tous les éléments évoluent: Les plans des orbites qui basculent lentement, ainsi que les excentricités, les périhélies, et, dans une moindre mesure, les

demi-grands-axes et les périodes de révolution.

La rotation du Soleil

Je n'ai tenu compte jusqu'ici que des moments cinétiques orbitaux, comme si les astres ne tournaient pas sur eux-mêmes. Or, dès le début de son article, M. Gié introduit le moment cinétique propre ou de rotation, et montre que le vecteur $\vec{\sigma}$ qui reste invariant dans un système isolé est la somme de tous les moments cinétiques, y compris ceux de rotation.

Oublier la rotation du Soleil dans une théorie sur les moments cinétiques de son système est une mésaventure dont les meilleurs esprits ne sont pas à l'abri, puisqu'elle n'épargna pas Pierre-Simon Laplace, dans sa " Mécanique Céleste ", publiée de 1799 à 1825. Ce fut Louis Poincot qui s'en avisa, et qui rectifia l'omission en 1834 dans sa " Théorie et détermination de l'équateur du système solaire ". Le terme oublié par Laplace est d'ailleurs moindre que ne le croyait Poincot, car on estime maintenant que, par suite de la répartition interne de sa masse, le Soleil n'aurait pour moment cinétique rotatoire que 16% de celui d'une sphère homogène. Quoi qu'il en soit, si les moments cinétiques de rotation des planètes sont entièrement négligeables, celui du Soleil dépasse les moments orbitaux de plusieurs planètes.

Recensement et cartographie des moments cinétiques

Le tableau ci-contre rassemble les moments cinétiques qui excèdent $10^{47} \text{ g cm}^2 \text{ s}^{-1}$. Moments cinétiques (en $10^{47} \text{ g cm}^2 \text{ s}^{-1}$)

<u>-orbitaux:</u>	
Soleil	≈ 3
Vénus	1,8
Terre	2,7
Jupiter	1930
Saturne	781
Uranus	170
Neptune	252
(somme de tous les autres)	≈ 0,6
<u>-de rotation:</u>	
Soleil	16,5

Il ne diffère du cours de Mécanique de Berkeley, sur lequel s'appuie M. Gié, qu'à propos de la rotation solaire, ainsi que de Pluton - dont la masse, autrefois égalée à celle de la Terre, est reconnue 500 fois plus faible depuis la découverte de son satellite Charon.

La prépondérance des quatre grosses planètes est donc très forte. Si on reporte sur une carte du ciel les pôles actuels de leurs orbites - soit J,S,U,N - le barycentre

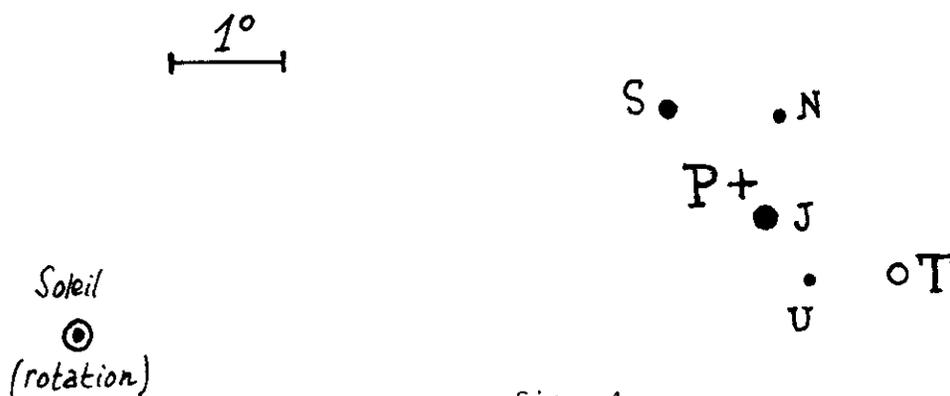


fig. 4

de ces points, affectés des moments cinétiques respectifs, sera donc très proche du " pôle " P du système solaire. Le pôle de rotation du Soleil, qui est loin de la concentration J-S-U-N, déplace vers lui le pôle P d'environ 2', par rapport au barycentre des quatre points. La Terre, et les autres planètes, n'agissent sur la position de P que d'un tout petit nombre de " d'arc.

Tous les points de la fig. 4 se déplacent avec le temps, sauf P qui reste fixe par rapport aux étoiles. En particulier, T qui est le pôle de l'orbite terrestre, ou pôle de l'écliptique, perd chaque siècle 0,2% de sa distance angulaire à P, qui vaut actuellement 1°37'. Il y a une petite migration parmi les étoiles du pôle de l'orbite de la Terre, qui est seulement 20 fois plus lente que la migration de son pôle de rotation (la précession des équinoxes, qui nous privera bientôt de notre étoile polaire).

La position de l'axe de rotation solaire, à 6° de la concentration J-S-U-N (entièrement contenue dans un cercle de 1° de rayon) a de quoi surprendre. Celle de T également, car les pôles orbitaux des 3 planètes telluriques non représentées sur la fig. 4 (Mercure, Vénus, Mars) sont plutôt du côté de l'axe de rotation solaire. Si l'on excepte Pluton - marginale à tant d'égards - la Terre est la seule planète dont l'axe de l'orbite fasse avec l'axe de rotation du Soleil un angle de plus de 7°.

Le nuage zodiacal

L'espace interplanétaire est occupé par un nuage de grains solides ayant en moyenne 1/100 de mm. de diamètre. Ce nuage est aplati en forme de lentille et il dépasse largement l'orbite de Mars, au moins. Ces grains brillent au soleil, et rendent un peu plus lumineuse que le reste du ciel une " bande zodiacale " ayant à peu près l'écliptique pour ligne médiane.

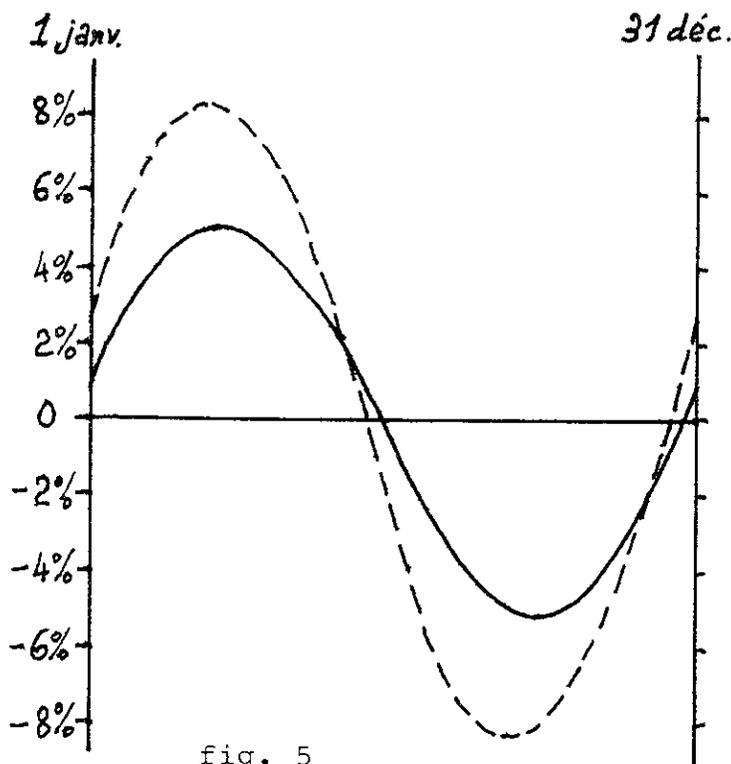


fig. 5

Variation annuelle de la brillance du ciel vers le pôle nord de l'écliptique; — dans le visible (satellite D2A, 1978); --- dans l'infra-rouge à 25 μm (satellite IRAS, 1984).

Sa trace exacte sur le ciel a peu de chances d'être l'écliptique, qui est un plan lié uniquement à la Terre (ou au système Terre-Lune, plus exactement). Jusqu'au XVIIIe siècle, sans doute pour avoir davantage théorisé qu'observé, on a cru que son plan de symétrie était celui de l'équateur du Soleil.

Pour déterminer l'écart entre l'écliptique et le plan de symétrie du nuage zodiacal, la meilleure méthode consiste à viser vers les pôles de l'écliptique. Comme la Terre passe alternativement d'un côté puis de l'autre du plan moyen du nuage, la brillance du ciel dans l'une ou l'autre de ces directions va montrer tantôt un excédent, tantôt un déficit; on doit s'attendre à des variations annuelles sinusoidales, avec une opposition de phase entre nord et sud.

La phase de ces oscillations fournit directement

l'intersection du plan de symétrie avec l'écliptique; l'angle des deux plans s'obtient, presque aussi facilement, d'après l'amplitude.

Appliquée aussi bien à des observations de brillance dans le spectre visible, telles que celles du satellite D2A, qu'à des observations dans l'infra-rouge (émission thermique des poussières, détectée par le satellite IRAS), cette méthode donne un plan de symétrie toujours remarquablement voisin de l'équateur du système solaire: tous les résultats sont proches du "paquet" J-S-U-N de la fig. 4. La fig. 5 montre un assez bon accord de phase en les mesures photométriques et les mesures thermiques; l'écart en amplitude provient d'une Physique distincte (diffusion et émission) et n'a rien de contradictoire.

Les grains interplanétaires orbitent autour du Soleil comme les planètes, et dans le même sens, ainsi que le prouve la spectrométrie des raies d'absorption solaires (raies de Fraunhofer) qu'on détecte par diffusion sur les poussières, mais légèrement décalées par l'effet Doppler-Fizeau dû à leur vitesse radiale moyenne le long de la ligne de visée. On voit que la direction du vecteur moment cinétique global des poussières est gouvernée surtout par les planètes joviennes, bien que le gros du nuage ne paraisse pas les atteindre. Il se peut toutefois que, localement, les planètes telluriques infléchissent la surface moyenne du nuage en direction de leurs plans orbitaux respectifs.

Comme le nuage zodiacal a une masse de l'ordre de 10^{-8} fois celle de la Terre, il va sans dire qu'il s'aligne sur le moment cinétique du système solaire, sans avoir aucune réaction sur lui.

Les comètes et le nuage de Oort

Le moment cinétique des comètes périodiques est négligeable lui aussi, mais celles apparaissant pour la première fois proviennent d'un réservoir appelé le nuage de Oort, qui pourrait contenir quelque 10^{13} noyaux et être 30000 fois plus loin du Soleil que n'est la Terre, soit à 1/2 année de lumière. La population, la masse et le moment cinétique du nuage de Oort sont mal connus ; ce dernier serait de l'ordre de 10^{53} g cm² s⁻¹ selon Marochnik et al. (1988), de 10^{51} selon Weissman (1991) - donc supérieur dans les deux cas à celui de l'ensemble des planètes.

Il faut cependant remarquer que les orientations quelconques des orbites des comètes nouvelles doivent beaucoup réduire la résultante de leurs moments cinétiques. D'autre part, l'introduction de corps situés au dixième de la distance de la plus proche étoile ôte sa validité à l'hypothèse des forces extérieures nulles. Ce sont précisément ces forces extérieures - les attractions stellaires - qui perturbent le nuage de Oort, et expédient des noyaux cométaires vers le Soleil.

Nemesis (?)

Il est tentant, bien que cela manque de rigueur pour la raison précédente, de pousser plus loin encore le recensement des contributions possibles au moment cinétique du système solaire.

Nemesis est le nom de la déesse de la vengeance, qu'on a donné à un très hypothétique compagnon stellaire du Soleil, assez discret pour être resté jusqu'ici inobservable, mais dont l'équipe Alvarez à Berkeley postule l'existence. C'est l'une des explications proposées aux variations probables de l'intensité du bombardement météoritique.

Celui-ci, par bonheur, n'est actuellement pas très sévère, encore qu'un petit noyau cométaire ait fait bien du dégât en Sibérie en 1908. Mais l'intensité du bombardement a déjà été plus forte, et, semble-t-il, à des intervalles assez réguliers, comme le montre un faisceau d'argu-

ments tous controversés, mais impressionnant cependant:

- tendance à une périodicité, de 26 Ma (millions d'années) dans le taux de disparition des espèces animales;
- teneur anormalement élevée en iridium (élément rare dans la croûte terrestre, mais courant dans les météorites) dans les couches géologiques contemporaines de ces disparitions d'espèces;
- périodicité invoquée, d'environ 28 Ma, dans les impacts qui ont creusé les plus grands cratères terrestres.

Pour porter une responsabilité dans ces recrudescences de catastrophes, Nemesis devrait avoir, d'après la troisième loi de Képler, un demi-grand-axe orbital de l'ordre de

$(26.106)^{2/3} \approx 88000$ unités astronomiques;

il les provoquerait, lors de ses périhélie, en pénétrant dans le nuage de Oort comme dans un jeu de quilles. Il faut donc lui supposer une orbite excentrique, qui le rejetterait en ce moment non loin de son aphélie, à quelque 150000 u.a. ou 2,3 années de lumière de nous, ce qui est peu pour qu'on ne l'ait pas identifié.

Si Némésis existe, faut-il le faire intervenir dans la théorie des moments cinétiques et de l'équateur du système solaire? Le moment cinétique étant proportionnel à la racine carrée de la distance au Soleil, celui de Nemesis, en supposant à cet astre la même masse qu'à la Terre, égalerait le moment cinétique de Saturne. Doit-on en conclure qu'un Nemesis de masse stellaire, même modeste, posséderait presque tout le moment cinétique circumsolaire, et que l'équateur du système solaire coïnciderait avec son orbite? Non sans doute, car sa distance, bien qu'inférieure à celle d' α Centauri, serait assez grande pour qu'il ne perturbe pas trop le ballet des planètes.

C'est d'une future statistique sur les âges des cratères lunaires, plus nombreux et surtout beaucoup mieux conservés que ceux de la Terre (celui de Rochechouart par exemple, le seul grand de France, est complètement érodé) qu'on peut espérer des indices plus convaincants.

Ce qu'il nous faudrait, c'est le témoignage posthume des dinosaures qui, après plus de 100 Ma de prospérité, se sont éteints assez brusquement vers la limite Crétacé-Tertiaire, il y a 65 Ma environ. Ils nous raconteraient, si cette hypothèse est la bonne, comment ils succombèrent aux désastres écologiques produits par un ou plusieurs gros impacts cométaires - plus intenses, par malchance, que ceux qu'ils avaient déjà essuyés 4 ou 5 fois auparavant... Ou encore, car il faut toujours habiller les pires fléaux d'euphémismes, ils nous diraient comment leur bioclimat s'est altéré par un léger transfert de moment cinétique vers les régions centrales du système solaire.

René Dumont
Observatoire de Bordeaux

LES MOTS DE L'ASTRONOMIE

L'astronomie, comme toute science, dispose d'un vocabulaire spécifique emprunté pour partie à celui de la langue véhiculaire, pour partie aux habitudes et aux traditions des anciens astronomes, pour partie enfin aux besoins de la recherche moderne. Cohabitent ainsi des mots d'origines très diverses ; pensez à nadir, à ascension droite, à anomalie, à pulsar,...

Pour le spécialiste ou l'amateur expérimenté, il n'y a plus de problème de vocabulaire, même s'il en a rencontré lors de son apprentissage.

Pour l'enseignant, c'est une autre affaire. Aux prises avec l'initiation des débutants, il s'efforce d'employer des expressions correctes mais pour expliquer un phénomène ou introduire une notion nouvelle, il peut être tenté d'employer un mot qui fasse image, quitte à créer chez l'élève une difficulté imprévue, l'image entrant en collision dans sa tête avec d'autres images ou d'autres notions.

Il y a plus de trente ans, mon ami regretté J.M.Chevallier qui enseignait les mathématiques au lycée Marcelin Berthelot de St Maur, avait entamé une étude critique sur la mathématique parlée par ceux qui l'enseignaient. Il nous distillait régulièrement d'astucieux articles qui alimentaient, entre nous profs de maths, de fructueux débats. Fructueux même s'ils n'aboutissaient à aucune conclusion unanime. Chacun découvrait, au courant des discussions, des difficultés pédagogiques qu'il ne soupçonnait pas auparavant ; il en tirait leçon et réformait sa façon de parler ou de présenter tels sujet. En discutant avec l'ami Chevallier, nous faisons de la didactique sans le savoir et notre pratique de l'enseignement s'en trouvait enrichie.

Avec la participation des lecteurs des Cahiers Clairaut, ne pouvons-nous pas essayer de faire de même avec les mots et les notions de l'astronomie ?

Méridiens, méridiens,...

A la pétanque, il faut que quelqu'un commence en lançant le cochonnet. Ici je lance le mot méridien qui me paraît ne présenter aucun piège particulier.

Je consulte quelques livres que je garde toujours à portée de main. Le premier est le manuel de Cosmographie écrit par André Danjon et publié en 1948 (éd Hatier ; ici noté AD1). A cette époque les profs de maths enseignaient la cosmographie dans toutes les classes terminales du lycée. L'observation du mouvement diurne ayant permis de définir la ligne des pôles ou axe du monde, voici la définition du méridien :

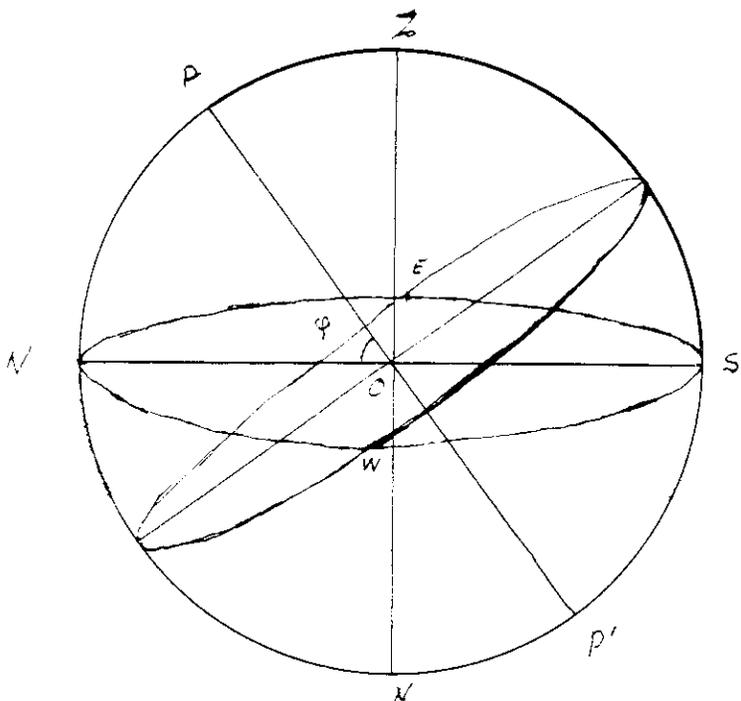
"Le plan qui contient la verticale et l'axe du monde est le méridien astronomique ou géographique du lieu. Il coupe l'horizon suivant la ligne méridienne Nord Sud."

Le même auteur, dans Astronomie générale (éd Blanchard notée ici AD2), son cours de Sorbonne (comme on disait encore en 1952 :

"On appelle méridien astronomique le plan vertical qui contient l'axe du monde."

Dans Astronomie fondamentale élémentaire de Vladimir Kourganoff (éd Masson 1961, notée ici (VK)), le mouvement diurne ayant permis d'identifier le pôle céleste P, il continue :

"Faisons passer par P un cercle vertical appelé méridien PZ et projetons ce méridien sur le plan horizontal (H). La trace ainsi obtenue passe par O et coupe la sphère céleste locale en (N) et (S), ce qui donne la direction



du Nord (N) du côté de P (par rapport à Z) et celle du Sud (S) diamétralement opposée à (N)... Le quart de cercle ZPN - augmenté de son symétrique par rapport au plan (H) - forme ce qu'on appelle le demi méridien Nord. La ligne Nord-Sud (NS) est appelée la Méridienne."

Danjon, dans AD1, prenait soin de définir astronomiquement les coordonnées géographiques. A chaque point du géoïde où avaient été définis la verticale, le plan horizontal, la direction du pôle céleste et la direction Nord-Sud, il fait correspondre un point de la sphère céleste. A deux points G et N sur le géoïde, correspondent g et n sur la sphère céleste et on reconnaît dans les demi cercles pgg' et

pnp' (p et p' étant les pôles célestes) les méridiens astronomiques des lieux G et N.

Pour compléter cette documentation, je consulte ce qu'écrivait Lalande dans son Astronomie de 1771 (notée ici (L), à la page 8 du livre I :

"...le grand cercle passant par le zénith et le nadir et par les pôles sera le méridien. Il est ainsi appelé parce qu'il marque le milieu du jour quand le Soleil y arrive : chaque point de ce cercle est également éloigné de l'horizon à droite et à gauche ; en sorte que tous les astres entre leur lever et leur coucher se trouveront dans le méridien une fois au-dessus de l'horizon et une fois au-dessous après leur coucher."

En dernier recours, je consulte le tome I de Astronomy par Russell-Dugan-Stewart (Ginn and C°, 1945) (Noté ici (RDS)), un manuel en anglais que Paul Couderc m'avait recommandé. On y définit les cercles verticaux, grands cercles de la sphère céleste passant par le zénith :

"Le cercle vertical particulier qui passe par le Nord et le Sud via le pôle est appelé le méridien céleste ; c'est le cerle tracé sur la sphère céleste par le plan du méridien terrestre sur lequel se trouve l'observateur."



Relisons attentivement ces citations de bons auteurs; pas de contradiction de l'un à l'autre, mais des différences. Pour AD1 et AD2 aussi bien que pour L, le méridien astronomique est un plan. Pour VK de même que pour RDS, c'est un grand cercle de la sphère céleste. VK définit aussi le demi méridien Nord et plus loin il considère les étoiles qui se trouvent à minuit au voisinage du demi méridien Sud, vous devinez pourquoi...

Ici, l'enseignant s'interroge : doit-il s'en tenir strictement à une définition acceptée par des astronomes ou aménager ces définitions en fonction de ses objectifs pédagogiques propres ? Je veux préciser tout de suite que je ne sais pas et ne veux pas savoir répondre à cette question. Il me semble que chacun de nous peut trouver SA solution, l'essentiel étant qu'elle ne soit jamais en contradiction avec ce qu'on pourrait appeler - à la manière de Grévisse - le bon usage. Insistons sur ce point : il n'est

pas question que ces notes aboutissent à une règle que nous serions tenus de suivre. Rien ne serait plus stérilisant que cette tendance normative. Ici, nous discutons, nous échangeons des avis et comme il faut bien prendre ses responsabilités, pour engager le débat, j'exprime du mieux que je peux ce que je pense.

Si j'avais à enseigner cela, au niveau collège ou au niveau lycée, je serais d'abord ravi de trouver une belle occasion d'étudier géométriquement la sphère. Une sphère particulière qui joue, pour l'astronomie, le rôle d'un rapporteur dans l'espace, le rôle joué par le cercle trigonométrique en géométrie plane ; rayon unité ou rayon arbitraire comme vous préférez.

Voici donc la sphère céleste locale. La verticale me donne le zénith Z, le nadir N, le plan horizontal H. Je réserverais le mot horizon au grand cercle intersection de la sphère par le plan H (contrairement à AD1). Le mouvement diurne m'ayant permis de définir le pôle céleste boréal P, j'en déduis l'axe du monde OP et le plan méridien ZOP. Je réserverais l'expression "méridien Sud" au demi grand cercle PZP' intersection du demi plan méridien Sud et de la sphère ; c'est au méridien Sud que toutes les étoiles culminent lors de leur passage supérieur alors que les seules étoiles circumpolaires ont un passage inférieur lors de leur passage dans le méridien Nord.

Peut-être un élève demandera pourquoi certaines lunettes sont dites méridiennes ? Parce qu'elles ne sont mobiles que dans le plan méridien.

J'ai donc pris soin de distinguer l'usage en qualificatif dans plan méridien et l'usage en substantif dans méridien Sud ou méridien Nord. Géographiquement on retrouve le méridien, demi grand cercle de la sphère image du géoïde et dont la tangente au point représentant le lieu d'observation est la méridienne Nord-Sud de la sphère céleste.

° °

Voilà bien des discours sur le méridien, mais ai-je épuisé le sujet ? Je lirai avec plaisir des contradicteurs.

En les attendant, je relis la notice Méridien du Littré. Pour lui c'est le grand cercle de la sphère céleste passant par les pôles le zénith et le nadir ; il cite Laplace :

"Le grand cercle qui passe par le zénith et par les pôles est le méridien ; il partage en deux également l'arc décrit par une étoile sur l'horizon ; et lorsqu'elles l'atteignent, elles sont à leur plus grande ou plus petite hauteur...Le méridien céleste, que déterminent les observations astronomiques, est formé par un plan qui passe par l'axe du monde et par le zénith de l'observateur." (in Système du monde)

Littré ne manque pas de signaler d'autres sens du mot méridien, par exemple, en géométrie, la section d'une surface de révolution par un demi plan passant par l'axe de révolution. Ou encore, à propos de méridienne, l'expression "faire méridienne", pour une sieste au voisinage de midi dans les pays chauds. Ne me dites pas, lassés par mes remarques, qu'au lieu de bavarder ainsi j'aurais mieux fait de m'y attarder, dans ma méridienne...

Gilbert Walusinski

BONHEUR A L'OMBRE DE LA LUNE

Ce 11 juillet 1991, 9 heures, à San José del Cabo, tout au bout de la Basse Californie, au Mexique, l'hôtel est en effervescence. Américains, Japonais, Français ont pris possession des lieux ; presque indifférents aux rouleaux du Pacifique, à la tiédeur de la piscine et à l'ombre agréable des palmiers, ils s'affairent sous la canicule avec leurs lunettes, télescopes, camescopes, appareils photographiques,...

Gérard Oudenot, du Palais de la Découverte, supervise calmement les opérations sous son grand parapluie noir. J'ai rencontré des "junkies" des éclipses ; imaginez, entre autres, un "daniel bardin" japonais qui a placé sur station une lunette, deux appareils photographiques, une caméra vidéo et une télévision miniature pour contrôler immédiatement les vues. Il était à Bornéo en 90, il sera en Patagonie le 30 juin 92 ! Cette atmosphère studieuse, bricoleuse et amicale me rappelle les universités d'été du CLEA.

Il y a bien eu quelques inquiétudes vers 8 h pour quelques nuages. Mais l'ambiance est à la confiance. Ne sommes-nous pas placés à l'endroit idéal dans une zone de climat désertique où on a 90% de chance d'avoir le Soleil visible ? Certes le site de la Pyramide du Soleil à Teotihuacan, au nord du Mexique aurait été plus symbolique mais le climat y eut été moins propice!

10 h 25, la Lune est au rendez-vous. Le Soleil commence à être grignoté. Bravo Newton !

On observe la progression de l'ombre dans les oculaires, sur des écrans. On se félicite mutuellement pour la beauté d'une vue. Trois gros carabiniers lourdement vêtus d'uniformes marron se promènent paisiblement et acceptent très fiers de se faire photographier. Sous les arbres, les taches circulaires de lumière se transforment lentement en petits croissants. Le bord des ombres est comme irréel !

11 h 45 , l'émotion augmente.

Tout le monde mitraille, s'affaire. Cependant, croyez-moi, l'idéal est de s'allonger et d'attendre avec son verre fumé devant les yeux. Le spectacle est si intense et merveilleux qu'il est inutile de s'embarrasser d'instruments ! L'ombre de la Lune masque presque entièrement le Soleil, l'obscurité tombe rapidement du ciel ; spectacle inhabituel pas du tout comparable à un crépuscule. Les oiseaux crient et fuient. Un bébé américain pleure, ses parents rient. La température chute de 10°, le vent se lève. Il fait frais.

11 h 50 ; le dernier rayon de Soleil et on n'a plus besoin de filtre. Durant six minutes la grande couronne solaire nous émerveille. Mercure, Jupiter, Vénus et Mars sont bien alignés. Orion, Castor et Pollux sont visibles mais le ciel n'est pas noir bien que l'éclipse soit totale.

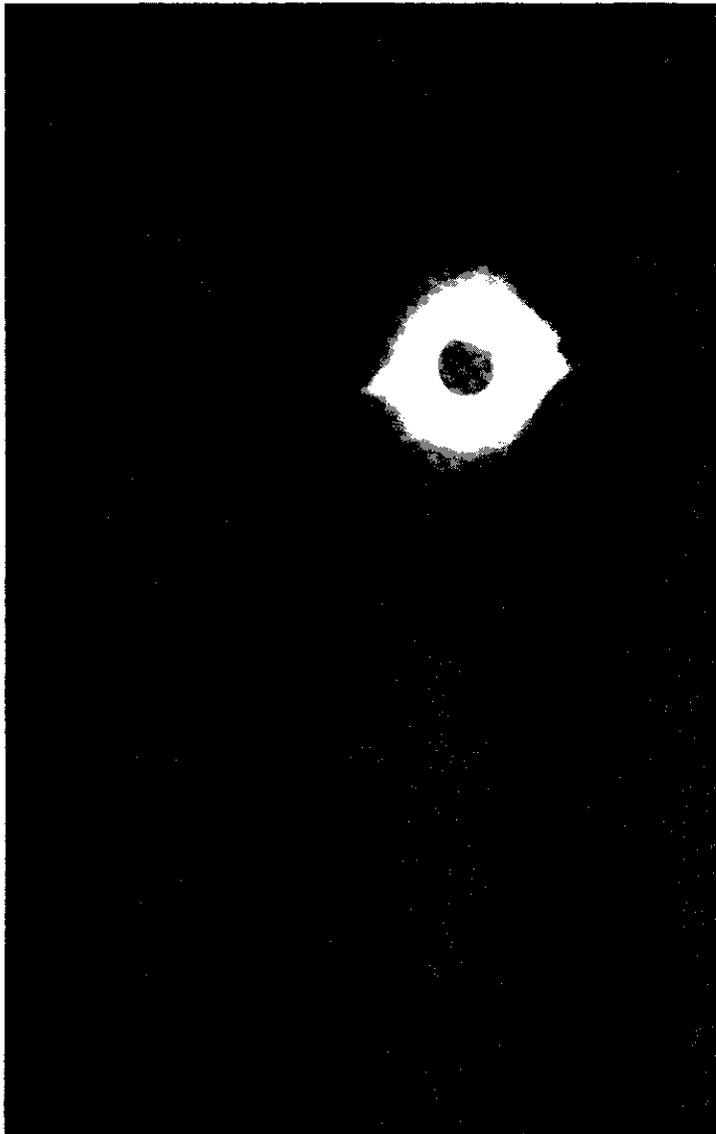
11h 56 ; brusquement le premier rayon de Soleil sort.

Durant 1 h 27, la Lune va repartir et libérer le Soleil.

Alors, comme après une grande émotion, on respire, on a faim. On évoque en riant les bonnes fatigues de ce voyage. Qu'importe puisqu'on a eu six minutes de bonheur !

A bientôt pour la prochaine éclipse !

Liliane Sarrazin
(IUFM de Limoges)



LA PERCEPTION DES CONCEPTS ASTRONOMIQUES CHEZ LES ELEVES (4)

Résumé: Après avoir examiné les cinq grands types de modèles terrestres généralement admis par des enfants de tous âges et d'ethnies diverses, J. Nussbaum (Jerusalem College for Women) a montré que les élèves passent d'une vision primitive et égocentrique à une vision géocentrique et scientifique au cours d'une lente évolution conceptuelle (voir CC 52, 53 et 54).

4. PROBLEMES PARTICULIERS DE L'APPRENTISSAGE DE L'ASTRONOMIE

Avant d'aborder l'analyse des résultats et leur discussion, je tiens à préciser que j'en exclue volontairement toutes les idées fausses sur l'astrophysique moderne ou les idées d'Einstein sur l'espace et le temps. Je préfère me limiter aux problèmes de l'apprentissage de l'astronomie élémentaire qui est encore généralement présentée dans un contexte Newtonien. Comme on le verra ci-dessous, ce contexte relativement "simple" offre déjà suffisamment de difficultés. Dans ce chapitre, mes sources sont une étude faite sur de jeunes élèves de Collège (ref.23), ma propre expérience de l'enseignement de l'Astronomie au niveau universitaire, ainsi que d'autres comptes-rendus de travaux portant sur des étudiants en Université (ref.5).

Les problèmes liés à l'apprentissage de l'Astronomie viennent de ce que la compréhension d'un quelconque des sujets qu'elle aborde repose sur la convergence de plusieurs concepts de base appartenant à différents domaines de la Physique et des Mathématiques. Ces domaines primaires sont: (1) la Mécanique Newtonienne, (2) l'Optique (la Lumière et la Vision) et (3) les Mathématiques, principalement: géométries planes et dans l'espace. Ainsi que l'ont démontré de nombreux travaux, chacun de ces domaines possède ses propres difficultés cognitives. On devrait donc s'attendre à ce que des difficultés particulières apparaissent lorsque des concepts appartenant à ces domaines doivent être associés pour fournir une explication à un phénomène astronomique. Dans chacun de ces domaines, il y a des difficultés subjectives spécifiques qui ont pour origine des préconceptions personnelles et fausses. Ces préconceptions conduisent à des distortions dans l'assimilation du savoir astronomique. Le problème est encore aggravé par la très grande diversité des aptitudes individuelles à mener différents types de raisonnements dans des situations relativement complexes.

Je me propose de classer dans ce qui va suivre les idées fausses relatives à l'Astronomie, soit en les formulant comme un principe (faux), soit en les décrivant lorsque cela sera nécessaire. Contrairement aux travaux centrés sur "la Terre en tant que corps cosmique", les études sur la compréhension générale de l'Univers n'ont pas permis de mettre en évidence un ensemble limité de fausses idées typiques. Celles-ci pouvaient être associées de façons tellement diverses que pratiquement chaque étudiant avait sa vue personnelle et unique du Monde.

4.1 Fausses représentations dans le domaine de la Mécanique et de la Dynamique

1. L'inertie n'est pas une propriété fondamentale incontournable de la Matière. Ainsi, sans faire intervenir aucune force extérieure, il est possible d'obtenir que, de lui-même, un corps: (a) ralentisse son mouvement b) suive une trajectoire courbe ou (c) flotte dans l'espace.

3. Il suffit qu'un objet soit présent physiquement pour qu'on le voie. On ne comprend pas que les objets ne sont vus que parce que la lumière qu'ils reflètent stimule les récepteurs optiques de notre œil. Cela entraîne des problèmes de ce genre: "Pourquoi la partie sombre de la Lune est-elle totalement noire, alors que notre expérience quotidienne nous dit que les objets à l'ombre ne sont jamais totalement sombres? Peut-être bien que la partie obscure de la Lune manque vraiment..."

4. Il est possible de voir la lumière elle-même par les rayons lumineux qu'elle trace (comme on peut le constater dans tous les manuels d'Optique et dans les salles de cinéma où le rayon projeté peut être "vu". Il est bizarre et impensable que sur la Lune le "ciel" reste absolument noir en plein jour.

4.3 Exigences à respecter pour comprendre l'espace cosmique

La compréhension élémentaire de la hiérarchie des corps cosmiques dépend de deux facteurs cognitifs:

a) avoir en permanence une image adéquate de l'espace cosmique et des corps qu'il contient: la Terre est ronde, et non plate. Les étoiles qui paraissent si petites sont des objets immenses, comme le Soleil. L'espace est infini, sans direction privilégiée "haut-bas", etc, etc.

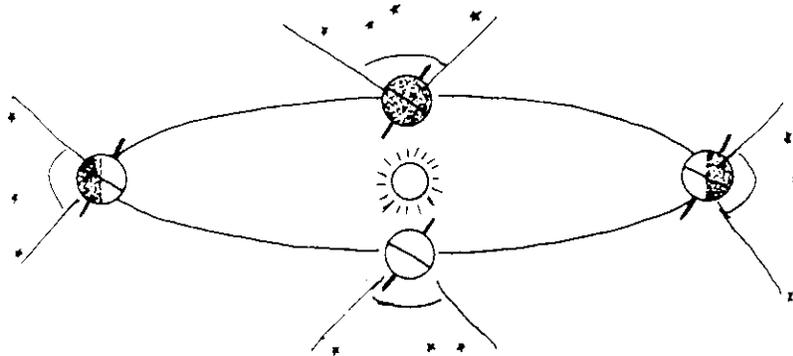


Figure 14: Orientations diverses de la Terre et les différentes saisons (saisons et constellations)

b) être prêt à mener un raisonnement "dans l'espace". Il faut être capable de gérer des représentations de l'espace cosmique observé de différents points. Les modèles, en Astronomie, sont présentés selon des perspectives différentes et de façon interchangeable. Ainsi que Kelsey l'a montré (ref.5), les manuels et le tableau noir supposent qu'un format bi-dimensionnel puisse représenter des systèmes à trois dimensions. De tels dessins montrent ce que l'on peut observer d'un point particulier (en général, une vue de dessus pour un observateur extérieur) afin d'expliquer des phénomènes vus dans un autre plan (par exemple, le plan défini par la feuille ou le tableau) alors que nous observons de l'intérieur du système vers l'extérieur. Les exemples classiques comprennent les vues de dessus et d'un seul côté pour expliquer les saisons, ou pourquoi on voit des constellations différentes selon la saison (fig.14). De nombreux travaux de psychologie cognitive ont montré que pour de nombreuses personnes il est difficile d'acquérir une "vision spatiale" et il existe des raisons de penser que cette aptitude pourrait bien être liée à des facteurs génétiques.

2. Le phénomène de l'inertie se manifeste aussi dans le mouvement circulaire. Les étoiles peuvent se déplacer sur une orbite circulaire qui n'aurait aucun centre matériel. Il en est ainsi à cause de la tendance qu'ont les corps à conserver un mouvement circulaire.

3. Il n'y a de champ gravitationnel que dans une zone limitée de l'espace circumterrestre. Il n'y a pas de gravité sur la Lune. Les astronautes qui se trouvent sur la Lune peuvent littéralement se mettre à flotter. Un corps qui se met à flotter librement dans l'espace peut suivre un trajet en zig-zag. Pour éviter de flotter dans l'espace, les astronautes doivent s'équiper de bottes à semelles plombées. C'est le poids de leurs bottes, non la gravité qui les maintient en contact avec le sol ou avec le plancher de leur astronef.

4. La gravité agit par l'intermédiaire d'un vecteur: l'atmosphère. Là où il n'y a pas d'air, il n'y a pas de gravité.

5. Les mouvements des planètes sont analogues au mouvement circulaire d'une pierre maintenue par une ficelle. Trop d'étudiants affirment que la Lune a tendance à s'écartier radialement de la Terre mais que la gravité la maintient sur son orbite comme la ficelle maintient la pierre. Il est clair que l'analyse vectorielle du mouvement circulaire n'est généralement pas comprise. Pas plus que l'idée de Newton selon laquelle le mouvement d'une planète est une chute sans fin vers un centre d'attraction.

Puisqu'un mouvement elliptique n'a rien à voir avec le mouvement circulaire de la pierre maintenue par sa ficelle, un tel mouvement autour de centres dont l'un est "vide" de toute masse paraît très bizarre et peu plausible.

6. La liaison même entre Astronomie et Mathématiques n'est pas anticipée "a priori". Lors de leur initiation à l'Astronomie, les étudiants sont très surpris de découvrir que l'Astronomie est dans une très large mesure faite de Mathématiques.

7. Le profane, étudiants compris, observe rarement les mouvements planétaires. Trop de gens n'ont aucune idée du mouvement journalier du ciel. Ils n'ont conscience que du mouvement diurne du Soleil. Mais ce mouvement ne peut, au mieux, que conduire à une vue géocentrique du Monde. Même les mouvements de la Lune sont peu évidents aux yeux de nombreux étudiants d'université. Beaucoup affirment qu'au début de la Lunaison, on peut voir un fin croissant de Lune se lever à l'Ouest. L'identification des planètes et, cela va sans dire, l'observation de leurs mouvements annuels, est inaccessible à la plupart des gens. Si on enseigne les mouvements des planètes en présentant dès le départ un modèle du système solaire, sans avoir auparavant fait un minimum d'observations (journalières et annuelles) ou sans recourir à une simulation de qualité, presque inmanquablement, l'élève moyen ne comprendra pas que ces mouvements ne sont pas observés mais déduits.

4.2 Fausses conceptions concernant la Lumière et la Vision

1. La lumière est une entité indépendante, qui peut "rester immobile". Les étoiles sont des corps brillants faits de lumière. Lumière et ombres sont perçus comme des entités matérielles différant seulement par leur "épaisseur". La Lune peut être à moitié recouverte par l'obscurité.

2. La Lune absorbe la lumière pendant le jour et la restitue la nuit.

À un niveau plus élevé, comprendre la nature de la recherche astronomique à partir des théories proposées par cette science suppose deux éléments de nature cognitive comparables à ceux qui viennent d'être mentionnés:

a) une philosophie selon laquelle il est du rôle de l'homme de spéculer sur des modèles du réel inobservable et de les construire.

b) l'idée que l'analyse mathématique des observations astronomiques est la seule façon d'obtenir de bons modèles du Cosmos. Quiconque pense s'engager dans ce genre d'activités doit être capable d'appliquer des opérations mathématiques élémentaires à une simulation de l'ordre cosmique et à la déduction de conclusions à partir du modèle produit.

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Parvenu au terme de cet article, le lecteur éprouvera peut-être un certain pessimisme quant à la possibilité de transmettre un savoir significatif sur le Cosmos à une majorité d'élèves de l'Ecole Primaire et du Collège. L'auteur ne partage pas ce pessimisme. Les descriptions et arguments exposés ci-dessus sont là pour faire prendre conscience des croyances autres de nos élèves et y sensibiliser les maîtres. Cette prise de conscience du caractère tenace des fausses idées existant chez nos élèves devrait nous conduire à rechercher des méthodes d'enseignement plus efficaces. Proposer des plans spécifiques et de nouvelles stratégies sortirait du cadre de cet article. Je propose ci-dessous quelques principes de base.

Il a été démontré que les concepts sont élaborés petit à petit, pendant des années, tandis que des préconceptions simplistes continuent à exister pendant très longtemps. Il est par conséquent crucial de commencer à enseigner l'Astronomie dès les premières années de l'Ecole Élémentaire. Dès ces premières années, on devrait insister sur la rotundité de la Terre et de la Lune, sur la gravité qui s'applique aux deux corps, sur la rotation de la Terre et sur les relations entre la Terre, la Lune et le Soleil. Mes travaux (ref.24) ont montré que cela peut être effectivement enseigné à des élèves qui n'ont que 7 ans. C'est seulement après avoir enseigné cela qu'on pourra par la suite y ajouter d'autres concepts.

La caractéristique essentielle de l'enseignement que l'on souhaite est qu'il doit comporter à tous les niveaux les éléments suivants:

a) réalisation d'observations élémentaires du réel ou de simulation

b) chaque observation d'un modèle devrait être accompagnée d'exercices soigneusement préparés. Ces exercices viseraient à coordonner les différentes perspectives offertes par les modèles et par les observations. On devrait toujours se souvenir que ce n'est pas le modèle lui-même qui a une valeur éducative mais les opérations qu'on lui fait subir.

c) à chaque étape de l'enseignement, il faut s'attendre à rencontrer ces fausses représentations et le maître doit s'y référer, de sa propre initiative, ou y réagir dès qu'elles se manifestent dans la classe. Je ne peux ici discuter des méthodes visant à encourager l'évolution conceptuelle qui ont été présentées ailleurs (ref.25). Je voudrais seulement dire que bien souvent, c'est un processus laborieux qui oblige à définir clairement les concepts et les termes.

Il nous faut nous souvenir qu'enseigner le Cosmos est un défi qui nous est lancé: il s'agit de former un être humain éclairé qui comprend le monde dont il fait partie, ce qu'est la Science, et qui veut et sait exercer ses facultés de Raison.

REFERENCES

1. Nussbaum J & Novak JD 1976, An assessment of children's concepts of the Earth utilizing structured interviews, Science Education 60(4), 535-550.
2. Nussbaum J 1979, Children's conception of the Earth as a cosmic body: A cross age study, Science Education 63(1), 83-93.
3. Mali G B & How A 1979, Development of Earth and Gravity concepts among Nepali children, Science Education 63(5), 685-691.
4. Snieder C & Pulos S 1983, Children's cosmographics: understanding the Earth's shape and gravity, Science Education 67(2), 205-22.
5. Kelsey L J 1980, The performance of college astronomy students on two of Piaget's projective infralogical grouping tasks and their relationship to problems dealing with phases of the moon, unpublished Ph.D thesis, The University of Iowa, Iowa City.
6. Vicentini-Missoni M 1981, Earth and gravity: Comparison between adult's and children's knowledge, in Jung W et al (Eds.) Problems concerning students' representation of Physics and Chemistry knowledge, Proceedings of an international workshop, University of Frankfurt.
7. Niesser V 1976, Cognition and Reality, San Francisco: W.H. Freeman and Co.
8. Anderson R C 1977, The notion of schemata and the acquisition of knowledge, in Anderson et al (Eds.) Schooling and the acquisition of knowledge, New York: John Wiley and Sons.
9. Archenhold W P et al (Eds.) 1979, Cognitive development research in science and mathematics, proceedings of an international seminar, Leeds U.K.; The Centre for Studies in Science Education, University of Leeds.
10. Jung W et al (Eds.) 1981, Problem concerning students' representation of physics and chemistry knowledge, proceedings of an international workshop, University of Frankfurt.
11. Helm H & Novak J D 1983, Misconceptions in science and mathematics, proceedings of an international seminar, Cornell University, Ithaca N.Y.
12. West L H T & Pines A L 1985, Cognitive structure and conceptual change, Academic Press, N.Y. & London.
13. Nussbaum J & Novick S 1982, A study of conceptual change in the classroom, a paper presented at the annual meeting of the National Association for Research in Science Teaching, Lake Geneva near Chicago.
14. Driver R et al (Eds.) 1985, Children's ideas in science, Open University Press: Milton Keynes and Philadelphia.
15. McClosky M 1983, Intuitive physics, Scientific American 248, 122-130.
16. Toulmin S 1972, Human understanding, Princeton: Princeton University Press.
17. Novak J D 1977, A theory of education, Cornell University Press: Ithaca, N.Y.
18. Driver R & Easley 1978, Pupils and paradigms: a review of literature related to concept development in adolescent science students, Studies in science education 5, 61-84.
19. Lakatos I & Musgrove A (Eds.) 1970, Criticism and the growth of knowledge, Cambridge: Cambridge University Press.
20. Brown H I 1977, Perception, theory and commitment: The new philosophy of science. Chicago: The University of Chicago Press.
21. Nussbaum J 1983, Classroom conceptual change: The lesson to be learned from the history of science, in Helm & Novak (Eds.), Misconceptions in science and mathematics, proceedings of an international seminar, Cornell University, Ithaca, N.Y.
22. Toulmin S & Goodfield J 1967, The Fabric of Heavens, Hutchinson: London.
23. Kramer E 1976, Junior high school students' conceptions of the structure of the universe, unpublished M.Sc. Thesis, The Hebrew University of Jerusalem.
24. Nussbaum J & Sharoni-Dagan N 1983, Changes in second grade children's preconceptions about the earth as a cosmic body. Science Education 67(1), 99-114.
25. Nussbaum J & Novick S 1982, Alternative frameworks, conceptual conflict and accommodation: toward a principled teaching strategy, Instructional Science 11, 183-200.

ENSEIGNER L'ASTRONOMIE A L'ECOLE PRIMAIRE ET AU COLLEGE: POURQUOI?

R. Estalella

Département d'Astronomie et de Météorologie, Université de Barcelone
Séminaire Permanent d'Astronomie, ICE, Université Polytechnique de Catalogne

RESUME

L'Astronomie est une Science de la Nature qui se propose de rendre compte du Cosmos, c'est à dire ce qui est situé encore plus loin que notre environnement proche. Pour cette unique raison, l'Astronomie mérite d'être enseignée dans le cycle d'Enseignement Général de Base (EGB) (*). Mais elle peut aussi constituer un bon exemple de la façon de pratiquer une science expérimentale à l'école, c'est à dire une science fondée sur l'observation de la Nature et sur l'expérimentation. C'est ce qui fait l'intérêt de l'Astronomie à l'école sans parler de l'attrait qu'elle exerce généralement chez les élèves de l'Enseignement Général de Base.

INTRODUCTION

En général, on enseigne très peu d'Astronomie dans l'Enseignement Général de Base (de 6 à 14 ans). La raison en est habituellement le manque de formation des maîtres et l'absence quasi-totale de l'Astronomie dans les programmes officiels. Les thèmes astronomiques généralement abordés sont très concrets et répétitifs: comment trouver le nord; le jour, la nuit et les saisons en relation avec les mouvements de la Terre; la planète Terre dans l'Univers. En général, les maîtres ne voient pas comment aller au-delà de ces points.

Toutefois, l'Astronomie est un outil qui convient tout à fait pour structurer et rationaliser la connaissance de l'Univers chez les jeunes élèves. Elle peut offrir un excellent exemple de pratique en milieu scolaire d'une science expérimentale fondée sur l'observation de phénomènes naturels.

LA NATURE COMME LABORATOIRE D'ASTRONOMIE

On dit souvent que le laboratoire est le meilleur des manuels. Cela ne vaut pas forcément pour les élèves de l'Enseignement Général de Base. La réalité du laboratoire peut être très éloignée de l'expérience quotidienne d'un élève. Il est généralement très difficile de faire faire la relation entre une expérience de laboratoire et le réel. En ce sens, l'Astronomie présente un avantage évident sur les autres sciences de la Nature. L'observation des phénomènes célestes familiers (la Lune, le Soleil, les étoiles) peut se substituer à l'expérience de laboratoire. Le but de l'Astronomie est visiblement d'expliquer des faits familiers comme le mouvement apparent du Soleil ou les phases de la Lune.

L'enseignement de l'Astronomie dans ce cycle initial devrait être fondé sur l'expérimentation et sur l'observation. L'Astronomie peut être un bon exemple de science expérimentale reposant sur l'observation de phénomènes naturels. Il

(*) L'Enseignement Général de Base (EGB) espagnol commence à 6 ans et prend fin à 14 ans avec la Classe de 4°. Pour des raisons de commodité, on a préféré traduire littéralement le terme espagnol, étant entendu qu'il recouvre tout le Cycle Primaire et une partie du Collège (NdT).

est aisé de tirer avantage de la vive curiosité que les enfants éprouvent pour les choses du ciel. Un autre facteur important est que l'Astronomie à l'école ne demande pas une instrumentation compliquée ou un laboratoire. On associe en général l'Astronomie à un travail nocturne exigeant un télescope. Au contraire, avec de jeunes élèves, il est plus profitable d'étudier l'Astronomie de jour et sans télescope [8,9].

Quelques précautions sont nécessaires lorsqu'on enseigne l'Astronomie à de jeunes élèves. Il est particulièrement important de ne pas introduire de concepts trop difficiles à comprendre. Par exemple, la représentation classique de la sphère céleste vue de l'extérieur, que l'on trouve dans tous les manuels d'Astronomie, est très difficile à comprendre et par conséquent sans aucune utilité pour de jeunes élèves. Un autre exemple est le concept de distance angulaire mesurée sur le ciel. Les jeunes élèves considèrent qu'un angle est une portion du plan. Ils ne comprennent pas le concept de "diamètre apparent" ou de "distance angulaire". Il vaut bien mieux parler de "dimension apparente" ou de "distance apparente" et les mesurer en "poings" plutôt qu'en degrés [4,9].

QUELQUES EXPERIENCES FONDAMENTALES

Des expériences classiques sur des thèmes tels que le Soleil, la Lune et le Système Solaire conviennent bien à des élèves de 11 à 14 ans n'ayant aucune connaissance préalable de l'Astronomie, mais on peut aussi les proposer à des élèves plus jeunes. Une grande partie de ces activités peuvent se dérouler pendant la journée [1,6].

Mouvement du Soleil

On observe le mouvement diurne du Soleil avec un gnomon. On incite les enfants à découvrir les paramètres dont dépendent la direction et la longueur de l'ombre, en comparant plusieurs enregistrements journaliers. On peut visualiser le mouvement annuel en enregistrant les ombres à quelques semaines d'intervalle [4,5,9,12]. On peut aisément mettre en relation ces observations et le modèle classique de la Terre en orbite autour du Soleil grâce à une très belle expérience décrite dans [2]. On peut compléter ce travail par la construction de cadrans solaires simples [2,9,11].

Phases de la Lune

On peut faciliter la compréhension des phases de la Lune en construisant un modèle du système Terre-Lune respectant le rapport dimensions-distance. En utilisant ce modèle dehors au soleil, il est possible de reproduire les dimensions apparentes et la phase de la vraie Lune, en montrant que les phases sont dues à l'illumination par les rayons solaires. On peut aussi utiliser le modèle pour reproduire les éclipses de Lune et de Soleil [4,5,9,12]. On peut compléter ce travail en notant la forme et la position de la Lune sur une lunaison complète [3,9].

Le Système Solaire

Les dimensions et les distances des planètes du système solaire sont difficiles à visualiser. Un excellent exercice consiste à donner aux élèves une collection de sphères de toutes tailles allant du ballon de basket à la tête d'épingle et à les laisser reproduire les dimensions et les distances dans le Système Solaire [5,7,9]. Tôt ou tard, ils finiront par comprendre que les dimensions sont très petites comparées aux distances et que les planètes géantes sont vraiment bien lointaines.

Le Ciel Nocturne

Les constellations, outil essentiel pour le repérage dans le ciel la nuit, peuvent aussi être étudiées en classe en dessinant les plus importantes d'entre elles sur une feuille puis en reconstituant sur un panneau mural l'ensemble des constellations circumpolaires avec l'Etoile Polaire, ainsi que les principales constellations observables au Sud en fonction de la saison [6,9,12]. Il faut aussi étudier les constellations la nuit, à l'aide d'un planisphère, mais les expériences nocturnes sont très difficiles à mener à l'école. [9,13].

Planétarium

Le planétarium peut aussi offrir une aide appréciable en venant compléter l'observation directe. Le plus important est peut-être que l'élève peut ainsi visualiser le mouvement diurne des étoiles, le Soleil et son mouvement apparent [2,9].

REFERENCES

- [1] Alemany, C. and Sarrate, J., 1986, Un taller de astronomia, Cuadernos de Pedagogia, 136, 11-14.
- [2] Broman, L., Estalella, R., and Ros, R.M., 1987, Experimentos de astronomia, Madrid, Ed. Alhambra, Col. Biblioteca de Recursos Didácticos.
- [3] Elementary Science Study 1968, Where is the Moon?, New York, Webster Div., MacGraw-Hill Co.
- [4] Elementary Science Study 1971, Daytime Astronomy, New York, Webster Div., MacGraw-Hill Co.
- [5] Estalella, R., 1985, L'astronomia a l'escola, Perspectiva Escolar, 95, 39-44.
- [6] Estalella, R., 1986, El mundo de las estrellas, Barcelona, Ed. Onda, Col. La Mirilla
- [7] Estalella, R., 1986, Els cometes a l'escola, Perspectiva Escolar, 104, 20-24.
- [8] Estalella, R., 1986, La astronomia en la enseñanza básica y media, Cuadernos de pedagogia, 136, 8-11.
- [9] Estalella, R., Cid, S., Garcíà-Luengo, E., Molins, M., Padullés, M.C. and Trabal, M., 1986, Astronomia a l'escola, Barcelona, A.A.P.S.A. Rosa Sensat.
- [10] Estalella, R., 1989, El cel, l'espectacle de la nit, Perspectiva Escolar, 132, 2-6.
- [11] Seymour, P., 1987, Aventuras con la astronomia, Barcelona, Ed. Labor
- [12] Trabal, M., 1986, La escuela, el Sol, la Luna y viceversa, Cuadernos de Pedagogia, 136, 15-21.

LES POTINS DE LA VOIE LACTEE : LA PREMIERE MESURE DU RAYONNEMENT THERMIQUE COSMOLOGIQUE

*Note de la Rédaction : Cet article est repris du numéro 165 (juillet 1991) de la revue **Pour La Science**, avec l'aimable autorisation de la Rédaction de cette revue.*

Les ouvrages d'histoire de la cosmologie rapportent qu'Arno Penzias et Robert Wilson ont découvert, en 1965, le rayonnement diffus cosmologique qui constitue l'une des preuves de la théorie cosmologique du Big Bang. Cependant, Albert Le Floch et Fabien Bretenaker, de l'Université Rennes I, affirment qu'Emile Le Roux qui travaillait dans le Laboratoire de radioastronomie de l'Ecole normale supérieure de Paris, a mesuré dès 1955, ce rayonnement avec une précision remarquable pour les moyens expérimentaux dont il disposait.

On sait aujourd'hui que ce rayonnement, libéré lorsque l'Univers était 1000 fois plus condensé, se propage librement parce qu'il n'interagit pratiquement plus avec la matière : l'Univers primitif, formé notamment de protons, d'électrons et d'ions, était en équilibre thermique avec le gaz chaud de photons qui baignait ces particules. Lorsque la matière devint neutre, l'équilibre thermique fut rompu, et le gaz de photons cessa d'interagir ; en raison de l'expansion de l'Univers, la température de ce rayonnement cosmologique, gaz de photons en équilibre thermique, a commencé à diminuer.

Le spectre de ce rayonnement thermique cosmologique est identique à celui d'un corps noir (un émetteur parfait) dont la température est évaluée à $2,735 \pm 0,006$ kelvins, d'après les mesures actuelles les plus précises effectuées à bord des satellites ou des fusées. Ce rayonnement électromagnétique, émis peu après le Big Bang, est le signal le plus vieux et le plus lointain que l'on ait détecté.

Les deux radioastronomes auxquels on attribue la première mesure du rayonnement travaillaient dans un laboratoire de la Société Bell et cherchaient les sources de bruit susceptibles d'interférer avec les systèmes de communication par satellite. Ils utilisaient un récepteur radio détectant les longueurs d'onde égales à 7 centimètres ; comme ces émissions étaient très faibles - quelques 10^{-30} watts - il était nécessaire d'amplifier tous les signaux enregistrés.

Cependant, si l'on amplifie les signaux reçus, on fait de même pour les signaux parasites, notamment le "bruit" du détecteur lui-même. A. Penzias et

R. Wilson refroidissaient leur récepteur avec de l'hélium liquide, à quatre kelvins, afin de limiter le bruit de fond et d'améliorer la précision des mesures.

Ils découvrirent par hasard une composante d'émission résiduelle, isotrope dans tout le ciel et correspondant à celle d'un corps noir dont la température semblait égale à 3.5 ± 1 kelvins. Collaborant avec P. Peebles, P. Roll et Wilkinson, Robert Dicke comprit qu'il s'agissait du rayonnement fossile qui baigne tout le ciel. Dès 1948, George Gasmow avait prévu l'existence d'un tel rayonnement, conséquence des conditions régnant dans les premières phases de l'Univers. R. Dicke et ses collègues avaient affiné les prévisions théoriques.

Parce qu'ils sont, à l'Université de Rennes, des collègues d'E. Le Roux, et parce qu'ils sont en relation avec R. Dicke, de l'Université de Princeton, aux Etats-Unis. A. Le Floch et F. Bretenaker ont découvert, au fil de discussions informelles, que leur collègue avait été le premier à mesurer le rayonnement cosmologique dans le cadre de sa thèse.

Les radioastronomes construisaient à l'époque des antennes et observaient les premières sources de rayonnement radio. Ils connaissaient la loi de variation de l'intensité du rayonnement d'un corps noir en fonction de la longueur d'onde du rayonnement, et pouvaient ainsi étudier un tel rayonnement à n'importe quelle longueur d'onde.

E. Le Roux utilisa une antenne détectant les longueurs d'onde de 33 centimètres et un récepteur parabolique de 7,5 mètres de diamètre dont il connaissait précisément la distribution spatiale de la détectivité : un radiotélescope, dont le pouvoir de résolution est généralement médiocre, enregistre les ondes provenant de la direction de la source que l'on cherche à mesurer, mais aussi celles des sources contenues dans un cône ayant pour axe cette direction, et d'angle d'autant plus petit que la résolution du télescope est bonne. La fraction d'énergie correspondant à la direction incidente est fonction de l'angle d'observation et la relation entre cette fraction d'énergie et l'angle d'observation est connue sous le nom de distribution spatiale de la détectivité.

E. Le Roux avait choisi de détecter les longueurs d'onde égales à 33 centimètres, mais il ne disposait pas encore des moyens qui lui auraient permis de refroidir son détecteur. Son récepteur, non refroidi, avait une émission propre importante, équivalant à une température de 1450 kelvins se superposant à toute autre mesure. Ainsi, pour mesurer un signal de trois kelvins s'ajoutant aux 1450 kelvins du récepteur, il aurait fallu connaître cette température avec une précision supérieure à 0,1 pour cent, et le gain du récepteur qui aurait permis de transformer le signal observé en température aurait dû être connu avec cette précision, évidemment inaccessible.

Afin de mesurer ce qu'il appelait "la température du ciel", E. Le Roux imagina une méthode très ingénieuse, éliminant les difficultés engendrées par le bruit important du récepteur. Il eut l'idée originale d'enregistrer les signaux obtenus au cours d'un balayage vertical de l'antenne, depuis le zénith jusqu'à l'horizon. En effet, pour chaque position, la température mesurée résulte de la contribution de deux sources de rayonnement : celui émis par le sol, dont on connaît la température (285 K), et celui émis par le ciel, dont on veut déterminer la température.

Par un étalonnage préalable et connaissant la courbe de distribution de la détectivité de l'antenne qu'il utilisait. E. Le Roux déterminait pour chaque orientation de l'antenne, la proportion de rayonnement émis par le sol et celle qui correspondait au ciel ; comme il connaissait le rayonnement global de la Terre, il calculait la fraction du rayonnement terrestre correspondant à l'orientation de l'antenne étudiée, et, de ses mesures du rayonnement global, il déduisait le rayonnement du ciel, puis sa température. E. Le Roux effectua ainsi trois mesures qui lui fournirent trois valeurs : 2,7 K, 2,0 K et 3,9 K. Il en déduisit une valeur moyenne de 3 ± 2 kelvins, valeur aussi proche de la valeur acceptée aujourd'hui, que celle obtenue 10 ans plus tard par A. Penzias et R. Wilson.

Dans son mémoire de thèse conservé dans les bibliothèques des Observatoires, E. Le Roux examine l'origine de ce rayonnement. Il ne mentionne pas les travaux de cosmologie que Gamow, Alpher et Herman firent en 1948 : il n'évoque à aucun moment l'hypothèse d'un rayonnement primitif. Il essaie de savoir si ce rayonnement, qu'il montre être isotrope, correspond au rayonnement émis par l'ensemble des galaxies, et s'il est de nature thermique.

En effet, certaines radiosources se comportent comme des corps noirs , et l'intensité du rayonnement émis est fonction de la longueur d'onde, mais d'autres radiosources, notamment les plus intenses, émettent aussi un rayonnement synchrotron qui suit une loi différente.

E. Le Roux ne parvint pas établir la nature thermique du rayonnement qu'il étudiait... parce qu'il fut obligé, pour construire la courbe de l'intensité du rayonnement étudié en fonction de la longueur d'onde, d'utiliser des mesures effectuées par d'autres astronomes et qui étaient inexactes. Il interpréta le rayonnement qu'il avait mesuré comme la résultante de l'émission homogène et isotrope de toutes les galaxies.

Le second sujet de thèse de E. Le Roux montre combien celui-ci se préoccupait du rayonnement émis par les galaxies, et qu'il pensait avoir observé; ce travail bibliographique exigé pour l'obtention d'une thèse d'Etat jusqu'à la fin des années 1960, portait sur le paradoxe d'Olbers : pourquoi le ciel

nocturne est-il noir, tandis que le rayonnement émis par l'ensemble des étoiles devrait le rendre uniformément brillant ?

L'astronome suisse Jean-Philippe Loys de Chéseaux dans son traité de la comète (1743), puis, en 1823, l'allemand Heinrich Olbers, qui sans doute ignorait l'oeuvre de Chéseaux ont été les premiers à expliciter ce paradoxe. La formulation d'Olbers reste attachée à cette interrogation : "Si l'espace est rempli à peu près uniformément d'étoiles, jusqu'à des distances aussi grandes que l'on voudra, le ciel doit être à peu près aussi brillant que la surface solaire." Toute ligne de visée devrait rencontrer nécessairement une étoile, et le ciel devrait avoir une brillance égale à la moyenne des brillances des étoiles. Or, entre les étoiles, le ciel est noir, et selon de Chéseaux et Olbers, une matière absorbante gazeuse aurait masqué le rayonnement des étoiles lointaines ; cette hypothèse a été rejetée depuis lors. E. Le Roux essaya de transposer le paradoxe d'Olbers aux galaxies : celles -ci émettent dans le domaine visible et dans le domaine radio ; ainsi le ciel devrait être uniformément brillant dans le domaine radio ; sauf si le paradoxe d'Olbers s'applique aussi à ce domaine de longueurs d'onde. Comme E. Le Roux avait observé le rayonnement isotrope, il pensait qu'il n'y avait pas de paradoxe dans le domaine radio.

On admet aujourd'hui, d'une part, que les étoiles s'occultant les unes les autres, l'horizon stellaire est limité, et que l'on ne "voit" pas le rayonnement émis par les étoiles les plus éloignées ; d'autre part, que l'Univers étant en expansion, la lumière des astres lointains est décalée vers le rouge jusqu'à ne plus participer à la brillance du ciel.

E. Le Roux n'a pas eu la même chance qu'A. Penzias et R. Wilson que le radioastronome Bernard Burke a mis en relation avec les théoriciens de la cosmologie : ceux-ci ont immédiatement compris la portée de leur découverte, rapidement publiée. Notons que cette démarche était peut-être plus aisée en 1965 qu'en 1955. Peu soucieux de célébrité personnelle, E. Le Roux ne s'est pas manifesté en 1965.

Deux de ses collègues ont eu à coeur, 25 ans plus tard, de récrire cette phase de l'histoire de la radioastronomie.

Lucienne Gouguenheim

L'ŒUVRE ASTRONOMIQUE DE CLAIRAUT

Pourquoi, dans les Cahiers Clairaut, ne parlerait-on pas, de temps à autres, de Clairaut lui-même ? En effet, me dit un nouvel abonné, cela m'expliquerait la raison du choix de ce titre pour la revue trimestrielle du CLEA.

Nous l'avions dit, évidemment, dans notre premier numéro, mais c'est déjà vieux (printemps 1978) et nous pouvons y revenir sans nous renier. Je persiste à penser que l'idée était bonne. La justification tient en deux phrases :

- Clairaut fut un génial mathématicien précoce, tôt acquis aux idées de Newton, et dont les contributions au problème des trois corps furent certainement importantes ;

- Clairaut fut aussi un pédagogue et ses ouvrages, Elémens de Géométrie (1741) et Elémens d'Algèbre (1746) s'inspirent du souci de rendre ces initiations scientifiques accessibles aux débutants ; ou pour reprendre ses propres écrits "Ces premiers pas ne pouvaient être hors de la portée des Commençants puisque, historiquement, c'étaient des Commençants qui les avaient faits."

Deux bonnes raisons : un savant à la pointe des recherches de son temps et soucieux de l'initiation des débutants. Vous en connaissez beaucoup d'exemples dans l'histoire, ou même aujourd'hui ? Oui, bien sûr, il y en a, ils sont rares et ils sont nos amis. En fait, nous attachions peut-être plus d'importance à la deuxième phrase qu'à la première : le premier objectif du CLEA est de participer à une meilleure formation des maîtres, besoin primordial pour qui envisage sérieusement le développement de l'enseignement de l'astronomie à tous les niveaux de l'enseignement public, de la Maternelle aux Universités. Quand nous considérons ce qu'a fait le CLEA depuis 1978 (on pourrait même dire depuis cette journée sur l'enseignement lors du congrès 1976 de l'Union Astronomique Internationale à Grenoble), d'école en université d'été, de fascicules pour la formation des maîtres en transparents animés pour rétroprojecteur ou séries de diapositives et jusqu'aux recueils Hors Série de fiches pour l'Ecole élémentaire ou le Collège (en attendant celles pour le Lycée), les équipes animées par le CLEA sont bien restées fidèles à la pensée de Clairaut. Par elles et grâce à leur travail, les premiers pas en astronomie ne sont plus hors de la portée des commençants...

Ce qui ne signifie pas enfermement dans les éléments et indifférence à l'égard des problèmes actuels de la science. Comment d'ailleurs ne pas enrichir l'enseignement, même élémentaire, des idées et des découvertes de l'astrophysique d'aujourd'hui ? C'est encore une façon d'être fidèles à l'exemple que nous donna Clairaut. En même temps que ses Elémens de Géométrie et d'Algèbre, il publiait Du système du monde dans les principes de la gravitation universelle (1745). Il lui fallait se battre pour faire reconnaître la mécanique de Newton rejetée a priori par des cartésiens attardés. Aujourd'hui, on ne peut ignorer les problèmes des quasars ou des super novae, non plus que les merveilles du système solaire révélées par les sondes interplanétaires. Relisez plutôt les articles de tête dans chaque numéro des Cahiers.

Soyons donc tout à fait fidèles à la leçon de Clairaut en revenant sur son oeuvre astronomique. Elle s'organise autour de deux grands thèmes, la figure de la Terre comme on disait alors et le problème des trois corps ; c'est à dire sur les applications de la grande idée de l'attraction universelle et sur les développements de la mécanique newtonienne. Car si Clairaut apporta sa pierre à l'histoire de l'astronomie, ce fut surtout au titre de géomètre, comme on disait alors, au titre de mathématicien.

DEUX MOTS SUR L'HOMME

Alexis, Claude Clairaut, né à Paris le 13 mai 1713, est mort dans la même ville le 17 mai 1705. A quelques années près, il est de la même génération qu'Euler, son aîné, et d'Alembert, son cadet.

Son père était professeur de mathématiques ; il sut cultiver très tôt ses deux fils particulièrement doués mais le cadet mourut prématurément. Alexis fut un génie précoce ; ses Recherches sur les courbes à double courbure furent publiées en 1731 (double courbure ? On dit plutôt aujourd'hui courbes gauches ou courbes non planes). L'auteur avait dix-huit ans et il fallut obtenir du roi une dispense d'âge pour qu'il entre à l'Académie des Sciences comme ses membres le souhaitaient.

Même si nous ne voulons pas nous attarder sur les épisodes de la vie personnelle de Clairaut - puisque c'est l'oeuvre du savant qui nous intéresse, n'oublions pas qu'il est un savant du dix-huitième siècle et qu'il est au plein sens du terme un homme de son temps. Ami des Encyclopédistes, il fréquente Maupertuis, d'Alembert, les Bernoulli, Voltaire. Il connaît la Marquise du Châtelet et l'aide de près dans sa traduction des Principia de Newton. Il vit dans un pays et un climat de riche culture où les moeurs sont également très libres. Clairaut dont Diderot disait :

"Il était honnête homme, bon ami et du commerce le plus sûr. Il n'était pas sans ressource dans la société ; et une étude des sciences abstraites, commencée dès ses plus jeunes années, et continuée toute sa vie avec opiniâtreté, ne lui avait pas ôté sa sérénité. Il était vrai, il était gai et il avait bien son mot à lui dans la conversation. Il jouissait doucement de sa fortune avec ses amis, et une petite servante fort jolie qui avait soin de son ménage, à qui il avait appris assez de géométrie pour l'aider dans ses calculs et que sa mort laisse dans le veuvage."

L'EXPEDITION DE LAPONIE

Ce sont donc ses Recherches sur les courbes à double courbure, un travail de géométrie, qui ont ouvert à Clairaut les portes de l'Académie des Sciences. Il y retrouve Maupertuis qui publie en 1732 un Discours sur les différentes figures des astres et qui anime des réunions de savants intéressés par les idées de Newton. Clairaut qui avait étudié tout jeune l'Analyse des infiniments petits du Marquis de l'Hôpital était donc préparé pour discuter avec Maupertuis de la forme de la Terre.

On se rappelle que Richer avait transporté à Cayenne un pendule réglé à Paris pour battre la seconde et qu'à l'arrivée, il avait observé que son pendule retardait de 2 minutes 28 secondes de temps par jour. Newton avait aussitôt proposé une explication, le rayon équatorial de la Terre est plus grand que le rayon de la Terre à la latitude de Paris qui serait encore plus long que le rayon polaire, autrement dit la Terre est aplatie selon la ligne des pôles. De plus, à cet effet qui diminue la gravité à Cayenne, s'ajoute l'effet de la force centrifuge qui y est encore plus sensible à Cayenne qu'à Paris.

Jean-Dominique Cassini, le fondateur de l'Observatoire de Paris, n'était pas de cet avis. En 1683, il avait prolongé de Paris à Collioure la mesure de l'arc de méridien qui avait été mesuré par Picard en 1667 entre Amiens et Juvisy. En comparant ces deux mesures, il trouvait qu'un arc de un degré du méridien vers le Nord était plus court qu'un arc de un degré vers le Sud. Il en déduisait que le rayon polaire de la Terre devait être le plus long ainsi d'ailleurs que les Cartésiens prétendaient le déduire de leur théorie des tourbillons.

La polémique restait d'autant plus d'actualité en 1734 que Jacques Cassini, fils de Jean-Dominique et successeur de celui-ci à l'Observatoire de Paris, pensait trouver une confirmation de la thèse de son père en mesurant un arc du grand cercle de la sphère terrestre perpendiculaire au méridien de Paris. A quoi Clairaut objecta justement que la courbe orthogonale au méridien à Paris ne sera un grand cercle que si la

surface de la Terre est exactement une sphère. Or les mesures ont justement pour but d'établir que cette forme n'est pas sphérique, ce qui entraînerait pour la courbe orthogonale au méridien une forme non plane. Tirer une information de la mesure de cette ligne exigerait donc une analyse plus compliquée. Clairaut propose quatre méthodes qui sont délicates mais pourraient au moins donner un résultat qualitatif (oui ou non la Terre est-elle sphérique?). Les mesures effectuées par Jacques Cassini de Paris à St Malo puis de Paris à Strasbourg ne donnent pas des résultats convaincants, même si les Cassiniens y voient une confirmation de leur hypothèse, l'ellipsoïde allongé dans le sens de l'axe de rotation. Pour Clairaut, il n'y a qu'une méthode sûre pour trancher le débat, "la mesure de la Terre par plusieurs arcs de méridien pris à différentes latitudes" pour reprendre le titre du mémoire publié en 1736. Il est le fruit des discussions engagées ensemble avec Maupertuis pour convaincre l'Académie des Sciences d'organiser deux expéditions, l'une le plus au Nord possible, l'autre vers l'équateur.

Clairaut pose le problème en géomètre : "Etant donné une équation qui exprime la relation entre la latitude et le degré du méridien, ou le rayon de la développée. construire ce méridien ; ou, ce qui revient au même, trouver une courbe dont on ne connaît que la relation entre les arcs et les angles de contingence"(c'est à dire l'angle des tangentes aux extrémités des arcs). La méthode qu'il envisage s'apparente aux méthodes d'interpolation de Newton : "placer plusieurs points de manière que les perpendiculaires menées de ces points à une ligne donnée, expriment les degrés mesurés, et que les intervalles entre ces perpendiculaires expriment les latitudes de ces degrés."

Clairaut montre en outre qu'en raison de l'incertitude des premières mesures de Picard - étant donné la précarité des moyens optiques de l'époque (depuis, on avait fait de notables progrès) - les écarts entre Amiens et Ollioules sur la méridienne de France ne pouvaient avoir de portée quant à la sphéricité ou non-sphéricité de la Terre.

Bref, en 1735, le principe des expéditions de Laponie et du Pérou est adopté par l'Académie des Sciences. Celle du Pérou, dirigée par Bouguer et La Condamine, sort de notre sujet. Celle de Laponie comprendra, outre Maupertuis et Clairaut, l'horloger Camus, les astronomes Le Monnier et Outhier ainsi que le savant suédois Celsius qui devrait faciliter les relations des missionnaires avec les autorités locales. (1)

L'embarquement de l'expédition à Dunkerque eut lieu le 2 mai 1736. Après un court séjour à Stockholm, les savants s'établirent au fond du golfe de Botnie pour mesurer un arc de méridien entre Pello et Tornea. L'amplitude de l'arc mesuré fut évaluée par visée de l'étoile δ Draco depuis Pello le 11 octobre, depuis Tornea le 31. La mesure devait être reprise en mars 1737 par visée de l'étoile α Draco. Passons sur les péripéties de l'expédition, les moyens de transport et les conditions de climat expliquent la durée du voyage et les épreuves subies par les savants.

Le résultat dépassait les espérances de Clairaut : 57 437 toises pour un arc de 1° en Laponie, soit 377 toises de plus que l'arc de 1° mesuré par Picard à la latitude de Paris. Cela suffisait pour que soit définitivement établi le fait de l'aplatissement polaire de la Terre.

Quand l'expédition du Pérou apporta la résultat de ses mesures - soit 56 925 toises pour un arc de 1° , donc 512 toises de plus que pour l'arc de 1° en Laponie - Clairaut put donner cette première estimation sérieuse de l'aplatissement terrestre, $1/178$ (Huygens avait proposé $1/578$; la valeur aujourd'hui adoptée est $1/298$).

L'affaire était donc entendue, l'hypothèse de Newton était la bonne. La polémique sur le sujet ne cessèrent pas pour autant et excitèrent la verve de Maupertuis dont un libelle "Examen désintéressé des différents ouvrages qui ont été faits pour déterminer la figure de la Terre" parut en 1738 sans nom d'auteur. De même que la "Lettre d'un horloger anglais à un astronome de Pékin, traduite par M."

Clairaut reste à l'écart de ces débats. D'autant que les mesures d'amplitude des arcs et la visée des étoiles du Dragon l'ont mis en contact direct avec un des problèmes posés alors pour toutes les mesures de précision : comment tenir compte de l'aberration de la lumière et du mouvement de nutation qui avaient été découverts en 1728 et 1736 respectivement ? Clairaut publie un mémoire sur l'aberration le 11 décembre 1737, il revient que la question en 1739 : "Sur la manière la plus simple d'examiner si les étoiles fixes ont une parallaxe et de la déterminer exactement". On sait qu'il était trop tôt pour y parvenir, mais Clairaut appréciait déjà l'importance et la difficulté de l'opération.

RECHERCHES THEORIQUES

Clairaut retourne donc bien vite aux calmes méditations de sa table de travail. L'expédition de Laponie aura été son aventure de jeunesse. Il retrouve vite le plaisir de discuter avec les mathématiciens de son temps qui affinent la notion de fonction. Avec Euler, il introduit la notation $f(x)$ qui nous est familière - que ferions-nous sans elle, même si nous l'écrivons plutôt $f : x \mapsto f(x)$

En 1741, Clairaut a publié ses Elémens de Géométrie sur lesquels pédagogues et didacticiens n'ont pas fini de débattre, ouvrage de médiocre vulgarisation pour les uns, initiative pédagogiques hardie et féconde pour les autres (chut! j'en suis).

En 1743, il publie sa Théorie de la figure de la Terre tirée des principes de l'hydrostatique dont Joseph Bertrand écrit qu'elle vaut plus, à elle seule, que l'expédition en Laponie toute entière. Il y établit la condition générale d'équilibre d'une masse fluide, la forme la plus utile étant celle d'un canal de Clairaut : "Afin qu'une masse fluide puisse être en équilibre, il faut que les efforts de toutes les parties du fluide renfermées dans un canal quelconque rentrant en lui-même (c'est à dire fermé sur lui-même) se détruisent mutuellement". Il en déduit une évaluation de l'aplatissement terrestre soit 1/300, plus faible que celui supposé par Newton et bien proche de celui adopté aujourd'hui.

La même année, Clairaut publie un mémoire sur "Le système du monde dans les principes de la gravitation universelle". C'est tout à fait dans le grand courant des problèmes de l'époque, soit pour les mathématiciens le préoccupant problème des trois corps. Le mouvement newtonien d'une planète isolée devant le Soleil est en effet parfaitement résolu, alors que la présence d'un troisième corps vient compliquer le problème mathématique de façon abrupte. Les recherches du XVIII^{ème} siècle aboutiront à bien poser le problème, à montrer comment en donner pratiquement des solutions approchées, non des solutions parfaites (on sait qu'il fallut attendre 1889 et Henri Poincaré pour démontrer l'impossibilité de cette solution parfaite et ouvrir ainsi la porte à la théorie moderne du chaos). Pour en revenir au temps de Clairaut, ce dernier justement aura à traiter deux sujets bien distincts :

- celui des perturbations subies par un objet (une planète ou une comète) soumis à l'attraction principale du Soleil et à l'attraction secondaire d'une ou plusieurs grosses planètes - et il en aura l'application avec le calcul de la date du passage de la Comète de Halley à son périhélie;

- celui des mouvements de la Lune, astre soumis à l'attraction principale de la Terre mais forcément perturbé par l'attraction du Soleil plus de trois cent mille fois plus massif que la Terre.

Cette dernière étude conduira Clairaut à formuler une hypothèse malheureuse qui aboutira à une polémique avec Buffon dans laquelle, pour une fois, Clairaut n'aura pas le meilleur rôle. Selon ses propres calculs, il avait trouvé pour le mouvement de l'apogée de l'orbite lunaire une période de 18 années au lieu des 9 années données par l'observation. Il avait alors formulé l'hypothèse que dans le cas de la Lune, plus proche de la Terre que tout autre astre, à la loi d'attraction en $1/r^2$ il faudrait ajouter un terme en $1/r^4$. Buffon lui objecta qu'avant de tout bouleverser par l'introduction d'une formule nouvelle plus compliquée que la précédente, il fallait chercher si d'autres forces, par exemple d'origine magnétique, n'intervenaient pas. Débat intéressant parce qu'il tourne autour de l'idée de simplicité des lois naturelles. Au fond, pour les savants, le principe est définitivement adopté que, comme l'avait dit Galilée, la nature s'exprime en termes mathématiques. D'où les formules les plus fréquentes de proportionnalité, primauté absolue du linéaire. Quitte, quand on ne peut faire autrement, à puiser dans le stock des bonnes fonctions usuelles, puissances, exponentielles ou sinusoidales et fonctions réciproques.

Clairaut devait être gêné d'avoir introduit ce terme en $1/r^4$ qui ne se trouve pas chez Newton. Il recommença ses calculs et le 17 mai 1749 il retrouva la bonne période de 9 années en restant dans la théorie classique. Selon Lalande, "le moyen que Clairaut employa pour reconnaître son erreur consiste à chercher la valeur du petit terme qu'il avait soupçonné devoir être ajouté à l'expression de la force centrale en raison inverse du carré de la distance ; comme ce terme devait être petit, il fallait mettre dans le calcul une précision singulière, et y faire entrer des inégalités qu'il avait jusqu'alors négligées ; avec ces attentions, il parvint à un résultat qui donnait zéro pour le terme additionnel, et cela lui apprit ce qu'il avait eu tort de négliger."

Belle leçon de rigueur scientifique et en même temps rappel des grandes difficultés de la théorie de la Lune. D'Alembert, Euler y travailleront aussi et toutes ces études ne seront pas pour rien dans les progrès de la mécanique céleste aboutissant au traité de Laplace.

LE RETOUR DE LA COMETE

Dès 1742, Maupertuis avait attiré l'attention de Clairaut sur l'intérêt du calcul des retours des comètes périodiques. Halley avait calculé que la comète de 1682 devait revenir à son périhélie en 1759. Dès 1757, Clairaut entreprit de calculer avec précision la perturbation que Jupiter pouvait apporter dans ce retour.

Pour mener à bien tous les calculs de cette affaire, Clairaut embaucha le jeune Lalande. Ils n'étaient pas trop de deux et ils eurent aussi l'aide précieuse de Hortense Lepaute : il aurait fallu, en principe, calculer les distances de la Comète à Jupiter au cours des deux dernières révolutions complètes de la comète et disposer, bien sûr, d'une assez bonne évaluation de la masse de Jupiter. Toutes données dont ils ne disposaient pas et cela explique une certaine imprécision du résultat, l'annonce que la comète passerait à son périhélie vers le milieu d'avril 1759. "On sent, disait Clairaut, avec quels ménagements je présente une telle annonce puisque tant de petites quantités négligées nécessairement par les méthodes d'approximation, pourraient bien altérer le terme d'un mois."

Effectivement, le passage eut lieu au milieu de mars ce qui confirmait pleinement la prévision de Clairaut. Succès indéniable et dans la concurrence avec d'Alembert et Euler sur le problème des trois corps, c'est, au bénéfice de Clairaut, un succès presque populaire, compréhensible en tout cas par beaucoup de personnes cultivées. Seul Le Verrier, presque un siècle plus tard, connaîtra un succès populaire plus grand... car entre temps, la grande presse sera née et se sera développée.

Deux mots pour conclure... Vers les années 1760, Clairaut reprit une idée d'Euler et fit la théorie des objectifs achromatiques composés de plusieurs matières différemment réfringentes. Quant à sa théorie de la Lune, elle ne marque qu'une étape dans cette théorie difficile ; Euler, qui était connaisseur, fit attribuer à Clairaut le prix de l'Académie de St Pétersbourg sur ce sujet.

L'oeuvre astronomique de Clairaut est donc marquée par les préoccupations de son temps. Dominée par l'oeuvre de Newton, la pensée de Clairaut passe aisément de la théorie aux applications et retourne avec délices à la théorie, le seul portrait qu'on est de lui le représente à sa table de travail. Les historiens des sciences lui rendent un hommage discret qui convient assez à son aimable personnalité, mais je me demande si le meilleur hommage est celui que nous lui rendons chaque trimestre en publiant ces Cahiers pour promouvoir l'enseignement élémentaire de l'astronomie (2).

K.Mizar

Notes

(1) - Anders Celsius (1701-1744), né et mort à Upsala, avait publié en 1733 plus de trois cents observations d'aurores polaires effectuées entre 1716 et 1732. Il est évidemment mieux connu pour avoir introduit en 1742 l'échelle thermométrique centigrade qui porte aujourd'hui son nom. Quelle chance que Centigrade et Celsius aient la même initiale !

(2) - Bibliographie 1) Histoire Générale des Sciences par R.Taton et autres, tome II ; 2) La vie et l'oeuvre de Clairaut par Pierre Brunet (éd PUF 1952)
3) A History of Astronomy par A.Pannekoek (éd Allen and Unwin 1961)

DE QUI EST-CE ?

L'énigme proposée aux lecteurs dans le Cahier 54 est restée sans réponse. C'est vrai qu'il était difficile de deviner que l'auteur de la citation était le baron d'Holbach (1723-1789), ami de Diderot et collaborateur de l'Encyclopédie. J'avais, par hasard, relevé cette citation page 138 du tome 2 de "L'église et la science" par Georges Minois (éd Fayard).

Je propose aux lecteurs une nouvelle énigme qui me semble plus facile. Dans un sens, la réponse est dans ce propre numéro des Cahiers.
De qui est-ce ?

"C'est un vrai miracle que l'entreprise éducative moderne n'ait pas encore complètement étouffé la curiosité sacrée propre à l'esprit de la recherche. Car cette petite plante fragile a besoin d'encouragement et surtout de liberté, sinon elle dépérit. C'est une grave erreur de croire que le plaisir d'observer et de chercher puisse être induit par la contrainte ou par le sentiment du devoir. Je pense que l'on peut même priver une bête de proie en bonne santé de sa voracité, en la forçant à manger sous la menace perpétuelle d'un fouet alors qu'elle n'a pas faim - surtout si l'on choisit en conséquence la nourriture qu'on la force à ingurgiter..."

LECTURES POUR LA MARQUISE ET POUR SES AMIS

LA LUMIERE DES ETOILES

par Jean-Yves Marchal, un BT2 n°237 réalisé en collaboration avec le planétarium de Strasbourg, 52 p (abonnement 10 n°/an 270 F, l'exemplaire 32 F, frais de port 25F, un fascicule gratuit pour dix commandés au planétarium de Strasbourg).

Dans la collection des BT2 riche de plus de deux cents titres sur les sujets les plus variés, voici une très remarquable introduction à l'observation des étoiles. Des notions sur les théories de la lumière, la mesure de sa vitesse, des notions de spectroscopie (en particulier la construction d'un spectrographe comme il en a été construit aux écoles d'été de Steige ou du Col Bayard), une initiation à la photométrie. Sous un petit volume, avec des illustrations bien choisies et un texte soigneusement mis au point pour être accessible aux élèves du Collège et du Lycée, Jean-Yves Marchal a fait un excellent travail qui doit être largement utilisé.

LA PHYSIQUE ET LES MATHÉMATIQUES

un numéro spécial de la Revue du Palais de la Découverte (n°40, mai 1991, 116p., 28 F)

Cette brochure nous permet de prendre connaissance des actes d'un colloque tenu les 17, 18 et 19 octobre 1988 au Palais de la Découverte et qui avait été organisé en commun par Michel Hulin, alors Directeur du Palais et Maurice Loi responsable du séminaire "Philosophie et Mathématiques" de l'ENS. Le titre du Colloque suffit à en dire l'intérêt "Un siècle de rapports entre la physique et les mathématiques, 1870-1970". Voyez plutôt ce sommaire :

- Physique et mathématiques ; avant 1870 (Maurice Loi)
- La science et la stabilité du monde (René Thom)
- Sur le développement des mathématiques de 1870 à 1970. Quelques exemples d'interaction avec la physique (Pierre Cartier)
- Mathématique de mathématicien et mathématiques de physicien (Jean-Marc Lévy-Leblond)
- La signification physique de la théorie quantique en 1926 : Heisenberg et Schrödinger (Catherine Chevalley)
- La symétrie en physique (Louis Michel)
- Un exemple de l'interaction entre mathématiques et physique : le pavage de Penrose et les quasi-cristaux (Claude Godrèche)
- L'évolution des idées sur la turbulence 1870-1970 (Marie Farge)
- Le Calcul numérique en météorologie (Bernard Legras)
- De l'activité scientifique au paradigme de l'enseignement. Clôture du colloque (Michel Hulin)

Comme toujours dans ce genre de manifestation collective, vous trouverez des textes d'inégale portée. Je n'ai pas compris, en ce qui me concerne, l'intérêt des remarques philosophiques de René Thom. L'exposé de Catherine Chevalley a dépassé mon niveau de compréhension de la physique quantique (qui est fort bas), mais je ne regrette pas du tout de l'avoir lu et je recommande aux amis d'en faire leur profit. Surtout je leur conseille de lire et relire les conclusions du colloque tirées par le regretté Michel Hulin. Le seul à mon avis, dans cette docte assemblée, à poser clairement les problèmes de l'enseignement. Avec des remarques du genre suivant : "la différentielle du physicien, la différentielle du mathématicien, ce sont bien sûr les mêmes choses, mais autour de l'outil lui-même, autour de la notion elle-même, il y a tout un habillage, toute une signification, toute une prise de sens qui est extrêmement complexe et sur les détails de laquelle il ne faut pas essayer de faire trop d'économies." Tout ce texte est important qui paraît s'achever sur une formule abrupte et désespérante "la physique ne s'enseigne pas" si, pour l'expliquer l'auteur ne

précisait "la physique est incompatible avec la rigidité du paradigme scolaire traditionnel, de toute l'organisation scolaire avec ses programmes, ses examens." Ou, encore mieux et plus généralement (car, évidemment, Michel Hulin ne pensait pas seulement à la physique mais à tout l'enseignement des sciences) : "L'enjeu c'est donc maintenant d'essayer d'être capable de changer ce paradigme de l'enseignement. Il nous faut pleinement admettre l'infinie variété de ce que j'appellerais les sensibilités cognitives."

Une lecture heuseusement dérangeante que je vous recommande et que vous pourrez prolonger puisque j'apprends la prochaine publication des textes écrits par Michel Hulin entre 1969 et 1988 sous le titre Le Mirage et la Nécessité (290 p.; éd Presses de l'ENS et Palais de la Découverte) Prix de souscription 170 F + 15 F de port, chèque à l'ordre du Palais de la Découverte à l'attention de Anne Fricquegnon. Sommaire : L'enseignement de la physique (avec un aperçu des travaux de la Commission Lagarrigue). De la didactique à la vulgarisation. La vulgarisation et l'enseignement face à un défi.

RAYON VERT

Sous ce titre, l'observatoire du livre et de la presse scientifiques, techniques et industriels de langue française pour les jeunes publie trimestriellement des notes critiques sur les ouvrages récents. L'éditeur est l'Institut National de la Jeunesse et de l'Éducation Populaire, parc du Val Flory, rue Paul Leplat, 78160 Marly-le-Roi. Une oeuvre utile qui mériterait d'être mieux connue. Dans son n°6, Rayon Vert publie un éditorial de son Président, Albert Jacquard. Je ne résiste pas au plaisir de vous le faire savourer :

LA PUBERTE DE L'HUMANITE - Depuis toujours les hommes, regardant la Terre autour d'eux, l'ont crue illimitée. Ils ont développé des cultures de nomades. Aujourd'hui nous savons que la Terre est petite et que nous allons bientôt la saturer ; nous ne la quitterons pas ; il nous faut donc bâtir une culture d'assignés à résidence.

Ou plutôt une culture permettant de gérer au mieux notre propriété de famille, notre planète. Après quelques millions d'années d'insouciance où nous avons dilapidé les richesses qu'elle nous offrait, il nous faut comprendre que ces richesses appartiennent à tous les hommes, ceux d'aujourd'hui et ceux de demain. S'approprier une ressource non renouvelable, c'est commettre un crime contre l'humanité. Souvenons-nous du proverbe indien : "Nous n'héritons pas la Terre de nos ancêtres, nous empruntons la Terre de nos enfants".

Les hommes d'aujourd'hui vivent l'équivalent d'une puberté ; après une si longue enfance, où nous avons même inventé de jouer à la guerre, nous n'avons que quelques décennies pour devenir adultes. Le seul espoir est dans un changement radical des états d'esprit, dans le remplacement du culte de la vitesse et de la compétition par celui de la mise en commun de nos angoisses et de nos espoirs.

Réaliser ce changement d'esprit n'est-ce pas le devoir premier du système édicatif ?

4 février 1991

L'HEURE AU SOLEIL

cadrans solaires en Franche Comté par F.Suagher, P.Perroud et J-P.Marchand. Un volume 128 p. format 24/27 cm richement illustré, 180F éd Cêtre (14 grande rue, BP 72, 25013 Besançon Cedex)

Notre amie Françoise Suagher est infatigable. Ici, avec ses compatriotes, elle nous permet de découvrir les richesses astronomiques de sa région. Ce beau livre est préfacé par Jean-Paul Parisot et est accompagné d'un précieux lexique.

SCIENCE, ETHIQUE, PHILOSOPHIE

par Albert Einstein, tome 5 des textes choisis et présentés par Jacques Merleau-Ponty et Françoise Balibar, et traduits de l'allemand (256 p. relié, 290 F ; éd Seuil et CNRS)

Dans le Cahier n°45 (printemps 1990), nous avons signalé l'intérêt exceptionnel de cette édition qui commençait par les tomes 1) Quanta

et 4. Correspondances françaises. L'entreprise se poursuit avec ce tome 5 particulièrement riche et passionnant. Quatre parties. 1) Documents autobiographiques (une esquisse parue en 1955, des éléments parus en 1949 et "Comment je vois le monde" écrit en 1930). 2) La nature et la physique en quatre chapitres : a) Relativité, espace-temps, champ, éther ; b) Méthodes de la physique ; c) Causalité, déterminisme, lois statistiques, ordre temporel ; d) Essai de synthèse, physique et réalité. 3) La religion, la science et les valeurs. 4) Philosophes et savants.

Tous les chapitres de ce volume 5 sont à lire, relire et à méditer; je retrouve, p.70, le texte de la conférence prononcée en 1921 et que j'ai maintes fois relue à mes élèves sur "La géométrie et l'expérience" ; on y trouve cette remarque à ne jamais oublier : "Pour autant que les propositions mathématiques se rapportent à la réalité, elles ne sont pas certaines, et pour autant qu'elles sont certaines, elles ne se rapportent pas à la réalité."

Je relève, P.31, dans ses souvenirs autobiographiques: "Je ne peux m'empêcher de remarquer que le couple Faraday-Maxwell ressemble de façon très curieuse, dans son fonctionnement interne, au couple Galilée-Newton : dans chaque couple, le premier comprend les relations de façon intuitive, le second les formule de façon exacte et en donne les applications quantitatives." Un autre exemple, tout différent des richesses que vous trouvez dans cette lecture, c'est à propos de l'attitude de Galilée devant les Inquisiteurs, une confidence personnelle dans une lettre à Max Brod : "Je ne peux en tout cas pas imaginer que j'entreprendrais quoi que ce soit de semblable pour défendre la théorie de la Relativité. Je me dirais : la vérité est beaucoup plus forte que moi et cela me semblerait ridicule et donquichottesque de vouloir la protéger, monté sur une rossinante et l'épée à la main."

Ce ne sont que citations au hasard. Puissent-elles vous donner le désir de lire ce livre, il me semble que je serais coupable de ne pas vous y inviter.

G.W.

TITRES PARUS donc livres à lire :

- La Lune par P.Bianucci, éd Bordas, 1990.
- La vie dans l'Univers par Jean Heidmann, éd Hachette 1990.
- La vie extraterrestre par J.Cle Ribes et G.Monnet, éd Larousse 1990.
- Nées dans la nuit par M.Cohen, éd A.Colin, 1990.

DANS LES REVUES

- Ciel et Espace, numéro spécial juin-juillet-août "Du big bang à nos jours", (98 p.) qui s'ouvre avec une introduction d'Evry Schatzman "L'origine en questions".
- La Recherche. La structure interne du Soleil par G.Berthomieu, M.Cassé et D.Vignaud (n°231, avril 91). Le chaos dans le système solaire par J.Laskar et C.Froeschlé (dans un numéro sur "la science du désordre", n°232, mai 91). Le noyau de la Terre par J.Hinderer, H.Legros et A.Souriau-Thévenard (n°233, juin 91). Les pulsars millisecondes par A.W.Jones et J.M.Bonnet-Bidaud (n°234)
- Espace Information (n°48 juin 91) : La Terre étudiée depuis l'espace.
- Gnomon (summer 1991) : La partie "the Universe in the classroom" est consacrée à l'éclipse de Soleil du 11 juillet.
- L'Université syndicaliste n°267 du 06/07/91 fait une place à l'astronomie et en particulier au CLEA. Merci.

ORIGINES DU BUREAU DES LONGITUDES (1795)

L'étude qui suit, a fait l'objet d'une conférence à la Médiathèque de La Villette le 20 septembre 1989, dans le cadre de la célébration du bicentenaire de la Révolution.

L'auteur s'est attaché ici à faire une analyse des conditions de mise en place de cette institution en regardant les hommes qui y participèrent, les problèmes qu'ils eurent à résoudre et les moyens dont ils disposèrent.

On a volontairement évité de parler du fonctionnement du Bureau des Longitudes après sa création; ceci résulterait d'une autre étude.

I-LA CREATION DU BUREAU DES LONGITUDES

1-Le rapport de l'abbé Grégoire

Le 4 messidor de l'an III de la République (22 juin 1795), lors de la 441ème séance du Comité d'Instruction publique, l'abbé Grégoire lut à l'Assemblée le rapport pour l'établissement d'un bureau des longitudes à Paris. Ce texte précédant le décret de création fut présenté au nom des Comités de Marine, des Finances et d'Instruction publique, réunis.

Le but de cette création était de "rivaliser avec les Anglais": Cette institution était une nécessité pour le développement de l'astronomie.

le Bureau des Longitudes devait: dispenser un cours public d'astronomie; vérifier les instruments nautiques; rédiger la Connaissance des temps; perfectionner les tables astronomiques, la méthode de détermination des longitudes en mer, les cartes magnétiques et les cartes hydrographiques; s'occuper de la météorologie.

L'Observatoire de Paris était placé sous son autorité. Il se trouvait ainsi réorganisé. Certains observatoires départementaux seraient conservés et réaménagés, en particulier ceux de Brest et de Toulon pour les besoins de la Marine. A Brest, un atelier d'optique allait être créé pour alimenter la Marine (notons que les prises de guerre en verre flint furent la matière première de cet atelier); le Bureau des Longitudes s'occuperait également de navigation intérieure: construction de canaux pour joindre les ports principaux; ce qui serait une protection contre les effets du blocus.

Les premiers membres du Bureau des Longitudes furent: Lagrange et Laplace comme géomètres; Lalande, Cassini, Méchain et Delambre comme astronomes; Borda et Bougainville, anciens navigateurs comme conseillers; un géographe: Buache; un artisan, Carochéz. On y associait quatre adjoints astronomes, Le Français de

Lalande, neveu de Lalande, Bouvard; les deux autres adjoints restaient encore à nommer.

L'observatoire de l'Ecole militaire se trouvait placé sous l'autorité du Bureau des Longitudes (Lalande et son neveu y ont observé 30 000 étoiles). Un des membres y faisait chaque année un cours d'astronomie, et le citoyen Lalande, qui y professait depuis 34 ans, en fut provisoirement chargé. Enfin, on seconderait les observatoires de Marseille, de Toulouse et de Montauban.

2-La navigation astronomique

Ce n'est pas par hasard si le Comité de Marine est nommé le premier. La France et l'Angleterre étaient, avant la Révolution, les deux plus grandes puissances maritimes. Après la désastreuse guerre de Sept ans, la Marine royale avait été entièrement à reconstruire. L'Académie de Marine, créée en 1752, fut réorganisée en 1769. Elle désirait vivement voir ses membres acquérir une solide culture scientifique particulièrement dans le domaine de l'astronomie. La conquête maritime et le commerce international, donc la richesse du pays, étaient liées inexorablement à la connaissance des longitudes; de ces dernières dépendait entièrement le succès économique et politique du pays.

Au début du XVIIIe siècle, la détermination des longitudes en mer était un problème si crucial pour l'Occident que les nations n'hésitèrent pas à proposer des prix importants à qui permettrait une connaissance des longitudes au demi-degré près - on sait qu'une minute d'angle correspond à un écart de un mille marin, on demandait donc une précision d'environ 50 km - La Grande-Bretagne proposa, par l'Acte de la reine Anne, une prime de 20 000 livres sterling; le roi d'Espagne promit 100 000 écus; les états de Hollande 30 000 florins. En 1716, le Régent fixa un prix de 100 000 livres. Ces récompenses élevées amenèrent une pléthore d'inventeurs de tous genres à proposer le plus souvent des solutions fantaisistes. Qu'en était-il donc?

On naviguait alors à l'estime; l'allure du navire était connue grâce au loch, pièce de bois triangulaire lestée de façon à rester perpendiculairement à la surface de l'eau et reliée au bateau par une ligne comportant des noeuds régulièrement espacés de 47,5 pieds. On laissait la ligne se dévider en observant le sablier de 30 secondes; par un coup sec, on faisait tomber la cheville tenant le loch vertical et on le hissait à bord. Mais l'écart entre les noeuds, normalisé, était souvent mal respecté; le sablier ne mesurait pas toujours exactement les trente secondes; la dérive déportait navire et loch; tout cela entretenait de nombreuses causes d'erreurs contre lesquelles les marins les plus savants opposèrent deux méthodes: la méthode des variations du compas et la méthode astronomique. La première révéla très tôt ses limites et la seconde eut pu imposer plus tôt ses méthodes. La latitude obtenue à partir de deux positions

du Soleil ou à partir de la hauteur de la Polaire pouvait être considérée comme relativement bien connue. La longitude dépendait d'une référence: le méridien d'origine donc d'une mesure du temps écoulé depuis le départ. Comment conserver l'heure du méridien origine à bord de ces vaisseaux constamment bousculés par les flots?

Vers 1735 une amorce de solution fut proposée par J.Harrisson en Angleterre. Harrisson travailla toute sa vie sur ses montres marines. Il devait cependant attendre 1762 pour être récompensé, en partie, après l'essai concluant de sa quatrième horloge. Pour recevoir le complément de la prime, il lui était demandé d'expliquer aux membres de la commission des longitudes le fonctionnement de cette dernière. Les savants français furent invités à cette occasion. F.Berthoud, horloger, et J. de Lalande rencontrèrent Harrisson en mai 1763 sans obtenir les détails techniques souhaités. En 1765, un autre horloger français, Pierre Le Roy apporta une solution à la compensation thermique; peu après, Ferdinand Berthoud expliquait l'isochronisme du ressort spiral. A la fin du XVIIIe siècle on pouvait considérer le problème des longitudes comme étant définitivement réglé dans ses grandes lignes. La marine française fut très vite équipée de montres de Berthoud tandis que la marine anglaise se contenta de garder les chronomètres pour les voyages d'expériences; ceci n'est peut-être pas étranger à la victoire française lors de la guerre d'Amérique (1783).

Dès la fin des années 60, les expéditions maritimes scientifiques se succédèrent. Elles avaient pour mission de tester les différents instruments servant à la détermination des longitudes et, surtout, d'éprouver la stabilité des montres marines. Nous pouvons rappeler:

- le voyage de l'*Isis* en 1768 avec Fleurieu, celui de *la Flore* en 1771 avec Borda aux Indes Orientales, la campagne privée du marquis de Courtanvaux à bord de *l'Aurore* le long des côtes d'Europe en 1768;

-enfin les voyages circumterrestres, celui effectué par Bougainville à bord de *la Boudeuse* et *l'Etoile* de 1766 à 1769 pour la France .

Le passage de Vénus devant le disque du Soleil en 1769 avait aussi donné lieu à bien des essais. Juste avant la Révolution, l'expédition de Lapérouse reprenait les méthodes de Cook et, sur les ordres du roi, était chargé de compléter la carte du Pacifique, ni plus ni moins.

Les montres marines étaient associées à des instruments de mesure d'angles plus ou moins maniables, plus ou moins précis. Dans la première partie du siècle, l'arbalestrille et l'astrolabe avaient été remplacés par l'octant de Hadley apparu en 1732. L'expédition géodésique pour la détermination d'un degré de méridien à l'équateur avait été chargée de le tester lors du voyage de départ en 1735. Ses qualités l'avaient très vite imposé dans les grandes navigations militaires et scientifiques.

En 1764, Campbell proposait le sextant plus performant. Enfin Borda améliorait le cercle à réflexion en 1777 et proposa le cercle répétiteur en 1784; il permettait théoriquement de diviser l'erreur par le nombre de répétitions de la mesure de part et d'autre du zéro.

Ainsi, au moment de la création du Bureau des Longitudes, les navigateurs possédaient deux types d'instruments fiables et commodes d'emploi:

- un instrument de mesure du temps origine: le garde-temps ou chronomètre;
- un instrument de mesure des angles: le sextant ou le cercle répétiteur.

Afin de tirer parti de ces moyens, il fallait fournir aux marins des tables astronomiques précises: les éphémérides nautiques. Déjà, le Bureau des Longitudes d'Angleterre faisait paraître depuis 1767 le *Nautical Almanach* donnant six ans de prévision. La *Connaissance des Temps* rédigée en grande partie par Lalande ne les fournissait que pour l'année. Il y avait donc là un défi à relever: le Bureau des Longitudes devait "rivaliser avec les Anglais", première mission qu'il lui fallait remplir. Ceci était d'autant plus urgent que la Révolution avait contribué à la destruction de la Marine française. Beaucoup d'officiers avaient émigré, les défaites s'étaient succédées, le Grand Corps était à reconstituer. Un organisme central éclairé par les Sciences ne pouvait qu'y contribuer.

Deux anciens navigateurs furent donc nommés: Borda et Bougainville, nous les avons déjà cité deux fois. A leurs qualités de marin, exemplaires, s'ajoutaient de grandes qualités humaines; leur grande culture scientifique était reconnue par tous.

II-LES NAVIGATEURS ET LE GEOGRAPHE DU BUREAU DES LONGITUDES

1-Borda

Né en 1733, le Chevalier Charles de Borda commença une carrière militaire tout en poursuivant des études de mathématiques. En 1756, l'Académie royale des Sciences lui décerna une mention particulière pour un mémoire traitant du mouvement des projectiles.

Les rapports difficiles de la France avec l'Angleterre laissaient espérer à certains caractères bien trempés une carrière dans les armes, particulièrement dans la Marine. Ce fut le choix de Borda comme de Bougainville. Borda devint lieutenant de port en 1767; il continua à produire des mémoires sur des sujets divers: analyse mathématique, écoulement des fluides... Sa carrière de navigateur commença en 1771 par une campagne scientifique.

Associé au chancine Pingré, lui-même astronome géographe de la Marine et de l'Académie des Sciences, il embarqua sur la *Flore* pour éprouver à la mer la montre marine n°8 de F. Berthoud et les montres A et S de P. Le Roy. Le périple dura un an (17 oct. 1771- 20 oct. 1772) et s'effectua en Atlantique, de Brest aux

Antilles en passant par Goree puis vers le nord en revenant à Brest par le Danemark. Les résultats pour la montre de Berthoud furent excellents: 1,36 seconde de résidu d'avance sur l'heure de départ, ce qui apparaissait tout-à-fait exceptionnel pour l'époque.

Au retour, Borda fut nommé académicien et lieutenant de vaisseau puis il effectua quelques croisières de reconnaissance: notamment, en 1774, il détermina la position précise des îles Canaries, afin de fixer le méridien zéro à l'ouest de l'île de Fer - important bien entendu pour la détermination des longitudes - Il perfectionna à cette occasion les instruments à réflexion, améliora considérablement le travail calculatoire des marins par la présentation imprimée des différentes étapes de calculs; l'observateur n'avait plus qu'à reporter ses mesures et à effectuer dans l'ordre les calculs.

En guerre contre l'Angleterre dans l'escadre d'Estaing dans les années 80, il fut fait prisonnier en 1782. Comme inspecteur de la Marine, il s'intéressa à la construction navale.

Dans le même temps, il prépara avec Bailly le programme astronomique de l'expédition Lapérouse (1785), de même il participa à nouveau à la préparation de l'expédition de recherche commandée par d'Entrecasteaux en 1791. Celle-ci emportait 800 feuilles imprimées des calculs préliminaires de Borda; le cercle de réflexion fut utilisé avec beaucoup de profit au cours de cette campagne.

En 1787, le cercle de répétition à double lunette de Borda montra une supériorité incontestable lors des opérations faites en France pour la jonction des observatoires de Paris et de Greenwich par Cassini, Méchain et Legendre. Il s'agissait de déterminer précisément leur différence de longitude.

A la Révolution, il participa activement à la commission temporaire de réforme des Poids et Mesures; on y rencontrait aussi, entre autres, Lagrange, Laplace, Méchain, Delambre, Monge, Coulomb et Lavoisier. Le Comité de Salut public l'en dessaisit le 3 nivôse an II (23 déc. 1793) en même temps que Lavoisier. Laplace, Delambre et Coulomb; furent conservés Lagrange, Monge et Méchain; y fut adjoint Buache.

2-Bougainville

Louis-Antoine de Bougainville, contemporain de Borda, était un homme d'une vitalité hors du commun; comme Borda, il était pétri de l'humanisme du XVIIIe siècle. De sa carrière exceptionnelle, à la fois riche et disparate, il n'espérait tirer gloire que du nom d'une fleur: la Bougainvillea, découverte lors du premier voyage circumterrestre qu'un capitaine français fut amené à effectuer de 1766 à 1769. Il en ramena Aotouru, indigène tahitien, et contribua ainsi au mythe du "bon sauvage". Rien au début de sa carrière ne laissait présager une telle expédition.

Fils d'un notaire, avocat au barreau de Paris, il étudia les mathématiques et publia même un traité de calcul intégral en 1752, à 23 ans. Il embrassa ensuite la carrière militaire: on le trouve successivement aide-major au bataillon de Picardie (1753); à Londres comme secrétaire d'ambassade (1754) où il devint membre de la Royal Society; comme aide de camp de Montcalm au Canada (1756) où malgré le succès de sa lutte contre les Anglais, il dut, sur ordre du roi, organiser la capitulation des forces françaises en 1760. En 1761, il était dans l'armée d'Allemagne. On s'essouffle à vouloir le suivre.

En 1766, la réaction très vive des Espagnols devant son essai de colonisation des îles Malouines par les Français rejetés du Canada lui fit modifier son projet. L'expédition circumterrestre commença par la remise aux autorités espagnoles des îles en question. Le voyage se déroula de façon tout-à-fait satisfaisante. On en connaît les conséquences littéraires.

Ses récits de voyages à peine publiés, Bougainville participa à la Guerre d'Amérique puis se retira en 1790 après son échec pour réprimer les troubles de l'armée navale à Brest.

Sa nomination au Bureau des Longitudes le remettait donc sur le devant de la scène publique. En 1795, à 66 ans, Bougainville apparaissait avec Borda, alors âgé de 62 ans, comme un des deux plus éminents conseillers navigateurs les plus aptes à définir la tâche du Bureau des Longitudes dans ce domaine.

3-Buache de La Neuville

A ces deux navigateurs on adjoint un géographe: Buache de La Neuville, ancien géographe du roi, hydrographe en chef au dépôt de la Marine. Buache dressa les cartes du Voyage de Lapérouse, elles servirent aussi à d'Entrecasteaux en 1791 (Buache a initié son neveu Beautemps-Beaupré à la cartographie: celui-ci révolutionna le relevé des cartes hydrographiques et sa méthode est encore appliquée aujourd'hui). Sous les ordres de Fleurieu, Buache avait participé à l'édition des *Neptune*, recueil de cartes dressées sur les indications des journaux de bord des différentes campagnes. En cette fin du XVIIIe siècle, il apparaissait comme le meilleur hydrographe de cabinet de son temps. Il était au début, de l'an III, professeur de géographie à l'École normale.

L'aspect maritime de la mission du Bureau des Longitudes est ainsi nettement marqué. On a fait appel à des hommes de l'Ancien régime ayant fait la preuve de leur efficacité, de leur sens de l'ordre et de l'organisation. La structure du Bureau des Longitudes, calquée comme nous allons le voir sur le projet initial de Cassini IV, a cependant emprunté à son homologue anglais. Mais la Nation avait besoin d'hommes efficaces à son service; le blocus exigeait des marins avertis et les moyens devaient être réunis pour cela.

Danièle FAUQUE

(à suivre ...)

CHRONIQUE DU CLEA - COURRIER DES LECTEURS

STAGE DE LA MAFFEN à Paris

Un stage d'astrophysique, "La lumière messagère des astres" aura lieu à l'Institut d'Astrophysique de Paris au troisième trimestre de l'année scolaire 91-92 avec la collaboration de Lucette Bottinelli, Michèle Gerbaldi et Lucienne Gouguenheim. Collègues parisiens, ne manquez pas de vous inscrire sans tarder dès l'ouverture des inscriptions en octobre.

UN AGENDA STELLAIRE POUR 1992

L'Observatoire d'Aniane annonce la prochaine édition d'un agenda pour 1992 qui donnera pour chaque jour l'événement astronomique important. Prix de souscription 120 F (+ 25 F de port). Adresse : BP 14, 34150 ANIANE.

SR L'ASTROLOGIE

Dans Sciences et Vie (août 1991), un excellent article "L'astrologie déguisée en astronomie". Son auteur, Michel Rouzé dénonce fort justement la mauvaise action de l'éditeur Presses Universitaires de France qui a remplacé le "Que sais-je ?" n°508 L'Astrologie, auteur Paul Couderc par le n°2481 L'Astrologie, même titre mais pas le même auteur, Suzel Fuzeau-Braesch. Au lieu d'un livre sérieux écrit par astronome compétent qui dénonçait l'escroquerie intellectuelle de l'astrologie, une apologie des charlatans. Nous avons dénoncé la mauvaise action dans le Cahier n°49 du printemps 1990 et nous avons écrit notre indignation au Directeur des PUF. Nous n'avons reçu aucune réponse.

UN DOCUMENT POUR L'HISTOIRE

De sa résidence du Panthéon de la Science au fronton duquel est inscrit "Aux savants illustres, l'humanité reconnaissante", Galilée nous communique la lettre suivante qu'il a adressée au journal Le Monde :

"Monsieur le Directeur, dans le numéro du 21 août 1991 de votre journal, vous publiez, page 13, l'information suivante :

"Depuis la découverte de Mars par Galilée en 1610,..."

Je vous en prie, Monsieur le Directeur, ne m'attribuez pas une découverte qui remonte à plusieurs millénaires avant mon époque. Je suis assez fier d'avoir découvert les satellites de Jupiter, les montagnes de la Lune, les phases de Vénus et d'avoir soupçonné l'existence d'un étrange objet autour de Saturne. Ce que vous avez écrit vaut rectification. Vous connaissez mes confrères du Panthéon, tous modestes mais susceptibles en diable ; à vous lire, j'en entends plusieurs s'écrier - ce Galilée, il se prend vraiment pour une vedette télévisuelle, bientôt ce sera lui qui aura inventé la Lune !

Agréez, Monsieur le Directeur, mes salutations panthéonesques empressées.
pour Galilée, son secrétariat d'été, G.W.

RETENEZ BIEN CETTE DATE :

LA PROCHAINE ASSEMBLEE GENERALE DU CLEA AURA LIEU LE
SAMEDI 16 NOVEMBRE 1991

RETENEZ BIEN AUSSI LE LIEU :

A L'UNIVERSITE D'AIX-MARSEILLE
ORGANISEE PAR L'EQUIPE CLEA DE L'ACADEMIE D'AIX-MARSEILLE

LES PUBLICATIONS DU C. L. E. A.

Le CLEA publie depuis treize ans, son bulletin trimestriel de liaison, Les Cahiers Clairaut. On trouvera, page 4 de la couverture, les conditions d'abonnement et les conditions d'adhésion au CLEA.

Toutes les publications du CLEA sont conçues pour l'information des enseignants et pour les aider dans leur enseignement de l'astronomie.

FASCICULES POUR LA FORMATION DES MAÎTRES EN ASTRONOMIE

de l'Université de Paris XI (Orsay) :

1. L'observation des astres et le repérage dans l'espace et le temps (20F)
2. Le mouvement des astres (25 F)
3. La lumière messagère des astres (25 F)
4. Naissance, vie et mort des étoiles (30 F)
5. Renseignements pratiques et bibliographie pour l'astronomie (25 F)
- 5 bis. Complément au fascicule 5 (25 F)
6. Univers extragalactique et cosmologie (30 F)
7. Une étape de la physique, la Relativité restreinte (60 F)
8. Moments et problèmes dans l'histoire de l'astronomie (60 F)
9. Le système solaire (50 F)
10. La Lune (30 F)
11. La Terre et le Soleil (40 F)
12. Simulations en astronomie sur ordinateur (30 F)

LES FICHES PÉDAGOGIQUES DU CLEA, numéros hors série des Cahiers Clairaut

par le Groupe de Recherche Pédagogique du CLEA

- HS 1. L'astronomie à l'école élémentaire (60 F) (40 F pour les abonnés)
HS 2. La Lune, niveau collège 1 (60 F) (40 F pour les abonnés)

TRANSPARENTS ANIMÉS POUR RETROPROJECTEUR

- T 1. Le TranSoLuTe (les phases de la Lune et les éclipses) (50 F)
T 2. Les fuseaux horaires (40 F)
T 3. Les saisons (50 F)

DIAPPOSITIVES Séries de 20 diapositives avec livret

- D 1. Les phénomènes lumineux (50 F)
D 2. Les phases de la Lune par le Groupe de Recherche Pédagogique du CLEA (50F)

COURS D'ASTRONOMIE POLYCOPIÉS de l'Université de Paris XI (Orsay)

- C 1. Astrophysique générale (30 F)
C 2. Mécanisme de rayonnement en astrophysique (30 F)
C 3. Etats dilués de la matière : le milieu interstellaire (30 F)
C 4. Structure interne des étoiles (30 F)
C 5. Relativité et cosmologie (30 F)
C 5. Cours d'astrophysique solaire : le Soleil (30 F)

LES COMPTES RENDUS DES UNIVERSITÉS D'ÉTÉ qui présentent le fruit du travail des participants. Sont encore disponibles ceux de : Digne 1978 (25 F), Grasse 1979 (35 F), Grasse 1983 (58 F), Formiguères 1984 (65 F), Formiguères 1985 (100 F), Formiguères 1986 (100 F).

PUBLICATIONS DU PLANETARIUM DE STRASBOURG : catalogue des étoiles les plus brillantes (75 F) ; le catalogue existe sur disquettes pour PC (120 F les deux disquettes). Deux séries de cartes postales : CP1 le système solaire, CP2 nébuleuses et galaxies (chaque série 23 F)

Commandes à adresser au secrétaire du CLEA, Gilbert Walusinski, 26 Bérençère, 92210 ST CLOUD en joignant le chèque correspondant rédigé à l'ordre du CLEA.

LE C.L.E.A. et LES CAHIERS CLAIRAUT

Conditions d'adhésion et d'abonnement pour 1991 :

Cotisation simple au CLEA pour 1991	25 F
Abonnement simple aux Cahiers n°53 à 56	90 F
Abonnement aux Cahiers (n°53 à 56) ET cotisation au CLEA pour 1991	110 F
Contribution de soutien (par an)	30 F
Le numéro des Cahiers Clairaut (port compris)	35 F

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

A l'intention des nouveaux abonnés, onze fascicules ont été édités; ils réunissent par thèmes des articles publiés dans les Cahiers Clairaut. Tout nouvel abonné reçoit en témoignage de bienvenue un index des articles publiés dans les Cahiers et un fascicule à choisir dans la liste suivante :

FA. L'astronomie à l'école élémentaire	FG. Astronomie et informatique
FB. L'astronomie au collège	FH. Articles de physique
FC. Construction d'une maquette	FJ. Articles d'astrophysique
FD. Construction d'un instrument	FK. Histoire de l'astronomie
FE. Réalisation d'une observation	FL. Interprétation d'un document d'observation
FF. Les Potins de la Voie Lactée	

On peut aussi se procurer des collections des Cahiers Clairaut :

- C1.. Collection complète du n°1 au n°52 (650 F)
- C88. Collection année 1988 (n°41 à 44) (80 F)
- C89. Collection année 1989 (n°45 à 48) (80 F)
- C90. Collection année 1990 (n°49 à 52) (90 F)

Adresser commandes et souscriptions au secrétaire du CLEA :

Gilbert Walusinski, 26 Bérengère, 92210 SAINT-CLOUD

en joignant à votre envoi le chèque correspondant à l'ordre du CLEA.

Directeur de la publication : Lucienne Gougenheim

Imprimerie Hauguel, 92240 Malakoff

Dépot légal : 1^{er} trimestre 1979 ; numéro d'inscription CPPAP :61660