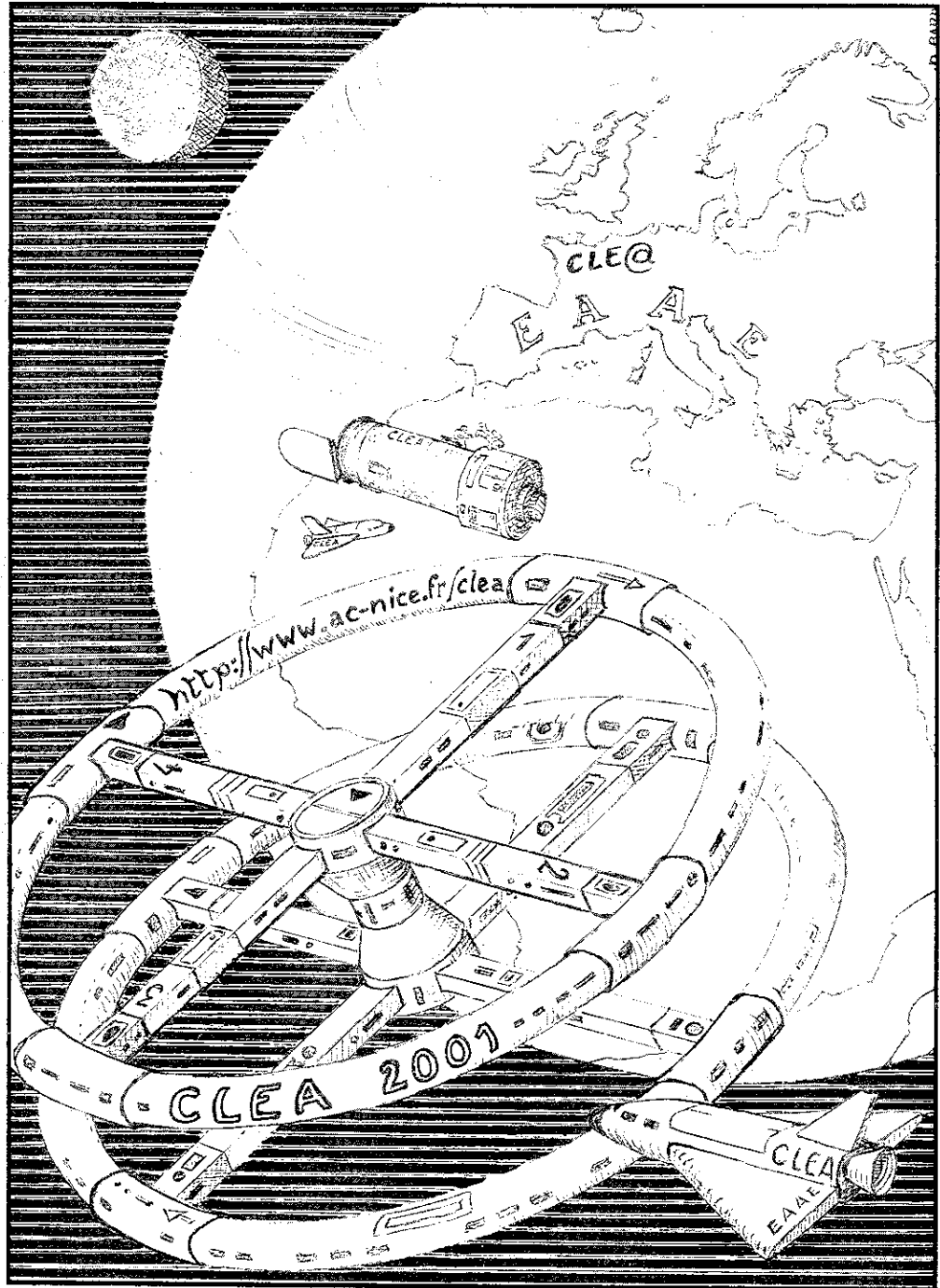


bulletin du comité de liaison enseignants et astronomes

Les Cahiers Clairaut



numéro 94- ÉTÉ 2001

ISSN 0758-234X

Comité de liaison enseignants astronomes

Le CLEA

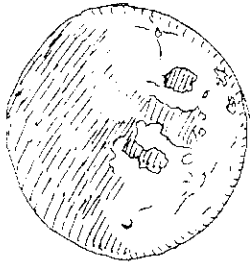
Le **CLEA**, Comité de Liaison Enseignants et Astronomes, est une association déclarée (loi de 1901). Elle réunit des enseignants et des astronomes professionnels qui veulent ensemble promouvoir l'enseignement de l'astronomie à tous les niveaux de l'enseignement et dans les organismes de culture populaire.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

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

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

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

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



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

Bureau du CLEA pour 2001

Présidents d'honneurs

Jean-Claude Pecker
Evry Schatzman

Présidente

Lucienne Gouguenheim

Vice-Présidents

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

Rédactrice en chef

Martine Bobin

Trésorière

Béatrice Sandré

Secrétaires

Martine Bobin et Catherine Vignon

Comité de rédaction des Cahiers Clairaut

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

EDITORIAL

Pour ce numéro d'été nous avons encore reçu des contributions riches et variées et nous en remercions les auteurs.

Des invitations au voyage... Philippe Laporte nous propose de parcourir notre Galaxie dans les différentes longueurs d'onde. Charles-Henri Eyraud nous prépare une visite de l'horloge astrolabique de la cathédrale de Lyon. Quant à Frédéric Dahringer il nous fait un rapport plein d'humour d'une expédition en Laponie.

Des idées pour nos élèves... Daniel Toussaint réfléchit à la façon de situer, d'un point de vue géocentrique, les astres à partir de leur mouvement apparent, tandis que Charles-Henri Eyraud interprète une légende des indiens Micmac du Canada. Marie-Agnès Lahellec propose un exercice sur la gravitation à propos des anneaux de Saturne et Pierre Causeret nous présente un cadran solaire de son invention.

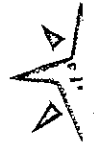
Des réflexions sur des points d'histoire...

La controverse sur la datation du zodiaque de Denderah par Colette Le Lay ; l'approche scientifique qui a conduit à l'expérience du pendule de Foucault par Robert Garnier et Georges Paturel ; la détermination de la date de Pâques et les coïncidences entre les deux dates dans les calendriers julien et grégorien par Lucienne Gouguenheim.

Et bien sûr des lectures et des remue-méninges ...

Bonnes lectures et bonnes vacances à tous.

La rédaction



Les Cahiers Clairaut

Été 2001 n° 94



Article de fond

Le ciel de l'invisible

p. 2



Avec nos élèves

L'ordre des astres dans les modèles géocentriques (niveau lycée)

p. 8

La chasse à l'Ourse céleste (niveau lycée)

p. 10

Les anneaux de Saturne (niveau lycée)

p. 12



Réalisation d'objets

Un cadran solaire demi-cylindrique (niveau collège)

p. 14



Reportages

L'horloge astronomique de Lyon

p. 17

Chronique d'une expédition internationale en Laponie

p. 24

Histoire



Le zodiaque de Denderah

p. 28

Le pendule de Foucault

p. 32

Remue-méninges



Excentricité de l'orbite terrestre

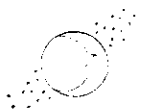
p. 34

Lectures pour la Marquise

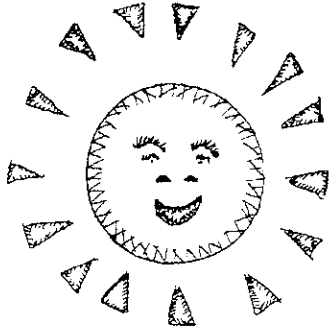


p. 36

Les potins de la Voie lactée



p. 38



Le ciel de l'invisible

Philippe Laporte, CNES

Philippe Laporte nous offre ici le texte de la conférence qu'il a présentée à Toulouse à l'occasion de l'A.G. 2000 du CLEA.

Il s'agit d'un voyage dans notre Galaxie, à travers les longueurs d'onde, des plus longues aux plus courtes.

Ce périple commence ici avec les ondes radio, l'infrarouge et le visible et se poursuivra dans le prochain numéro avec l'ultraviolet, les rayons X et γ .

Présentation

1 - Pourquoi le ciel invisible ?

Depuis plusieurs milliers d'années, l'Homme regarde le ciel. Qui, un soir d'été, n'a jamais levé le nez pour observer le spectacle de ces milliers de points blancs scintillants ? Bien que le gnomon, destiné à mesurer les angles, ait été inventé bien avant notre ère, les yeux ont constitué durant de nombreux siècles le principal instrument de mesure. Pour cette raison, l'astronomie a peu progressé durant cette période : 2500 étoiles, le Soleil, la Lune et 5 "objets mobiles", en fait les planètes visibles à l'œil nu, constituaient le cheptel astronomique. L'étude du ciel sur des siècles a certes permis la découverte du parcours des astres errants, les périodes des éclipses et d'autres phénomènes, mais les mouvements et l'origine des objets étaient loin d'être expliqués. Si le ciel a été utilisé comme horloge (calendrier solaire et luni-solaire), il a aussi et surtout un aspect divin qui perdurera jusqu'au début du 17^e siècle. C'est en effet en 1609 que Galilée construisit une lunette dont le gros-

sissement était de 20 fois pour observer le ciel. Il fera des découvertes sensationnelles, qu'il publiera en 1610 dans "Le messager céleste". Ainsi, il écrivit entre autres que :

- Saturne a des oreilles (en fait les anneaux impossibles à résoudre avec cette lunette).

- la Lune possède des montagnes, comme la Terre, perdant ainsi son caractère immuable et divin.

- Vénus présente des phases, comme la Lune. Elle tourne donc autour d'un objet lumineux et ne produit pas sa propre lumière ! Encore une croyance qui tombe à l'eau...

- la Voie Lactée contient des milliers d'étoiles indiscernables à l'œil nu.

Cette dernière observation amena la question suivante, que les Grecs se posaient déjà : la Terre est-elle vraiment au centre du monde ?

L'astronomie a alors progressé au rythme des instruments. De la lunette de Galilée aux télescopes actuels (VLT, Hubble), qui nous permettent aujourd'hui de voir l'Univers à des milliards d'années lumière, les frontières ont littéralement

explosé ! Entre temps, Janski étudie les antennes radio et démontre en 1931 que le Centre Galactique émet des ondes radio. Presque 40 ans plus tard (1967), la découverte du rayonnement galactique de haute énergie (Clark et al., 1968) apporte la preuve que des phénomènes violents se déroulent dans l'Univers. Ces particules sont si rapides (10 TeV, soit 10^{-6} joule) qu'une seule d'entre elles peut posséder autant d'énergie cinétique qu'une balle de ping-pong lancée à 30 mms^{-1} qui contient 10^{23} atomes !

Mais l'atmosphère est opaque aux autres formes de rayonnement. Ce n'est qu'en 1969 que débute l'astronomie satellitaire. A cette époque de guerre froide, Russes et Américains s'espionnent à grand renfort de satellites. Ainsi, les Vela américains, comme leurs homologues russes, embarquent des détecteurs de rayons gamma et sont envoyés en orbite afin de s'assurer qu'aucune explosion nucléaire n'a lieu. Aucune alerte jusqu'en 1969 où une bouffée de photons gamma est détectée par un satellite Vela. Panique chez les propriétaires jusqu'à ce que l'analyse des données montre que les photons détectés provenaient... du ciel. Quatre ans plus tard, la découverte des sursauts gamma était annoncée.

Depuis, de nombreux satellites ont été lancés pour scruter le ciel dans les autres domaines "oubliés" de longueur d'onde : infrarouge, ultraviolet, rayons X. Toutes les fenêtres de longueurs d'ondes étant ouvertes, l'astronome peut étudier un objet céleste sous toutes ses coutures. De grands progrès vont en découler, comme la découverte des microquasars ou la compréhension de l'origine de l'Univers.

Que savons-nous aujourd'hui du ciel ? A quoi ressemble ce ciel invisible à nos yeux mais porteur de tant d'informations ? C'est ce que nous allons découvrir tout au long des pages suivantes. Mais le voyage ne va pas se faire dans l'espace ou dans le temps, comme il est d'usage, mais à travers les longueurs d'ondes; un voyage dans la cinquième dimension, en quelque sorte !

2. le support graphique

En 1996, l'équipe muséologique de la Cité de l'espace a demandé à l'équipe du CESR¹ dans laquelle je travaillais de développer deux éléments d'exposition. Le premier devait proposer un voyage dans l'Univers, où le visiteur a les commandes d'un vaisseau spatial imaginaire. Le second est de montrer le ciel à toutes les longueurs d'ondes. Autrement dit, si vous aviez des yeux capables de voir dans l'infrarouge, comment verriez-vous le monde ? C'est à partir de ce logiciel qu'a été réalisée cette conférence.

Le principe est le suivant : le domaine visible avec l'œil nu perd ses couleurs et devient noir et blanc. Le spectre coloré (du rouge au violet) est distribué des ondes radio (rouge) au rayonnement de haute énergie (violet) en passant par tous les dégradés. Ainsi, en tournant un simple bouton pour changer la longueur d'onde, il est possible de voir le ciel changer d'aspect. Mais ce n'est pas tout car plusieurs options sont possibles :

- une vue du ciel depuis Toulouse, pour se repérer plus aisément (la vue principale est en coordonnées galactiques).
- un accès à l'historique des instruments d'observation utilisés dans le domaine de longueur d'onde en cours, ainsi que leurs principes de fonctionnement.
- une aide.
- un tableau, dessiné par Loustal sur notre demande, où sont cachés des objets de la vie courante émettant dans les différents domaines de longueur d'onde.

3 - Quelques détails

La représentation galactique a été choisie afin de voir la totalité du ciel sur une seule carte. La figure 6 représente la carte galactique du visible. A titre de repérage, la nébuleuse du Crabe, M1, se situe sur le bord droit de la carte. La constellation Cassiopée (le W) est à 30° du bord gauche de la carte, noyée dans la luminosité de la galaxie. La Grande Ourse est proche du nord galactique, notamment constituée par les 3 étoiles brillantes. Enfin, le pôle sud céleste se situe à proximité des deux nuages visibles dans l'hémisphère sud.

Tous les panneaux du choix multiple (près de cent !) utilisés pour la conférence n'ont pu être reproduits ici. Seules les neuf représentations galactiques ainsi que quelques instruments incontournables sont figurés, mais tous les commentaires sont retranscrits.

4 - Les prérequis

4.1. La loi de Wien

Les étoiles et les nuages de gaz interstellaires se comportent comme des corps noirs. La quantité d'énergie qu'ils déversent dans l'Univers se calcule à partir de leur température effective. Ainsi, la photosphère du Soleil (surface lumineuse) a une température de 5770 K, ce qui implique une puissance P égale à $63,5 \text{ MWm}^{-2}$, d'après la formule suivante : $P = \sigma T^4$.

σ est la constante de Stefan et vaut $5,67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$.

D'autre part, les corps noirs ont un spectre d'émission caractéristique, passant par un maximum à une longueur d'onde qui dépend de la température : c'est la loi de Wien : $\lambda_M T = 2870$ où T est la température et λ_M la longueur d'onde du maximum, exprimée en micromètres.

La photosphère du soleil émet donc un maximum d'énergie à une longueur d'onde d'environ $0,5 \mu\text{m}$, c'est-à-dire le visible...

4.2. L'effet Doppler

La variation de longueur d'onde est liée à la vitesse (très inférieure à c) par la relation : $(\lambda' - \lambda) / \lambda = v / c$ où c est la vitesse de la lumière, v la vitesse du corps, λ la longueur d'onde au repos et λ' la longueur d'onde vue.

En route

Notre voyage va débiter par les ondes radio, domaine des grandes longueurs d'ondes. Il se terminera avec les photons gamma, vecteurs d'information sur les phénomènes violents de l'Univers.

1 - Les ondes radio

Notre exploration commence par deux raies extrêmement importantes en astrophysique. Il s'agit de la raie 21 cm de l'hydrogène et de la raie à 2,6 mm du CO. La première raie est émise par l'hydrogène atomique froid. Principal constituant de l'Univers, il est fondamental de le traquer pour connaître la répartition de la masse. La figure 1 montre le ciel à cette longueur d'onde là. On constate que la plupart de l'hydrogène se concentre au niveau du disque de notre galaxie. C'est la raison pour laquelle les étoiles naissent actuellement dans cette zone. La boucle visible au-dessus de la galaxie est aujourd'hui inexpliquée.

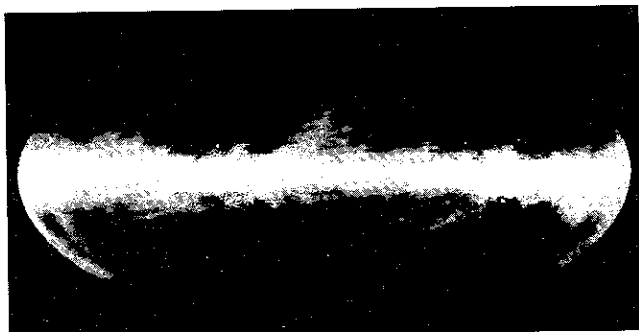


fig. 1 : vue du ciel à la longueur d'onde de 21 cm

La seconde raie concerne le monoxyde de carbone. Composé toxique pour l'Homme, il est recherché car il constitue un marqueur pour l'hydrogène moléculaire (deux atomes d'hydrogène). Les astronomes connaissent la proportion relative entre ces deux composés. Détecter le monoxyde de carbone et calculer son abondance à partir de l'intensité de son émission permet alors de déduire la quantité d'hydrogène moléculaire présent dans la même région. Sur la figure 2, on constate que sa répartition est encore plus confinée dans le disque galactique.

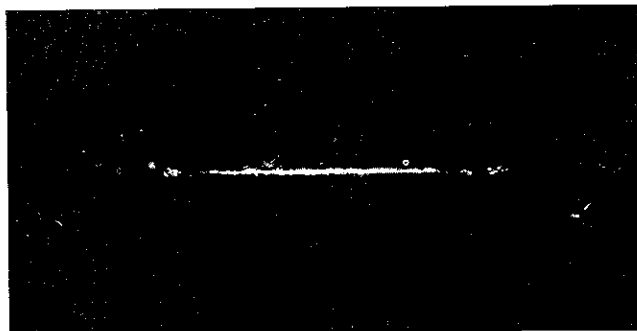


fig. 2 : vue du ciel à la longueur d'onde du CO

L'étude en laboratoire permet de connaître avec précision la longueur d'onde d'émission des composés au repos. L'effet Doppler permet alors de mesurer la vitesse relative des nuages de gaz d'hydrogène dans notre Galaxie. Cette célérité est notamment reliée à la distance qui sépare le nuage du centre de la galaxie. On peut ainsi cartographier notre galaxie et obtenir sa structure tridimensionnelle. En utilisant ce principe, on peut aussi déterminer la distance d'autres sources.

Un exemple : GRS 1915+105

Cet objet est soupçonné d'être le second microquasar découvert dans notre galaxie, après 1E1740.7-2942 (source proche du centre de notre galaxie). Un microquasar est un trou noir de masse stellaire (de 3 à 10 masses solaires) autour duquel gravite une étoile. Cette dernière subit une telle attraction gravitationnelle qu'une partie de son gaz se déverse vers le trou noir. Cette matière est fortement accélérée et spirale autour de l'objet central : c'est un disque d'accrétion. La gravitation est telle que le gaz s'échauffe à plusieurs millions de degrés et émet des rayons X. Episodiquement, la partie du disque la plus proche du trou noir se vide et une partie de la matière est projetée au niveau des pôles, formant des jets qui rayonnent en radio et infrarouge.

Ces objets sont ainsi nommés car on les soupçonne d'être des modèles réduits des quasars, détectés il y a 35 ans sous forme de sources radio puissantes et provenant d'une région dont la taille était inférieure à quelques secondes d'arc. On sait aujourd'hui que ces objets appartiennent à des galaxies lointaines, suggérant l'énorme quantité d'énergie que rayonnent ces corps.

La distance de GRS 1915+105 est de $12,5 \text{ kpc} \pm 1,5 \text{ kpc}$ et a été déterminée grâce à l'effet Doppler. En effet, en prenant des spectres des nuages d'hydrogène dans la direction de GRS1915+105 et dans une direction très proche, on obtient deux spectres. Le premier contient les raies d'absorption des nuages présents devant la source, plus ou moins décalées selon l'éloignement des différents nuages, mais pas le second. En combinant ces données avec celle du second spectre, on détermine la position de la source par rapport aux nuages d'hydrogène : la position de GRS 1915+105 est déterminée ! Profitons de cet exemple pour aborder l'intérêt de l'étude d'un objet dans plusieurs domaines de longueur d'onde. Des observations ont été réalisées en radio, infrarouge et rayons X. Mais aucun modèle n'arrivait à expliquer élégamment le comportement de ce microquasar. Il a fallu effectuer des observations simultanées dans ces trois domaines de longueur d'onde pour avancer un modèle cohérent. L'analyse des données a permis de déceler une succession dans le temps des événements X, infrarouge et radio. Le rayonnement X provient du disque extrêmement chaud en rotation autour du corps noir. Cette émission s'arrête au moment du vidage du disque. La matière éjectée au niveau des pôles est animée d'une grande vitesse et rayonne fortement dans l'infrarouge. La perte d'énergie progressive augmente la longueur d'onde de l'émission synchrotron, emmenant graduellement l'émission dans les ondes radio (fig. 3).

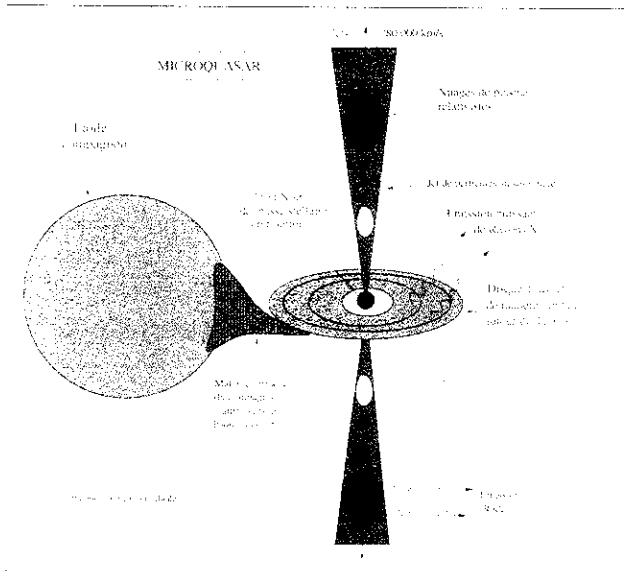


fig. 3 : vue schématique du microquasar GRS1915+105

Janski fut celui qui ouvrit l'étude du ciel dans ce domaine. Son antenne était composée de cadres métalliques disposés sur un plateau tournant. En fait, un simple grillage peut suffire à détecter les ondes radio, pourvu que le maillage soit plus petit que la longueur d'onde à "récolter". Grâce à la seconde guerre mondiale, les techniques de réception se sont améliorées et les instruments ont rapidement profité des avancées techniques. A titre d'exemple, citons le télescope d'Arecibo dont le diamètre est de 300 mètres. Cela donne une résolution angulaire inférieure à la seconde d'arc à une longueur d'onde de 1 mm pour une excellente sensibilité. Le prix à payer est une zone observable réduite à un disque (la parabole est fixe et l'antenne, supportée par trois pylônes, ne permet pas de très grands déplacements). Le système interférométrique, situé au Nouveau-Mexique, dispose de 27 antennes disposées en Y. Ces instruments proposent des sensibilités et des résolutions autorisant l'étude fine des objets qui peuplent notre Univers.

Mais à l'heure du téléphone portable, les bandes utilisables par les astronomes se réduisent... Aussi certains envisagent-ils dès à présent les futurs radiotélescopes en orbite, ou sur la face cachée de la Lune. A l'abri de la bruyante Terre, on pourra alors écouter le ciel en toute quiétude.

2 - L'infrarouge (IR)

Selon la théorie du Big Bang, l'Univers est devenu transparent lorsque sa température est descendue suffisamment bas pour que les électrons s'apparient avec des noyaux de manière à former les atomes. Les photons ont alors cessé d'interagir avec les électrons et ont commencé leur long chemin. C'est la toute première image que nous avons de l'Univers. Voir cette première lumière, appelée rayonnement de fond cosmologique, c'est apporter une preuve pour la théorie du Big Bang. Or, l'Univers étant en expansion, la longueur d'onde de ce rayonnement s'est progressivement

agrandie pour atteindre la valeur d'environ 1 mm, soit 2.7 K d'après la loi de Wien. Les observations de ce rayonnement par le satellite COBE, il y a quelques années, indiquent que la matière était uniformément répartie en grumeaux dans la jeunesse de l'Univers. La taille de ces variations de densité revêt une importance capitale car elle permet d'estimer la quantité de matière dans l'Univers et donc, de savoir s'il est ouvert, plat ou fermé. Une nouvelle expérience, embarquée sous ballon stratosphérique, a décollé en 1999 d'Antarctique pour scruter 4% du ciel. Le résultat confirme le précédent : notre Univers est plat ! Reste à attendre le satellite Planck Surveyor qui cartographiera l'intégralité du ciel et nous dira si, oui ou non, la platitude de l'Univers que nous soupçonnons aujourd'hui est une réalité.

Avant d'être utilisables, ces données issues du rayonnement de fond cosmologique doivent être corrigées d'un grand nombre de phénomènes qui perturbent les mesures : rotation du satellite, révolution de la Terre autour du Soleil, parcours de ce dernier dans la Galaxie, etc. Tout déplacement influe la mesure qui doit être précise à mieux que 10^{-6} !

Mais il existe un autre phénomène, plus lointain, qui modifie aussi le rayonnement de fond cosmologique. Il s'agit de l'effet Sunayev-Zel'dovitch, abrégé en effet SZ. Le principe est le suivant : les photons cosmologiques traversent, pour parvenir jusqu'à nous, les amas de galaxies. Entre ces dernières existe un gaz très chaud (environ 1 million de degrés) qui interagit avec les photons. Au passage, une partie des photons du rayonnement de fond cosmologique absorbe de l'énergie du gaz. Il en résulte un déficit en photons de basse énergie et un surplus de photons de haute énergie. C'est en tout cas ce que prévoit la théorie. Elle a été partiellement confirmée grâce à l'expérience DIABOLO, montée sur le radiotélescope de l'IRAM (plateau de Bure). Les données ont en effet montré le déficit en photons. Mais l'autre partie demeure inaccessible depuis la Terre, l'atmosphère étant opaque à ces longueurs d'ondes là.

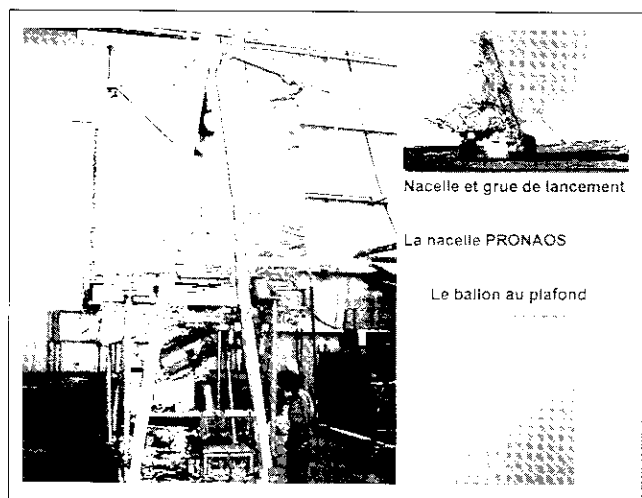


fig. 4 : l'expérience PRONAOS (à gauche), prête à décoller à Fort Sumner, Nouveau-Mexique et prise en photo au plafond.

C'est donc l'expérience PRONAOS (fig 4), télescope de 2 mètres de diamètre embarqué sous ballon stratosphérique, qui a observé plusieurs amas de galaxie et qui a fini de confirmer l'existence de l'effet SZ. L'intérêt majeur est que l'étude de cet effet fournit des informations sur la matière traversée au sein des amas et des grandes structures de l'Univers.

Un autre apport de l'expérience PRONAOS est une dizaine de cartes de $1^\circ \times 1^\circ$ de régions extrêmement froides. Les régions observées concernent des zones où se situent des candidats pré-stellaires, c'est-à-dire des nuages froids, en cours d'effondrement ou sur le point de le faire. En se contractant, le centre du nuage s'échauffe et lorsqu'une température de l'ordre de 15 millions de degrés est atteinte, les réactions nucléaires de fusion de l'hydrogène s'enclenchent : une étoile est née ! Mais nous avons un problème : les calculs montrent que la poussière à elle seule ne peut évacuer le surplus de chaleur produit par l'effondrement du nuage, ce qui stopperait prématurément le processus. Or, ce n'est pas le cas, puisque les étoiles existent !

On suppose que d'autres composés contribuent aussi à évacuer la chaleur. Les suspects sont l'eau, l'oxygène, le carbone et le monoxyde de carbone. Ils seraient capables d'absorber une grande quantité de chaleur et restitueraient l'énergie emmagasinée via leurs raies d'émissions. C'est ce que l'analyse des données nous permettra de savoir...

Que verrait-on dans la vie courante si nos yeux voyaient dans l'infrarouge ? Les militaires en ont déjà une idée avec leurs lunettes de vision nocturne. Tous les objets sont chauds. C'est-à-dire nous, les animaux, les surfaces chauffées par le Soleil, un feu dans son âtre ou dans une forêt. Mais nous trébucherions sur les objets froids, plongerions dans les rivières car invisibles, etc !

Déplaçons-nous vers les longueurs d'ondes plus courtes et passons de 1 mm à 10 μm (figure 5).

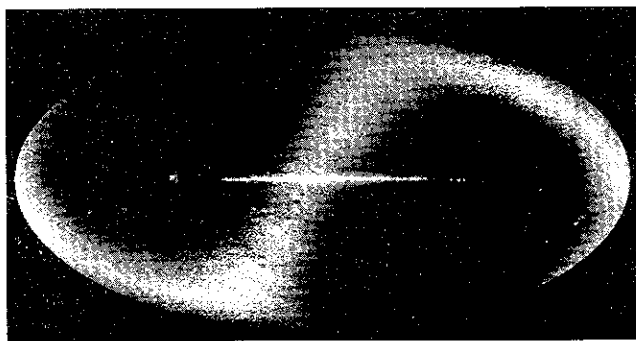


fig. 5 : l'écliptique trahi par les poussières qu'il contient

Une barre partage le ciel en deux parties. A l'évidence, elle ne fait pas partie de notre galaxie... et pourtant. Cette longueur d'onde correspond, d'après la loi de Wien, à une température de 300 K. Mais qu'est-ce qui est incliné de 63° environ par rapport au plan de notre galaxie ?

Il s'agit de l'écliptique. Ce que l'on voit, ce sont les poussières, chauffées par le Soleil.

3. Le visible

Exploré depuis plusieurs siècles, on pourrait penser que ce domaine de longueur d'onde a livré la plupart de ses secrets. Il n'en est rien parce que les instruments d'observation sont toujours plus grands et permettent de voir des objets plus faibles, plus lointains ou encore d'identifier des détails plus fins dans des corps déjà connus. De nouvelles méthodes, comme les arcs gravitationnels, sont utilisées pour déterminer la masse des amas de galaxies. La détection d'objets de grande magnitude (supérieure à 25) a permis par exemple de trouver la contrepartie optique des sursauts gamma, relançant les travaux de recherche. Nous allons aborder ici quatre sujets : trois d'actualité, l'autre d'une extrême utilité.



Fig. 6 : Le ciel dans le visible

Depuis la découverte de β Pictoris, d'autres planètes extra-solaires ont été découvertes. Mais chaque fois, il s'agissait de corps très gros ayant plusieurs fois la masse de Jupiter, et relativement éloignés de l'étoile mère. La raison est que nous sommes limités par la résolution des instruments. Nous savons donc qu'il existe d'autres planètes, mais en existe-t-il de semblables à la Terre ? Cette recherche s'explique par le fait que nous n'avons qu'un seul exemple de vie : nous. Trouver une planète semblable à la notre relancerait certains débats...

Pour atteindre ce but, COROT sera prochainement envoyé en orbite. A l'aide d'un système optique très performant, il devrait être capable de détecter le passage de planètes devant la couronne de l'étoile étudiée. Ces occultations, faibles, devraient permettre la découverte, s'il en existe, de planètes de petite taille, comparable à la nôtre. Réponse dans quelques années !

Hipparque a vécu deux siècles avant JC. Il a entre autres réalisé le premier catalogue d'étoiles (850 en tout), nommant ainsi certaines d'entre elles pour plusieurs siècles. C'est en son souvenir que le satellite Hipparcos a observé et repéré très précisément par la méthode de la parallaxe² des milliers d'étoiles et des objets émettant en radio. Le résultat

est un catalogue sûr permettant de créer un système fiable de passage d'un système de coordonnées à l'autre. Une autre conséquence est la révision des étalons de mesure de l'Univers. Ces derniers sont en effet créés en se référant au précédent, cumulant ainsi les erreurs. La première étape est de rechercher la distance des étoiles proches en mesurant leur parallaxe. Ceci permet d'accéder à la plupart des types d'étoiles existants (étoiles étalons) et de construire un diagramme HR (Hertzsprung-Russel) où les étoiles sont disposées en fonction de leur luminosité (axe vertical) et de leur température (axe horizontal). C'est la base du système de détermination des distances. L'erreur est celle commise sur l'angle de parallaxe.

Il est possible de constituer un diagramme HR pour un amas stellaire lointain. La différence par rapport à notre premier diagramme est que les étoiles seront moins brillantes car plus éloignées. Comme l'éclat décroît avec la distance, la différence de hauteur sur l'axe vertical du diagramme HR entre l'amas d'étoiles lointaines et le groupe étalon indique la distance de ce groupe. Mais il y a de la matière entre nous et cet amas, qui absorbe une partie de la lumière. La différence d'ordonnée n'est donc pas entièrement due à la distance, induisant une seconde erreur sur l'estimation de distance. Et ainsi de suite avec les céphéides (étoiles pulsantes), les populations de galaxies et les quasars, chaque "mesure" ajoutant ses erreurs à celles déjà existantes. On comprend l'intérêt des mesures d'Hipparcos. Il a permis de renforcer les fondations sur lesquelles reposent notre système de mesure de l'Univers.

Dans la rubrique des événements récents, le télescope spatial Hubble a photographié le satellite Io et pris des spectres lors de l'éruption du volcan le plus actif. L'analyse des données a permis une estimation de la température et de la pression à l'intérieur de la cheminée du volcan, ainsi que la composition du matériau. Il semblerait que le manteau de Io (la zone située sous la croûte) soit dépourvu de fer, comme sur Terre. Le responsable serait l'eau, aujourd'hui disparue, qui aurait oxydé le fer, augmentant son poids et l'aidant ainsi à descendre vers le cœur de Io.

Enfin, le nuage d'Orion, qui n'en finit pas de nous montrer des objets insolites. Grâce à des observations réalisées dans ce nuage avec les télescopes des îles Canaries, une équipe de l'Institut d'Astrophysique de Tenerife a découvert 18 objets isolés et non identifiés. Le spectre révèle une température de 2000 degrés et l'âge, estimé à partir de la luminosité, serait de 5 millions d'années. Cela implique une masse comprise entre 5 et 15 fois celles de Jupiter. Trop peu massives pour être des étoiles, mais sans étoile à proximité pour être des planètes (les objets orbiteraient autour). Alors, planètes éjectées ou étoiles avortées ? Sont-ce des cas particuliers ou l'espace est-il peuplé de ces objets là en grand nombre ? La suite des observations nous le dira !

Les instruments adaptés à l'observation de ce domaine de longueur d'onde sont forcément monnaie courante puisque nous les utilisons tous les jours (des appareils photos aux

lunettes). Les télescopes qui sont destinés à l'observation du ciel, apparaissent souvent dans les revues à large diffusion. On y trouve souvent les télescopes présents au Chili, à Hawaï ou encore aux Canaries. L'histoire de ces instruments commence en 1609 pour la lunette (Galilée) et 1672 pour le télescope (Newton). La lunette atteindra son apogée au début de ce siècle et sera avantageusement remplacée par le télescope, moins sujet aux défauts optiques. La course au "plus grand, plus gros" s'est accélérée au cours de ce siècle pour atteindre des monstres de près de 10 mètres de diamètre ! Le résultat est une foule de détails sur les objets, affinant notre compréhension, ou la découverte d'autres corps, comme ces planètes errantes, complétant le tableau "anthropologique" des habitants de l'Univers.

Quels instruments pour demain ? Certainement des télescopes spatiaux (le successeur du télescope Hubble est aujourd'hui financé), mais aussi les télescopes terrestres encore plus performants (par exemple, le VLT européen). Mais n'oublions pas qu'à l'ère de l'informatique et des satellites, le Pic du Midi, avec son télescope de deux mètres, reste encore l'un des meilleurs sites d'observation au monde.



Fig 7. : l'Observatoire du Pic du Midi, situé dans les Pyrénées.

Notes :

1 - L'équipe était composée de Peter von Ballmoos (chef projet), Jürgen Knodlseder (programmation), Christophe Gallian, Philippe Laporte et Nadine Sangérotéo (base de données, ressources logiciel et mise en forme).

2 - La méthode de la parallaxe consiste à mesurer l'angle entre la direction d'une étoile et une direction fixe. Au bout de six mois, la Terre étant de l'autre côté du Soleil à 300 millions de km de la première position, on recommence l'opération. La demi-somme des angles trouvés est la parallaxe de l'étoile. La distance de l'étoile est le quotient de l'unité astronomique par la parallaxe, exprimée en radians. Les angles mesurés sont très faibles (moins d'une seconde d'arc pour l'étoile la plus proche) et la moindre erreur engendre des valeurs de distances fausses.



L'ordre des astres dans les modèles géocentriques

Daniel Toussaint

Daniel Toussaint poursuit son travail de réflexion sur distances et mouvements (voir CC 93) en se demandant comment placer les astres les uns par rapport aux autres en se plaçant d'un point de vue géocentrique. Il explique comment les anciens ont pu le faire sans connaître les distances et en utilisant uniquement les mouvements apparents.

Quels sont les points communs à la plupart de ces modèles ?

Les modèles géocentriques de représentation du Monde placent les astres errants (les cinq planètes visibles à l'œil nu) et les deux luminaires (Soleil et Lune) sur des cercles ou des sphères concentriques agrémentés éventuellement d'épicycles.

Immobile au centre de ces cercles ou de ces sphères se trouve la Terre, elle-même enserrée dans des sphères d'eau, d'air et de feu conformément à la physique d'Aristote. Pas très loin à l'extérieur, la sphère des "étoiles fixes" est soumise au mouvement diurne, c'est-à-dire qu'elle tourne en 24 heures sans se déformer.

A partir de la Terre, les astres s'étagent dans un ordre pratiquement immuable : la Lune dont l'orbe marque la frontière entre les mondes terrestre et céleste, Mercure, Vénus, le Soleil, Mars, Jupiter, Saturne, et enfin les "étoiles fixes".

Au-delà peuvent se trouver d'autres sphères : les chrétiens y logeront Dieu et les anges...

Peut-on retrouver un critère qui justifie cet ordre ?

N'insistons pas sur la place des anges et tentons seulement de placer les astres les uns par rapport aux autres.

Les Anciens Grecs qui avaient mesuré le rayon de la Terre, la distance Terre-Lune et la distance Terre-Soleil (dont ils avaient sous-estimé la valeur) ne connaissaient pas les autres distances.

En revanche, ils connaissaient très bien les mouvements apparents des astres par rapport à la "sphère des fixes". L'expérience quotidienne montre aussi que, sur la Terre, les objets lointains semblent plus lents que les objets proches.

En oubliant que les lois physiques qui régissent les Mondes situés de part et d'autre de l'orbe de la Lune étaient différentes, on peut essayer de classer les astres d'après la rapidité de leurs mouvements apparents.

Les résultats :

Comparons d'abord la Lune au Soleil.

Ces deux astres parcourent la bande zodiacale dans le même sens, mais la Lune boucle son tour en un mois environ alors que le Soleil l'effectue en un an. Il est donc logique de placer le Soleil plus loin de la Terre que la Lune.

Viennent ensuite les cas de Mercure et Vénus.

Les périodes de visibilité de Mercure sont bien trop courtes pour qu'il soit facile de suivre son mouvement par rapport aux étoiles. En revanche, il est beaucoup plus aisé de constater que Mercure et Vénus accompagnent toujours le Soleil à la manière du chien qui court tantôt devant, tantôt derrière le chasseur.

Ces deux planètes sont donc plus rapides que le Soleil, Mercure étant la plus rapide des deux. De là à prendre Mercure pour le Messager des Dieux et à l'associer au vif-argent, il n'y a qu'un pas, vite franchi... Tous ceux qui ont tenté de ramasser des boules de mercure à l'époque où son utilisation n'était pas si réglementée savent bien que le mercure court partout.

Pour les planètes Mars, Jupiter et Saturne, leurs lentes dérives dans le Zodiaque permettent de les comparer.

Ces planètes sont forcément au-delà du Soleil puisqu'elles mettent nettement plus d'un an pour faire le tour complet du Zodiaque. La durée moyenne d'un tour place le Soleil et les planètes les plus lentes dans l'ordre suivant : Soleil, Mars, Jupiter, Saturne. C'est d'ailleurs sans doute sa lenteur qui vaut au Dieu Saturne d'être le vieillard "qui préside aux choses du Temps".

Les amplitudes des boucles de rétrogradations conduisent au même résultat. La rétrogradation de Mars, bien connue des lecteurs des Cahiers Clairaut, est facile à observer même à l'œil nu car elle s'étend sur plus de 15°. Celles de Jupiter et de Saturne sont nettement plus petites ce qui les rend un peu plus difficiles à suivre sans faire appel à des instruments de mesure précis. C'est d'autant plus difficile que ces boucles vues de profil ne sont que de petits allers-retours sur l'écliptique.

Exceptionnellement, les boucles de rétrogradation de ces trois planètes peuvent devenir très faciles à comparer. Il faut pour cela qu'elles se produisent simultanément dans la même constellation. Par exemple, cette situation rare s'est produite dans la constellation du Lion au cours de l'hiver 1979-80. Le logiciel Albiréo permet à ceux qui n'ont pas eu la chance d'assister au ballet de ces trois planètes de savoir ce qu'ils ont raté...

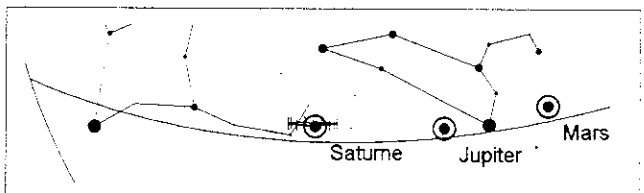
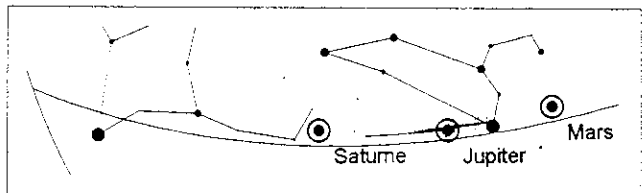
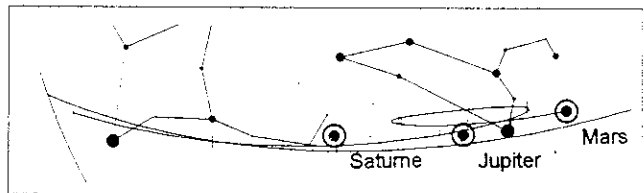
Quant aux étoiles dites fixes, il est normal de les placer encore plus loin, sur une seule sphère puisqu'elles ne bougent pas les unes par rapport aux autres.

En attendant Copernic...

A posteriori, ces considérations semblent peu rigoureuses. En particulier, elles ne rendent pas compte des variations périodiques de l'éclat apparent des planètes Vénus et Mars. Ces variations d'éclat traduisent les variations des distances Terre-Vénus ou Terre-Mars.

Mais dans le cadre des modèles géocentriques la question de variation de ces distances n'avait pas de sens, alors personne ne pouvait se la poser. Même les épicycles qui ont été inventés pour interpréter les rétrogradations sont généralement trop petits pour expliquer ces variations.

Ce n'est qu'en acceptant de déplacer la Terre parmi les planètes qu'il sera possible de faire mieux en comparant les distances du Soleil aux planètes qui sont beaucoup moins variables que les distances de la Terre aux planètes.



Les trois cartes ci-dessus, extraites du logiciel Albiréo représentent respectivement, de haut en bas, les rétrogradations de Mars, Jupiter et Saturne au cours de l'hiver 1979-1980.

Caractéristiques communes aux trois cartes :

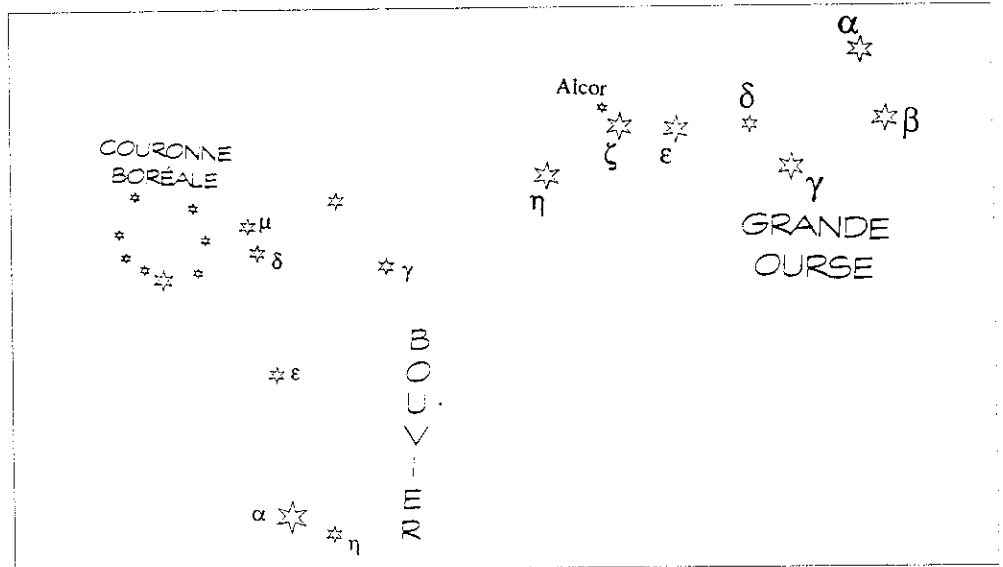
- date de départ 1/11/79 à 6 heures
- incrément : 10 jours
- nombre de pas 30
- gradué tous les 3 pas.



La chasse à l'Ourse céleste

Charles-Henri Eyraud

Charles-Henri Eyraud nous propose ici un exercice imaginé à partir d'une légende¹ des indiens Micmac du Canada : la chasse à l'Ourse céleste.



Les acteurs

L'Ourse, représentée par les étoiles du quadrilatère ($\alpha, \beta, \gamma, \delta$) de la Grande Ourse

Les sept chasseurs :

Un premier groupe de trois, correspondant aux trois étoiles de la queue de notre Grande Ourse : le rouge-gorge (ϵ), la mésange à tête noire (ζ), "l'oiseau de l'élan" (η).

Un deuxième groupe de quatre, dans la constellation du Bouvier : le pigeon (γ), le geai bleu (ϵ), la chbuette (α : Arcturus) et la chouette ægolius (η).

La marmite dans laquelle la viande sera cuite : la petite "Alcor", compagnon de ζ de la Grande Ourse.

La tanière de l'Ourse (μ et δ du Bouvier) et le cercle d'étoiles de la Couronne boréale.

Le récit

Acte I Scène 1 puis suivantes.

Par une belle soirée la tanière de l'Ourse est visible dès le coucher du soleil. Sortant de son hibernation, celle-ci quitte

son gîte en quête de nourriture. Elle est repérée par la mésange à tête noire, qui ne se sentant pas capable de la chasser seule, demande du renfort aux six autres chasseurs : la poursuite commence.

Acte II Scène 1 puis suivantes.

L'Ourse bien visible près du zénith en début de soirée, poursuivie par les chasseurs, décide d'aller se cacher vers l'horizon nord. Au cours de l'acte, l'Ourse se faufile de plus en plus le long de l'horizon nord et les quatre chasseurs du Bouvier abandonnent la partie. Seuls demeurent le rouge-gorge, la mésange noire et "l'oiseau de l'élan".

Acte III Scène 1 puis suivantes.

A la tombée de la nuit le pigeon qui ne suit plus la chasse que de loin franchit la ligne Est-Ouest, et engage les autres à continuer la poursuite au delà de l'horizon Nord. À la fin de la nuit, l'Ourse, dressée sur ses pattes vers l'horizon Est, commence à perdre son sang par les blessures des flèches de ses poursuivants. Le rouge-gorge qui la talonne est taché de son sang. Secouant ses ailes, il en couvre les feuilles des arbres et l'érable du Canada, où il niche, se teinte alors de rouge.

Scène finale : l'Ourse ayant vaillamment combattu toute la nuit meurt près du zénith lorsque le soleil se lève.

Acte IV Scène 1 et suivantes.

C'est maintenant le squelette de l'Ourse qui flotte pendant de longues nuits en tournant autour de l'Étoile Polaire. Il franchit le méridien nord au début de la soirée, puis passe à l'ouest, puis près du zénith, enfin à l'est pendant que les chasseurs festoient autour de la marmite. L'animal est bien mort, mais son esprit cherche une autre Ourse en train d'hiberner.

Par une belle soirée la tanière apparaîtra à nouveau juste au coucher du soleil et l'esprit de l'Ourse renaîtra au monde dans une jeune Ourse qui vivra elle aussi cette vie-mort et résurrection.

Exercice

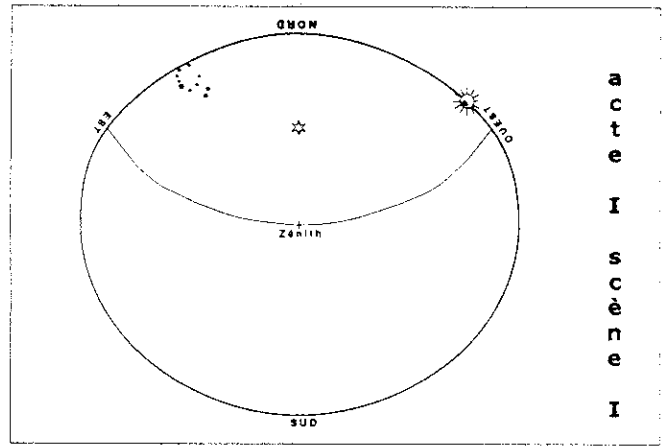
En s'aidant d'une carte mobile du ciel, trouver comment la légende permet de se repérer dans l'année.

Donner les dates du début de chaque acte ainsi que la date de la scène finale de l'acte III.

Revivre le récit en dessinant tous les acteurs sur les cartes ci-contre où figurent déjà quelques indications.

note :

rapportée par Stansbury Hagar en 1900 dans le "Journal of American Folklore".

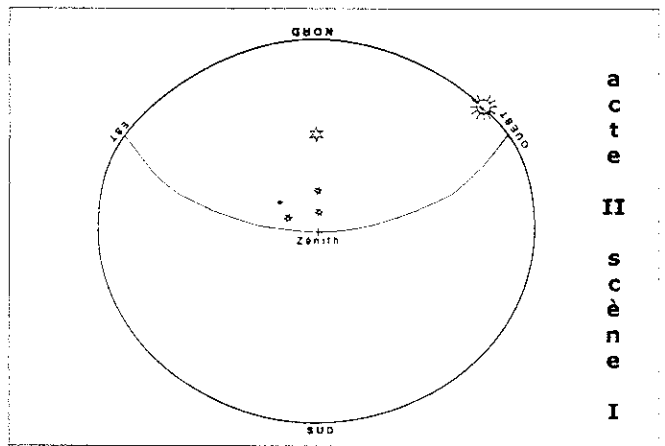


a
c
t
e

I

s
c
è
n
e

I

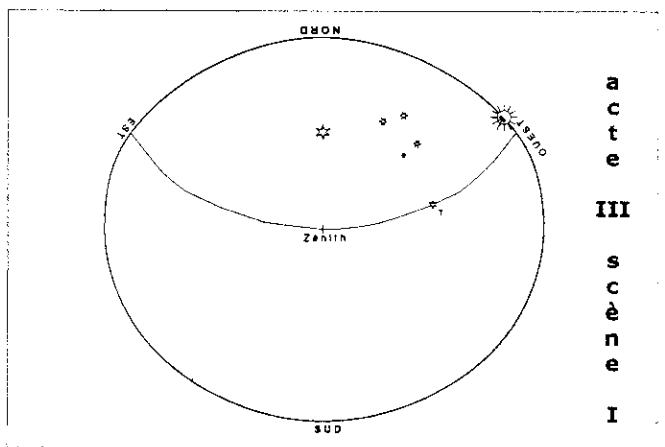


a
c
t
e

II

s
c
è
n
e

I

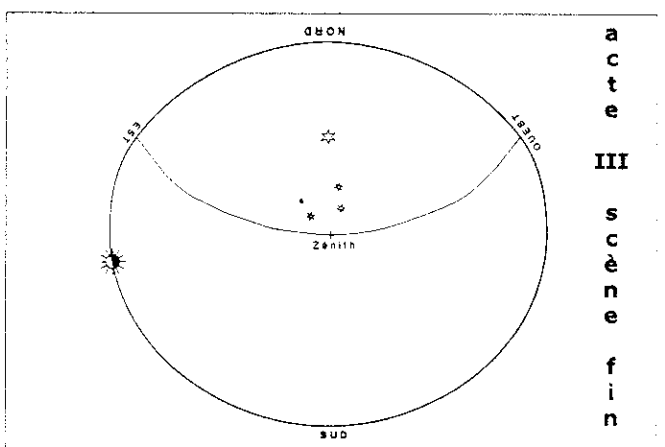


a
c
t
e

III

s
c
è
n
e

I



a
c
t
e

III

s
c
è
n
e

f
i
n



Les anneaux de Saturne

AVEC NOS ÉLÈVES

Marie-Agnès Lahellec

Marie-Agnès Lahellec nous propose ici un exercice adapté du document d'accompagnement du programme des Terminales S.

Il s'agit d'un exercice sur la gravitation (donné en contrôle) permettant de comparer les vitesses relatives des éléments constitutifs des anneaux de Saturne.

"On pourrait croire que les anneaux de Saturne sont d'un seul tenant. En fait, il s'agit de nuées de pierrailles, dispersées tout au long du plan équatorial, qui circulent en orbites individuelles autour de la planète"

Hubert Reeves (poussières d'étoiles)

C'est en 1610 que Galilée découvrit par l'observation dans sa lunette "quelque chose" autour de Saturne.

On sait, depuis les survols de 1980 et 1981 par les deux sondes américaines "Voyager", que les anneaux de Saturne sont constitués de milliards de cailloux de toutes tailles, entre le micromètre et plusieurs kilomètres.

Le but de cet exercice est d'utiliser les résultats de la loi de gravitation énoncée par Newton pour comprendre la deuxième phrase de la citation.

Résultats de cours :

On prend comme système un objet de masse m en orbite autour de la planète Saturne de masse M , l'étude est faite dans le repère centré sur Saturne et supposé galiléen.

On suppose que la planète a une symétrie sphérique.

On néglige les dimensions de l'objet devant celles de Saturne.

On suppose que l'objet est soumis uniquement à l'attraction gravitationnelle de Saturne.

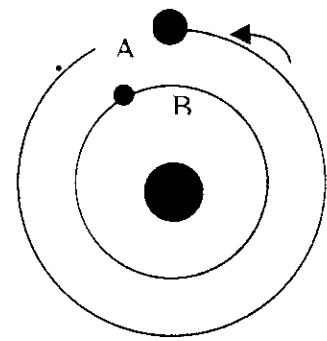
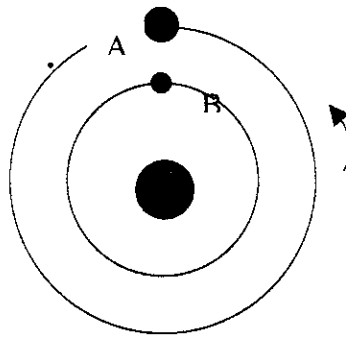
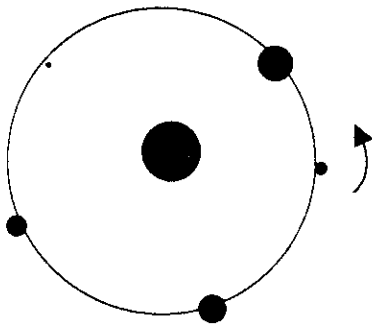
En appliquant les lois de Newton, on montre que si l'objet est animé d'un mouvement de rotation uniforme autour de Saturne de vitesse v , de rayon de trajectoire r , de période T , on a les expressions suivantes :

$$v = \sqrt{\frac{K.M}{r}} ; \frac{T^2}{r^3} = \frac{4\pi^2}{K.M}$$

1) Pourquoi "*On pourrait croire que les anneaux de Saturne sont d'un seul tenant*" ?

2) K est une constante. La définir, en donnant une formule (autre que celles de l'énoncé) où elle intervient. Donner son unité. Aucune valeur ne doit être fournie.

3) La figure suivante donne la configuration d'objets de tailles et de masses différentes, tournant dans le même sens, sur une même orbite circulaire centrée sur Saturne. Il n'y a aucun respect d'échelle.



configuration à t_0

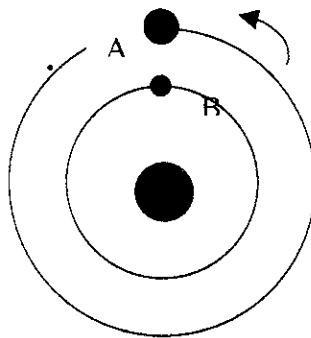
configuration 2

a) Tous ces objets ont-ils la même vitesse sur l'orbite ? Justifier.

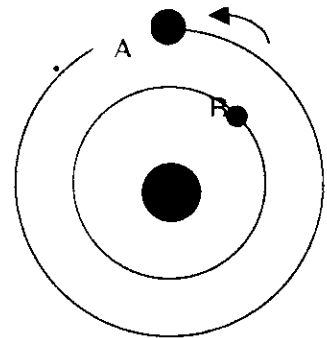
b) Est ce que la structure de l'ensemble évolue au cours du temps ? Justifier.

4) On considère deux objets A et B, tournant dans le même sens sur deux orbites différentes de rayons r_A et r_B tels que $r_A = 1,05 r_B$.

La figure ci-contre donne la configuration de ces objets à une date t_0 donnée et t_0 est la première date permettant cette configuration. Il n'y a aucun respect d'échelle. Au bout d'une période T de rotation du satellite A dire quelle est la configuration parmi les trois proposées ? Justifier.



configuration 1



configuration 3

Corrigé

1) Pourquoi "On pourrait croire que les anneaux de Saturne sont d'un seul tenant" ?

A l'observation optique à travers des jumelles, une lunette, un télescope on voit un ou des anneaux. La distance entre la Terre et Saturne est trop grande pour pouvoir distinguer la structure d'un anneau.

2) On attend ou la loi d'attraction universelle (Newton) ou l'expression du champ de gravitation d'un corps de masse M .

3) a) Tous ces objets ont la même vitesse sur l'orbite de rayon r . D'après l'expression de la vitesse, v n'est fonction que de r et non de la masse des objets.

b) La structure de l'ensemble n'évolue pas au cours du temps. Puisque les objets ont la même vitesse leurs distances mutuelles ne varient pas.

4) Au bout d'une période T_A de rotation du satellite A, la configuration est la 2. D'après l'expression de la période : $r_A > r_B$ donc $T_A > T_B$

$$T_A = \left(\frac{R_A}{R_B}\right)^{\frac{3}{2}} T_B = (1,05)^{\frac{3}{2}} T_B \approx 1,076 T_B$$

Quand A a fait un tour, B a fait environ 1/13 de tour de plus.

NDLR : un peu d'histoire.

En 1654, Christiaan Huyghens trouve que Saturne est entouré d'un anneau brillant situé dans le plan équatorial de la planète. Jean-Dominique Cassini découvre une division, démontrant ainsi que les anneaux ne sont pas homogènes et il suggère qu'ils sont formés d'une multitude de petits cailloux.

De nombreux astronomes des XVII^e et XVIII^e siècles croyaient que les anneaux étaient solides et c'est Laplace qui en 1754 démontre qu'un anneau solide serait instable et détruit par les effets de marée de la planète.

En 1867 James Clerk Maxwell démontre théoriquement que les anneaux sont constitués de particules

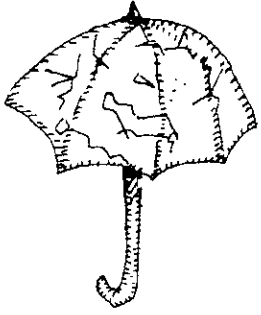
solides en rotation différentielle autour de la planète.

En 1998 James Edward Keeler obtient un spectre de Saturne et de ses anneaux et montre (effet Doppler Fizeau) que ces anneaux tournent autour de Saturne comme une multitude de petits satellites indépendants, (lois de Kepler). Les particules les plus proches tournent en moins de 8 h tandis que les plus éloignées en plus de 12 h.

On sait, grâce aux travaux successifs de Cassini, Laplace, Maxwell et Sophie Kovalevska, qu'un tore fluide homogène de section méridienne ovoïde, pas forcément elliptique, peut, dans certaines conditions de géométrie et de masse volumique respecter les lois de Kepler et être stable. ■

Erratum : Potins 93

Page 40, première colonne, dernier paragraphe il faut remplacer mm par μm pour la taille des filtres.



Un cadran solaire demi-cylindrique

Pierre Causeret

Ce petit cadran tout en papier vous permettra de déterminer l'heure et la date. Pour le construire, une paire de ciseaux et de la colle suffisent. Pour éviter de découper votre revue préférée, vous pouvez le photocopier sur une feuille plus épaisse type bristol. Ces plans sont déjà parus (en couleur) dans la revue Cosinus de juillet 2000.

Au cours de la journée, nous voyons le Soleil se lever vers l'est, monter dans le ciel jusqu'à midi au Soleil, heure à laquelle il culmine plein sud, pour redescendre côté ouest l'après-midi.

Du solstice d'hiver au solstice d'été, la hauteur du Soleil à midi augmente, la direction du lever de Soleil passe approximativement du sud-est au nord-est et celle du coucher du sud-ouest au nord-ouest (ceci pour les régions situées entre le tropique du Cancer et le cercle polaire arctique).

Le cadran demi-cylindrique que je vous propose permet de visualiser ces

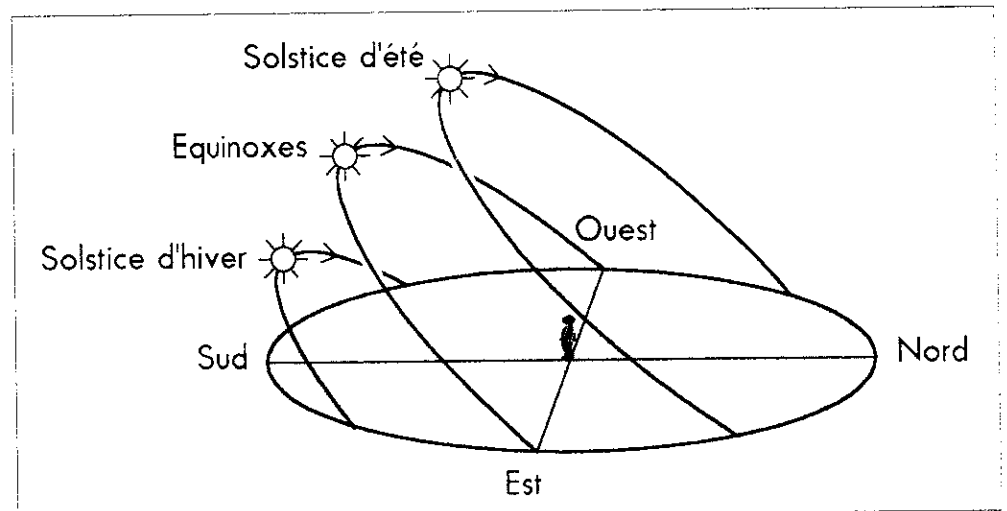
mouvements apparents. Il donne aussi l'heure et la date en lisant la position de la tache lumineuse formée par les rayons du Soleil passant par un trou percé dans un plan contenant l'axe du cylindre.

Le mouvement diurne

Au cours de la journée, on voit le Soleil se déplacer d'est en ouest en passant par le sud. La tache lumineuse, elle, avance d'ouest en est en passant par le nord.

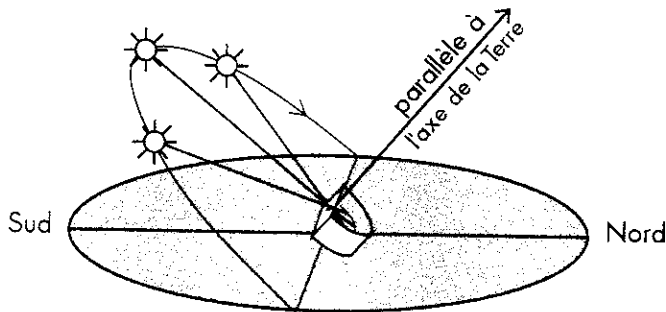
L'axe du demi cylindre du cadran doit être parallèle à l'axe de la Terre.

L'inclinaison du cadran dépend donc



de la latitude : c'est pour cela que le découpage des pieds est fonction de la latitude.

De plus, il faut orienter le cadran nord sud pour lire l'heure correctement.

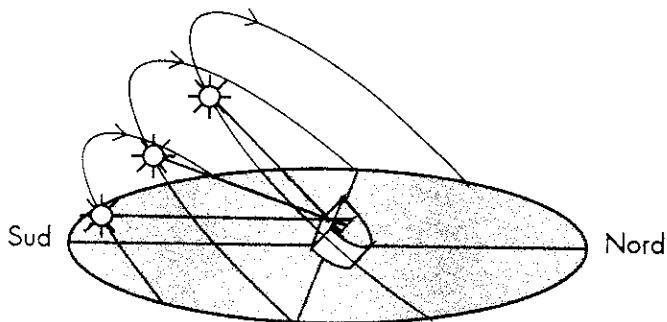


Le Soleil à 10 h, 12 h et 14 h un jour d'équinoxe

La hauteur du Soleil au dessus de l'horizon varie au cours de l'année. C'est ce phénomène qui permet de lire la date sur le cadran.

Le Soleil passe à la même hauteur dans le ciel deux fois par an. Par exemple, la trajectoire apparente du Soleil le 4 septembre est la même que le 8 avril.

Chaque ligne diurne correspond donc à deux dates, la déclinaison du Soleil étant la même à ces deux dates.



Le Soleil à 10 h aux solstices et aux équinoxes

Montage

Découpez suivant les traits épais. Mais attention, la longueur des pattes dépend de votre latitude (pour la France métropolitaine, elle varie de 42° en Corse à 51° dans le Nord). Percez un trou d'environ 1 mm de diamètre au centre du Soleil. Pliez suivant les traits fins et collez les parties grisées pour obtenir un cadran comme celui de droite.

Installation du cadran

Ce cadran doit être placé sur une surface bien horizontale, orienté précisément vers le Nord (le trou Soleil vers le Sud). Si vous l'installez à l'extérieur, vous avez intérêt à le fixer sur une planchette pour éviter que le vent ne l'emporte.

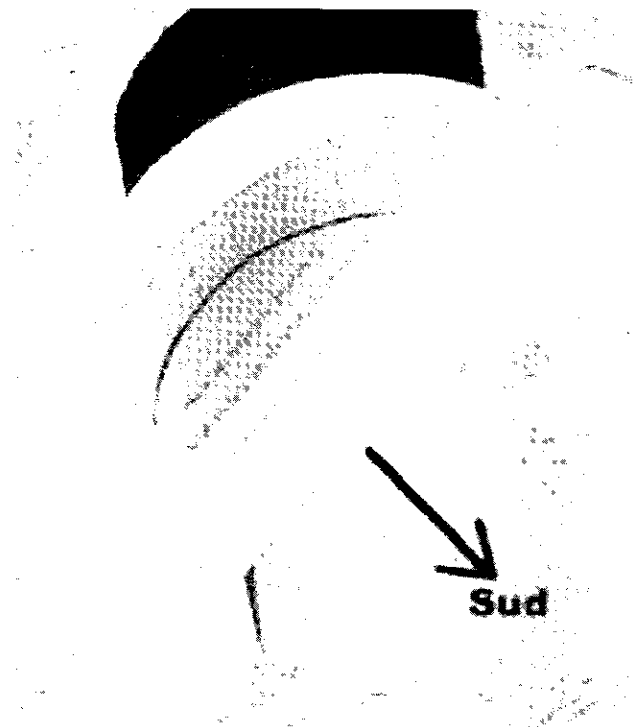
Utilisation

La tache lumineuse donne directement l'heure solaire, mais si vous voulez obtenir l'heure légale, trois corrections sont à faire :

- 1) Il faut ajouter 1 h (en heure d'hiver) ou 2 h (en heure d'été).
- 2) Il est midi au Soleil plus tôt à Strasbourg qu'à Brest. Il faut donc effectuer une correction due à la longitude que l'on calcule ainsi : Correction en minutes = longitude en degré \times 4. Cette correction doit être comptée positivement si on habite à l'Ouest de Greenwich et négativement à l'Est.
- 3) Le mouvement de la Terre autour du Soleil fait que l'heure solaire n'est pas régulière. Il existe donc un décalage entre l'heure solaire et l'heure légale que l'on appelle l'équation du temps et qui dépend de la date. Celle-ci varie de - 16 min à + 14 min et est à ajouter à l'heure solaire. Elle est donnée dans le tableau tracé sur le cadran.

Pour obtenir la date

Seules 9 lignes de dates sont tracées. Et chaque ligne correspond à deux dates possibles. Il faudra donc choisir la bonne. La lecture de la date n'est pas très précise. Le trait central correspond aux équinoxes. Le solstice d'été est tracé en bas (le Soleil est alors au plus haut) et le solstice d'hiver en haut.



Ce cadran est paru dans la revue Cosinus de juillet-août 2000. Conception Pierre Causeret (Pierre.Causeret@wanadoo.fr).

Equation du temps

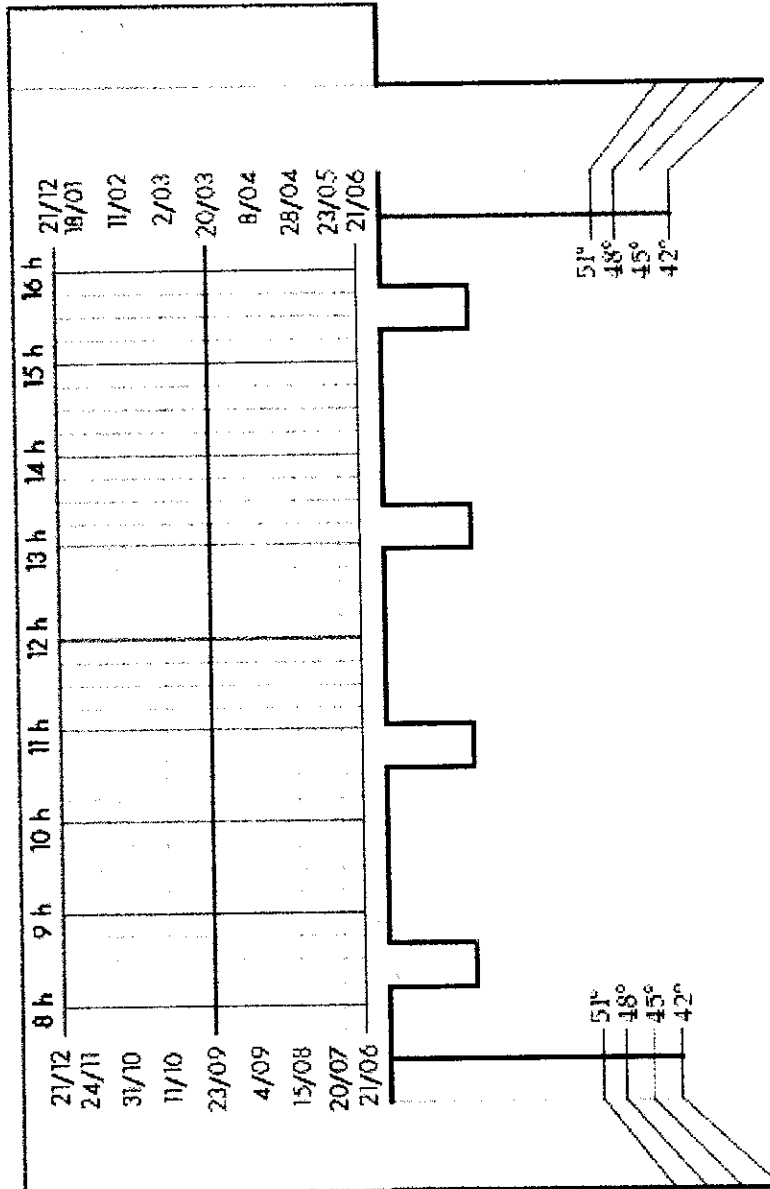
1/01	+ 3 min	1/07	+ 4 min
1/02	+ 14 min	1/08	+ 6 min
1/03	+ 13 min	1/09	0 min
1/04	+ 4 min	1/10	- 10 min
1/05	- 3 min	1/11	- 16 min
1/06	- 2 min	1/12	- 11 min

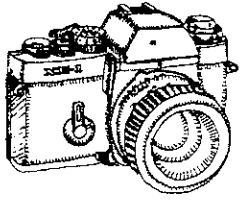


Ce cadran donne l'heure solaire locale. ☒

Pour avoir l'heure légale :

- 1) Ajouter 1 h (heure d'hiver) ou 2 h (heure d'été)
- 2) Ajoutez le décalage dû à la longitude
- 3) Ajoutez l'équation du temps





L'horloge astronomique de Lyon

Charles- Henri Eyraud, Paul Gagnaire,
Henri-Jean Morel, IUFM de Lyon
Photos : Guy Bussery

Les auteurs ont fait une description très complète de la superbe horloge astrolabique de la cathédrale Saint-Jean à Lyon. L'article entier aurait été trop long et nous avons choisi de traiter uniquement la partie strictement astronomique. Ceci constitue une excellente préparation à une visite éclairée.

Les grandes villes du Moyen-Âge investirent parfois des sommes considérables pour réaliser sur leurs Hôtels de Ville ou dans leurs cathédrales des horloges monumentales "à rouages" munies d'automates et parfois même de cadrans astronomiques.

Les plus notables en France munies de mécanismes astronomiques furent celles de Cluny (1340, disparue), Strasbourg (1354, restaurée en 1574 puis 1842), Lyon (1379), Bourges (1423, restaurée de 1992 à 1994), Saint-Omer (1555, restaurée en 1680), bien plus tard Besançon (1860), Beauvais (1865).

A l'étranger : Heilbronn (1580), Ulm (1580 refaite après 1945), Prague (1410, refaite après 1945), Olomouc en Bohême (vers 1500), Erémone et Fribourg, Gdansk (1470, détruite en 1945), Berne, Salisbury et Wells en G.B. (1392, restaurée en 1835), Oslo et Lund en Suède (1380), la "Sens Olsen" à Copenhague (moderne).

Il existe aussi des horloges monumentales indiquant les phases de la Lune, parfois l'heure ds marées : Rouen, Fécamp, Lyon (Beffroi de l'Hôtel de Ville), Cucurron (Vaucluse).

Par son ancienneté préservée, la richesse de son décor et le nombre des automates mis en mouvement, l'horloge astronomique de Lyon est particulièrement intéressante.

L' horloge astronomique

1 - Historique

1180 à 1480 : Construction de la Primatiale Saint Jean-Baptiste.

1383 : Premier document relatant l'existence d'une horloge.

1552 : Les archives mentionnent : "horlogier Claude rabille les deux horloges de l'église".

1562 : Sac de la Cathédrale par le Baron des Adrets.

1598 : Restauration de Hugues Levet et Nicolas Lippius. Seules quelques pièces de cette époque subsistent.

1660 : Restauration de Guillaume Nourrisson. L'horloge est telle que nous la voyons aujourd'hui.

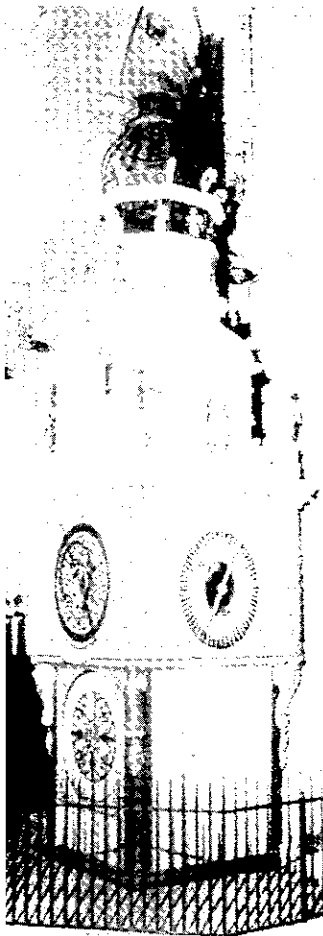
1779-1782 : Pierre Charmy modernise des rouages ; un échappement Graham (inventé vers 1700) remplace l'ancien. Le Suisse est ajouté.

1794 : Destruction de tous les ornements de l'horloge

1894-1900 : Restauration par Chateau sans transformations importantes.

1954 : Restauration de Ungerer.

1992-1993 : Restauration de Xavier Desmarquest (son fils Éric est l'horloger actuel).



2 - Description

L'horloge est située dans une tour carrée de 1,80 m de côté, surmontée d'une tourelle octogonale présentant les automates, puis d'un dôme supportant le coq qui culmine à 9 m. Décor avec guirlandes de fleurs et fruits datant du 17^e siècle. Cinq poids à remonter tous les 4 jours permettent le fonctionnement.

3 - La partie astronomique.

1) **Le cadran des minutes** (sur le côté droit ajouté en 1660 par Nourrisson) est constitué d'une aiguille avec un mécanisme permettant de suivre le cadran elliptique et de deux angles tenant l'un, équerre et sphère armillaire (avec en plus un cadran solaire au sol), l'autre, globe terrestre et compas.

2) **L'almanach ecclésiastique** (cercle établi pour 66 ans de 1954 à 2019).

1. Le millésime	2000
2. Le nombre de dimanches après l'Épiphanie	6
3. La date de la Septuagésime	20 Fév
4. La date du Mercredi des Cendres	9 Mars
5. La date de Pâques	23 Mars
6. La date de l'Ascension	10 Juin
7. La date de la Pentecôte	17 Juin
8. La date de la Fête Dieu	24 Juin
9. Le nombre de dimanche après Pentecôte	7
10. La date de l'Avent	27 Nov
11. La lettre dominicale	BA
12. Le nombre d'or	11
13. L'épacte	11
14. L'indiction	8
15. Lettre du martyrologe (données pour l'année 2000)	S

● **Anni Domini (2000)** : rang de l'année dans le calendrier grégorien.

● **Dom. Post Epiph (6)** : nombre de dimanches entre l'Épiphanie (dimanche suivant le 1er janvier) et la Septuagésime. Septuagesima (20 février) :

6^e dimanche avant Pâques : 1er dimanche de Carême

9^e dimanche avant Pâques : dimanche de Septuagésime

● **Dies Cinerum (8 mars)** : date du mercredi des Cendres, premier jour de Carême.

● **Pascha (23 avril)** : Pâques : 1er dimanche qui suit la Pleine Lune qui suit l'équinoxe de printemps.

● **Ascensio Dom. (1er juin)** : Ascension : le jeudi 40 jours après Pâques.

● **Pentecostes (11 juin)** : Pentecôte : le dimanche 50 jours après samedi saint de Pâques (7 dimanches).

● **Fest. Corporis Ch. (22 juin)** : Fête-Dieu : le jeudi 11 jours après Pentecôte.

● **Dom. Post Pentec. (24)** : nombre de dimanches entre Pentecôte et le premier dimanche de l'Avent.

● **Adventus (3 décembre)** : date du premier dimanche de l'Avent (du latin *adventus*, "arrivée").

● **Littera Domin. (2000 : B et A)** : lettre dominicale.

On désigne par A, B, C, D, E, F, G à partir du 1er janvier les 7 premiers jours successifs de l'année. La lettre du premier dimanche s'appelle la lettre dominicale. Sur le cercle 3 du calendrier perpétuel contenant 365 secteurs et portant la succession des lettres A, B, C, D, E, F, G, A, B, C, D, E, F, G, ... cette lettre dominicale sera en face de tous les dimanches si l'année est non bissextile. Pour les années bissextiles de 366 jours, le 29 février prend la lettre qui revient normalement au 1er mars et il faut deux lettres dominicales, la première permettant de trouver les dimanches jusqu'au 29 février, l'autre les dimanches après le 29 février.

● **Num. Aureus (6)** : nombre d'or, i.e. rang de l'année dans le cycle de 19 ans découvert par Méton en 432 av J.C. dont la formule fut gravée en lettres d'or : 19 années solaires = 235 lunaisons. Par convention, N = 1 si la Nouvelle Lune a lieu le 23 janvier (N = 2 si N.L. le 12 janvier, N = 3 si N.L. le 1^{er} janvier... ; 12 lunaisons font 354 jours soit 11 jours de moins que l'année de 365 jours).

L'année 1995 est l'année numéro 1 d'un nouveau cycle, 1996 portera le numéro 2, l'année 2000 le numéro 6.

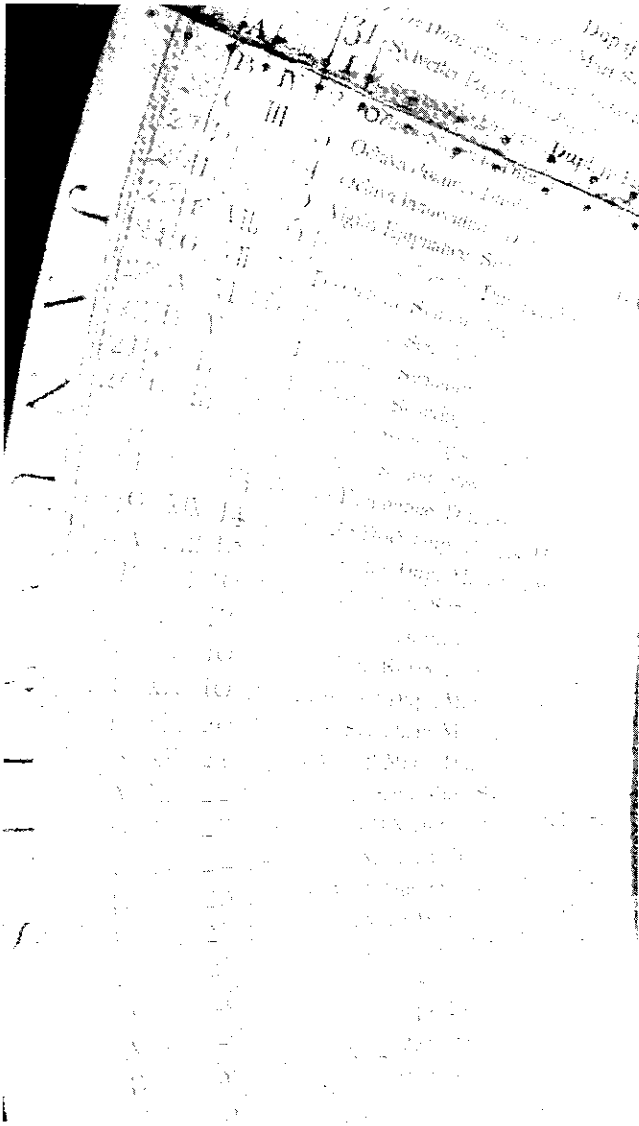
● **Epacta (XXIV)** : épacte, i.e. âge de la lune "ecclésiastique" (Lune "régulière" ...) au 31 décembre de l'année précédente. L'épacte varie donc de 0 (âge d'une N.L.) à 29. Le 31 décembre 1999, l'âge de la lune était donc 24. La suite des épactes est calculée pour que lune ecclésiastique et lune vraie soient les plus proches, mais il peut y avoir un décalage d'un ou deux jours car, d'une part, la lune ecclésiastique est une lune moyenne de 29,5 j sur une année (avec en plus une correction des épactes comme pour les années bissextiles séculaires... pour plus de précision), d'autre part, la lune vraie a un mouvement irrégulier (durées différentes entre quartiers...).

● **Indictio (8)** : rang de l'année dans un cycle de 15 ans d'origine romaine : tous les 15 ans s'accomplissaient certains actes administratifs, comme des révisions cadastrales permettant une mise à jour des impôts. Indiction 1 pour l'année 313 après J.C., l'année 2000 est numéro 8 de ce cycle.

● **Littera Marty. (E)** : lettre du martyrologe : lettre majuscule ou minuscule associée à l'épacte. Pour chaque lettre (30 lettres possibles) correspond un livre relatant pour chaque jour de l'année la vie d'un saint dont on lisait la vie à Prime, premier office de la journée.

On rencontre parfois le cycle dominical de 28 ans (4 x 7) au bout duquel les noms des jours tombent le même quantième du mois. Exemple : lundi 1^{er} janvier 2001 et lundi 1^{er} janvier 2029. Sans années bissextiles, le cycle serait de 7 ans.

3) **Le calendrier perpétuel** : il s'appelle perpétuel par rapport à l'almanach ecclésiastique. Le disque est divisé en 365 secteurs et tourne d'un secteur par jour. Les 6 cercles désignent de gauche à droite :



1 - Mois en latin, JANUARIUS, ...

2 - Cercle permettant de trouver les "Nouvelles Lunes ecclésiastiques". L'alternance des chiffres est (*=0 pour le 1er janvier), 29, 28, 27, 26, 25, 24, ..., 1, puis *, 29, 28, 27, 26, 24, ..., 1, *, 29, 28, 27, 26, 25, 24, ...

Cette succession donne une lunaison approchée mais inexacte de 29,5 jours. Il peut ainsi y avoir un décalage de un jour entre l'âge de la Lune ecclésiastique et celui de la Lune vraie. On lit d'abord l'épacte E sur l'almanach et on trouve alors sur le calendrier perpétuel toutes les Nouvelles Lunes. Soit X le nombre lu sur ce deuxième cercle le jour J, l'âge de la lune ce jour est $E + 1 + 30 - X$ ou $E + 1 - X$

Exemple : chercher les dates des "Nouvelles lunes ecclésiastiques" de l'année 2000 (épacte 24) et les comparer aux "N.L. vraies". Les "Nouvelles Lunes ecclésiastiques" d'âge 0 seront chaque mois en face du $X = E + 1$, de façon que $E + 1 - X = 0$ (âge d'une N.L.). Pour 2000 :

Nouvelle Lune ecclésiastique : 6 janvier, 5 février ...

Nouvelle Lune vraie : 6 janvier (18h), 5 février (13h) ...

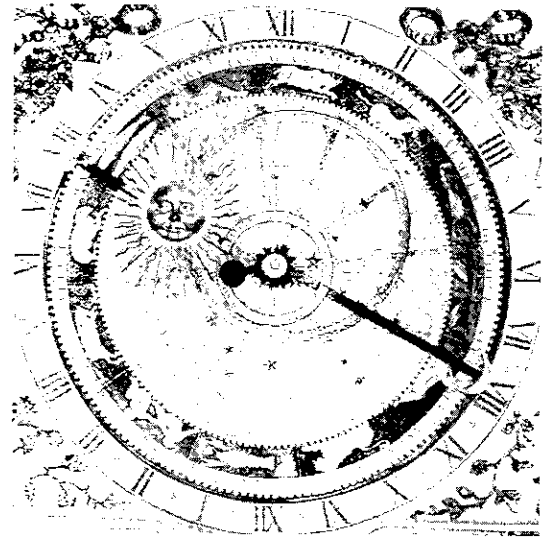
3 - Cercle permettant de trouver les dimanches (voir Lettre dominicale sur l'almanach page 18);

4 - Calendrier romain (Calendes : 1^{er} du mois ; Nones : jour 9 avant les Ides ; Ides : milieu du mois).

5 - Calendrier grégorien donnant le quantième du mois.

6 - Dates des fêtes des saints et des cérémonies.

L'astrolabe



L'astrolabe complet

La Mère ("umm" en arabe)

C'est le boîtier au fond duquel est logé le tympan, surmonté de l'araignée. Le diamètre de ce boîtier excède celui du tympan et son rebord circulaire a une épaisseur telle que le tympan sera, de peu, enfoncé dans la mère et que l'araignée se placera au même niveau que ce rebord. Dans un astrolabe manuel, la mère peut ainsi tenir en réserve plusieurs tympan différents. Comme le fond et l'envers du fond de la mère ne sont pas visibles, seul le rebord circulaire assure une fonction horlogère : il porte les 24 marques d'heures rondes, espacées de 15° en 15°, et numérotées en deux séquences de chiffres romains, de I à XII. Entre les chiffres, les demi-heures sont repérées par une moucheture d'hermine. Midi se place sur le XII du haut.

Le Tympan ("safihah" en arabe) et ses 7 familles de lignes.

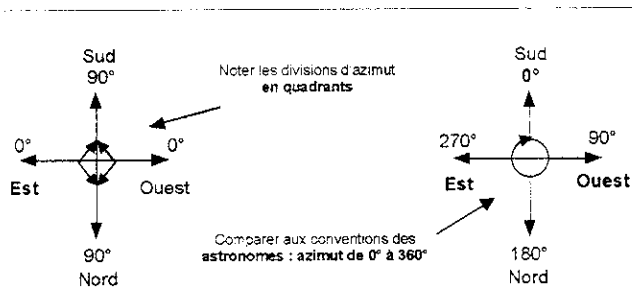
1 - La ligne d'horizon, ou hauteur 0°, rouge, non numérotée.

2 - Au-dessous, la ligne rouge de hauteur -18° qui représente la frontière entre le crépuscule astronomique et la nuit noire non numérotée.

3 - Dix-sept courbes de hauteur, de couleur noire (ou almicantarats), pour des hauteurs d'astres étagées de 5° à 85° et numérotées, en chiffres arabes noirs, par pas de 10°. La courbe de hauteur 90°, pour un astre au zénith, se réduit à un point.

4 - Les trois cercles de l'équateur, du tropique du Cancer, du tropique du Capricorne. Bien que le Capricorne soit tracé très près du bord du tympan, il ne constitue une limite que pour les lignes tracées au-dessous de l'horizon. Les azimuts et les almicantrats le franchissent et atteignent le bord même du tympan.

5 - Trente-six lignes d'azimut, de couleur noire, une tous les 10°, avec une numérotation particulière aux astrolabes, qui s'organise en 4 séries de part et d'autre de deux axes, l'un Nord-Sud et l'autre Est-Ouest. Ces axes se coupent à angle droit, sur le pôle du tympan et les azimuts numérotés 0° coupent l'horizon sur l'axe Est-Ouest et progressent, de 10° en 10°, jusqu'au méridien Nord-Sud où ils valent 90°. Les chiffres arabes noirs qui les identifient sont tracés de plus en plus gros, à mesure qu'on progresse vers le haut du tympan.



Conventions d'azimut

6 - Onze courbes noires sous l'horizon, allant du tropique du Cancer au tropique du Capricorne numérotées en chiffres romains noirs de I à XII (horizon). Ces heures temporaires de nuit découpent, en douze tranches égales, la durée qui s'écoule entre le coucher du Soleil et son lever du lendemain. Elles sont donc égales entre elles, n'importe quel jour mais, collectivement, inégales de jour en jour. A la latitude de Lyon, elles valent sensiblement :

- au solstice d'été (Cancer): $8h30 / 12 = 0h 42$
- aux équinoxes (Bélier, Balance): $12h / 12 = 1h 00$
- au solstice d'hiver (Capricorne): $15h30 / 12 = 1h 17$

Ces heures temporaires s'appellent aussi antiques, inégales, bibliques, judaïques. Il faut bien voir qu'elles ne sont pas des instants, comme nos heures modernes, mais des durées et il est mieux de les numéroté, non pas sur la ligne mais dans l'espace entre deux lignes. Si on numérote les lignes comme sur ce tympan, de I à XII, on exprime l'idée que la ligne marque la fin de la plage horaire : à minuit la sixième heure temporaire de nuit est accomplie et on entre dans la septième.

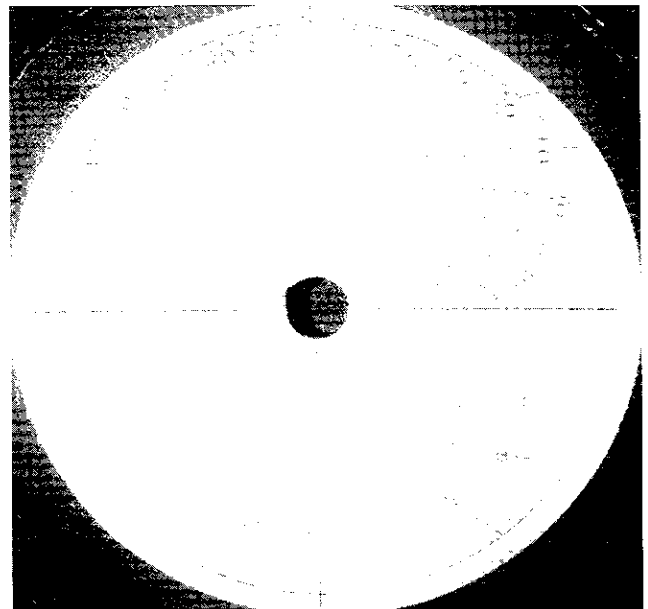
Le système fonctionne aussi, mutatis mutandis, de jour et, jusqu'à la Renaissance, toute l'Europe s'en accommoda. Les douze heures temporaires de nuit étaient suivies de douze heures temporaires de jour, la sixième accomplie étant notre midi. Il n'y avait égalité entre les heures de jour et les heures de nuit que les jours d'équinoxes où elles valaient toutes une de nos heures modernes.

Sur l'horizon Est, et confondues avec lui, se placent l'heure zéro de jour et l'heure douze de nuit. Sur l'horizon Ouest, et confondues avec lui, se placent l'heure zéro de nuit et l'heure douze de jour.

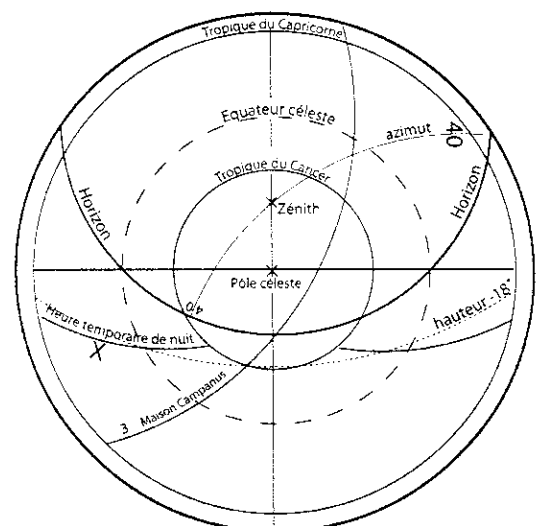
Sur ce tympan, seules sont tracées les heures de nuit. Elles tournent de droite à gauche par le bas, donc en sens horloge.

7 - De l'intersection de l'horizon et du méridien (point Nord sur l'épure, point Sud en dehors de l'épure), rayonnent douze arcs de cercle rouges, numérotés de I à XII, en chiffres arabes rouges et en sens anti-horloge. Douze demi-plans (d'axes la ligne horizontale Nord-Sud) définissent les douze "maisons astrologiques" dans le système de domification attribué à Campanus de Novare (XIII^e siècle).

Les maisons 1 (Ascendant) à 6 sont au-dessous de l'horizon, les maisons 7 (Descendant) à 12 au-dessus. Les arcs I et VII sont confondus avec l'horizon. Ces arcs de cercle forment les frontières ou cuspidés des maisons astrologiques. Fond du ciel et milieu du ciel se trouvent respectivement sur les cuspidés des maisons n° 4 et n° 10. La présence du Soleil, de la Lune ou des planètes dans telle ou telle maison est prise en considération par les astrologues.



Tympan de l'astrolabe



L'alidade



L'alidade portant le Soleil

Un soleil doré, humanisé, entouré de 30 rayons, alternativement sagittés et ondes, parcourt l'écliptique. L'alidade qui le porte est terminée par une fleur de lys dorée indiquant l'heure sur la couronne de la mère. Le croissant que porte l'autre extrémité n'est qu'un contrepoids...

L'araignée et l'alidade tournent autour d'un pivot sculpté en

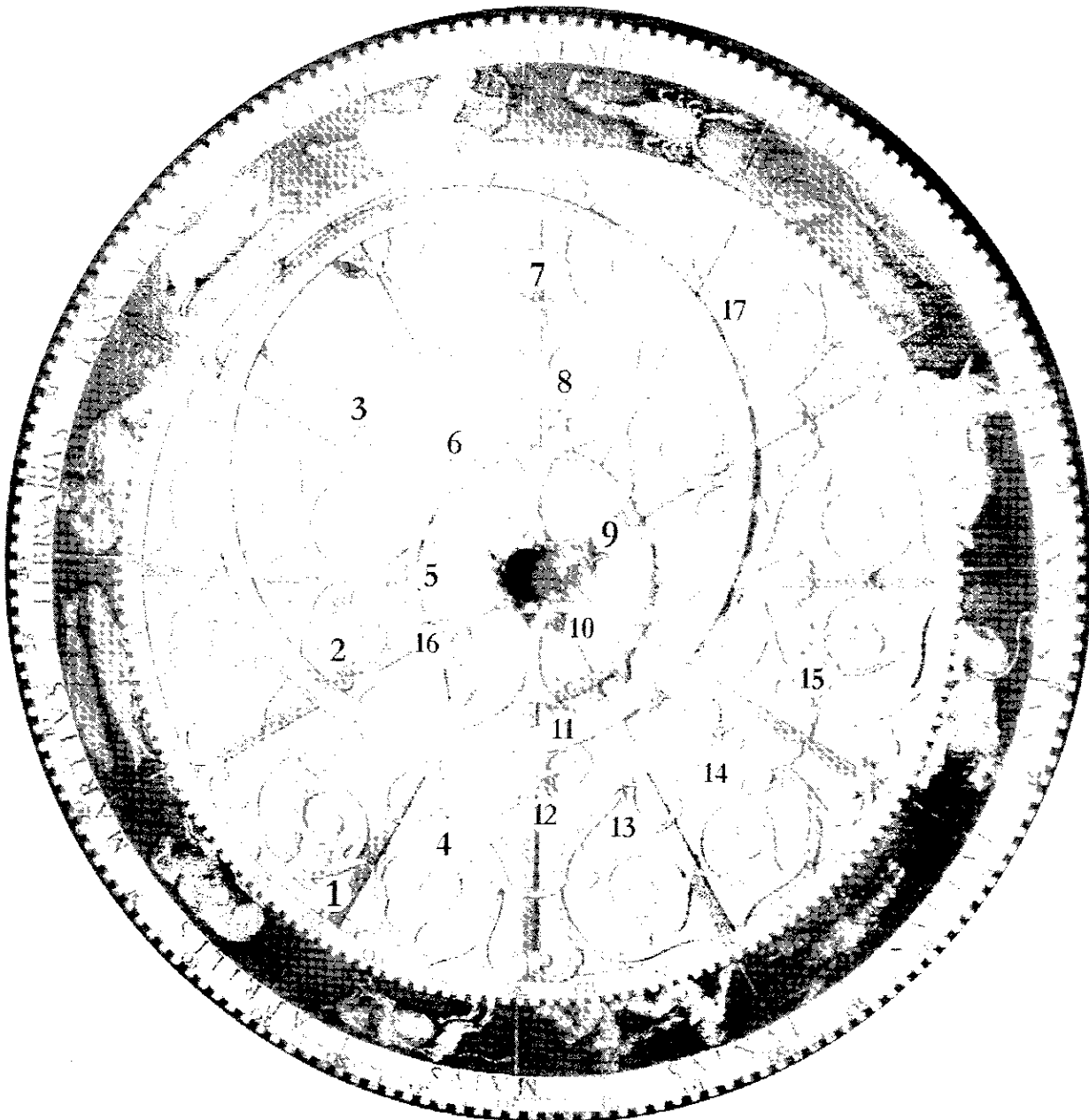
forme de fleur de tournesol dorée et 12 rayons en fer forgé assurent le maintien de l'ensemble.

L'araignée ("ankabut" en arabe)

C'est la pièce tournante, très belle, ajourée le plus possible pour laisser voir le tympan qu'elle recouvre, mais les volutes des rinceaux dorés et l'énormité du Soleil qu'elle porte rendent souvent impossible l'examen du tympan dont les courbes qui seraient alors significatives, sont occultées. De la périphérie vers le centre, on remarque les éléments suivants :

1 - Une mince couronne portant les graduations des 365 jours de l'année, en forme de pavés blancs et noirs, alternés.

2 - Une couronne portant les noms latins des douze mois de l'année, avec des graduations renforcées pour les jours 10, 20, 30 ou 31 (28 pour février).



3 - Une couronne comportant douze secteurs dont les frontières sont celles des jours où le Soleil change de signe zodiacal (vers le 21 de chaque mois). Dans ces secteurs, des sujets dorés représentent ces douze signes ; en dessous d'eux une mince couronne porte les graduations des 360 degrés de l'écliptique, avec des marques renforcées pour les décans (degrés 10, 20, 30).

4 - Une couronne en fer forgé représente l'écliptique et en porte les symboles conventionnels des signes du zodiaque.

5 - Près du centre une couronne argentée est partagée en 29 cases et demie. La Lune est matérialisée par un globe mi-argenté, mi-noir, tournant selon les phases de la Lune sur une aiguille dont l'extrémité étoilée indique le jour de la Lune.

6 - Fixées sur les rinceaux, 17 étoiles à 5 rais représentent les principales étoiles facilement identifiables. Les étoiles n° 3, 5, 6 représentent par exemple Altair, Deneb, Véga avec leurs coordonnées équatoriales 1600.

1- L'alidade doit accomplir un tour en 1 jour solaire moyen de 24 heures, pendant que l'araignée accomplit un tour en 1 jour sidéral de 23 heures 56 minutes et 4 secondes. Autrement dit, pour 365,25 tours de l'alidade ("portant le Soleil"), l'araignée ("portant les étoiles") fait 366,25 tours.

2 - La Lune doit parcourir son cercle gradué en 29,5 jours dans le sens rétrograde et en tournant sur elle-même en accord avec ses phases. Le mois synodique lunaire vaut en moyenne 29,530588 jours et l'astrolabe procure 29,538461 jours, ce qui est une valeur remarquable : il faut 121 mois, soit 10 ans, pour qu'apparaisse un écart de 1 jour.

3 - L'intérieur de l'horloge : les "rouages" permettant les mouvements précédents (automates et astronomie) et 5 poids (250 tours de manivelle pour remonter le mécanisme, environ 80 pour les automates) :

- Mécanisme : poids de 300 kg se trouvant dans un caisson derrière l'horloge. Lors du remontage, l'horloger engrène un petit contrepoids de 100 g sur une roue pour éviter l'arrêt de l'horloge. Câbles (40 m) avec des moufles nécessitant 250 tours de manivelle. Les roues du mouvement sont en bronze moulé et taillé (restauration Charmy), celles du comput en fer taillé à la main, certaines de Nourrisson ou Lippius... - Suisse : d'abord rapide (petit volant) puis il ralentit (2^e volant), fait un tour, salue, repart à la sonnerie.

- Sonnerie du coq : soufflet et boîte permettant le son haché, surpoids sur le soufflet, 2 câbles : ailes et cou.

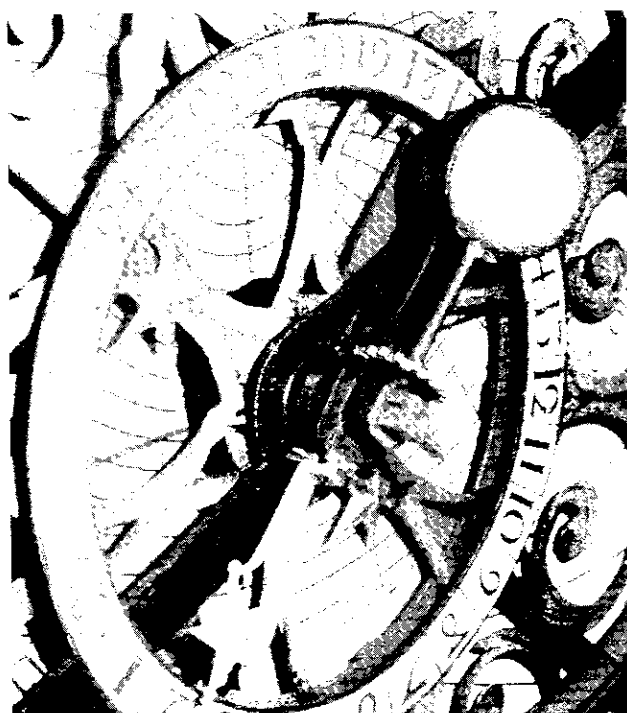
- Automates : 6 anges aux clochettes, 2 anges du bas, Annonciation, Pere Céleste qui bénit, carrousel des jours

- Sonneries : En plus des heures qui sonnent à 12h, 14h, 15h, 16h, lorsque la roue est en bonne place, sonnerie des demi-heures, suppression possible de la sonnerie aux moments des offices (dimanches notamment).

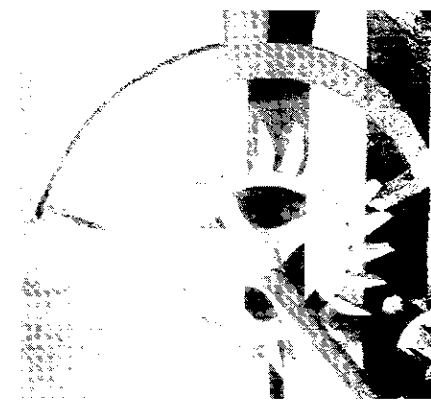
4 - Remarques.

L'horloge est le chef d'œuvre de différents artisans dans ses moindres détails : à l'intérieur par exemple, invisibles du public, on note un pendule de longueur 2,7 m (période 3,305s), l'ancre de 1782 datée de la restauration de Charmy, une vis sans fin à 2 filets qui transmet le mouvement au calendrier perpétuel (1 tour par an) et à l'almanach (1 tour en 66 ans). Les roues des engrenages sont taillées à la main pour les plus anciennes. On peut voir aussi des pièces de fer forgé d'une grande finesse (salamandre pour le changement d'année de l'almanach ecclésiastique, patte de lion près du mécanisme du Suisse). La photo ci-dessous représente la vis sans fin, la salamandre et l'ancre datée de 1782 avec sa roue d'échappement.

La partie cachée ; les rouages



Lune : phase et âge



Identification des étoiles

La présence de 17 étoiles pose un problème. Si, sur un astrolabe manuel, l'araignée est chargée d'étoiles, c'est parce que celles-ci renseignent la nuit sur la position du Soleil ; mais, sur un astrolabe motorisé, elles ne servent qu'à renseigner sur leurs propres positions. Le travail qui suit a été fait à partir de la photo de la page 5.

Comme tout l'astrolabe a été restauré, pour ne pas dire reconstruit, en 1661 par Guillaume Nourrisson, nous avons admis que les coordonnées des étoiles choisies devaient être celles de l'équinoxe de printemps 1600. Nous avons aussi admis que la photographie ne déformait pas les tracés circulaires puisqu'on n'y décèle qu'une ovalisation inférieure à 1 mm sur 112 mm de diamètre.

Nous débarrassons en esprit l'araignée de tous ses rinceaux ; nous y reportons les quatre cercles des tropiques, de l'équateur et de l'écliptique, puis nous traçons les cercles de déclinaison étagés de -23° à 89° . Les étoiles sont ainsi définies par leur déclinaison ; pour mesurer leur ascension droite nous disposons des graduations du Capricorne, tous les degrés avec traits renforcés pour les degrés 10° , 20° , 30° .

Il suffit alors de noter à quelle déclinaison et sur quelle ligne d'ascension droite se place une étoile, au besoin en convertissant en degrés son ascension droite exprimée en heures et minutes, pour pouvoir l'identifier dans un catalogue d'étoiles. C'est exactement la manoeuvre inverse de celle qu'effectuerait un astrolabiste pour créer son instrument.

On trouvera surtout des étoiles de forte magnitude mais, comme le rôle des étoiles, sur un astrolabe manuel, consiste à renseigner, pendant toute la nuit sur la position du Soleil, on peut aussi trouver des étoiles plus modestes, mais dont la

présence au-dessus de l'horizon à telle ou telle époque de l'année serait bien utile.

Un astrolabe est tout entier dimensionné à partir du rayon de son cercle équateur ; nous avons mesuré pour rayon de ce cercle $R = 56$ mm, en respectant l'obligation de le faire passer par les points γ et γ' . Cela conduit à estimer le Cancer à 36,75 mm et le Capricorne à 85,34 mm. Une étoile de déclinaison δ se projette à une distance r du centre égale à $R \times \tan((90^\circ - \delta) / 2)$. Le tableau ci-dessous rassemble les mesures et les hypothèses.

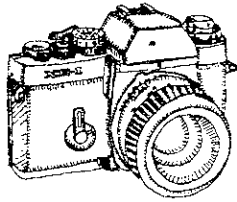
L'étoile n° 1 est nécessairement Sirius mais son ascension droite est fautive de 5 heures, ce qui pourrait s'expliquer par un accident ayant entraîné un repositionnement aventureux. Admettre que l'étoile n° 10 soit Kochab semble déjà plus hasardeux puisque l'écart en ascension droite serait de 7 heures ! Il semblerait normal que Guillaume Nourrisson eût laissé quelques traces écrites de ses choix et calculs, et, peut-être, un dépouillement méthodique de ses dossiers nous en apprendrait-il plus.

Cette très brève analyse ne peut être considérée comme résolvant un problème mais, simplement, comme contribuant à le poser. On voit cependant que les étoiles de l'araignée n'ont pas un rôle purement décoratif.

Bibliographie.

- L'horloge astronomique de la cathédrale Saint-Jean, F. Branciard et C. Maorat, Éditions ANCAHA BP 312, 75 025 Paris Cedex 01 (50 F).
- L'astrolabe de Henri Michel, Edition Alain Brioux (épuisé).

n°	r mm	α °	α h min	δ ° '	hypothèse étoile	constellation	$\alpha / 1600$ h min	$\delta / 1600$ ° '
1	74	27	1h 48	-16	Sirius ?	Grand Chien	6h 27	-16
2	43	344	22h 56	15	Markab	Pégase	22h 45	13°02
3	46	294	19h 36	11	Altair	Aigle	19h 32	7°50
4	54	41	2h 44	2	Menkar	Baleine	2h 41	2°32
5	24	310	20h 40	43°30	Deneb	Cygne	20h 28	43°49
6	25	279	18h 36	42	Vega	Lyre	18h 24	38°26
7	56	239	15h 56	0	Unukhala	Serpent	15h 25	7°40
8	34	227	15h08	27	La Perle	Couronne boréale	15h 18	28°02
9	13,5	167	11h 08	63	Dubhé	Grande Ourse	10h 39	63°55
10	7,5	118	7h 52	74°30	Kochab ?	Petite Ourse	14h 51	74°50
11	25	77	5h 08	42	Capella	Cocher	4h 47	45°34
12	43	65	4h 20	15	Aldébaran	Taureau	4h 13	15°42
13	49	86	5h 44	7°30	Bételgeuse	Orion	5h 33	7°21
14	51	110	7h 20	5°30	Procyon	Petit Chien	7h 18	6°10
15	61	136	9h 04	-5	Alphard	Hydre	9h 08	-6°55
16	18	9	0h 36	54	Schedar	Cassiopée	0h 18	54° 21
17	64	198	13h 12	-8	Epi Vierge	Vierge	13h 04	-9°05



Chronique d'une expédition internationale en Laponie.

Frédéric Dahringer

En guise de préambule.

Du 22 au 26 Février de l'an de grâce 2001, une expédition internationale s'enfonça au plus loin possible vers le nord de la Finlande.

Comme pour marquer que le Millénaire Nouveau sera celui de la prise de pouvoir par les Femmes, l'expédition était dirigée par la Señora Rosa M.R. de l'Université de Catalogne.

Parmi les neuf autres membres de l'expédition, il y avait trois femmes et six hommes venant de six pays européens différents, dont votre serviteur.

Trois des membres de l'expédition, habitant le sud de la Finlande avaient la difficile mission de mener le groupe sain et sauf jusqu'en Laponie et faciliter les relations avec les populations autochtones.

L'objectif principal de cette entreprise consistait en une mission exploratoire pour l'installation en juillet 2002, d'un centre d'étude temporaire dans la région.

Sous les auspices concourants de la Connaissance par Socrate, de la Pédagogie par Comenius et de l'Astronomie par l'EAAE, ce centre devra accueillir pendant une semaine cinquante personnes dévouées jour et nuit à ces trois Divinités.

Un objectif secondaire consistait en l'observation d'aurores dites boréales, décrites par certains voyageurs égarés dans ces terres inhospitalières, et leurs relations

supposées avec l'intense activité solaire du moment.

Comme pour toute expédition de ce genre, l'étude du milieu local revêt une grande importance et une bonne connaissance des coutumes indigènes permet d'envisager une installation de longue durée, en toute sécurité.

Et le voyage commença...

Le groupe se retrouva au grand complet au départ des "Caravelles" locales, toutes marquées du même motif "_F" faisant penser au vol d'un oiseau.

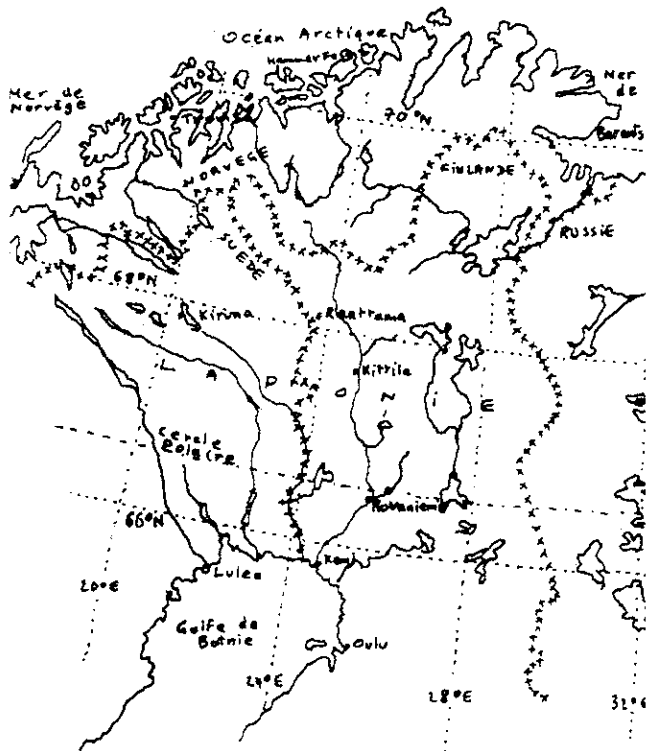
Il était 20 heures locales ce 22 février et la nuit était tombée depuis longtemps déjà, nuit dont on nous disait que, durant toute cette expédition, elle ne nous quitterait guère.

"L'oiseau" atterrit à près de 22 h, bien au-delà du cercle polaire, en un lieu nommé Kittilä. La nuit et la forêt, noires, engloutirent les véhicules dans lesquels nous nous étions engouffrés pour échapper au froid qui avait transformé nos vêtements d' "hommes du sud" en tuyaux d'un acier glacial.

Pendant de nombreuses lieues, les phares des véhicules éclairèrent sans discontinuer une sorte de couloir blanc bordé par le noir de la forêt, dans lequel nous avançons vers l'inconnu.

Mais le ciel, lui, était devenu gris-vert sur une énorme étendue : première observation d'une aurore boréale très diffuse avec dans le lointain (mais était-ce si loin), le long hurlement des loups.

Au bout d'un temps qui nous parut tout à la fois long, par la fatigue du voyage, et court par l'excitation de la découverte, nous arrivâmes à ce qui allait, pour quatre jours, nous servir de camp de base, en un lieu répondant au nom de Raattama. Maisons en bois, fortement chauffées, où nous allions trouver le gîte et la nourriture et l'accueil attentif de deux vieilles personnes dont nous ne comprenions pas le langage.



Les nuits des aurores boréales.

Cette première nuit, comme la suivante, les aurores polaires vont se développer continuellement durant de nombreuses heures. Tout l'horizon nord et jusque très haut au-dessus de nous (l'Etoile Polaire, est bien comme nous nous y attendions, presque au zénith), le ciel est fait de draperies gris-vert qui évoluent lentement, nous laissant à chaque instant espérer les fulgurances et flamboiements colorés décrits dans la littérature ancienne dont nous avons pris connaissance. Nous n'aurons pas le privilège de ces colorations surprenantes mais les apparitions de nouvelles vagues lumineuses, mouvantes comme de légers rideaux sous la brise, nous arrachaient des cris d'émerveillement comme les feux d'artifice aux enfants.

Chaudement habillés, durant ces nuits claires sans vent, nous n'étions pas gênés par le froid. Froid intense cependant puisque le thermomètre de congélateur que j'avais pris le soin de prendre avant mon départ marquait résolument moins quarante degrés centigrades.

Par contre les pellicules photo avaient perdu de leur souplesse et il devenait très risqué de réarmer les appareils de peur qu'elles ne se déchirent. La luminosité du ciel étant trop faible pour nos caméscopes, nous n'avons pas pu hélas obtenir de photographie valable de nos observations.

Nous avons dû nous contenter de photos vendues par nos hôtes Lapons et dont vous retrouverez une reproduction, hélas en noir et blanc, ci-dessous.

Vous pourrez voir de magnifiques photos sur le site internet : ww.spaceweather.com/aurora/gallery_12apr01.html



Remarque : la légende de cette photo vous donne un aperçu de la langue locale ainsi qu'une preuve du passage d'autres civilisations que la nôtre, dont l'écriture de formes géométriques complexes nous est complètement inconnue.

Et la nuit se fit jour.

Et quelle surprise ! Le lendemain 23 février, il fit jour et il en fut de même le 24 et le 25 et je puis l'affirmer pour l'avoir vécu, au moins jusqu'au 26 février de cette année 2001.

Je dois ici confesser que nos hôtes Finlandais et Lapons se sont montrés très surpris et même un peu compatissants, comme on le serait d'un malade mental, à voir ma stupéfaction qu'il fit jour.

Cela leur était bien naturel et c'est bien cela qui leur rendait la vie agréable en ce lieu. Mais moi, tout pétri de longues études théoriques sans doute mal digérées, et de démonstrations avec un planétarium qui me semblaient être la meilleure des pratiques possibles, j'en étais à la conviction fortement ancrée que le soleil en hiver ne fait qu'une très courte apparition sous ces latitudes extrêmes.

Et j'avais raison et j'avais tort. Oh oui, le Soleil se lève bien tard et se couche très tôt, et reste tout au long de la journée si bas sur l'horizon que si nous n'avions pas eu de chro-

nomètres avec nous, nous aurions, à l'aune de nos habitudes, jugé à tout moment de la journée que le Soleil était sur le point de se coucher et qu'il fallait nous hâter pour rentrer au camp avant la nuit.

Mais les aurores et les crépuscules sont si longs, le Soleil met tant de temps à se lever et si longtemps à se coucher qu'avec le ciel si pur que nous avons connu là-bas il faisait jour bien avant que le soleil se levât et les lueurs magnifiques du crépuscule illuminaient encore longtemps le ciel avant qu'il ne fît nuit.

Quelques expériences élémentaires mais nécessaires.

Pour montrer à mes concitoyens à quel point le soleil reste bas sur l'horizon, je m'empressai dès ce premier jour à mettre en place un gnomon vertical de faible taille et je relevai régulièrement les positions successives de l'extrémité de son ombre. Je fis de même, avec le même instrument, quand revenu chez moi je pus bénéficier d'une journée ensoleillée.

La comparaison des deux relevés est fort instructive et vous pourrez sans peine, avec les indications fournies, calculer la latitude et la longitude de ces deux lieux d'observation.

Les relevés seront publiés dans le numéro de septembre où ils feront l'objet d'une activité avec les élèves.

Ayant déterminé le méridien astronomique local, j'en profitai pour relever la direction du nord magnétique. Je découvris à mon grand étonnement que la déviation magnétique était de quelques degrés à l'est (2° en principe) alors qu'en ma province d'origine, elle est de l'ordre de 4° ouest comme en attestent les deux reproductions ci-contre. (photos 3 et 4).

Je fis de même pour mesurer les inclinaisons magnétiques. L'aiguille aimantée que j'avais emportée avait la possibilité aussi de tourner dans un plan vertical que je choisis ici d'être le plan du méridien magnétique.

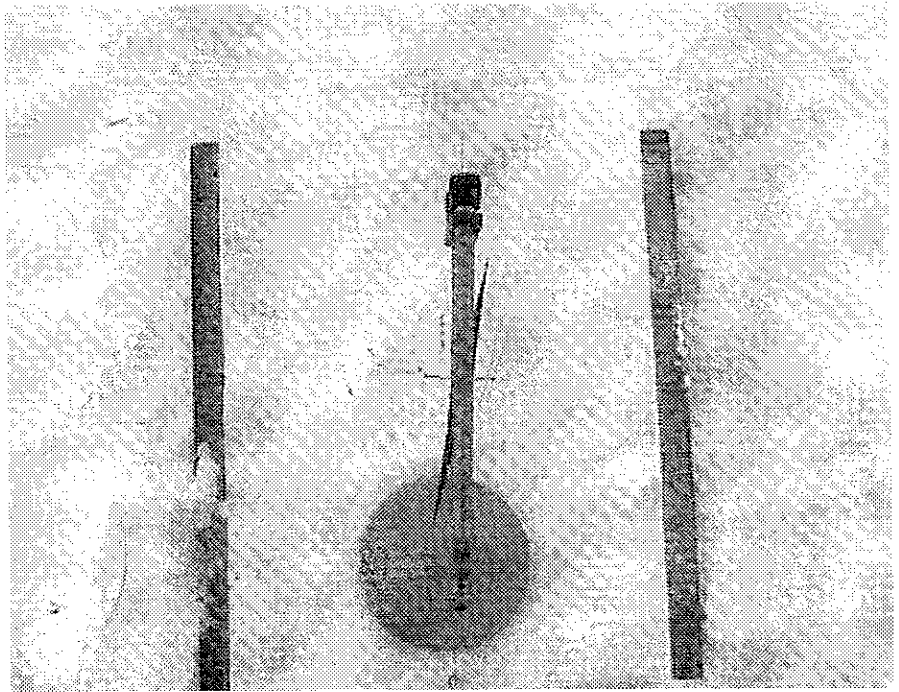


Photo n° 3 : déclinaison magnétique à Raatama (Laponie)

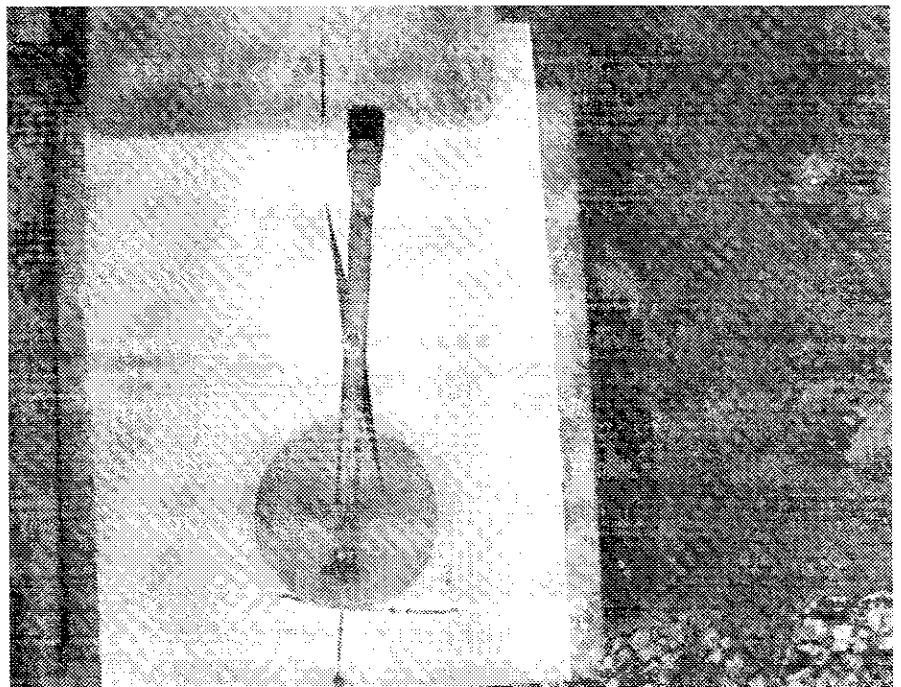


Photo n° 4 : déclinaison magnétique à Bubry (Bretagne)

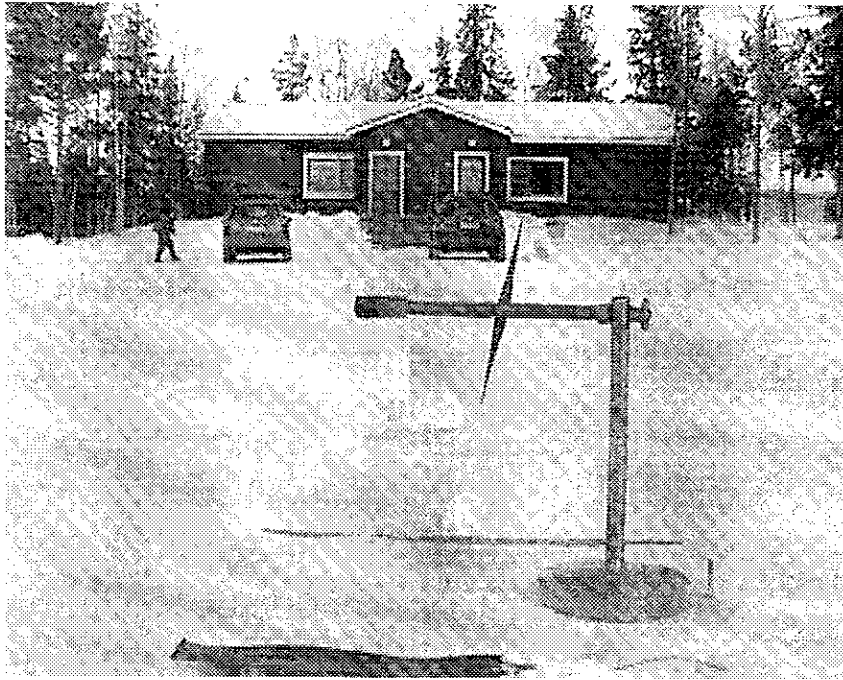


Photo n° 5 : inclinaison magnétique à Raattama (Laponie)

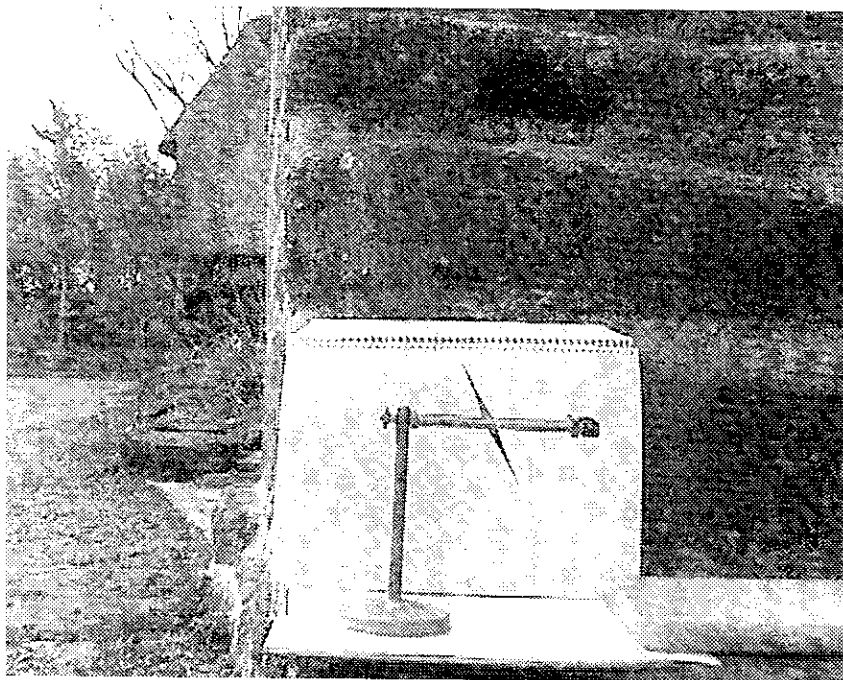


Photo n° 6 : inclinaison magnétique à Bubry (Bretagne)

Vous pourrez aisément faire les mesures de ces deux inclinaisons à Raattama et à Bubry sur les photos 5 et 6 ci-contre.

Et nous faisons connaissance de notre environnement.

Ciel pur. L'absence de vent et l'air très sec rendent la température de moins vingt six degrés centigrades, à midi, face au Soleil, très supportables.

Devant les chalets où nous logeons, une rivière bordée de quelques bouleaux est figée par le gel. Le matin de notre départ, la température se sera un peu adoucie et l'on entendra le bruit de la rivière coulant à nouveau comme un signe précurseur du printemps, pourtant lointain.

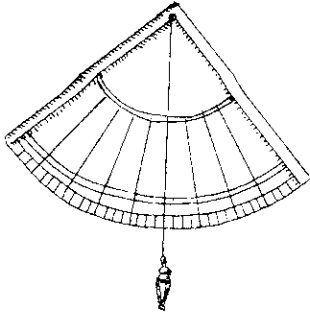
Nous goûtons avec plaisir à la nourriture locale fondée sur le poisson abondant, conservé séché, la viande de rennes, des bouillies de céréales et des compotes ou confitures de baies sauvages récoltées en été.

Un village s'étend à peu de distance de notre camp de base. Il comprend un établissement de vente de différents produits manufacturés, de première nécessité comme du savon ou des vrilles pour percer la glace des rivières et pêcher le poisson en hiver. Plus loin, une église sobre correspondant à un culte monothéiste comme celui qui a cours dans nos contrées mais beaucoup plus austère et sans fioritures ni apparat. Parmi les maisons basses, une école accueille de jeunes enfants. On y découvre comme chez nous les trois divinités Connaissances, Pédagogie et Astronomie, servies aussi bien par les dessins et jeux d'autrefois que par les nouveaux Dieux Informatique et Internet.

Et l'objectif principal de notre expédition ?

La deuxième semaine du mois de juillet 2002 aura lieu dans les environs de Raattama, au pied des monts Pallas la 6^e Université d'été d'astronomie de l'EAAE, avec en prime le Soleil de Minuit.

■



Le zodiaque de Denderah

Colette Le Lay

HISTOIRE

Lors de la campagne d'Égypte (1798 - 1801), un zodiaque circulaire est découvert au plafond du temple de Dendérah. Plusieurs savants renommés tentent de le dater par l'étude des phénomènes astronomiques représentés. Mon article a pour but de présenter les enjeux de cet essai de datation et d'en retracer les principales étapes.

Le premier à découvrir le temple de Dendérah, près de Thèbes, est le général Desaix, à la poursuite des Mamelouks en novembre 1798, bientôt suivi par Dominique Vivant-Denon qui décide de revenir pour dessiner le zodiaque circulaire :

Je commençai donc par ce qui était en quelque sorte l'objet de mon voyage, le planisphère céleste, qui occupe une partie du plafond du petit appartement bâti sur le comble de la nef du grand temple. Le plancher très bas, l'obscurité de la chambre qui ne me laissait travailler que quelques heures dans la journée, la multiplicité des détails, la difficulté de ne pas les confondre en les regardant d'une manière si incommode, rien ne m'arrêta ; la pensée d'apporter aux savants de mon pays l'image d'un bas-relief égyptien d'une telle importance me fit un devoir de souffrir patiemment le torticolis qu'il me fallait prendre pour dessiner¹.

En mars 1799, surviennent les ingénieurs des Ponts et Chaussées, Prosper Jollois et Edouard de Villiers du Terrage. Ils divisent le zodiaque en huit secteurs égaux à l'aide de fils tendus et adoptent l'échelle du cinquième. C'est leur dessin,

plus précis que celui de Vivant-Denon qui sert de support aux études.

On distingue les douze signes du zodiaque distribués sur une espèce de spirale, dont le Lion occupe l'extrémité la plus éloignée du centre, et le Cancer l'extrémité la plus rapprochée (...) ; le Lion et le Cancer sont à peu près sur le même rayon du cercle.(...) Dans l'espace qui est entre le médaillon principal et la grande ligne circulaire d'hiéroglyphes, on voit deux phrases hiéroglyphiques opposées l'une à l'autre, qui se trouvent sur un même diamètre avec le Cancer et le Capricorne. Deux hiéroglyphes placés dans le même espace, et pareillement opposés l'un à l'autre, se trouvent sur un autre diamètre avec le Taureau et le Scorpion².

Enfin arrive Fourier, auréolé de son statut de savant ; c'est à lui que Jollois et De Villiers laissent le soin d'interpréter le zodiaque :

Je vous dirai pour m'en tenir à une idée générale que les anciens habitants du climat de Thèbes ont représenté dans les sculptures qui décorent les édifices religieux l'état du ciel tel qu'ils l'observaient alors et que la disposition de cette ancien-

ne sphère est très différente de celle que nous voyons aujourd'hui : change - ment qui est principalement dû à la précession des équinoxes. La quantité et même la carte de ce mouvement sont aujourd'hui connues de sorte qu'on peut déterminer l'époque que les Egyptiens ont eu le dessein de représenter³.

En 1821, à la grande fureur des Anglais, le roi Louis XVIII achète le zodiaque au pacha Mehemet Ali, pour la somme de cent cinquante mille francs dont la moitié est prélevée sur sa cassette personnelle. Le maître - maçon Le Lorrain se charge de l'opération technique. Le zodiaque est extrait du plafond du temple, transporté en France et exposé à la Bibliothèque Nationale où il restera un siècle, jusqu'en 1922 date de son transfert au Louvre.

L'enjeu de la datation du zodiaque est d'importance.

Deux conceptions s'affrontent. Pour certains, le zodiaque a été inventé par les Egyptiens à une époque très reculée, pour les autres, les Egyptiens ont emprunté le zodiaque aux Grecs. Ce sont deux perceptions différentes de la place de l'Egypte dans l'histoire de l'astronomie.

N'oublions pas que la controverse bat son plein à une époque (1798 - 1822) où on n'a pas encore percé le mystère des hiéroglyphes : l'idée d'un système complexe ne vient à Champollion qu'au cours de l'été 1822 et ses travaux ne seront publiés qu'en 1824. Les considérations astronomiques sont donc le seul outil dont disposent les savants qui s'intéressent au problème.

L'Eglise n'est pas non plus indifférente à la querelle. En effet, elle date la création du monde de quatre mille ans avant Jésus-Christ et ne voit pas d'un bon œil un zodiaque datant de 15000 ans.

Deux concepts importants apparaissent dans la controverse :

- la précession des équinoxes : l'axe

de rotation de la Terre est affecté d'un mouvement lent qui a la conséquence suivante : l'équinoxe de printemps recule de 1° en 72 ans. En considérant que tous les signes du zodiaque occupent 30°, l'équinoxe est décalé d'un signe tous les 2160 ans et fait un tour complet en 26000 ans.

- le lever héliaque de Sirius (appelé Sothis en Egypte) : c'est le moment de l'année où Sirius se lève juste avant le Soleil. Dans l'ancienne Egypte, le lever héliaque de Sirius correspondait à la crue du Nil. Mais du fait de la précession des équinoxes, le lever héliaque de Sirius a retardé sur la crue d'environ une semaine par millénaire.

Passons maintenant en revue les acteurs de la controverse.

Charles François Dupuis (1742-1809), professeur d'éloquence latine au Collège de France et membre de l'Académie des Inscriptions et Belles - Lettres, étudie les zodiaques dans son ouvrage *L'origine de tous les cultes*, publié en 1794 : il analyse les signes, leur rapport avec les saisons et recherche une région et une époque rendant compte des analogies découvertes : il propose la région de Thèbes vers 15000 ans avant notre ère (quand l'équinoxe d'automne était dans le Bélier.)

Les savants qui participent à la campagne d'Egypte connaissent l'œuvre de Dupuis. Lorsqu'ils découvrent le zodiaque de Dendérah, ils y voient une confirmation des thèses de la haute antiquité de l'astronomie égyptienne.

L'Italien Ennius Quirinus Visconti (1751-1817), expert reconnu dans le domaine de l'Antiquité, émet une hypothèse très différente dans sa *Notice sommaire des deux zodiaques de Tentyra*, publiée en annexe de la 2ème édition de *L'histoire d'Hérodote* de Larcher en 1801. Jérôme Lalande (1732-1807) s'en fait l'écho dans *La connaissance des temps pour l'an XIV* :

(...) Une notice de M. Visconti, qui dit que le premier signe du grand zodiaque est celui du Lion ; que la Balance, symbole de l'équinoxe, est à sa place, et que la ressemblance de la plupart des signes grecs, prouve que ce

zodiaque a été exécuté dans un temps qui ne remonte pas à la plus haute antiquité de l'astronomie grecque ; il est presque convaincu que cet ouvrage est du premier siècle de l'ère vulgaire.

Lalande en profite pour faire part de son avis personnel, mais à partir d'un zodiaque rectangulaire, également découvert à Dendérah :

*Pour moi, j'ai remarqué par la gravure de M. Denon, que le Cancer est figuré dans les deux lignes, à la tête des signes descendants et à la fin des signes ascendants ; ce qui prouve bien que le solstice était vers le milieu du Cancer, et cela remonte à 3000 ans. Mais j'ai fait voir dans mon *Astronomie* que Eudoxe, qui écrivait environ 370 ans avant notre ère, et Aratus, qui suivit Eudoxe, décrivent la sphère d'après une tradition plus ancienne, qui remonte à douze à treize cents ans avant l'ère vulgaire, et qui venait de l'Egypte ou des Indes(...) ainsi il est tout naturel qu'elle se trouve dans le zodiaque de Dendera, qui, par conséquent, peut bien être regardé, à cet égard, comme un ouvrage des Grecs.*

Dupuis, piqué au vif par les critiques de Visconti, publie à son tour en 1806 un Mémoire sur le zodiaque de Tentyra.

L'équinoxe était dans le Bélier. En effet, l'équinoxe de printemps était désignée en Egypte par l'image d'un oiseau, par l'épervier. Or cette image, nous la trouvons près du Bélier, placée au-dessus d'un groupe de deux animaux adossés, qui sont la chèvre et le chien, c'est-à-dire de deux constellations qui longtemps fixèrent l'équinoxe de printemps.(...) Nous ne savons jusqu'ici encore qu'une chose, c'est que les points équinoxiaux et solsticiaux, à l'époque à laquelle fut composé ce zodiaque, répondaient aux constellations du Bélier, de la Balance, du Cancer et du Capricorne : mais ils y ont répondu pendant 2160 ans, c'est-à-dire depuis l'an 2548 jusqu'à l'an 388 avant le commencement de l'ère vulgaire.

Dupuis propose le moyen terme de 1468 ans.

Quelques temps plus tard, dans *La*

description de l'Égypte, Joseph Fourier (1768-1830) fait part de ses propres conclusions : pour lui, les zodiaques trouvés en Égypte ont environ 25 siècles :

La constellation qui occupe la dernière place est celle où se termine l'année d'Isis, c'est-à-dire où l'on observe le Soleil au lever héliaque de Sirius (...) Il était dans le signe du Lion vers le milieu du XXVe siècle, avant l'ère chrétienne, lorsqu'on imposa en Égypte aux constellations zodiacales les noms et les figures propres à ce climat.

Dans le Précis de l'histoire de l'astronomie qui constitue le livre V de l'édition de 1824 de son *Exposition du système du monde*, Pierre Simon Laplace (1749-1827), après avoir rappelé la thèse de Dupuis donne sa préférence à l'interprétation de Fourier dont il souligne "l'ingénieuse remarque au sujet des levers héliaques de Sirius".

Dans cette position qui remonte à quinze mille ans, la Balance était à l'équinoxe de printemps ; et les constellations du zodiaque avaient des rapports frappants avec le climat de l'Égypte et avec son agriculture. Tous ces rapports subsisteraient encore, si les constellations du zodiaque, au lieu d'avoir été nommées d'après leur lever avec le soleil, ou au commencement du jour, l'eussent été d'après leur lever à l'entrée de la nuit (...) L'origine du zodiaque, qui ne remonterait alors qu'à deux mille cinq cents ans avant noire ère, s'accorderait beaucoup mieux que la précédente avec le peu que nous savons, de l'antiquité des sciences et spécialement de l'Astronomie.

C'est entre temps que Jean Baptiste Biot (1774-1862) fait une entrée en scène fracassante en lisant à l'Académie des sciences, le 15 juillet 1822, son Mémoire sur le zodiaque circulaire de Dendérah. La conclusion en est la suivante :

Alors l'époque céleste qu'il représente, se trouve être celle d'environ 700 ans avant l'ère chrétienne, ce qui n'empêche pas que sa construction ne puisse être d'une date fort postérieure.

Les critiques fusent et Biot ressent la nécessité de défendre son point de

vue dans ses *Recherches sur plusieurs points de l'astronomie égyptienne*, parues en 1823 :

Je compris que j'avais blessé au vif quelque opinion de corps, dont les partisans se coalisaient pour prévenir la propagation de sentiments qui leur étaient contraires. Cette opinion, ou plutôt ce dogme, car je ne saurais autrement l'appeler en voyant la ferveur qu'il excite, c'est celui de l'immense antiquité des monuments astronomiques trouvés en Égypte.

Le préalable de Biot est complètement nouveau : il pense que le zodiaque a été construit à l'aide d'un "procédé géométrique rigoureux et uniforme" utilisant un globe céleste. En voici la description :

Ce système consiste à projeter tous les points de la sphère par développement autour d'un d'entre eux choisi pour pôle, en plaçant chaque point sur le tableau, dans son alignement véritable, et à une distance du pôle égale au développement de l'arc qui mesure sa distance polaire sur la sphère.

A l'aide de mesures précises, Biot détermine la position d'un certain nombre d'étoiles, trouve la période correspondante et reconstruit l'état du ciel : il coïncide avec le zodiaque si l'on tolère des erreurs du même ordre que celles d'Hipparque.

Biot critique Fourier sur deux points.

D'abord

M. Fourier n'assigne entre les parties de ces zodiaques aucune relation géométrique. Il ne voit même dans le zodiaque circulaire aucun indice d'un mode régulier de projection.

D'autre part :

Sirius⁴ ne pouvait se trouver astronomiquement à cette place (...) Il ne peut donc avoir été marqué ici que comme un emblème.

Plusieurs auteurs obscurs participent à la polémique. Deux ouvrages de ce type figurent au catalogue de la médiathèque de Nantes. Le premier, *Essai d'interprétation du zodiaque circulaire de Dendérah* par H.S. Leprince, sous-bibliothécaire de la ville de Versailles, donne dans un style très ampoulé, une date très précise :

En dernière analyse, le colure des solstices passait donc, à l'époque de la

composition du zodiaque, au milieu du Cancer primitif (...) c'est donc à l'an 824 avant J.C. qu'il faut reporter la date de l'origine du zodiaque.

Mais le même ouvrage contient aussi une "réfutation du traité d'optique de Newton" et on peut se demander si M. le sous-bibliothécaire de Versailles n'a pas une idée trop élevée de ses propres qualités scientifiques. Le second, *Explication du zodiaque de Denderah*, de L.D. Ferlus, membre de plusieurs sociétés savantes, est plus descriptif. Il se contente de rappeler les thèses de Dupuis et de Visconti. A la 14^{ème} page d'un ouvrage qui en comporte 16, l'auteur se permet une pique contre les Grecs :

Les Grecs, voulant persuader à la postérité que l'invention du zodiaque leur appartenait, appliquèrent à leurs histoires les figures qu'ils trouvèrent dans les zodiaques égyptiens.

Au cours de l'été 1822, Jean François Champollion (1790-1832) perce enfin le mystère des hiéroglyphes et accessoirement celui du zodiaque de Dendérah. Biot en a vent et le signale dans son avant-propos :

Pendant l'impression de l'ouvrage que je soumetts ici au public, deux savants distingués, M. Champollion jeune et M. Letronne, ont, par des découvertes fort diverses, jeté une lumière toute nouvelle sur l'époque véritable à laquelle ont été faites les sculptures astronomiques de Denderah.

Le temple et le zodiaque circulaire de Dendérah datent de l'époque hellénistique et plus précisément du premier siècle avant notre ère.

Les arguments astronomiques de datation n'ont plus cours et quand, en 1834, Jollois et De Villiers publient à leur tour leur Appendice aux recherches sur les bas-reliefs astronomiques des Égyptiens, c'est pour solder leurs comptes avec Biot et pour revendiquer la primeur de l'idée de projection pour le zodiaque circulaire.

Nous savons aujourd'hui que l'astronomie égyptienne demeura à un stade élémentaire. Ses legs les plus importants à la postérité sont l'année égyptienne : douze mois de trente jours

et cinq jours épagomènes. (elle servit aux astronomes jusqu'à Copernic) et les décans dont les utilisateurs principaux sont les astrologues.

Laissons la conclusion à l'*Histoire générale des sciences* de René Taton :

Les zodiaques qui ornent les plafonds de certains temples d'époque grecque furent considérés par les pre-

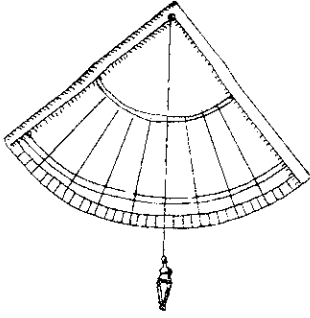
miers égyptologues comme des monuments se rapportant à l'astrologie et à l'astronomie pharaonique. Ils ont donné lieu à une littérature abondante, aujourd'hui inutile puisque l'on a pu prouver que ces documents avaient été fortement influencés par les concepts hellénistiques et qu'ils n'avaient gardé, en fait, de l'ancienne astronomie égyptienne que les figurations des décans.

notes

- 1- Voyage dans la Basse et la Haute Egypte - 1802
- 2- Description de l'Egypte - 1809
- 3- Lettre à Bonard - 21-11-1801
- 4 - Sirius est représenté par une vache dont la tête est surmontée d'une étoile.



Le zodiaque de Denderah



LE PENDULE DE FOUCAULT

Robert Garnier et Georges Paturel,
Observatoire de Lyon

HISTOIRE

Le mouvement diurne, à savoir la rotation d'ensemble de la voûte céleste autour de la Terre en vingt-quatre heures sidérales, constitue probablement par sa répétition l'un des tout premiers faits d'observation intégré à une connaissance qui deviendrait un jour un savoir. En des temps où l'idée d'interpréter un fait d'observation en le reliant à d'autres ne s'était pas encore imposée, il semblait tout à fait naturel d'affirmer que le ciel tournait autour de la Terre, tout simplement parce qu'on le voyait tourner.

Et puis un jour (quand ?), l'homme a voulu comprendre ce qu'il observait. Alors, comme chaque fois que l'homme cherche à comprendre, il en résulte des discussions et de celles-ci naissent les controverses. On vit donc des esprits chagrins s'élever pour dire : "D'accord, les étoiles tournent d'un seul bloc d'Est en Ouest, mais si ces mêmes étoiles étaient fixes et si la Terre, elle, tournait sur elle-même d'Ouest en Est en vingt-quatre heures sidérales, on observerait exactement la même chose". Ce à quoi les "traditionalistes" avaient beau jeu de répondre : "La Terre est fixe, si elle bougeait on le sentirait, ce qui n'est pas le cas". Quoi qu'il en soit, l'idée d'une possible rotation de la Terre était lancée et elle allait provoquer pas mal de remous. Bref, le débat restait ouvert et la question était posée : "Qu'est ce qui tourne : la Terre ou le ciel ?".

Lorsqu'après les vicissitudes que l'on sait le modèle copernicien d'un univers héliocentrique finit par s'imposer, la Terre quittait le centre du monde pour prendre place dans le cortège planétaire et puisque l'observation des surfaces planétaires montrait que ces astres tournaient sur eux-

mêmes, pourquoi la Terre échapperait-elle à la règle générale ? Alors la Terre se mit à tourner sur elle-même. C'était si évident qu'on finit par oublier que cette rotation, pour aussi logique et naturelle qu'elle parût, n'était que le résultat d'une extrapolation et qu'aucune expérience terrestre n'avait jusqu'alors justifié cette nouvelle façon de voir. Ceci nous semble si vrai, qu'à notre connaissance, l'histoire des sciences ne semble pas avoir conservé la mémoire d'expériences qui auraient été imaginées dans le seul but d'établir la rotation de la Terre autour de l'axe de ses pôles, tant la chose paraissait certaine. Il fallut attendre la première décennie du XIX^e siècle pour que le problème posé par la mise en évidence expérimentale du mouvement diurne de la Terre puisse trouver une solution correcte. Tout un chacun connaît Jean Bernard Léon Foucault et son pendule. Mais ce qui est moins connu, c'est l'approche scientifique qui a conduit Foucault à concevoir et à réaliser l'expérience qui porte son nom. Aujourd'hui cette démarche n'apparaît que comme l'aboutissement d'une réflexion approfondie concernant le mouvement relatif résultant des travaux de trois mathématiciens français et, rappelons-le, Foucault n'était pas mathématicien et n'occupait alors aucune position officielle dans le monde scientifique. Il ne deviendra physicien en titre à l'Observatoire de Paris que trois ans plus tard.

L'aventure commença en fait lorsque le mathématicien Gaspard Coriolis (1792-1843) établit un théorème qui depuis porte son nom. Ce théorème fournit entre autres choses le moyen de ramener à des questions de mouvement absolus toutes celles, si importantes, qui concernent les mouve-

ments observés à la surface de la Terre. Ainsi, si la Terre était immobile dans l'espace, les vents iraient directement des points de haute pression vers les points de basse pression en empruntant le trajet le plus court à la surface du globe. La Terre tournant sur elle-même, le théorème de Coriolis nous permet de comprendre que dans l'hémisphère Nord, les vents tournent autour d'une dépression dans le sens contraire de celui des aiguilles d'une montre. Pour s'en convaincre, il suffit de remarquer que le vent du midi précède souvent l'arrivée d'une dépression alors que le vent du Nord suit son passage.

A l'époque même où Coriolis développait son étude du mouvement relatif de rotation, deux physiciens français Louis Poinsot (1777-1859) et Denis Poisson (1781-1841) établissaient les équations complètes du mouvement du pendule simple dans le champ de pesanteur terrestre. Prenant en compte les résultats de leur collègue Coriolis, ils établirent que contrairement à ce qui était admis jusque là le plan des oscillations d'un pendule à la surface terrestre devait tourner si la Terre tournait. Selon eux, la boule du pendule était soumise à tout instant du fait de la rotation de la Terre à une force dirigée perpendiculairement au plan des oscillations. Si donc le fil du pendule n'était soumis à aucune contrainte résultant de sa fixation l'existence de cette force de Coriolis devait entraîner la rotation du plan des oscillations. Alors pourquoi le pendule de Foucault et non pas le pendule de Poinsot ou de Poisson ?

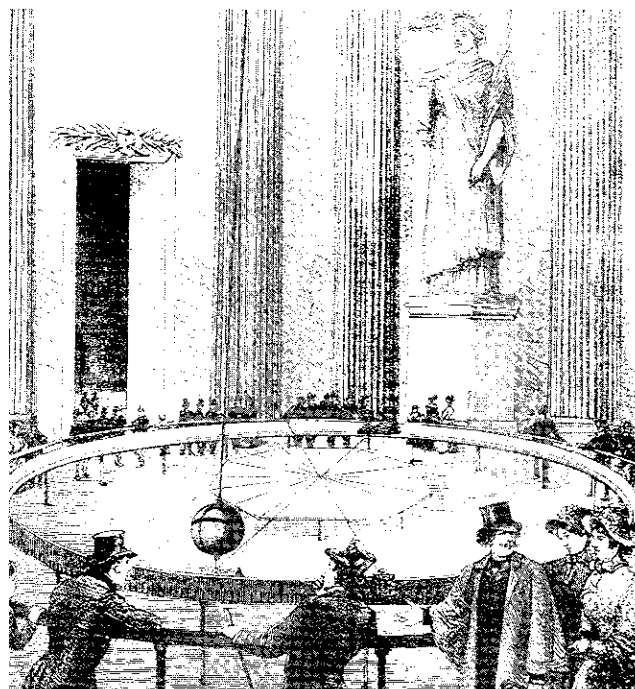
Poinsot et Poisson développèrent leurs calculs et montrèrent que la force de Coriolis qui devait entraîner la rotation du plan des oscillations du pendule était trop peu importante pour qu'on puisse espérer mettre cette rotation en évidence. Il ne semble pas qu'ils aient cherché à réaliser l'expérience.

C'est donc Léon Foucault (1819-1868) qui entreprit concrètement d'observer une éventuelle rotation du plan des oscillations d'un pendule. Tout alla très vite. Le premier pendule qu'il réalisa fin 1850 était de dimensions fort modestes puisqu'il l'installa dans la cave de la maison de sa mère. Bien que les oscillations n'aient pas été entretenues l'expérience était concluante et à Paris le plan des oscillations du pendule tournait bien dans le sens des aiguilles d'une montre ainsi que l'avaient prévu Poinsot et Poisson.

Dès janvier 1851 Foucault installa un pendule dans la salle de la lunette méridienne de l'Observatoire de Paris et convia le monde scientifique de l'époque à constater "de visu" la rotation de la Terre. L'expérience n'apportait peut-être rien de nouveau à la connaissance puisqu'il y avait bien longtemps que le commun des mortels savait que la Terre tournait autour de l'axe des pôles, mais elle ne manquait pas de panache puisqu'elle relevait le défi qui remontait à l'antiquité. Jusque là on savait que la Terre tournait ; grâce à Foucault on la voyait tourner.

L'expérience de Foucault rendit rapidement son nom populaire et en ce même mois de janvier 1851 il installa sous la coupole du Panthéon un fil d'acier long de 67 mètres fixé

à la coupole et terminé à l'autre extrémité par une sphère métallique de 28 kilogrammes (peut-être un boulet de canon). A sa partie inférieure, la boule était terminée par une pointe qui effleurait deux monticules de sable très fin disposés perpendiculairement au plan d'oscillation aux deux positions extrêmes atteintes par le pendule. A mesure que le plan des oscillations tournait, la pointe arasait les deux monticules attestant ainsi de la rotation de la Terre conformément aux résultats contenus dans les équations de Poisson.



L'année suivante, sur une suggestion de Poinsot qui lui demandait de réaliser une expérience encore plus spectaculaire que celle du pendule permettant de mettre en évidence la rotation de la Terre, Foucault allait imaginer le gyroscope dont il ne pouvait certes pas prévoir les applications futures.

Notes de la rédaction :

1 - On peut lire avec profit le très beau livre de Stéphane Deligeorges : "Foucault et ses pendules", dont est extraite l'image ci-dessus (p. 55).

(Ed. Carré, 1995 ; collection "Vues des sciences").

Cet ouvrage montre que Foucault était un expérimentateur génial et un découvreur foisonnant (daguerréotype du Soleil, mesure, avec Fizeau, de la vitesse de la lumière dans l'air et dans l'eau, gyroscope...).

Le 3 février 1851 un certain nombre de personnes reçurent un billet ainsi rédigé : "vous êtes invités à voir tourner la Terre dans la salle méridienne de l'Observatoire de Paris". Stéphane Deligeorges détaille le contexte et les conséquences de la découverte expérimentale la plus célèbre du XIX^e siècle.

2 - Dans son ouvrage déjà cité "Et pourtant elle tourne !", (Seuil), Jacques Gapaillard consacre un chapitre fort intéressant au pendule de Foucault

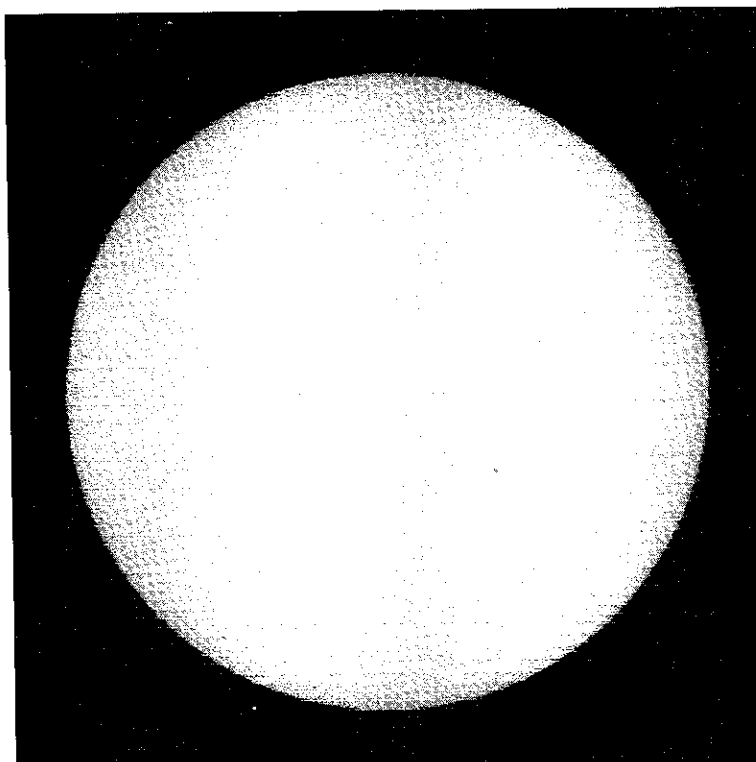
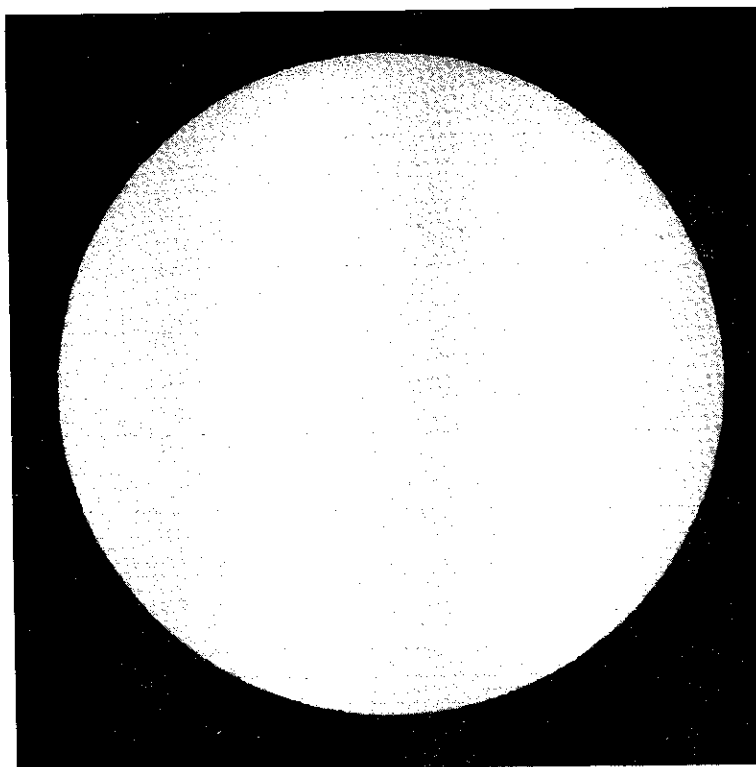
■



Excentricité de l'orbite terrestre

Pierre Causeret

REMUE-MÉNINGES



Le problème

Les deux photos du Soleil de la page de gauche ont été prises avec la même optique, un télescope Maksutov de 1,5 m de focale mais à deux dates différentes : la première en janvier et la deuxième en juillet. On peut vérifier que le diamètre apparent du Soleil est plus grand sur la première photo : janvier est l'époque où la Terre passe au périhélie, au plus près du Soleil alors qu'en juillet elle est à l'aphélie, au plus loin du Soleil.

A partir de ces deux photos, on demande de calculer l'excentricité de l'orbite terrestre.

Solution du Remue-Méninges 93

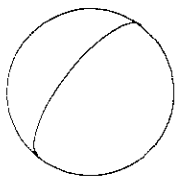
Le croissant de Vénus, de même que le croissant de Lune est limité par une demi ellipse côté terminateur (la limite jour-nuit) et par un demi cercle de l'autre. Le premier problème consiste à faire coïncider le croissant de la photo avec cette forme théorique et ce n'est pas évident. Il est assez difficile de reconnaître un demi cercle dans la partie gauche du croissant. Est-ce un problème de turbulence atmosphérique, de réfraction ou de diffusion sur le film ? Sans doute un peu des trois. On se contentera donc de calculs assez approximatifs.



photo originale



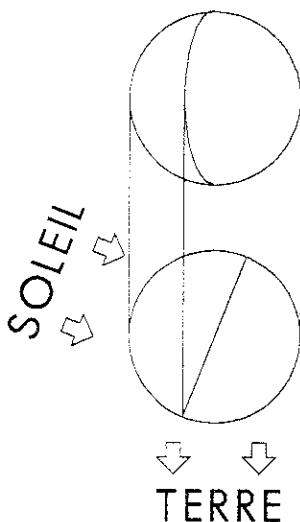
Photo détournée



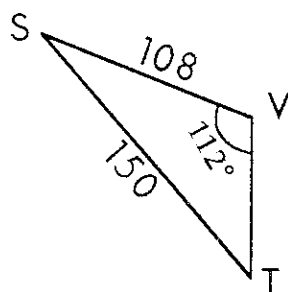
Modèle assez proche

On a représenté en haut Vénus vue depuis la Terre et en dessous Vénus vue depuis le nord du plan de l'écliptique.

Le dessin permet de mesurer l'angle Soleil Vénus Terre appelé angle de phase. On obtient 112° .



On connaît les distances Soleil Vénus et Soleil Terre, données ici en millions de km.



La relation : $150 / \sin 112^\circ = 108 / \sin STV$ permet de trouver 42° pour STV donc 26° pour TSV.

Par rapport à l'axe Soleil Terre, la période de révolution de Vénus est de 584 jours (période synodique).

$584 \times 26360 \approx 42$: la photo a donc été prise environ 42 jours avant la conjonction inférieure du 30 mars, ce qui donne le 16 février.

Le photographe Alain Jaquot avait réalisé en réalité cette photo le 12 février. Une erreur de 4 jours, ce n'est pas si mal.

Discussion sur la précision du résultat.

Pour tracer mon modèle théorique, j'ai supposé que sur la photo, il y avait eu une diffusion importante de lumière, que j'ai un peu exagérée. Le croissant était en réalité légèrement plus gros. L'angle de phase était de 109° .

Lavabos, Coriolis et hémisphère sud (2ème épisode)

A la suite des expériences que j'avais faites sur des bassines percées (voir cahier Clairaut n° 88 hiver 1999-2000), j'ai réussi à envoyer l'une d'elles dans l'hémisphère sud, à l'île de la Réunion (21° de latitude sud) dans la valise d'Alain Jaquot parti photographier le ciel austral. C'est encore près de l'équateur et l'accélération de Coriolis y est plus faible qu'en métropole mais de sens inverse.

Voici les résultats de 6 vidanges de bassine : 4 dans le sens des aiguilles d'une montre contre 2 dans le sens direct. Je vous rappelle qu'avec la même bassine en Bourgogne (remplie d'eau), j'avais obtenu, sur 10 essais, 9 sens de rotation direct et un sans aucun sens visible. La différence semble exister. Faut-il en conclure que l'accélération de Coriolis (qui devrait faire se vider les bassines dans le sens direct dans l'hémisphère nord et dans le sens des aiguilles d'une montre dans l'hémisphère sud) a un effet visible sur ces bassines ? Ce n'est pas impossible mais l'expérience devrait être renouvelée. On peut imaginer que le support de la bassine vrille le fond dans un sens ou dans l'autre et perturbe l'expérience...

A vos saladiers !



Histoire et géographie de l'Univers Atmosphères planétaires

LECTURES POUR LA MARQUISE

Histoire et géographie de l'Univers.

Alain Blanchard
Ed. Belin, CNRS 2000, 144 p., 144F.

La question cosmologique a toujours passionné l'être humain mais ce n'est qu'au début du XX^e siècle qu'elle est entrée dans le domaine scientifique.

Le but de l'ouvrage est de présenter les arguments et les faits qui ont conduit progressivement au modèle dit du big bang, qui paraît en accord avec la physique actuelle.

L'auteur, Alain Blanchard, est astrophysicien et directeur du programme national de Cosmologie. Il nous expose les problèmes liés à l'Univers en présentant l'aspect historique, les interrogations, les controverses, les progrès récents.

C'est une histoire passionnante écrite dans un style clair et précis.

La mise en page, comme celle des ouvrages de cette collection, met en valeur texte et illustrations et contribue au plaisir de la lecture.

L'auteur a choisi de structurer son travail en huit chapitres pour traiter les différents problèmes de la cosmologie moderne.

1 - L'Univers proche.

Alain Blanchard relate ici la découverte de l'Univers extragalactique au début du XX^e siècle, les modèles cosmologiques relativistes, les observations de Hubble et la mise en évidence de l'expansion de l'Univers. Il explicite les difficultés de la détermination, essentielle, des distances extragalactiques (problèmes de calibrages, indicateurs primaires, secondaires, tertiaires). Il explique pourquoi la controverse sur la valeur de la constante de Hubble n'est pas encore résolue bien que le Hubble Spatial Telescope ait permis de mesurer des céphéides jusqu'à une distance d'une vingtaine de mégaparsecs. C'est avec beaucoup de clarté qu'il expose la géométrie de l'Univers et le lien entre sa densité et son évolution.

2 - La composition chimique de l'Univers.

On apprend comment la nucléosynthèse permet d'expliquer l'abondance des éléments légers (hélium, deutérium, hélium 3 et lithium 7). Le produit de la nucléosynthèse dépend du rapport η du nombre de baryons sur le nombre de photons, de la durée de vie des neutrons et du nombre d'espèces de neutrinos : d'où la naissance d'une nouvelle discipline, "l'astroparticule", domaine d'interaction entre physique des particules et astrophysique. Si l'auteur s'attarde sur les difficultés des mesures des abondances actuelles (à relier aux abondances primordiales), il conclut que les recherches d'aujourd'hui essaient de cerner la valeur de η et ne remettent pas en cause la théorie de la nucléosynthèse primordiale, élément fondateur du modèle dit du big bang.

3 - Le fond cosmologique : le fossile de l'Univers.

L'auteur tente de nous faire comprendre pourquoi la très importante découverte du rayonnement cosmologique du fond du ciel se fit de façon accidentelle (Penzias et Wilson, 1963) ; cette découverte ne put être faite dans les années cinquante, malgré les travaux de Gamov sur la nucléosynthèse, malgré ceux de ses étudiants pour estimer la température actuelle de l'Univers et malgré la technologie qui aurait permis de détecter ce rayonnement.

Il explique ensuite comment la détection d'un rayonnement de corps noir joua un rôle important dans l'émergence de la cosmologie physique et fit augmenter le nombre de travaux en cosmologie.

Les mesures de Penzias et Wilson étant à une longueur d'onde unique, il fallut mesurer ce rayonnement à de nombreuses autres, ce qui fut achevé dans les années 1990 avec l'instrument FIRAS du satellite COBE.

4 - L'Univers extragalactique.

L'auteur nous parle de la classification de Hubble, des progrès dans la détection

des galaxies lointaines donc à leur stade le plus jeune.

Une revue des connaissances et des progrès espérés est faite à propos des amas de galaxies, des quasars, des lentilles et des arcs gravitationnels.

5 - Les enjeux actuels de la cosmologie.

On voit ici la complexité des problèmes posés par la matière noire : courbes de rotation des galaxies spirales, amas de galaxies, nature de la matière noire, baryonique ou non.

6 - La distribution de la matière dans l'Univers.

L'auteur explique comment on mesure la distribution des galaxies, qui, si elle semble homogène à grande échelle, a tendance à l'amasement à petite échelle. Le scénario de l'instabilité gravitationnelle, esquissé par Lemaître, suppose que la gravité est le mécanisme principal d'évolution des structures mais il faut expliquer les fluctuations primordiales.

La détection récente des fluctuations du fond cosmologique, grâce au Differential Microwave Radiometer du satellite COBE, est une découverte majeure pour les scénarios de formations de structures.

7 - L'Univers primordial : la marche vers l'inconnu.

La physique qui règne avant le premier milliardième de seconde nous reste inconnue et on ne connaît pas l'origine de l'asymétrie entre matière et antimatière.

8 - Perspectives et moyens de la recherche en cosmologie.

L'auteur nous parle ici des projets d'instruments au sol et hors atmosphère, de la modélisation et de la communication.

"La recherche fondamentale oblige le chercheur à une constante innovation, à une innovation "extrême", le forçant à s'écarter toujours le plus possible des sentiers battus ; une démarche qui enrichit la société dans son ensemble."

Alain Blanchard nous permet de mieux comprendre ce sujet difficile et

passionnant qu'est la cosmologie. Il ne se contente pas de présenter le modèle du Big Bang mais nous aide à comprendre les arguments et les faits observationnels qui ont conduit à ce modèle tout en évoquant les nombreux problèmes non encore résolus.

Il s'agit d'un de ces livres précieux dont la lecture nous demande un effort mais qui nous rend plus intelligents.

Martine Bobin

Atmosphères planétaires. Origine et évolution.

Thérèse Encrenaz

Ed. Belin, CNRS 2000, 152 p, 144 F.

Spécialiste de l'étude des atmosphères planétaires, Thérèse Encrenaz, qui dirige le Département de recherche spatiale de l'Observatoire de Paris-Meudon, était déjà l'auteur de plusieurs ouvrages de vulgarisation : Système solaire (Flammarion, 1994) ; Planètes géantes (Belin, 1996)...

Il est bien agréable de pouvoir consulter sur le thème des atmosphères planétaires une mise au point récente, d'autant que les éditions Belin n'ont pas lésiné sur l'iconographie (pas de double page sans croquis, tableaux ou photos, ces dernières, magnifiques, pour la plupart issues de la NASA).

Les **processus** physicochimiques sont étudiés dans le chapitre 2, "Qu'est-ce qu'une atmosphère ?" : (hydrostatique, thermique, effet de serre, circulation, structure, chimie, magnétisme). et les **méthodes** d'étude (imagerie, spectroscopie, et in situ) puis la **formation** des atmosphères (planétogénèse, abondances cosmiques, évolution des atmosphères) font l'objet des chapitres 3 et 4.

A l'image de la diversité du Système solaire qui nous est révélée depuis une trentaine d'années, les chapitres suivants nous font découvrir que les principes généraux précédents ont des concrétisations d'une extrême variabilité.

Le chapitre 5 décrit et compare la situation pour les planètes telluriques. Sur Mercure : atmosphère extrêmement ténue et transitoire. Sur Vénus, en

revanche : pression 100 bars, température en surface environ 730° K, 96 % de CO₂, nuages et pluies d'acide sulfurique. Comme spécificité de la Terre citons les océans, l'abondance de O₂ (et O₃). Atmosphère ténue (6 mb) et tempêtes de poussières pour Mars.

L'historique de l'atmosphère terrestre fait l'objet du chapitre 6, avec les interrogations sur les effets anthropiques, le réchauffement.

Les planètes géantes (chapitre 7) amènent à étudier des problèmes spécifiques (chimiques, magnétosphériques) et les conséquences astrophysiques des rapports isotopiques sont analysées.

Les atmosphères des petits corps (Io, Titan, Triton, Pluton, Charon, comètes, ceinture de Kuiper) sont décrites dans la chapitre 8.

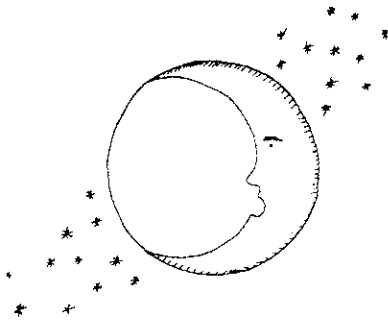
Le chapitre 9 évoque les planètes extrasolaires et l'exobiologie. L'ouvrage conclut sur la place de l'homme dans l'Univers.

Quelques coquilles dans cette édition seront sans doute corrigées ultérieurement : exposant dans Titius - Bode (p. 55) ; génitif Ursae Majoris (p. 139) ; pour Io (p.151) volcanisme (théorie) au lieu de volcanisme (phénomène). Les équations demeurent discrètes comme le veut ce genre littéraire mais de manière plus significative un lecteur non physicien peut penser qu'un glossaire redéfinissant in fine des termes tels que troposphère, stratosphère, mésosphère, thermosphère, gradient adiabatique (p. 20) ou encore précisant la nuance entre diffusion turbulente et convection (p. 19) serait plus utile qu'une table des 123 illustrations des 9 chapitres.

Il n'en demeure pas moins que cet ouvrage est d'un accès facile, quarante titres pour approfondissement sont proposés en bibliographie.

Sans dogmatisme, évoquant les nombreuses interrogations posées aux chercheurs pour ces prochaines années ce livre est, alors que les ouvrages récents sur le climat terrestre foisonnent, bien venu d'ouvrir, si l'on peut dire, de nombreuses fenêtres sur les atmosphères non terrestres.

Michel Bobin



Une année inhabituelle pour la fête de Pâques

Lucienne Gouguenheim

LES POTINS DE LA VOIE LACTÉE

La détermination de la date de Pâques dépend à la fois de la position du Soleil dans le ciel, qui gouverne le retour des saisons, et de la lunaison, ce qui en fait une fête mobile. Catholiques et protestants utilisent le calendrier grégorien, les orthodoxes utilisent le calendrier julien. Il s'ensuit deux fêtes de Pâques généralement différentes.

La date du printemps

Le printemps débute quand le Soleil passe dans la direction du point gamma. Il faut en moyenne au Soleil 365,24220 jours pour revenir dans cette même direction : l'année tropique, que le calendrier se propose de reproduire dure donc 365,24220 jours, ce qui est un peu inférieur à 365 jours un quart.

Le printemps commence donc toujours à la même date du calendrier si la durée de l'année dans ce calendrier est bien égale à 365,24220 jours. Si ce n'est pas le cas, la date officielle du printemps, considérée comme toujours la même (le 21 mars), se décale petit à petit par rapport à celle du printemps vrai. Ou si l'on préfère, le printemps vrai se produit à une date de plus en plus décalée dans le calendrier.

Cette situation est illustrée par le calendrier julien dont la structure a été décidée en - 44 par Jules César, sur les conseils de l'astronome Sosigène ; il a une durée moyenne de 365,25 jours qui est assurée par la succession de trois années de 365 jours et d'une année de 366 jours, selon une règle simple, l'année dont le millésime est un multiple de 4 possède un jour de plus et on la dit bissextile.

La très petite différence ($365,25 - 364,24220 = 0,0078$ jours chaque année) atteint un jour tous les 128 ans ; et comme l'année julienne est un peu trop longue, le retour annoncé selon elle de l'équinoxe apparaît de plus en plus tard, avec un décalage d'un jour tous les 128 ans. Ou bien, dit autrement, le printemps vrai arrive un jour plus tôt dans le calendrier julien tous les 128 ans.

La date de la fête de Pâques

Le problème est apparu historiquement à partir de la fête de Pâques. Cette fête chrétienne est liée aussi à une fête juive, qui est datée dans le calendrier hébreu, qui est un calendrier luni-solaire : dans ce calendrier, les mois reproduisent le cycle des phases de la Lune, donc avec une durée moyenne de 29,5 jours (plus précisément 29,530588) et les années le cycle des saisons ; le calendrier est assez complexe et ce bon ajustement ne se fait qu'en moyenne sur une durée assez longue de 19 ans. Ce qui nous intéresse ici, c'est la définition de la Pâque juive qui se produit le jour de la Pleine-Lune du premier mois de l'année qui est le mois de Nisan. La Pâque

juive a lieu dans la nuit du 14 au 15 Nisan. Le mois de Nisan débute à la première Nouvelle-Lune de printemps.

Nous allons voir que la permanence de sa situation par rapport au printemps est maintenue. Au 14 Nisan, à la Pleine-Lune, les Hébreux immolaient l'agneau pascal (en référence au passage de l'ange de la mort, exterminateur des premiers nés, qui épargna les maisons des Hébreux marqués par le sang de l'agneau) ; mais la fête de la Pâque est aussi liée à celle dite des "Azymes", une fête agricole, d'origine cananéenne adoptée par les Hébreux après leur installation dans la Terre promise. Le 16 Nisan, on offrait à Dieu les prémices de la moisson des orges. Et 50 jours plus tard, pour la Pentecôte, on offrait deux pains de froment nouveau, pour remercier Dieu de la moisson finie. Il était donc nécessaire que le mois de Nisan coïncidât avec l'époque où les orges précoces étaient bonnes à couper. Dans les temps anciens où aucune prévision n'était possible, le calendrier était corrigé empiriquement : si, par le dérangement du calendrier, l'orge semblait ne pas devoir être en épis le 16 Nisan, le Grand-Prêtre ajoutait un mois à l'année en cours, en redoublant Adar par un mois nouveau appelé Véadar (le second Adar) et la Pâque se trouvait retardée de 30 jours.

Les chrétiens célèbrent la passion et la résurrection du Christ qui ont eu lieu au moment de la Pâque juive. Ils choisissent donc la date de Pâques en fonction d'un calendrier israélite qui n'est plus le leur et qu'il faut donc traduire dans le calendrier julien : d'où cette décision du concile de Nicée, en 325 qui fixe ainsi la date de Pâques : *le dimanche qui suit le 14^e jour de la Lune (c'est-à-dire la Pleine-Lune) de printemps* ; dans le calendrier julien en 325, l'équinoxe de Printemps a eu lieu le 21 mars. Il est nécessaire de préciser "en 325", puisque l'année julienne glisse par rapport aux saisons.

D'où la règle pour définir la date de Pâques : on attend le 21 mars, puis la Pleine-Lune qui suit, puis le dimanche qui suit. En 325 tous étaient d'accord pour accepter cette règle. Ils fêtèrent donc tous Pâques le même jour.

La fluctuation de la date de Pâques

Remarquons que cette règle conduit à une date de Pâques fluctuante entre le 23 mars et le 25 avril, parce que les phases de la Lune ne se produisent pas à des dates fixes du calendrier julien. Donc, le plus tôt que Pâques puisse se produire, c'est quand la Pleine-Lune a lieu un 22 mars (premier jour possible après le 21 mars) et que ce 22 mars est un samedi : le lendemain est un dimanche qui satisfait bien à la règle. Au contraire, si le 21 mars est une Pleine-Lune, la suivante, celle qui sera la première après le 21, a lieu 29,5 jours plus tard, soit le 19 avril et si ce jour est un lundi, il faut encore attendre 6 jours pour tomber sur un dimanche qui aura lieu le $19 + 6 = 25$ avril.

Donc la date de Pâques fluctue d'une année sur l'autre, entre le 23 mars et le 25 avril mais toujours dans cette même période liée au printemps "vrai".

Le décalage systématique de la date de Pâques dans le calendrier julien

Cependant, comme la durée de l'année julienne n'est pas bonne, cette fluctuation se fait dans un intervalle qui se décale d'un jour tous les 128 ans. Des mesures ont donc été prises en 1582 par le pape Grégoire XIII pour mettre bon ordre à cette situation.

Entre 1582 et 325, il s'était écoulé 1257 ans, soit en gros 10 fois 128 ans. Il y a donc un décalage de 10 jours entre la date du calendrier qui porte le nom du 21 mars et celle du printemps vrai (constaté "climatiquement" ou "astronomiquement") qui a eu lieu 10 jours plus tôt, le 11 mars.

Sur décision de Grégoire XIII, le calendrier a été modifié pour mieux reproduire l'année des saisons. C'est l'année grégorienne, celle que nous utilisons aujourd'hui.

La réforme grégorienne

Rappelons comment les choses se sont passées.

D'une part, la règle qui fixe la durée des années a été modifiée : puisque l'année est trop longue d'un jour tous les 128 ans, il faut retirer un jour tous les 128 ans et l'on a adopté une règle pratique arrivant à une solution très voisine ; elle consiste à supprimer 3 jours tous les 400 ans, soit un jour tous les 133 ans : les années de fin de siècle comme 1700 ou 1800 ou 1900 ne sont pas bissextiles, par contre, 1600 et 2000 restent bissextiles (la règle étant que le millésime, 1600 ou 2000 est divisible par 400).

Pour rester en conformité avec les décisions du concile de Nicée qui situait l'équinoxe de printemps le 21 mars, il a été décidé de sauter 10 jours dans le calendrier en octobre 1582, tout en conservant la succession des jours de la semaine : le lendemain du jeudi 4 octobre 1582 a été le vendredi 15 octobre. Cela, à Rome, là où le pape avait pouvoir de décision. Les Etats catholiques, comme la France, ont fait de même très vite ; les Etats protestants ont mis plus de temps ; par exemple, l'Angleterre n'a adopté le calendrier grégorien qu'en 1752 : elle a donc eu à retirer un jour de plus (celui de l'année 1700 qui avait un jour de plus dans le calendrier julien).

Les fêtes religieuses dans le calendrier orthodoxe

Venons-en aux Églises orthodoxes orientales, qui n'ont pas voulu se rallier à une décision de la papauté. Elles utilisent toujours le calendrier julien. Cela se voit à l'occasion de deux types de fêtes religieuses chrétiennes : les fêtes fixes comme celle de Noël et les fêtes dites mobiles comme celle de Pâques.

Actuellement, le décalage entre le calendrier julien et le calendrier grégorien est de 13 jours : les 10 jours "rattrapés" en 1582 et le désaccord sur la durée des années 1700, 1800 et 1900 qui ont un jour de moins dans le calendrier grégorien.

Donc le Noël orthodoxe, qui se produit comme pour nous

le 25 décembre, mais dans le calendrier julien, se produit 13 jours après le nôtre, soit le 7 janvier de notre calendrier.

En ce qui concerne Pâques, nous avons vu que sa date fluctue entre le 23 mars et le 25 avril, ces dates étant celles de chacun des calendriers.

Le 23 mars du calendrier julien correspond à 13 jours plus tard du nôtre, soit le 5 avril et le 25 avril du calendrier julien correspond au 8 mai de notre calendrier.

Quand peut-il y avoir coïncidence entre les deux dates de Pâques ?

En résumé : la fête de Pâques du calendrier grégorien, d'une part, et celle du calendrier julien des orthodoxes d'autre part, ne peuvent avoir lieu qu'à l'intérieur des fourchettes qui vont respectivement, exprimées dans notre calendrier, du 23 mars au 25 avril et du 5 avril au 8 mai.

Pour qu'il y puisse y avoir coïncidence entre les deux dates de Pâques, il est nécessaire (mais non suffisant) que cette date commune se situe dans la partie commune aux deux fourchettes, soit entre le 5 et le 25 avril.

C'était le cas cette année 2001, où la date de Pâques était le 15 avril.

Calcul de la date de Pâques 2001

Pour la fête "grégorienne", on cherche dans le calendrier la première Pleine-Lune après le 21 mars : c'est celle du 8 avril, qui est un dimanche : le dimanche suivant, le 15 avril est donc le jour de Pâques.

Pour la fête orthodoxe, on doit chercher la Pleine-Lune qui suit le 3 avril (13 jours après le 21 mars) : on retombe sur la Pleine-Lune du 8 avril : la date de Pâques est la même.

Fréquence de cette coïncidence

On peut voir dans les deux tableaux donnant la date julienne de la fête de Pâques du calendrier julien et la date grégorienne de la fête de Pâques du calendrier grégorien, que cette situation se reproduira en 2004, 2007, 2011, 2012, 2014, 2017, puis 2025. Ces dates diffèrent en effet entre elles de 13 jours.

Coïncidence avec la Pâque juive

Il peut aussi y avoir coïncidence avec la Pâque juive, si le 14 Nisan tombe le "bon jour", mais il faut entrer dans la complexité du calendrier israélite. Cette situation est possible, parce que le mois de Nisan est lié au printemps, mais elle arrive beaucoup plus rarement, en particulier parce que le jour de la semaine n'est pas nécessairement un dimanche. C'était le cas cette année.

Date julienne de la fête de Pâques dans le calendrier julien.

Les dates en caractères gras correspondent au mois de mars ; les autres, au mois d'avril.

année	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1900	9	1	14	6	28	17	2	22	13	29
1910	18	10	25	14	6	22	10	2	22	7
1920	29	18	3	26	14	6	19	11	2	22
1930	7	30	18	3	26	15	30	19	11	27
1940	15	7	23	12	3	23	8	31	19	11
1950	27	16	7	23	12	4	23	8	31	20
1960	4	27	16	1	20	12	28	17	8	31
1970	13	5	27	16	1	21	12	28	17	9
1980	24	13	5	25	9	1	21	6	28	17
1990	2	25	13	5	18	10	1	14	6	29
2000	17	2	22	14	29	18	10	26	14	6
2010	22	11	2	22	7	30	18	3	26	15
2020	6	19	11	3	22	7	30	19	3	26
2030	15	31	19	11	27	16	7	23	12	4
2040	23	8	31	20	11	27	16	8	23	12
2050	4	24	8	31	20	5	27	16	1	21
2060	12	28	17	9	31	13	5	28	16	1
2070	21	6	28	17	9	25	13	5	25	10
2080	1	21	6	29	17	2	25	14	5	18
2090	10	26	14	6	29	11	2	22	14	30

Date grégorienne de la fête de Pâques dans le calendrier grégorien.

Les dates en caractères gras correspondent au mois de mars ; les autres, au mois d'avril.

année	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1900	15	7	30	12	3	23	15	31	19	11
1910	27	16	7	23	12	4	23	8	31	20
1920	4	27	16	1	20	12	4	17	8	31
1930	20	5	27	16	1	21	12	28	17	9
1940	24	13	5	25	9	1	21	6	28	17
1950	9	25	13	5	18	10	1	21	6	29
1960	17	2	22	14	29	18	10	26	14	6
1970	29	11	2	22	14	30	18	10	26	15
1980	6	19	11	3	22	7	30	19	3	26
1990	15	31	19	11	3	16	7	30	12	4
2000	23	15	31	20	11	27	16	8	23	12
2010	4	24	8	31	20	5	27	16	1	21
2020	12	4	17	9	31	20	5	28	16	1
2030	21	13	28	17	9	25	13	5	25	10
2040	1	21	6	29	17	9	25	14	5	18
2050	10	2	21	6	29	18	2	22	14	30
2060	18	10	26	15	6	29	11	3	22	14
2070	30	19	10	26	15	7	19	11	3	23
2080	7	30	19	4	26	15	31	20	11	3
2090	16	8	30	12	4	24	15	31	20	12

Documents pour les fiches CLEA BELIN

DCB : 20 exemplaires (70 F- 65 F)

Transparents animés pour rétroprojecteurs

(55F-50F)

T1 Le TransSoluTe
(phases de la Lune et éclipses)

T2 Les fuseaux horaires

Filtres colorés

Six feuilles de filtres colorés et
une feuille de réseaux (75 F- 65F)

CD Rom CLEA 2000

Sciences physiques en seconde
Programme 2000 (50 F)

DIAPPOSITIVES

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

- D1** Phénomènes lumineux
- D2** Les phases de la Lune
- D3** Les astres se lèvent aussi
- D4** Initiation aux constellations
- D5** Rétrogradation de Mars
- D6** Une expérience pour illustrer les saisons
(série de 8 vues 35F-30F)
- D7** Taches solaires et rotation du Soleil
- D8** Comètes

Publications du **CLEA**

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



Chèques à l'ordre du CLEA

Les fiches d'activités pédagogiques du CLEA

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

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

Cours photocopiés d'astrophysique

Maîtrise de l'université
Paris XI Orsay

P1

Astrophysique générale (63F)

P2

Processus de rayonnement (30F)

P3

Structure interne
et évolution des étoiles (35F)

P4

Astrophysique solaire (35 F)

CONDITIONS D'ADHESION ET D'ABONNEMENT POUR 2001

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

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

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

90F par an jusqu'en 1997

110F par an à partir de 1998

Adresser adhésions,
abonnements ou commandes à

Chèque à l'ordre du CLEA

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

Publications

FASCICULES POUR LA FORMATION DES MAITRES EN ASTRONOMIE

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

Publication du planétarium de Strasbourg
 LSO. Catalogue des étoiles les plus brillantes :
 toutes les données disponibles du Centre des Données Stellaires de l'Observatoire
 de Strasbourg concernant 2 000 étoiles visibles à l'oeil nu (75 F)
 Commande à adresser au service librairie du Planétarium de Strasbourg