

bulletin du comité de liaison enseignants et astronomes

Les Cahiers Clairaut

Lectures
pour la marquise

et ses

Hist

Ré

d'o

Art

for

Réfle

déb

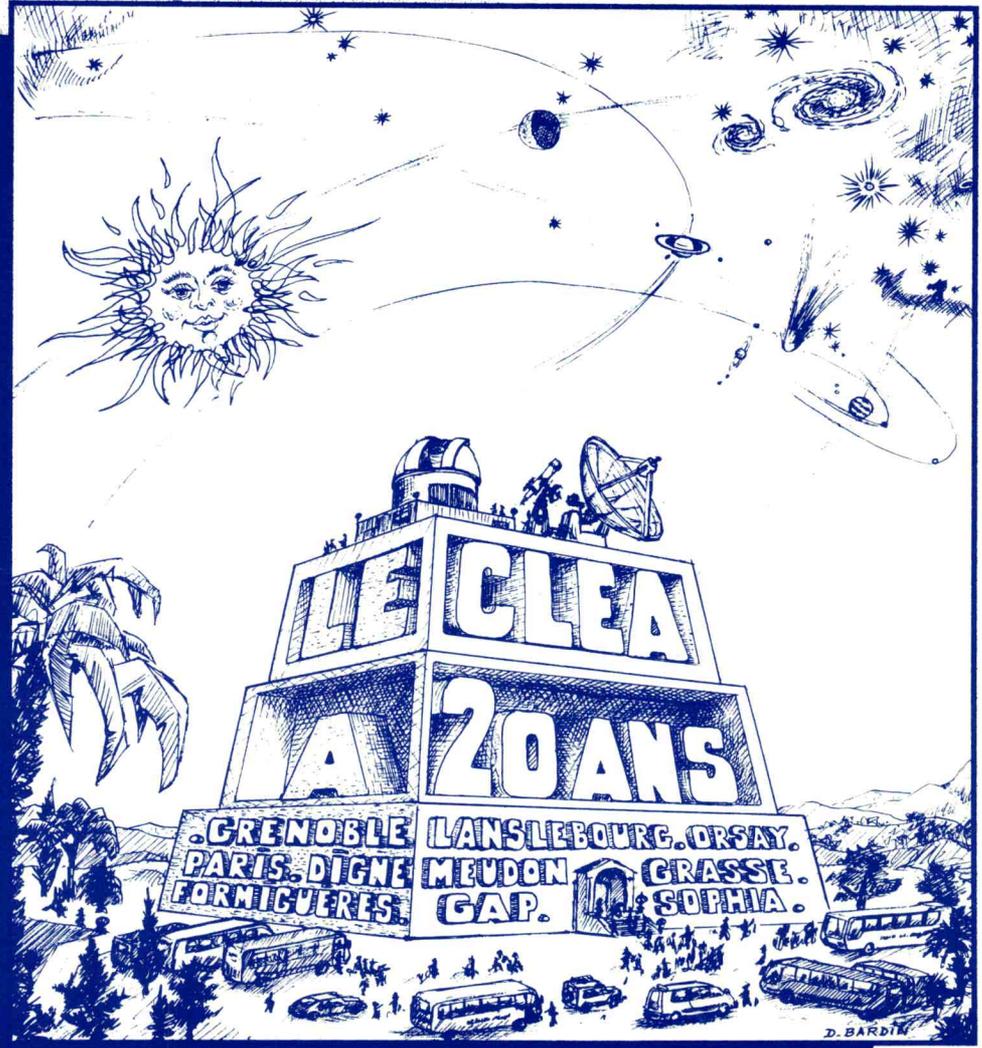
Info

élèves

Vie

Tex

exerc



Articles de fond

Les potins de la Voie lactée

numéro 83 - AUTOMNE 1998

Comité de liaison enseignants et 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 MAFPEN. 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 (observations,

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.



PUBLICATIONS DU CLEA p.C et p.D

Bureau du CLEA pour 1998

Présidents d'honneur

Jean-Claude PECKER
Evry SCHATZMAN

Présidente

Lucienne GOUGUENHEIM

Vice-Présidents

Agnès ACKER
Marie-France DUVAL
Jean RIPERT
Josée SERT
Gilbert WALUSINSKI

Secrétaire

Martine BOBIN

Trésorière-Secrétaire

Catherine VIGNON

Daniel Bardin
Francis Berthomieu
Martine Bobin
Michel Bobin
Lucette Bottinelli
Pierre Causeret
Jacky Dupré
Michèle Gerbaldi
Lucienne Gouguenheim
Christian Larcher
Georges Paturel
Jean Ripert
Jean-Paul Rosenstiehl
Daniel Toussaint
Michel Toulmonde
Gilbert Walusinski

Comité de rédaction des Cahiers Clairaut

Conception et réalisation de la mise en page : Sophie Durand

ÉDITORIAL

Nous remercions tous les auteurs : leurs contributions variées nourrissent encore une fois notre revue. Nous espérons que les niveaux différents des articles répondent aux souhaits de chacun.

Ainsi, la rubrique "Avec nos élèves" fournit aussi bien la description d'un travail pour les classes prépas que plusieurs idées pour les professeurs de collège.

Nous comptons sur vous pour faire vivre la rubrique "Réflexions et débats". Gilbert propose ici de se pencher sur la formation des enseignants : vaste projet qui nous concerne tous... Nous souhaitons que l'article de Claudette Balpe suscite réactions et remarques.

N'hésitez pas à donner votre avis en précisant les articles qui vous intéressent et les sujets que vous aimeriez voir traités. Chaque lecteur est un auteur potentiel.

La prochaine année scolaire va être consacrée plus particulièrement à la préparation de l'éclipse totale de Soleil du 11 août 1999 : Que souhaitez-vous trouver dans les Cahiers Clairaut pour vous y aider ?

L'université d'été qui s'est déroulée à Gap du 20 au 26 août a donné aux quelques 50 stagiaires des pistes de travail pour leurs élèves.

Vous pourrez en consulter le compte-rendu sur le site Web du CLEA (cf encadré p.19).

Enfin n'oubliez surtout pas notre rendez-vous annuel:

**La prochaine
Assemblée Générale
du CLEA
aura lieu**

**le dimanche
22 novembre 1998
au lycée d'Orsay.**

les Cahiers Clairaut

Automne 1998 n°83



Article de fond

Le temps
au XX^e siècle

p. 2

Mars. Approche biogéologique de la planète rouge

p. 7



Réalisation d'objets

La pêche à la Lune ou comment "pêcher" les croissants de Lune

p. 12



Avec nos élèves

Initiation aux instruments d'Astronomie (club)

p. 17

Comment déterminer la longitude de la Guadeloupe ? (collège)

p. 20

Stabilité et mécanique céleste (classe prépa)

p. 22

Histoire

L'histoire de la vitesse de la lumière

p. 28



Réflexions et débats

A propos de la formation des enseignants

p. 34



Lectures pour la Marquise

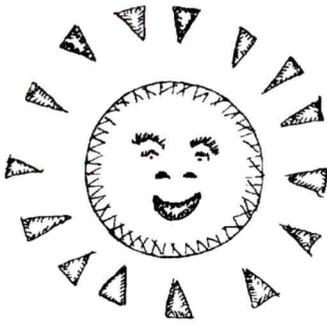
p. 37



Les potins de la Voie lactée

p. 39





Le temps au XX^e siècle

Françoise Suagher

Après nous avoir explicité les irrégularités du Temps universel (CC n°82), Françoise nous aide à comprendre pourquoi le Comité International des Poids et Mesures a adopté puis abandonné le Temps des éphémérides et fini par choisir le Temps atomique international.

IV - Le Temps des éphémérides, TE.

1 - Une nouvelle échelle de temps basée sur le mouvement orbital de la Terre.

Afin de pallier les défauts d'uniformité de UT, on décide de définir une nouvelle échelle de temps à partir du mouvement orbital de la Terre selon Newcomb, et de déterminer le temps d'après le mouvement en longitude du Soleil. Le TE est ainsi affranchi des irrégularités de la rotation de la Terre. La longitude moyenne du Soleil s'exprime sous la forme d'un polynôme du second degré de la variable t auquel il a été nécessaire de rajouter un terme correctif. En utilisant les observations du Soleil de 1680 à 1895, Newcomb a déterminé les valeurs des coefficients du polynôme.

On a : $L = 279^{\circ} 41' 27,54'' + 129\,602\,768,13'' T + 1,089'' T^2 + \Delta L$.
On mesure L et on résout l'équation du second degré pour trouver T . (Si vous ne saviez pas à quoi servait $b^2 - 4ac$, en voici une belle application...)

La mesure pratique de L est donnée par le mouvement en longitude de la Lune. En fait, on effectue une photographie simultanée de la Lune

et des étoiles environnantes, et pour supprimer le mouvement de la Lune pendant la pose, on le compense par la rotation d'une lame à faces parallèles. On en déduit les coordonnées de la Lune, puis on calcule la longitude du Soleil.

2 - Une nouvelle unité de temps : la seconde des éphémérides.

La seconde des éphémérides va remplacer la seconde UT. Le processus d'adoption de la nouvelle seconde est très complexe. Il montre qu'il n'est pas facile de changer la définition d'un étalon. Rappelons les différentes étapes.

En 1950, la Conférence Internationale des Constantes Fondamentales de l'Astronomie fait des propositions qui sont soumises en 1954 à la X^e conférence des Poids et Mesures. Cette conférence charge le Comité International des Poids et Mesures de décider. Ce comité prend, en 1956, la décision d'adopter comme unité de temps la seconde des éphémérides qui est la fraction $1 / 31\,556\,925,974\,74$ de l'année tropique qui a commencé le 0 janvier 1900 à 12h TE (ou le 31 décembre 1899 à 12h TE) et qui a duré 365,242 198 8 jours solaires moyens. La seconde de Temps Universel était la fraction $1 / 86\,400$ du jour solaire moyen).

Ces deux secondes ont la même durée (c'est voulu) mais deux années différentes n'en comportent pas le même nombre car elles n'ont pas la même durée.

Cette définition a été entérinée par la XI^e Conférence des poids et mesures en 1960 ; puis rendue légale en France par le décret du 3 mai 1961 sur les unités légales de mesure. Que de réunions, que de discussions : 11 ans pour officialiser la nouvelle définition !

L'emploi de la seconde de TE n'était qu'une étape provisoire, car la détermination exacte de cette unité (malgré les 14 chiffres significatifs de la définition) comportait beaucoup d'erreurs, dues en particulier à la difficulté des observations et à l'insuffisance de la "Théorie du mouvement de la Lune" qui servait aux observations réelles. Le défaut d'uniformité du TE est de l'ordre de 10^{-9} . Il ne faut donc pas s'étonner que les physiciens recherchent un nouvel étalon de temps.

3 - L'écart ΔT entre TE et UT

La connaissance de l'écart entre TE et UT est le souci majeur de l'astrométrie. On le détermine à partir d'événements non liés à la rotation de la Terre comme par exemple l'occultation des étoiles par la Lune ou par des phénomènes planétaires dans lesquels la position de l'observateur n'intervient pas.

On pourrait aussi utiliser le Soleil, mais sa grande luminosité, sa structure gazeuse, sont des contre-indications. Les valeurs obtenues avec la Lune sont plus précises du fait que le mouvement de la Lune est treize fois plus rapide que celui du Soleil. De plus, comme c'est l'astre le plus rapproché de la Terre, les astronomes sont en mesure d'observer de très nombreuses inégalités de son mouvement qui passeraient inaperçues pour des

astres plus lointains. Les observations de la Lune sont pratiquement l'unique moyen de déterminer l'écart $\Delta T = TE - UT$. Une telle détermination nécessite une théorie de la Lune la plus précise possible, ce qui justifie les efforts faits en vue de l'amélioration des théories existantes.

La valeur exacte de ΔT n'est connue qu'a posteriori, par comparaison entre les coordonnées observées de la Lune et les coordonnées calculées. L'écart entre TE et UT est bien connu de 1850 à nos jours. Pour le connaître sur des périodes plus longues, on a utilisé d'autres méthodes. Depuis 1620, on utilise des occultations d'étoiles qui ont l'avantage d'être des phénomènes quasi instantanés ou des observations comme les passages de Mercure ou Vénus devant le disque solaire.

évalue que l'accroissement du TU pour un jour est en moyenne de 0,001 64 seconde par siècle, et que le cumul depuis l'ère chrétienne atteint 3 heures.

Pour des époques antérieures à 1710, une valeur de ΔT en minutes peut être calculée de manière approchée par la relation : $\Delta T = 0,41 + 1,205 3 T + 0,499 2 T^2$ où T est le temps en siècle à partir de 1900.

Avec une éclipse observée en 135 avant notre ère, on trouve ΔT compris entre 3,13 et 3,38 heures et la formule ci-dessus donne 3,04 heures.

Exemple 1 : position de Mercure le 6 février à 6 h UT de l'an - 555.

On a $T = - 24,55$; $\Delta T = 272$ min.
 $TE = 6h + 272$ min = 10 h 32,

Tableau donnant les valeurs de ΔT en minutes depuis 1710

1710	- 0,2	1903	0
1730	- 0,1	1912	+ 0,2
1750	0	1927	+ 0,4
1770	0	1940	+ 0,4
1800	+ 0,1	1950	+ 0,5
1840	0	1965	+ 0,6
1870	0	1971	+ 0,7
1880	- 0,1	1977	+ 0,8
1895	- 0,1	1987	+ 1

On notera que l'écart entre TE et UT s'est annulé plusieurs fois. On retrouve ces résultats sur le tableau ci-contre. On remarque que ΔT varie de façon très chaotique. La vitesse de rotation de la Terre diminue, donc la durée des jours augmente, les jours réels sont plus longs que les jours calculés, le TE a pris en 70 ans, entre 1900 et 1970, 38 secondes d'avance sur le TU et en 1974 on avait : $\Delta T = TE - UT = 44$ s (0,74 minutes).

Pour l'Antiquité, on a recours aux éclipses. Dans le cas des éclipses observées il y a quelque 2000 ans, les différences entre sites d'observation théoriques et réels sont de l'ordre de quelques dizaines de degrés en longitude et ceci correspond au retard accumulé par la rotation terrestre au cours des siècles, car des différences aussi grandes ne peuvent pas être imputées à des imperfections dans la théorie des mouvements célestes. Spencer Jones

donc, dans les équations du mouvement on doit prendre la date 6 février - 555 à 10 h 32 TE.

Exemple 2 : phase maximale de l'éclipse de Lune du 4 avril 1977 à 4 h 19,0 min TE. On a $\Delta T = 0,8$ min en 1977, donc $UT = 4$ h 19,0 min - 0,8 min = 4 h 18,2 min.

V - L'échelle de Temps atomique international (TAI) et la seconde TAI.

1 - La seconde de Temps atomique

A peine née, la seconde des éphémérides est moribonde. Peu après l'adoption du TE, le Comité International des Poids et Mesures constitue un groupe d'experts : le Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde (CCDS), chargé de suivre l'évolution des recherches pouvant conduire à une nouvelle définition de la seconde, et de l'informer. L'idée d'utiliser des effets atomiques pour mesurer le temps remonte à 1945 (Rabi) et en 1955, les physiciens Essen et Parry réalisent le premier étalon atomique à l'aide d'un maser à césium 133 à 9 GHz. C'est le point de départ des étalons de temps à césium. Le CCDS s'est réuni 4 fois, en 1957, 1961, 1963, 1967. A la session de 1967, il a recommandé d'adopter une définition de la seconde à partir d'une transition atomique du césium. Cette proposition a été suivie par le Comité International des Poids et Mesures, puis par la XIII^e conférence des Poids et Mesures, qui, en octobre 1967 adopte un nouvel étalon de temps : la seconde atomique. La seconde du système international est une durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant entre les deux niveaux hyperfins F_4 à MF_0 de l'état fondamental de l'atome de césium 133.

2 - L'échelle TAI

Pour l'utilisateur qui dispose d'une horloge atomique, la précision est de l'ordre de la nanoseconde, et par comparaison des différentes horloges atomiques du monde entier, on gagne encore en uniformité. L'élaboration du Temps atomique international TAI a été confiée pendant plus de

quinze ans au BIH (Bureau international de l'heure) qui regroupait 24 pays, une cinquantaine de laboratoires et environ 150 horloges comparées entre elles régulièrement.

En 1997 le TAI est élaboré à partir de 223 horloges atomiques, installées dans 38 pays. Ce n'est pas une simple moyenne qui est effectuée, la pondération des horloges présentant les plus gros défauts d'uniformité est amoindrie. L'écart entre le TAI et le TAF (Temps atomique français) est lentement variable. En 1997 il vaut environ 163 μ s.

Le Temps atomique n'est pas diffusé, mais avec une précision de 2×10^{-14} , son uniformité surpasse de beaucoup celle des échelles de temps astronomiques. Le gain en uniformité en 1997, avec emploi du TAI est de 10^7 par rapport au UT et de 10^5 par rapport au TE. Pendant les dix dernières années, la précision augmenta d'un facteur 100. L'échelle de Temps atomique international a été introduite officiellement le 1^{er} janvier 1972. TAI coïncidait approximativement avec UT le 1^{er} janvier 1958. Son origine a été choisie pour conserver une continuité avec les précédentes échelles de temps, Temps des éphémérides et Temps universel (UT2). De ce fait, on a actuellement : $TE = TAI + 32,184$ s (circulaire IERS de juin 1997).

3 - Usage du TAI

Le TAI est utilisé comme échelle de temps uniforme. Il permet les études théoriques des mouvements des satellites, il sert au lissage du TE, il est utilisé dans les calculs des éphémérides des planètes à la place de UT.

VI - Compléments

1 - Quelques comparaisons

La précision d'une pendule est d'un dixième de seconde par jour,

donc de l'ordre de 10^{-6} , celle d'une horloge à quartz est de l'ordre de 10^{-9} . Celle des horloges atomiques atteint maintenant 10^{-14} . Il faut environ 1 000 000 ans pour qu'une horloge atomique accumule un retard d'une seconde... La précision atteinte est telle que cela pose des problèmes relativistes.

2 - Le Temps universel coordonné

Après avoir défini une unité de temps grâce aux étalons atomiques, et d'une façon totalement indépendante de la rotation de la Terre, il est nécessaire de conserver une échelle concordante avec les cycles diurnes, les activités spatiales, la navigation, les observations terrestres.

On utilise un temps déduit de l'observation astronomique par l'intermédiaire d'une convention opportune, analogue à la convention des années bissextiles et qui porte le nom de UTC, temps universel coordonné. Il s'agit d'une simple renumérotation des secondes d'un rang en avant ou en arrière selon l'avance ou le retard accumulé par la rotation terrestre à cette date. Le temps universel coordonné a la même unité que le TAI mais il est réajusté parfois d'une seconde de telle façon que l'écart entre UT_1 et UTC, en valeur absolue, soit inférieur à 0,9 seconde (fig.8).

Cette correction ne peut être connue qu'a posteriori à partir des résultats des observations des Services de l'Heure. Elle est positive ou négative. La correction est opérée de préférence le 30 juin 1997 à 24 heures UT, soit le 1^{er} juillet 1997 à 2 heures légales en France.

La succession des secondes a été la suivante :

30 juin 1997 23h 59 min 59 s ;
30 juin 1997 23h 59 min 60 s ;
1^{er} juillet 1997 0 h 0 min 0 s.

Du 1^{er} janvier 1997 au 30 juin 1997, on avait $TAI - UTC = 30$ s, et à partir du 1^{er} juillet, et il y a maintenant 31 secondes (circulaire T 115 du BIPM en date du 12 août 1997).

Le UTC est ce que l'on sait faire de mieux comme échelle de temps directement accessible. Il est la base des temps légaux. Il permet d'avoir le UT_1 avec une précision suffisante pour les besoins courants. Les valeurs $UT_1 - UTC$, déduites des observations sont connues depuis 1984 à 0,1 milliseconde près et sont publiées par le Service International de la Rotation Terrestre (IERS = International Earth Rotation Service)

Du 1^{er} janvier au 30 juin 1997 on avait $UT_1 - UTC = -0,47379$ et, depuis le 1^{er} juillet, et jusqu'à nouvel ordre, on a $UT_1 - UTC = +0,52486$. On remarque que la nouvelle valeur ne s'obtient pas à partir de l'ancienne en ajoutant une seconde.

Le Service de l'Heure a profité de la correction d'une seconde pour recalibrer le UTC et l'horloge Terre.

Le système de satellites GPS (Global Positioning System) diffuse un temps égal au TAI, mais avec 19 secondes de retard. Depuis la création du GPS, on a $TAI - GPS = 19$ s. Par contre, l'écart avec UTC suit les sauts de l'échelle de temps. Jusqu'au 1^{er} juillet 1997 on avait $UTC - GPS = -11$ s et à partir du 1^{er} juillet, l'écart est passé à -12 s. Cet écart surprenant de presque 20 secondes avec TAI correspond à l'écart qui existait entre les deux échelles de temps TAI et UTC au moment de la première diffusion du GPS.

3 - L'argument des éphémérides astronomiques

En 1976, l'UAI a recommandé de remplacer à partir de 1984, l'échelle de temps des éphémérides

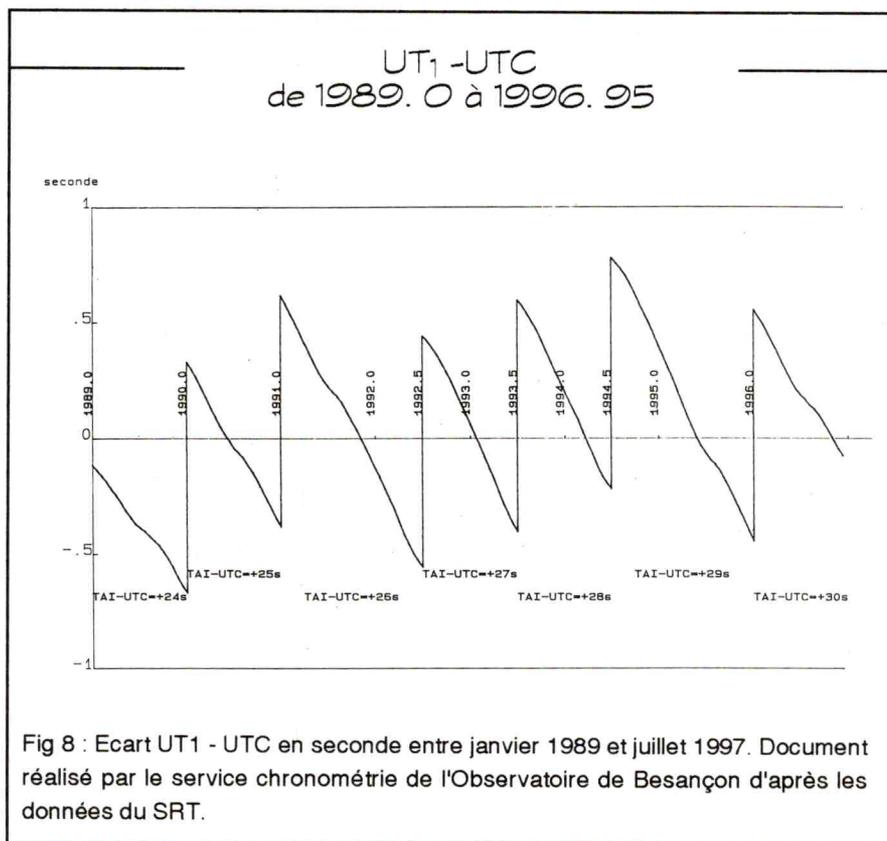


Fig 8 : Ecart $UT_1 - UTC$ en seconde entre janvier 1989 et juillet 1997. Document réalisé par le service chronométrie de l'Observatoire de Besançon d'après les données du SRT.

des TE par une unité proche du TE dont l'unité fondamentale est la seconde SI (atomique) et qui s'obtient pratiquement en ajoutant 32,184 secondes au TAI.

4 - Le temps dynamique

Pour certaines activités astronomiques de pointe, le temps des éphémérides est déjà dépassé, et on utilise le TDT ou le TDB. Le TDT (Terrestrial Dynamical Time ou TT) est utilisé comme échelle de temps pour les observations depuis la Terre. C'est $TAI + 32,184$ s. TDB est le Barycentric Dynamical Time, utilisé comme échelle de temps pour les éphémérides ramenées au barycentre du Système Solaire.

$$TDB = TDT + 0,001\,658 \times \sin(g) + \dots$$

En 1997, on a $UT = TD - 63$ s

La plupart du temps, le TDT peut être considéré comme la suite du TE (à partir du 1^{er} janvier 1984) et l'ensemble forme une échelle continue.

5 - Vers l'abandon de UT ?

UT est tellement irrégulier, tellement impropre aux théories mécaniques, ne va-t-on pas se décider à l'abandonner définitivement ? A quoi cela peut-il bien servir de continuer à le diffuser ? La réponse est simple : son abandon signifierait la déconnexion de l'observateur d'avec la Terre et le ciel. Sans lui, un observateur ne peut plus situer le Soleil et les étoiles, le point en mer ne donne plus un résultat correct. Par ailleurs, la comparaison de UT et de TAI permet a posteriori de connaître le mouvement du pôle. Il a comme sous-produits l'amélioration des catalogues d'étoiles et des constantes astronomiques, et il donne l'accès à des données expérimentales sur la dérive des continents par exemple.

VI - Réduction des échelles de temps

Pour passer d'une échelle de temps à l'autre, il est nécessaire de connaître un certain nombre de formules que l'on trouve par exemple dans la Connaissance des Temps. Les formules permettent de passer d'une échelle de temps à une autre pour une période déterminée. Elles ne sont pas toujours simples.

Exemple 1 :

Du 1^{er} janvier 1996 au 1^{er} février 1998 on a :

$$\text{TAI} - 32,184 \text{ s} - \text{UTC} =$$

$$36,497\ 170\ 0 \text{ s} + (\text{JD} - 2\ 439\ 125,5) \times 0,002\ 592$$

JD (Julian Day) représente le jour julien. Il incrémente d'une unité chaque jour à midi ; et l'origine est le premier janvier - 4712 à midi. Le 1^{er} janvier 2000 à 0 heure on aura
JD = 2 451 544,5

Exemple 2 :

Après 1972, la formulation est plus simple après l'adoption du TAI :

du 1^{er} juillet 1993 au 1^{er} octobre 1993 on a :

$$\text{TAI} - 32,184 \text{ s} - \text{UTC} = 53,184\ 000\ 0$$

et pour la même période on a $\text{TU}_1 - \text{UTC} = + 0,60$.

Les corrections varient en fonction de la date, en suivant les "hoquets" de la Terre.

Conclusion

Une telle précision dépasse de loin les utilisations que l'homme de la rue peut en faire. Mais pour les plus puristes d'entre nous, une bonne précision dans la transmission de l'heure est actuellement à la portée de tous, par l'intermédiaire de l'émetteur allemand DCF - 77, situé à Mainflingen, près de Frankfurt am Main, en Allemagne et qui diffuse l'heure légale. La communication de l'information horaire est en Grandes Ondes sur 77,5 kHz. L'émetteur ayant une puissance de 25 kW, le signal peut être capté dans un rayon de 1500 à 2500 kilomètres, suivant le relief.

On trouve dans le commerce des petits réveils radiopilotés, remis à l'heure d'une horloge atomique à chaque heure. Leur coût est inférieur à 300 F. La métrologie du temps a des implications importantes en navigation, mais aussi dans les industries de précision, car, depuis 1983, elle est liée aux longueurs par la vitesse de la lumière dans le vide. L'industrie aéronautique de construction et les réseaux de télécommunications sont des gros utilisateurs de nano et de picosecondes. ■

Des nouvelles de l'EAAE :

- du 20 au 25 juillet 1998 s'est tenue près de Rome la deuxième école d'été européenne. Elle a rassemblé une quarantaine de stagiaires et une quinzaine d'animateurs, du Portugal à la Finlande, de la Bretagne à la Géorgie.

Au programme : des conférences, des groupes de travail et des ateliers, une journée de visite astronomique de Rome...

Journées très chaudes, bien remplies de travaux et d'échanges. Le CLEA était très présent chez les animateurs.

Les projets ne manquent pas pour continuer : la troisième école d'été est prévue en France près de Metz du 8 au 14 août 1999 (occultation du 11 oblige !). Pour tous renseignements, s'adresser à Frédéric Dahringer.

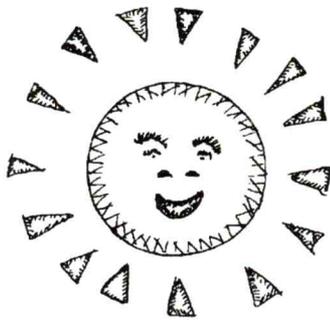
(8, rue Albert Camus, 29300 Quimperlé. Adresse électronique : frederic.dahringer@wanadoo.fr)

- L'Assemblée Générale se tiendra à Stockholm du 25 au 28 septembre pour faire un bilan des trois premières années d'existence et définir des perspectives et des pistes de travail nouvelles.

- l'EAAE ne vit que par les cotisations de ses membres. Pensez à renouveler votre adhésion ou à devenir membre ! Chèque de 70 F à adresser à Bernard Pellequer, notre représentant national.

(Géospace d'Aniane ; 929, rue d'Alco, 34080 Montpellier. Adresse électronique : bernard.pellequer@cnusc.fr)

Josée Sert



Mars

Approche bio-géologique de la planète rouge

Nicolas Defer

Annie Pincaut a apprécié cet article, paru dans le bulletin de l'Association de Géologie Auloise et, à sa demande, l'auteur a gentiment accepté sa publication dans les CC.

Nicolas Defer a fait, en puisant dans différents ouvrages, un travail de synthèse des connaissances actuelles sur la géomorphologie et la géologie de Mars. Il nous présente la composition chimique, l'atmosphère et le climat. Il décrit en détail les reliefs et en donne les interprétations possibles.

Dans le n°84, il nous racontera où en est la recherche d'une vie passée ou présente sur la Planète Rouge et explicitera les problématiques et les arguments scientifiques.

La planète Mars est en moyenne à 228 millions de km du Soleil et parcourt son orbite en 687 jours. Son diamètre est à peu près deux fois plus petit que celui de la Terre, sa masse est 1 / 10 de celle de la Terre, la pesanteur y est trois fois moindre que sur Terre. Mars est perçue à l'oeil nu : sa couleur rouge orangé, due aux oxydes de fer présents en surface, lui a valu d'être surnommée la "Planète Rouge". Terre et Mars ont le même âge : à peu près 4,6 milliards d'années et leur distance respective varie de 80 à 400 millions de km.

Mars, une planète inaccessible, d'apparence inhospitalière ? Pas du tout. Après les missions Mariner (1964) et Viking 1 et 2 (1976), après le revers de Mars Observer en 1993, on s'apprêtait à lancer une sonde russe, "Mars 96" dont l'objectif était de photographier la surface planétaire de l'équateur aux pôles

pour en dresser des cartes géologiques et minéralogiques. Mais cette sonde n'a même pas quitté l'orbite de la Terre et s'est abîmée dans le Pacifique. D'où un échec cuisant pour les russes et les français (premiers partenaires) tant du point de vue technologique que scientifique. Or, le 2 décembre 1996, la NASA envoya la sonde Mars Pathfinder, laquelle se posa début juillet 1997 dans un site tropical, à 19° 30' de latitude nord. Cette mission est une incontestable réussite technologique (nouvelles technologies destinées aux futures missions spatiales sur Mars, lancement d'une sonde en un temps record, à moindre coût) mais aussi culturelle. Les images extraordinaires reçues sur Terre complètent celles réalisées par la sonde Viking en 1976 et nous dévoilent ainsi les caractéristiques d'une partie du paysage martien.

Parmi les énigmes que vont tenter de résoudre les scientifiques de cette mission et des missions futures, il y a l'existence d'une vie passée et la présence antérieure d'eau à l'état liquide. Si eau il y a eu, il est donc possible que la vie soit apparue, même si c'était sous une forme éphémère et limitée à des bactéries primitives. Mais pour trouver une forme quelconque de vie, il faut creuser ! On peut se demander en quoi la planète Mars constitue un espoir de recherche d'une "exo-vie", et comment elle peut devenir une source de données, de renseignements que rêvent de mettre à jour les scientifiques afin de mieux comprendre non seulement l'évolution de la Planète Rouge mais aussi celle de notre très chère Planète Bleue.

Géologie et géomorphologie de la Planète Rouge

Mars : une planète tellurique

Composition chimique

Elle est analogue à celle de la Terre, sauf que Mars contient trois fois plus de fer : 50% d'oxygène, 20% de silicium, 14% de fer, 4% d'aluminium. Comme toute planète rocheuse, elle est composée d'un petit noyau central de fer (2500 km de diamètre), contenant 25% de la masse, entouré d'un manteau et d'une croûte, riche en olivine et en oxyde de fer, de 40 à 50 km d'épaisseur, atteignant par endroits 80 km (sous les montagnes) et se réduisant parfois à 8 km (sous les bassins d'impact).

Évolution de l'atmosphère pour Vénus, Terre et Mars depuis leur formation

Lors de leur formation, il y a environ 4,6 milliards d'années, les trois planètes avaient une atmosphère primitive, un peu comme

celle de Jupiter. Elle a été chassée par le vent solaire, puis remplacée par une atmosphère à dominante de CO₂, produite par dégazage. Le gaz carbonique engendre un effet de serre qui provoque une augmentation de la température.

- Pour Vénus, l'effet de serre est "divergent" : l'eau chauffe, s'évapore, est dissociée en altitude par les UV du Soleil, et l'hydrogène s'évade dans l'espace. Il y a, en gros, une fuite d'eau sous forme de vapeur qui assèche la planète.

- La Terre est moins chaude. Actuellement sans l'effet de serre, sa température extérieure serait de - 18°C au lieu des 15°C que l'on relève, et toute sa surface serait recouverte de glace, sauf dans la ceinture équatoriale. D'autre part, le CO₂ est piégé sous forme de carbonates et tend à disparaître de l'atmosphère. Or, sur Terre, les carbonates se déposent au fond des océans, où le mouvement des plaques tectoniques les fait repasser dans le magma, puis le CO₂ est recraché par les volcans. C'est donc le CO₂ recyclé qui entretient l'effet de serre. Pendant 4 milliards d'années la Terre a ainsi pu conserver une température propice au maintien de la vie.

- Pour Mars, l'hypothèse est qu'il y fait trop froid pour que le CO₂ soit recyclé, comme sur Terre. L'atmosphère devient de plus en plus ténue et l'effet de serre ne suffit pas à réchauffer la planète. L'eau gèle dans le sol qui devient un "pergélisol". Il y a de nombreux indices de cette présence de glace dans le sol. Par exemple, les éboulis des grandes vallées ne se forment pas à la verticale mais s'étalent, du fait de la présence de grains de glace qui jouent le rôle de lubrifiant. L'idée prévaut que l'atmosphère martienne se serait en partie échappée vers l'espace,

le reste étant piégé dans les calottes glaciaires et dans le sol. Mais on ne comprend toujours pas comment, et surtout en combien de temps, le climat de Mars a basculé. On suppose que le climat de Mars aurait changé il y a environ 3,5 milliards d'années avec la perte de l'essentiel des éléments (CO₂, H₂O) qui composaient son atmosphère. Tout se serait joué sur une période de 500 millions d'années.

Composition de l'atmosphère et caractères climatiques

L'atmosphère est composée de 95,3% de CO₂, de 2,7% d'azote moléculaire (N₂) et de 1,6% d'argon. Les autres constituants (notamment l'oxygène) sont observés à l'état de traces. Elle est épaisse de 11 km. De plus, la pression au sol est très faible : de 6,9 à 9 hPa (1015 hPa sur Terre).

La variation diurne des températures à l'équateur est relativement importante (en moyenne - 22 °C le jour et - 73°C la nuit). La température moyenne est de - 60°C. Aux pôles, on note de très basses températures, de l'ordre de -130°C en hiver tandis qu'à l'équateur, elles sont de peu supérieures à 0°C.

Terre et Mars sont comparables en ce qui concerne la durée du jour, ainsi que l'inclinaison du plan de l'orbite sur celui de l'équateur (24°48' contre 23°27'). Il existe donc des saisons, comme sur la Planète Bleue, mais elles sont près de deux fois plus longues.

Enfin, de violents vents (200 km / h) circulent dans l'atmosphère, déclenchant des tempêtes de poussières, projetées jusqu'à 50 km d'altitude, et modelant par endroits la surface de Mars en champs de dunes (le plus important, Hellas Portus, a une superficie de 1600 km²).

Les premiers résultats de Sojourner

L'APXS, le spectromètre à rayons X de Sojourner destiné à l'analyse de la composition chimique des roches martiennes, travaille la nuit, en bombardant une dizaine d'heures d'affilée sa cible de particules alpha ; en retour, la roche émet des rayons X dont le spectre est analysé. L'AXPS a ainsi révélé que le petit rocher d'origine volcanique, Barnacle Bill, situé à quelques pas de Mars Pathfinder, était très riche en quartz comme certaines laves terrestres. C'est une roche magnétique, riche en quartz et en pyroxène. S'il se confirme qu'il y a du quartz sur Mars, il faut trouver le processus par lequel il a été fabriqué ! Sur Terre, le quartz apparaît de diverses façons, mais toutes impliquent la présence d'eau, de hautes températures et de hautes pressions. Par exemple, le quartz peut se former dans des zones de subduction où les plaques océaniques s'enfoncent dans le manteau terrestre, en emportant d'énormes quantités d'eau avec elles. L'eau se mêle alors au magma à plus de 1000°C. Mais sur Mars, il n'y a pas de zones de subduction. Et l'on ne comprend pas comment du quartz a pu se former dans ces conditions.

Causes et descriptions des reliefs

Les cratères et le volcanisme

- L'hémisphère sud de Mars comporte beaucoup plus de cratères que le nord, ce qui pourrait s'expliquer par la présence d'une mer martienne au nord (où l'on observe d'énormes "estuaires" qui semblent s'y déverser). L'enfance du système solaire a été dominée par un bombardement météoritique, dont la phase la plus violente se serait achevée il y a 3,8 milliards d'années. En se fondant sur le décompte et sur l'état de dégra-

dation des cratères, les géologues estiment qu'il ne s'est plus passé grand-chose dans la majeure partie de l'hémisphère sud, depuis 3,5 milliards d'années. Or, la plupart des vallées et des chenaux (environ 95 % selon les chercheurs) sont associés à des terrains cratérés. Leur formation serait donc intervenue au cours du premier demi-milliard d'années qui a suivi l'accrétion de la planète. Au delà, il n'y a plus de traces évidentes d'érosion et il n'y a plus, ou presque plus, d'eau liquide.

L'hémisphère nord est peu cratérisé, occupé par des plaines relativement lisses. Ces dernières correspondent probablement aux terrains les plus récents, postérieurs au bombardement météoritique qui a suivi de peu la naissance de Mars. Il n'est pas exclu qu'elles soient apparues lors d'un comblement de formes, par des dépôts éoliens. Autre hypothèse : les cratères de l'hémisphère nord auraient été comblés par des écoulements de lave, comme ce fut sans doute le cas pour les mers lunaires.

- Il existe une dizaine de grands cratères de nature volcanique. Deux volcans imposants se trouvent sur le bord d'un bombardement appelé le dôme de Tharsis : Alba Patera, le plus étendu et Olympus Mons, large de 500 km et haut de 27 km. Trois autres, l'Ascraeus, la Pavonis et l'Arsia, sont situés sur le dôme de Tharsis lui-même ; tous les trois atteignent 27 km d'altitude mais reposent sur un socle de plus de 9 km. Les plus grands cratères ont un diamètre allant de 80 à 120 km.

Par ailleurs, les petits cratères se comptent par milliers. A diamètre égal, ils sont moins profonds que sur la Lune, sans doute parce que l'érosion, principalement éolienne, s'exerce davantage sur Mars. On parle d'un relief "limé".

Les cratères s'emboîtent les uns dans les autres et, en particulier, le rempart de caldeiras¹ est souvent indenté de dépressions semi-circulaires, ce qui s'explique mieux si les cratères sont volcaniques que s'ils sont dus à un impact de météorite : on ne comprendrait pas que les météorites plus petites soient tombées juste sur le bord de la cicatrice de la plus grande. Le fond des grandes caldeiras est tantôt très plat, tantôt accidenté de collines (et de cratères mineurs bien entendu). Des formes qui ressemblent à des coulées de lave, mais sont peut-être des glissements apparaissent dans le fond. Des failles transverses cassent parfois le bord des cratères, mais il n'existe pas de "rayures". Une des particularités de beaucoup de cratères de Mars est que leurs pentes extérieures s'accidentent de formes de fluage² polylobées, que l'on ne trouve pas sur les autres planètes : ce sont les cratères à "ejecta fluidisés" (R. Battistini).

On peut affirmer que les grands volcans de Mars sont des boucliers de type hawaïen³ à caldeiras emboîtées. Des épanchements latéraux de lave sont produits, en plus des "ejecta fluidisés".

Malgré l'importance du volcanisme, beaucoup de cratères sont bien dus à des impacts météoritiques, comme le plus grand, Hellas, qui atteint 2000 km de diamètre. Il y a aussi des zones sans cratères.

- Mars a donc connu une intense activité volcanique qui a engendré le surgissement de volcans géants. Pour des raisons mal comprises, ce volcanisme, qui se serait éteint il y a 800 à 600 millions d'années, n'a affecté que la plus grande partie de l'hémisphère nord, où des flots de lave ont façonné d'immenses plaines relativement jeunes.

La tectonique

Beaucoup de reliefs ont une origine tectonique, qu'il s'agisse de tectonique interne, panamienne⁴ ou complexe car beaucoup de formes de glissement ont accidenté des parois de grabens⁵ dus à la distension. Parmi les mouvements endo-tectoniques, peut-être dus à des courants de convection dans le manteau de la planète, on doit insister sur ceux qui ont produit deux des reliefs les plus spectaculaires, le dôme de Tharsis et Valles Marineris.

- le dôme de Tharsis, situé sur l'équateur martien, est dû à un soulèvement de la croûte d'environ 6 km, localement 9, il y a 3,5 milliards d'années. Il est large de 3000 km et long de 4000. Le plateau d'Elysium, situé dans l'hémisphère nord est plus petit ; il est haut de 4 à 5 km et a un diamètre de 1500 km, supportant des volcans. S'opposant à ces dômes, de grands bassins entourés de bourrelets occupent une grande partie de l'hémisphère sud : ainsi la plaine Hellas, de plus de un million de km².

- Valles Marineris est un grand canyon équatorial, long de 4000 km, large de 120 à 200, profond de 6. Il commence juste sur la remontée orientale du dôme de Tharsis, par Noctis Labyrinthus, réseau de vallées découpant la région en petits plateaux polygonaux, suivant les lignes tectoniques. Ce labyrinthe de vallées s'explique par la formation de grabens, dont les parois ont ensuite été modelées par des affaissements d'ordre kilométrique en forme de cirques elliptiques ; beaucoup de dépressions sont fermées, de sorte que l'ensemble est mal communiquant. On a l'impression que des formes de dégradation du pergélisol fondu ont modifié le relief tectonique primitif. De Noctis Labyrinthus

s'échappe vers l'Est le canyon proprement dit, constitué en fait de plusieurs vallées profondes parallèles, révélant une coupe des couches volcaniques dans lesquelles elles sont ouvertes. Le glissement, le ruissellement peut-être, ont modelé les versants. Troisième secteur de Valles Marineris, l'Est est une vaste dépression chaotique. Sa surface est marquée par un vaste réseau fluvial (canaux de Mars).

L'oeuvre du vent

Mars est un désert glacial balayé au rythme des saisons par de violentes tempêtes de poussières, livré pratiquement sans aucune protection aux ravages des particules du vent solaire et du rayonnement UV de notre étoile. Le vent est probablement à l'origine de la présence d'importants yardangs⁶ et de dunes (transversales ou barkhanes⁷) groupées en vastes ergs⁸. Ces dunes paraissent figées, encroûtées, attaquées par déflation. Des poussières stratifiées couvrent les calottes glaciaires et leurs abords.

Les écoulements

Une partie de la surface de Mars est sillonnée par des dizaines de chenaux et de vallées de formes, de profondeurs et de longueurs très diverses : les vallées en U de type glaciaire auraient, d'après la topographie des cratères de météorites, entre 3,5 et 3,8 milliards d'années (époque de la glaciation).

Beaucoup de formes de Mars s'expliquent par des écoulements. Certains peuvent remonter à une période fluviale très ancienne. D'autres ont pour cause l'intervention de l'eau contenue dans le sous-sol : l'hydrolithosphère. Il y a là, en effet, une quantité stockée bien supérieure à celle des calottes polaires. Une partie de cette eau souterraine, la plus superficielle,

est gelée et constitue un considérable pergélisol. Une autre, l'hydrolithosphère inférieure, imbibe d'eau liquide les roches sous-jacentes et les rend plus ou moins plastiques. La limite actuelle, ou cryomarge, entre l'hydrolithosphère profonde et l'hydrolithosphère superficielle gelée se situe vers trois kilomètres de profondeur à l'équateur et à huit kilomètres au pôle, mais la couche gelée n'est pas parfaitement continue : elle manque sur une partie de la planète. Le fluage passé est responsable, en particulier, des ejecta, polylobés, franges boueuses des flancs de volcans et ce sont ces ejecta particuliers qui permettent de distinguer les parties de Mars pourvues d'hydrolithosphère et celles où celle-ci est absente ou en tout cas très lacunaire.

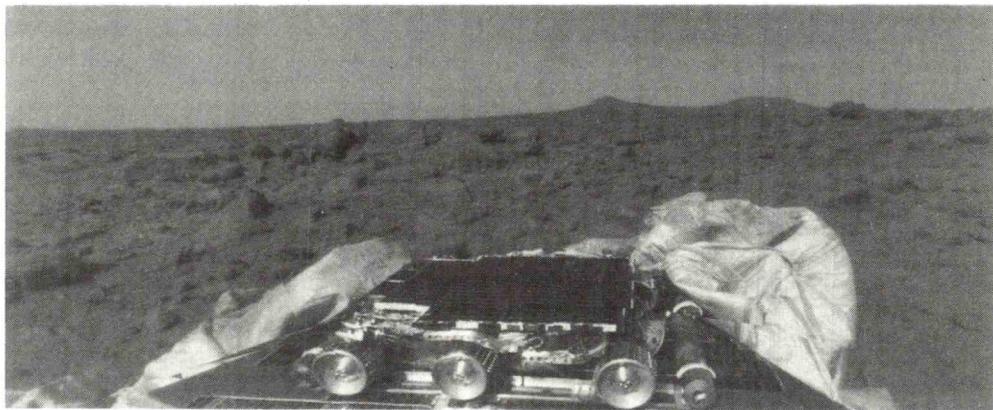
S'expliquent probablement aussi par une fusion du pergélisol, des reliefs chaotiques résultant d'un effondrement de la surface lors de la fusion, avec basculement en tous sens des blocs ainsi privés de leur support solide. Sur les versants des vallées, des glissements et des effondrements ont la même origine. Des champs de rides hautes de 50 à 400 m, longues de plusieurs centaines de kilomètres, subparallèles ou en réseau, résultent probablement d'un giclage de matière dégelée le long de fractures par lesquelles est monté un flux de chaleur interne.

Les fusions de cryolithosphère⁹, parfois sous la forme d'irruptions d'eau artésienne sous pression, ont provoqué des éboulements liquides catastrophiques qui ont creusé des vallées larges de 10 km et plus, profondes de centaines de mètres, longues de plusieurs centaines de kilomètres : on les a appelées "outflow channels".

Mars Pathfinder

Landing Site
July 4, 1997

Image JPL
NASA
(Photothèque
Planétaire d'Orsay)



Moins spectaculaires, des "chevelus" hydrographiques n'en ont pas moins laissé des traces étendues.

Il ne semble pas (mais on en discute encore) y avoir eu sur Mars de glaciers de type terrestre ; cependant l'hydrolithosphère a dû, à certaines époques, alimenter des masses superficielles de glace. On s'interroge sur l'origine des formes qui paraissent périglaciaires (polygones géants). Des calottes de glace, probablement composées de glace d'eau et de neige carbonique (dioxyde de carbone solide), recouvrent donc les pôles. Leur progression et récession suivent un cycle saisonnier, induit par la forte inclinaison (24°) de l'axe de rotation de la planète sur le plan orbital (très faiblement incliné ($1^\circ 51'$) sur le plan de l'écliptique). Ainsi, la calotte du pôle sud, le plus proche du Soleil, disparaît peu à peu après chaque printemps, tandis que celle du pôle nord ne fond pas complètement.

Arès Vallis est une grande vallée de débâcle, longue de 1500 km, large de 25 km, profonde de plusieurs centaines de mètres. Mars Pathfinder s'est posé à l'embouchure d'Arès Vallis et de Tiu Vallis. Les données de Mars Pathfinder conforteraient ainsi l'hypothèse d'écoulements d'eau liqui-

de dans le passé martien plutôt que celle de la glace (car si Arès Vallis avait été creusée par un glacier, plutôt que par de l'eau liquide, les roches auraient été déposées dans n'importe quelle direction). Les vallées martiennes n'ont pas dû connaître non plus des écoulements prolongés car on ne trouve pas le moindre galet dans le lit d'Arès Vallis. En fait, on a beaucoup de mal à interpréter ce paysage martien, qui a été remodelé, bouleversé par des impacts météoritiques...

L'eau de Mars provient probablement de la condensation de celle de l'atmosphère primitive, lors du refroidissement de la surface ; c'est alors il y a 3,5 milliards d'années qu'ont dû se produire de grands écoulements, en une véritable période pluviale ; le refroidissement continuant, avec peut-être des récurrences tièdes faisant fondre le pergélisol, l'eau s'est fixée au pôle et dans le sol. Mais on ignore ce qu'est devenue l'eau des "outflow channels", et si leur écoulement s'est répété périodiquement. Par contre, il est clairement établi que l'écoulement s'est complètement arrêté depuis un milliard d'années.

Malgré les progrès, il faut se résoudre à plus d'ignorances géologiques que géomorphologiques.

Notes de la rédaction

1 - Une caldeira est un grand cratère volcanique, formé par l'effondrement de la partie supérieure du cône volcanique dans le vide laissé par certaines éruptions très intenses et rapides.

2 - Un fluage est une déformation lente que subit un matériau soumis à une contrainte permanente.

3 - Le type hawaïen est celui d'un volcan-bouclier, accumulation de laves basaltiques très fluides, édifiant des cônes à faibles pentes mais de diamètre atteignant plusieurs dizaines de km. Les éruptions et explosions sont minimales.

4 - Une cassure tectonique peut être symbolisée par une fracture ou /et par une faille et doit être distinguée de la fausse faille ou "faille panamienne", déchirure due à un affaissement.

5 - Un graben est un fossé d'effondrement tectonique.

6 - Un yardang est une butte allongée, haute parfois de plusieurs mètres, à profil longitudinal aérodynamique, que le vent creuse dans des roches meubles.

7 - Une barkhane est une dune en forme de croissant.

8 - Un erg est un vaste ensemble de dunes.

9 - La lithosphère est la partie rigide du sous-sol, l'hydrolithosphère contenant de l'eau liquide et la cryolithosphère de la glace.

suite et fin dans le n°84 ■



La pêche à la Lune

ou comment "pêcher" les croissants de Lune

Daniel Toussaint

L'observation directe de la Lune n'est pas toujours facile surtout dans la journée. Aussi Daniel a-t-il inventé une maquette pour prédire l'aspect de la Lune et la repérer en connaissant simplement son âge. Il nous explique ici comment réaliser cette maquette.

Quand Victor Tryoën avait réalisé la série de diapos D2 présentant les phases de la Lune, je l'avais complétée par un petit jeu inspiré des raisonnements géométriques des Anciens Grecs. Ce "jeu" consiste à observer la Lune en plein jour, quand c'est possible, en brandissant dans sa direction une boule fixée sur un manche (semblable à un bilboquet). Si on a pris soin de placer la boule au soleil, on est frappé par la similitude des phases de la Lune et de la boule vue sous cet angle.

Cette expérience anodine est très instructive : s'il en était encore besoin, elle prouverait que la Lune n'est pas la médaille plate qui ornaît le chef de certains dieux égyptiens. Mais surtout elle montre sans ambiguïté que la distance Soleil-Terre ou Soleil-Lune est beaucoup plus grande que la distance Lune-Terre.

Pour le démontrer, faisons l'expérience lors d'un quartier (premier ou dernier, c'est sans importance). La Lune est facile à trouver en plein jour dans ce cas. Le schéma n°1 aide à comprendre que si l'observateur voit les régions éclairées de la Lune et de la boule sous le même angle, cela signifie que les rayons solaires

qui les frappent sont pratiquement parallèles entre eux et donc que la distance Terre-Soleil est très grande par rapport à la distance Terre-Lune.

Une maquette inédite pour pêcher les croissants de Lune :

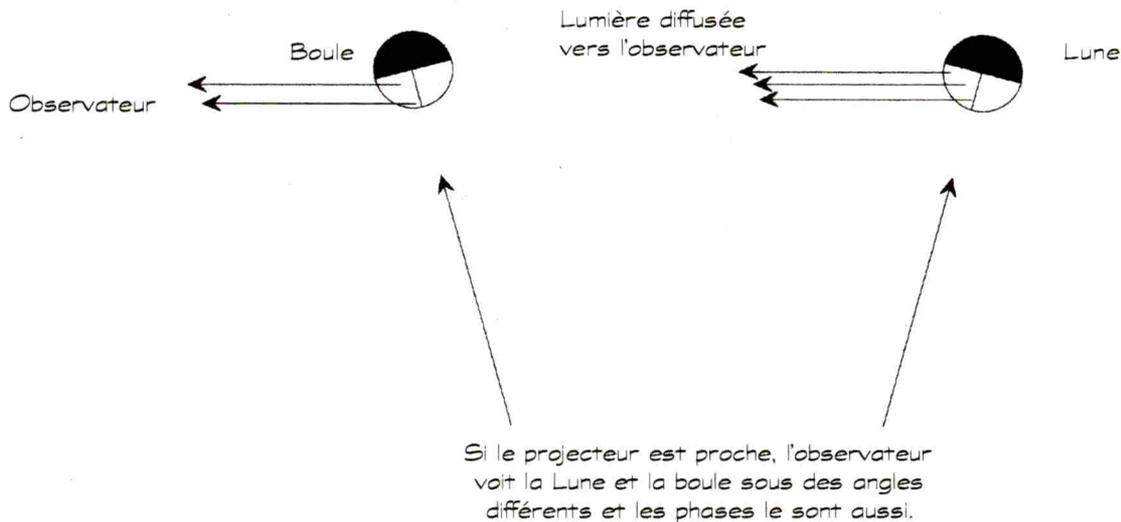
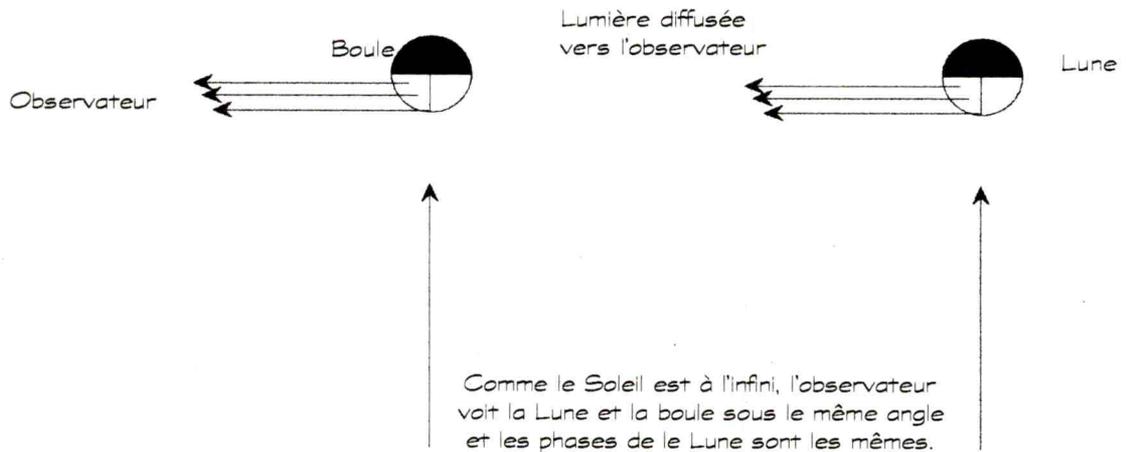
Quand la Lune est en croissant, chacun la voit facilement le soir (au début de la lunaison) ou le matin (en fin de cycle) quand le Soleil est sous l'horizon et le ciel assez sombre. Mais en milieu de journée, si on n'a pas la chance d'être à la montagne, le ciel bleu est bien trop brillant pour trouver la Lune sans aide.

La solution professionnelle consiste à utiliser un télescope à monture équatoriale et des éphémérides de la Lune.

Cette solution n'étant pas à la portée de tous, j'ai imaginé une maquette beaucoup plus primitive qui permet de prédire l'aspect de la Lune, et de la repérer en connaissant simplement son âge (nombre de jours écoulés depuis la Nouvelle Lune). Si on indique en outre la date de l'observation, il est possible de savoir dans quelles constellations zodiacales se trouvent la Lune et le Soleil.

Schéma n°1

Pêcher un quartier de Lune pour comprendre que $d_{TS} \gg d_{TL}$



Cette maquette est obtenue en ajoutant deux disques mobiles et deux ou trois boules au schéma classique qui présente les phases de la Lune en fonction de sa position par rapport à l'axe Soleil-Terre.

liste du matériel nécessaire :

- une photocopie du recto de format A4, une photocopie de la notice d'utilisation à coller au verso et un carton rigide collé en sandwich entre les deux.
- une photocopie de chaque disque (le moyen qui portera la boule bicolore, et le petit à couronne zodiacale). Ces deux disques seront aussi collés sur du carton fort.
- deux rondelles de caoutchouc (ou de carton) pour séparer les disques.
- deux vis portant écrous et éventuellement rondelles pour assembler le tout et fixer la boule bicolore.
- une boule bicolore (modèle atomique H dont un hémisphère est noir).
- une demi-boule (bouton).
- éventuellement une petite boule à fixer sur l'extrémité de la vis centrale.

Réalisation de la maquette :

- 1 - Photocopier la page : schéma n°2, qui représente le plan Soleil-Terre-Lune (elle porte les deux couronnes de Lunes de différentes phases) et la notice d'utilisation.
- 2 - Coller ces deux photocopies au recto et au verso d'un carton rigide de format A4.
- 3 - Percer ce carton au centre T des couronnes (c'est la position de la Terre) pour y enfoncer l'axe de rotation des disques. Prévoir deux rondelles de caoutchouc pour séparer les disques. Cet axe pourra être une petite vis à métaux dont l'écrou bloquera les différents disques. Pour l'enjoliver, cette vis peut se terminer par une toute petite boule représentant la Terre, mais ce n'est pas nécessaire.
- 4 - Sur le recto de ce carton A4, fixer un bouton de veste (sphère ou mieux demi-sphère) au centre du cercle repéré par cette phrase : « *Fixer ici une boule qui représente le soleil à l'infini* ».
- 5 - Photocopier la page portant deux disques. Le plus grand (disque-support de la Lune) recevra une sphère blanche dont un hémisphère aura été repassé au feutre noir indélébile. Cette sphère bicolore, qui doit pouvoir tourner à frottements doux sur elle-même autour d'un axe (petite vis) fixé en L perpendiculairement au disque, est l'élément fondamental de la maquette : c'est elle qui indiquera à l'avance l'aspect de la Lune et qui permettra de la localiser. L'axe doit passer à la limite des deux hémisphères de couleurs différentes.
Pour réaliser cette sphère, on pourra par exemple détourner de sa fonction première un modèle d'atome H dont le trou permettra de fixer la petite vis à métaux servant d'axe de rotation.
- 6 - Coller chaque disque sur un carton rigide et découper en suivant le plus grand cercle. Découper aussi la fenêtre qui indique l'aspect de la Lune du jour (à côté du point L).
- 7 - Percer le centre des disques pour loger la vis qui représente la Terre.
- 8 - Percer sur le disque-support de la Lune le passage de la vis qui porte la boule bicolore au point L et fixer cette vis par deux écrous moyennement serrés (ne pas oublier l'étape n° 6 : si le disque n'a pas été renforcé par un carton rigide, la boule ne tiendra jamais...).
- 9 - Assembler les trois parties à l'aide de la vis centrale T.
- 10 - Pour l'utilisation, attendre une date favorable et s'en remettre à la notice collée au verso.

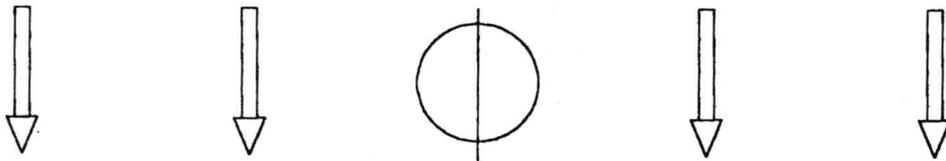
Notice d'utilisation pour une pêche réussie :

- 1 - **Afficher "l'âge de la Lune" en tournant le disque portant la sphère bicolore.**
Pour cela, compter le nombre de jours écoulés depuis la dernière Nouvelle Lune (souvent représentée par un disque noir sur les calendriers) et placer la boule bicolore à l'endroit où ce nombre est indiqué.
- 2 - **Situer correctement le jour et la nuit sur cette boule.**
Cela revient à faire tourner cette boule bicolore sur son axe sans bouger le disque jusqu'à ce que l'hémisphère clair soit face aux flèches parallèles qui représentent les rayons du Soleil situé à l'infini.
- 3 - **Situer la Lune et le Soleil par rapport aux étoiles du Zodiaque (facultatif).**
Cela se fait en faisant tourner le petit disque central, sans faire bouger le reste, jusqu'à ce que le segment TS indique le bon mois (chaque saison est partagée en trois secteurs qui représentent ces mois).
- 4 - **Orienter correctement la ligne ST.**
Comme le Soleil est représenté en relief sur cette maquette par un bouton (sphère ou mieux demi-sphère), ce bouton peut porter une ombre sur la plaque.
Il faut tenir la maquette à deux mains par les coins de la plaque A4 et la déplacer (sans changer les réglages précédents) jusqu'à ce que l'ombre portée du bouton ait la direction du rayon Soleil-Terre.
- 5 - **Viser la Lune.**
En fermant un œil, il faut essayer d'aligner l'autre œil, le centre T, et la boule bicolore. Si on a de la chance, la Lune apparaît au voisinage de cet alignement.
Si ce n'est pas le cas, faire tourner lentement la maquette autour de l'ombre portée ST déterminée lors de l'étape n°4.

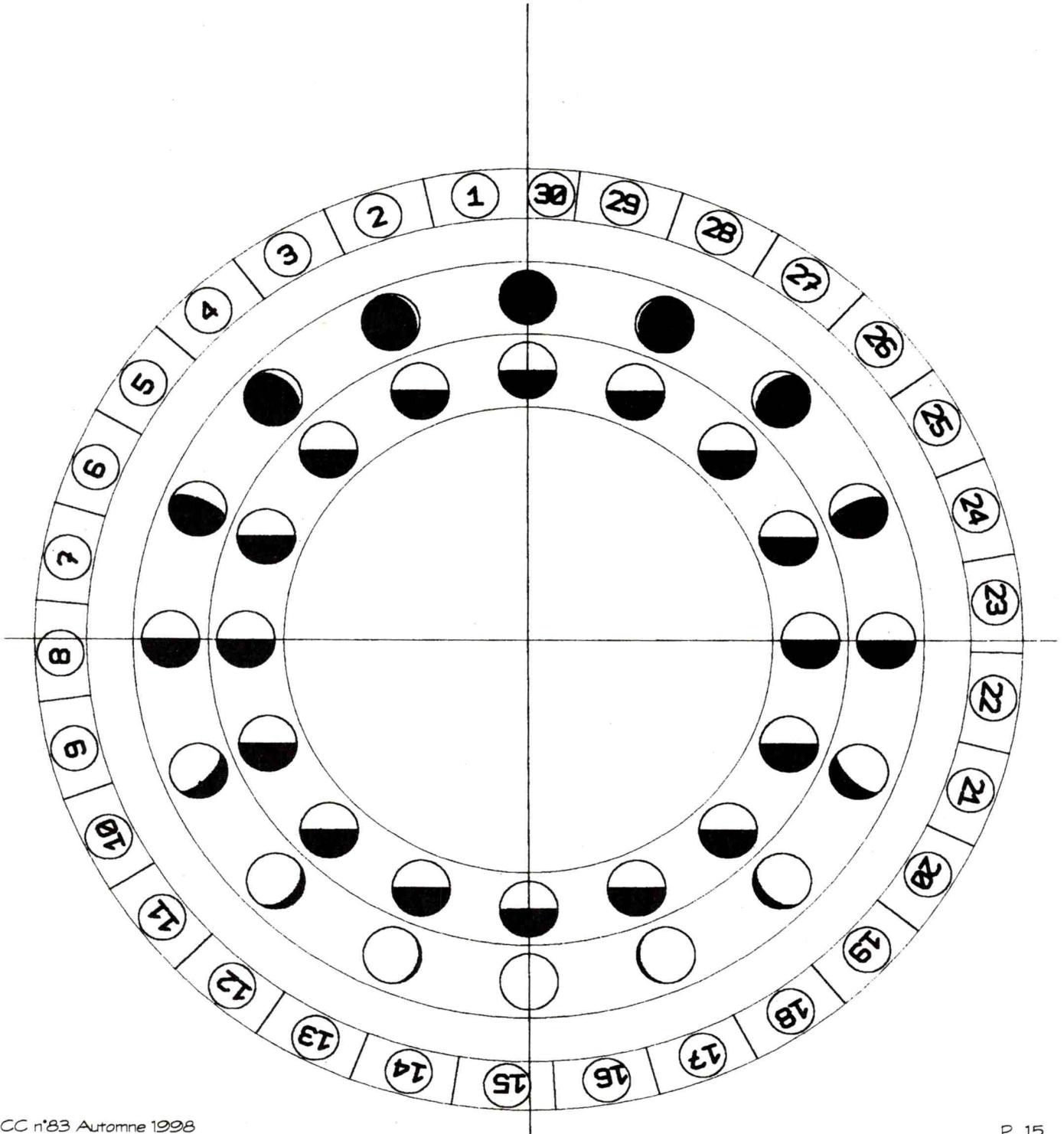
Normalement le miracle a lieu : brutalement la Lune apparaît juste à côté de la boule bicolore et elles ont la même phase, celle qui est indiquée dans la fenêtre !

Schéma n°2

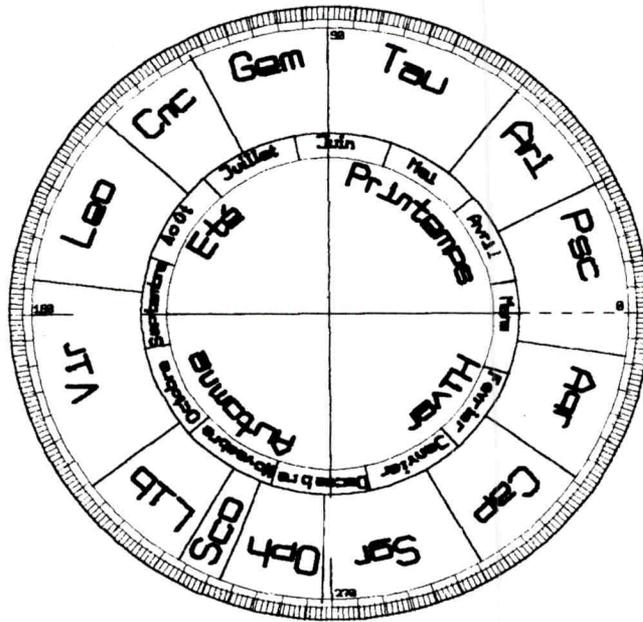
Comme la distance Terre - Lune est négligeable devant la distance Terre - Soleil les rayons du Soleil sont représentés par des droites parallèles.



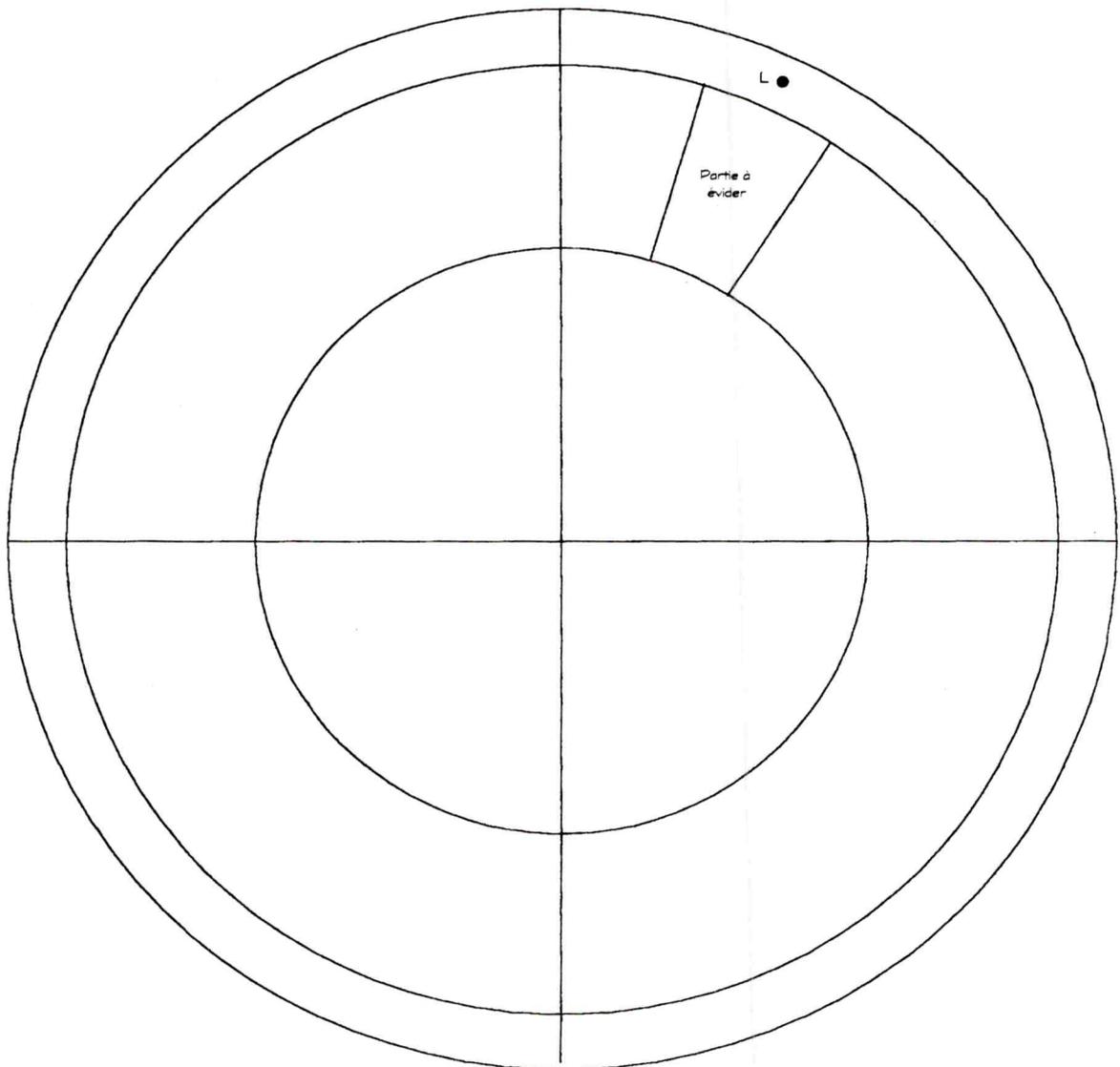
Fixer ici une boule qui représente le Soleil à l'infini



Disque du Zodiaque



Disque support de la Lune





Initiation aux instruments d'Astronomie

Christian Larcher

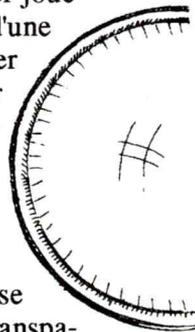
Un nombre sans cesse croissant de personnes s'inscrivent dans les clubs d'astronomie pour mieux connaître les "choses du ciel" et souvent pour apprendre à utiliser une lunette ou un télescope offert pour la fête de Noël et qui depuis prend la poussière dans le salon. Aussi dans notre club à l'Uranoscope de l'Île de France nous proposons des séances d'initiation qui comprennent une partie théorique et une partie expérimentale. Ce travail est utilisable en club scolaire.

On commence par se poser la question : à quoi sert une lunette ou un télescope ?

Pour répondre à cette question, on compare la surface de la pupille de l'œil bien dilatée dans l'obscurité avec la surface d'entrée de notre Céléstron. On trouve alors que dans l'instrument il entre environ 1 000 fois plus de lumière que dans notre œil seul.

1 - La lunette

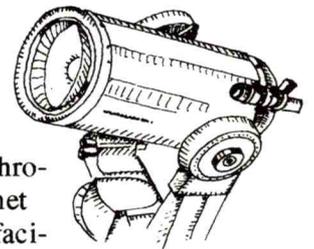
Elle comprend un objectif et un oculaire ; ce dernier joue seulement le rôle d'une loupe pour observer l'image donnée par l'objectif. On associe des verres en crown à base de plomb et très dispersifs, avec des verres en flint à base de calcium, très transparents et peu dispersifs afin d'éviter l'apparition d'aberrations chromatiques.



La première lunette construite par Galilée avait un diamètre de 2,5 cm c'est à dire inférieur d'un mm à celui d'une pièce de 2 francs (2,6 cm).

2 - Le télescope

Il fut inventé par Newton en 1668 qui utilisa un miroir en bronze. Le télescope permet d'éviter les aberrations chromatiques et permet d'atteindre plus facilement de grands diamètres.



Nous décrivons les différents types de télescopes : Newton, Cassegrain, Schmidt-Cassegrain en expliquant le rôle de la lame de Schmidt quand le miroir est sphérique.

Les points suivants concernent les différentes montures équatoriales de type "Allemande" ou à "fourche". Des indications sur la mise en station nécessitent quelques explications sur l'axe horaire et l'axe des déclinaisons ainsi que sur le rôle du moteur d'entraînement permettant de compenser l'effet résultant de la rotation de la Terre.

3 - Comment ça marche : expériences

Ces expériences ont pour objet d'expliquer le principe de base de fonctionnement d'une lunette. On passe ensuite facilement au principe de fonctionnement d'un télescope. On utilise 3 lentilles de focales différentes que l'on place successivement devant un objet lumineux (lettre F découpée dans du carton et recouverte d'un papier calque, devant une lanterne lumineuse).

1ère expérience : on place une lentille de 12,5 cm de focale à environ 13 centimètres devant l'objet lumineux. On obtient sur l'écran (à 2 ou 3 mètres plus loin) une image renversée grande et un peu floue sur les bords.

2ème expérience : on incline légèrement la lentille, on voit apparaître des irisations colorées (aberrations chromatiques).

3ème expérience : on utilise une lentille de 30 cm puis de 50 cm de focale. Il apparaît sur l'écran une image de plus en plus petite, de plus en plus lumineuse et de plus en plus nette. On observe que plus la focale est grande plus l'image est petite.

Ces expériences correspondent au cas d'un système du genre appareil de diapositives : l'image obtenue avec une lentille de petite distance focale est grande et renversée par rapport à l'objet diapositive.

Dans le cas d'une lunette astronomique l'objectif est très loin de la source lumineuse et très près de l'œil ou de l'écran. On recommence donc les expériences précédentes mais en plaçant cette fois la lentille près de l'écran (environ 12 cm pour la lentille de 12,5 cm de focale). On constate que l'image est toujours inversée, mais qu'il n'y a pratiquement plus d'irisations et que cette fois on obtient un phénomène inverse de celui des expériences précédentes :

plus la distance focale de la lentille est grande plus l'image est grande. On se doute alors que l'on cherchera à obtenir des objectifs constitués de focales toujours plus grandes pour obtenir de forts grossissements. Cela permet de comprendre pourquoi, à travers l'Histoire, les lunettes devinrent de plus en plus longues nécessitant des échafaudages impressionnants.

4 - Ouverture d'un instrument

L'ouverture d'un instrument se mesure par le diamètre de l'objectif. Plus l'ouverture est grande plus l'instrument est lumineux. Or il est important d'avoir un instrument lumineux pour observer des détails.

PLUS ON GROSSIT

UNE IMAGE PLUS CELLE-CI DEVIENT SOMBRE

Exemple : l'observation d'un timbre avec une loupe nécessite un bon éclairage. Avec un microscope il faut un éclairage puissant.

5 - Le grossissement

Il caractérise le rapprochement apparent de l'objet observé. A l'œil nu on verrait l'objet sous un angle a . Dans l'instrument d'optique on voit l'image sous un angle b . Le grossissement est donné par $G = a / b = F / f$ où F est la distance focale de l'objectif, et f celle de l'oculaire. Exemple pour le C8 (Célestron 8) : $F = 2\ 000$ mm. Avec un oculaire de 10 on a $G = F / f = 2\ 000 / 10 = 200$. On peut grossir bien plus mais plus on grossit plus l'image devient sombre et perd en netteté.

6 - Le rapport d'ouverture F / D

D est le diamètre d'ouverture.

Exemple pour le C8 :

$F = 2\ 000$ mm, $D = 200$ mm donc $F / D = 2\ 000 / 200 = 10$.

On dit aussi que le C8 est ouvert à $F / 10$ c'est à dire à $2\ 000 / 10 = 200$ mm = D .

Le rapport F / D est une constante de l'appareil qui détermine sa luminosité.

* Plus ce rapport est petit (ouverture grande) plus l'appareil est lumineux ce qui est particulièrement intéressant pour l'astrophotographie. Mais plus ce rapport est petit plus il y a de risques d'aberrations (déformations de l'image).

* Plus ce rapport est grand, c'est à dire pour un diamètre d'ouverture donné, plus la distance focale est grande, plus on verra de détails sur des objets lumineux ; c'est le cas des planètes, de la Lune ou du Soleil.

Dans un club on cherche un compromis ; par exemple pour le C8, $F / D = 10$.

Ceci permet d'observer les planètes mais aussi une partie du ciel profond.

* Plus le rapport F / D est petit plus l'appareil est lumineux et plus le "temps de pose photographique" est petit.

Si $F / D = 2$ à 3 on dit que le télescope est "rapide".

Si $F / D = 10$ à 15 on dit que le télescope est "lent".

Rapidité et grande qualité optique sont des caractéristiques contradictoires.

7 - Les jumelles

* Plus leur diamètre est grand plus elles reçoivent de lumière donc plus elles peuvent être lumineuses. Cependant la luminosité effective dépendra ensuite à diamètres égaux du grossissement des jumelles.

* La pupille de sortie (cercle oculaire) doit être de l'ordre de grandeur du diamètre de la pupille de l'œil.
exemple : jumelles 7 x 50 : grossissement : 7 fois et diamètre : 50 mm. Le diamètre de la pupille de sortie est donnée par le rapport $D / G = 50 / 7 = 7,14$ mm.

On a dans ce cas un bon compromis car on est proche du diamètre de la pupille de l'œil.

*** La luminosité**

Elle caractérise la lumière qui sort vers l'œil. Elle est proportionnelle au carré du diamètre de la pupille de sortie. Pour des "7 x 50" (grossissement : 7 et diamètre : 50) on a un diamètre de la pupille de sortie de 7,14 et donc une luminosité proportionnelle à :

$(7,14)^2 = 50,98 \text{ mm}^2$ ce qui constitue une bonne valeur.

*** Le champ**

C'est la portion d'espace visible dans les jumelles. Il est exprimé en degrés, exemple pour les "7x50" le champ est $50/7 = 7,1^\circ$ (soit 14 fois le diamètre de la pleine lune) ; il peut aussi être exprimé par la largeur du terrain visible à 1000 m dans l'instrument.

Le facteur 17,4 permet de passer des degrés à la distance de terrain à 1000 m ou le contraire (exemple toujours pour les "7 x 50" : $7,1^\circ$ permet de voir $7,1 \times 17,4 = 123,5 \text{ m}$ à 1000 m de distance).

*** Les jumelles utilisées en astronomie**

caractéristiques	pupille de sortie
7 x 50	7,1
8 x 56	7
10 x 50	5
11 x 80	7,2
12 x 80	6,7

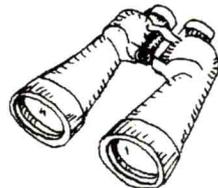
Cette présentation théorique des instruments et de leurs caractéristiques est suivie d'une familiarisation pratique. Elle vise l'acquisition des savoir-faire qui permettent de régler ces instruments de façon à les utiliser au mieux de leurs performances.

Quelques compétences à acquérir:

- savoir équilibrer un télescope ;
- savoir relier qualitativement grossissement et focale de l'oculaire ;
- savoir pointer à vue un objet quelconque de nuit ;
- savoir embrayer et débrayer le moteur d'entraînement ;
- savoir régler le télescope ;
- savoir utiliser la raquette, c'est à

- dire prévoir sur quel bouton il faut appuyer pour obtenir un déplacement désiré ;
- savoir retrouver les directions cardinales y compris avec un renvoi coudé ;
- savoir lire les éphémérides ;
- savoir utiliser un vernier ;
- savoir pointer de jour un objet en le repérant à l'aide de ses coordonnées. Il faut quand même choisir un objet très lumineux, par exemple Vénus, pour pouvoir l'observer de jour ;
- savoir mettre en station un télescope ;
- savoir observer sans danger le soleil.

La liste est loin d'être exhaustive. ■



L'université d'été d'astronomie de Gap 1998.

L'UEA de Gap a réuni sous un très beau ciel et dans la bonne humeur 50 stagiaires et 14 animateurs. Les cours et les activités pratiques se sont articulés autour de la préparation de l'éclipse du 11 août 1999. Ils ont donc eu essentiellement pour thème le Soleil, la Lune et leurs mouvements.

Durant ces six jours intenses il a fallu trouver du temps pour rédiger le compte-rendu exigé par le ministère. Il en résulte, pour chaque activité, une présentation synthétique accompagnée d'une réflexion faite par les stagiaires sur un projet de réalisation en classe ou en club (pour les trois niveaux : primaire, collège, lycée).

Ce travail est disponible sur le site web du CLEA :
<http://www2.ac-nice.fr/clea>

*L'annonce faite dans le n°80 sur l'ouverture du site était un peu prématurée :
 veuillez nous en excuser ; cette fois le site est réellement ouvert.*

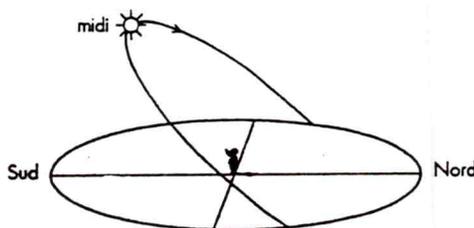


Comment déterminer la longitude de la Guadeloupe ?

Pierre Causeret

Déterminer sa longitude fut pendant longtemps pour les navigateurs le problème le plus difficile. Il ne fut résolu qu'à la fin du XVIII^e siècle avec l'invention d'horloges de précision. Les marins pouvaient alors apporter avec eux l'heure de Paris par exemple et comparer à tout moment leur heure locale avec celle de Paris. Le décalage donnait immédiatement la longitude par rapport au méridien de Paris. J'ai voulu refaire la même expérience en profitant du déplacement de nombreux métropolitains vers la Guadeloupe fin février à l'occasion de l'éclipse totale de Soleil.

L'heure solaire



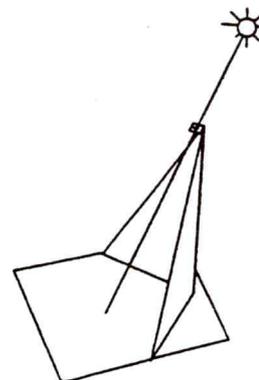
Elle se définit à partir du midi solaire. Il est midi solaire quand le Soleil passe dans le plan du méridien, plein Sud ici, à égale distance entre le lever et le coucher du Soleil

Les préparatifs

Le 19 février, je règle une montre à l'heure solaire de mon collège d'Echenon en Côte d'Or, grâce à une méridienne tracée avec un groupe d'élèves.

Le 21 février, 5 amis de la Société Astronomique de Bourgogne décollent vers la Guadeloupe, emportant dans leurs bagages une enveloppe format A5 contenant tout le matériel pour calculer leur longitude, à savoir :

- 1) La montre réglée à l'heure solaire d'Echenon.
- 2) Une plaque de 15 cm par 20 cm accompagnée de deux équerres et d'un œilleton qui, assemblés, donnaient à peu près le montage représenté à droite.

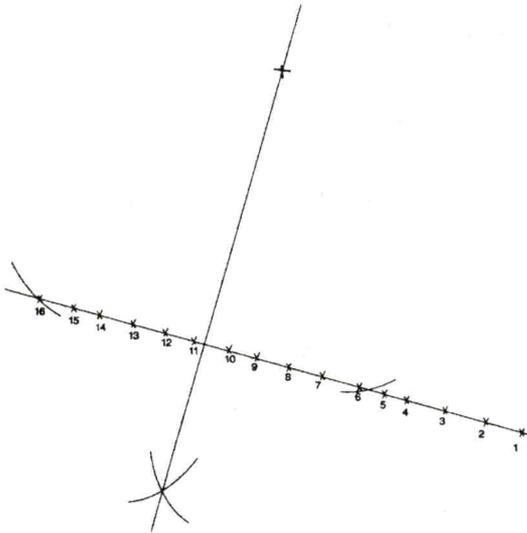


Le relevé

Le 27 février 1998 (le lendemain de l'éclipse), Anne-Lise, la fille d'un de nos astronomes amateurs, sort le matériel de son enveloppe, l'installe bien à plat et note consciencieusement à intervalle régulier la position de la tache lumineuse sur la plaque horizontale, sans oublier d'inscrire l'heure de la montre apportée.

Voici à gauche le relevé qu'elle a obtenu. La croix représente la base de l'œilleton.

A partir de ce relevé, la première étape consiste à trouver la direction Nord-Sud, ce qui revient à trouver l'axe de symétrie de cette courbe passant par la croix. Quelques tracés au compas permettent vite de l'obtenir.



Les calculs

On voit que le Soleil est passé sur la ligne Nord Sud (à midi solaire) entre les positions 10 et 11. En consultant les notes d'Anne-Lise, on trouve 16h19 pour la position 10 et 16h 29 pour la position 11 (en heure de la montre embarquée donc en heure solaire d'Echenon). Une règle de trois permet d'être plus précis et on trouve qu'il était midi solaire à la Guadeloupe (Soleil plein Sud) alors que l'heure solaire d'Echenon était 16h 26.

Il y a donc 0h 26 de décalage entre Echenon et la Guadeloupe.

Or, on sait que le décalage horaire provient des écarts de longitude : on a 24 h de décalage pour 360° donc 1h pour 15° et 1min pour $0,25^\circ$. 0h 26min correspondent à $4 \times 15 + 26 \times 0,25$ soit $66,5^\circ$ d'écart de longitude. **La Guadeloupe est donc à $66,5^\circ$ Ouest d'Echenon**

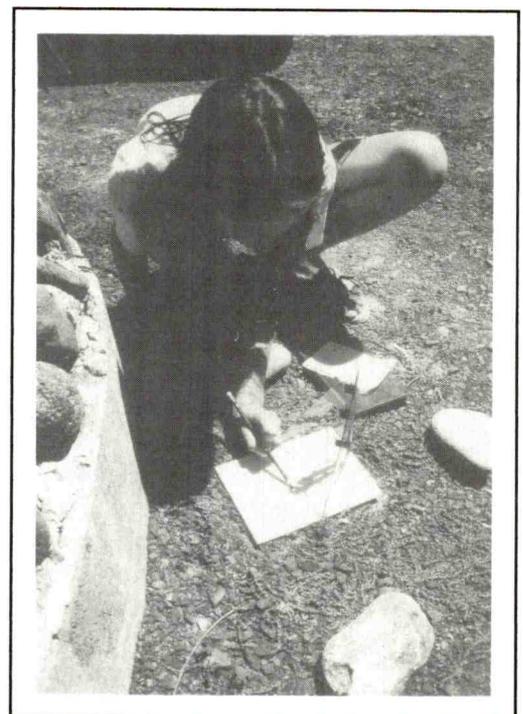
La précision du résultat

Avec ce type de matériel, installé approximativement de niveau, il est facile de faire une erreur de quelques minutes sur le midi solaire.

De plus, la Terre ne tourne pas bien rond et la durée du jour solaire peut varier de + ou - 30 s. C'est ce qui est à l'origine de l'équation du temps. Les heures ont été mesurées à 8 jours d'intervalle à Echenon et à la Guadeloupe. La montre étant réglée sur un jour moyen de 24h ne suivait pas exactement l'heure solaire d'Echenon. D'où une erreur supplémentaire. Par chance, à cette époque là, l'équation du temps varie très peu, le jour solaire ayant une durée relativement précise de 24 h.

La longitude d'Echenon est de $5,3^\circ$ Est : celle du lieu de l'observation à la Guadeloupe $61,7^\circ$ Ouest de Greenwich, soit 67° Ouest d'Echenon au lieu de $66,5^\circ$.

L'erreur a été d'environ un demi degré, ce qui correspond en temps à 2 minutes, et en distance à 50 km. Résultat pas si mauvais que ça vu le matériel utilisé. On a beaucoup mieux maintenant avec le GPS mais il est toujours amusant et instructif de vérifier que les anciennes méthodes fonctionnent...





Stabilité et Mécanique céleste

Christelle Dumas et Michel Bobin

Élève en classe prépa, Christelle Dumas nous présente le travail sur le thème "Systèmes dynamiques" qu'elle a effectué dans le cadre d'un TIPE durant l'année scolaire 96-97. Une version écrite de la totalité de la partie technique serait trop copieuse pour être publiée dans nos colonnes. Toutefois on trouvera dans l'annexe 2 le traitement des points de Lagrange, rédigé par Michel Bobin.

Le TIPE (Travail d'Initiative Personnelle Encadré) est une nouvelle épreuve créée à la suite de la réforme des classes préparatoires scientifiques. La plupart des concours aux Grandes Écoles l'ont mise en place pour l'année 1997. En particulier les Mines, Centrale et les ENSI se sont regroupés pour faire passer une épreuve commune.

Au début de l'année de Mathématiques Spéciales, l'élève choisit une matière entre deux ou trois proposées suivant la section. Pour ce qui est de la section MP, le choix se fait entre mathématiques, physique et informatique. A chaque matière est rattaché chaque année un thème, respectivement les systèmes dynamiques, la mesure et l'image pour l'épreuve de 1997.

Le travail de l'élève tout au long de l'année consiste d'une part à choisir un sujet approprié, à l'étudier, à préparer un exposé, et enfin à rédiger une fiche synoptique (cf. Annexe 1) qui doit résumer son travail. D'autre part il doit s'entraîner à lire des textes scientifiques rapidement et acquérir une culture sur le thème proposé. L'épreuve commune se présente ainsi : à partir de textes scientifiques ou de vulgarisation ayant trait au thème général et fournis par le jury, le candidat

prépare pendant 2h15 un exposé. Puis il présente au jury constitué de deux personnes deux exposés de 10 min : celui préparé dans l'année et celui proposé par le jury. Chacun est suivi de 10 min de questions. La fiche synoptique a pour but de rappeler au jury la teneur de l'exposé personnel. L'élève dispose d'un tableau et d'un rétroprojecteur pour ses exposés.

Les documents que l'on m'a proposés le jour de mon oral étaient regroupés sous le titre "information et complexité" et comportaient un texte scientifique et un texte plus culturel extrait de "La Recherche".

J'ai choisi comme sujet personnel "stabilité en mécanique céleste", qui relève du thème mathématique, malgré son titre.

Dans la première partie, je définis la stabilité d'une solution d'un système différentiel, je fournis une condition nécessaire et suffisante pour que toutes les solutions d'un système linéaire soient stables, puis je donne des théorèmes qui permettent de déduire la stabilité d'une solution d'un système non linéaire de la stabilité de la même solution du système linéaire associé.

La suite de mon exposé consiste à étudier des applications de cette notion de stabilité dans le domaine de la mécanique céleste.

Annexe 1 : fiche synoptique

Nom de l'établissement : Lycée Pasteur C.A.C. et de l'établissement et Signature :
Ville : Neuilly-sur-Seine
Je soussigné
atteste que la description ci-dessous, correspond au travail effectué en
TIPE durant l'année par l'élève Christelle DUMAS
Date :/...../.....

Épreuve Commune de TIPE

FICHE SYNOPTIQUE

à remettre en deux exemplaires lors de l'épreuve

N° d'inscription : || || || || Nom : DUMAS
Prénoms : Christelle Marie
Candidat Filière : MP Thème : Systèmes dynamiques

Stabilité et mécanique céleste

L'étude du système solaire a toujours été un aiguillon puissant dans le développement de la mécanique. Les plus grands noms de la science y sont attachés : Kepler, Newton, Lagrange, Laplace... La question de stabilité touche à la philosophie, à l'histoire, à la physique et aux mathématiques. Je m'intéresse ici à quelques techniques mathématiques sous-jacentes à ce problème.

Travail de recherche

Les livres que j'ai cités dans la bibliographie proviennent du centre de documentation de l'INRIA de Rocquencourt et des bibliothèques de l'Université Pierre et Marie Curie. D'autre part, je me suis servie du logiciel de calcul formel Maple afin de faire les calculs, les graphes et toutes sortes de représentations nécessaires à mes applications.

Plan de l'exposé

1- Comportement asymptotique de systèmes linéaires et non linéaires.

11- Stabilité des solutions d'une équation différentielle.
Dans ce paragraphe, je m'attache à définir différents types de stabilité de solutions d'une équation différentielle.

12- Classification des systèmes linéaires 2×2 .
Il s'agit ici d'étudier la stabilité des solutions de l'équation différentielle $x' = Ax$, où A est une matrice carrée inversible d'ordre 2. On obtient ainsi six portraits de phase types.

13- Extension aux systèmes linéaires n -dimensionnels.
Dans certains cas, le comportement asymptotique des solutions du système au voisinage d'un point critique est le même que celui des solutions du système linéarisé ; je précise donc dans cette partie des conditions suffisantes qui permettent d'étendre les résultats acquis dans le cas linéaire.

2- Étude de la libration de la Lune.

21- Mise en place des équations.

On étudie le système constitué de deux corps en interaction gravitationnelle, l'exemple pris est celui de la Terre et de la Lune. Pour cela on fait l'hypothèse que l'un des axes liés à la Lune est constamment perpendiculaire à son orbite.

Afin d'exprimer le théorème du moment cinétique, on établit le moment de la force gravitationnelle.

L'équation obtenue s'appelle équation d'Euler.

22- Étude au voisinage d'un point critique.

On reconnaît l'équation du pendule. Dans un cas, on obtient deux valeurs propres réelles opposées, l'approximation de la linéarisation donne alors l'instabilité du système. Dans l'autre, les valeurs propres sont imaginaires pures et on ne peut pas conclure à long terme. On obtient alors une condition nécessaire de stabilité.

3- Étude des points de Lagrange.

31- Mise en place des équations.

Le problème restreint des trois corps, dans lequel l'un des corps est de masse négligeable devant celle des deux autres, se modélise dans un repère tournant lié aux corps massifs. On établit le système régissant le mouvement du corps sans masse.

32- Étude au voisinage d'un point critique.

Les points critiques sont de deux types : les points d'Euler, qui sont alignés avec les deux corps massifs et les points de Lagrange qui forment chacun un triangle équilatéral avec ces deux corps. La linéarisation du système au voisinage de ces points permet une étude partielle de leur stabilité.

Références :

(1) ARGYRIS, J., FAUST, G., HAASE, M. *An exploration of chaos : an introduction for natural scientists and engineers*. No.7 in Texts on computational mechanics. North-Holland, 1994.

(2) CODDINGTON, E. A., AND LEVINSON, M. *Theory of Ordinary Differential Equations*. McGraw-Hill, 1955.

(3) GUTHMANN, A. *Einführung in die Himmelsmechanik und Ephemeridenrechnung*. Bibliographisches Institut, 1994.

(4) HESTENES, D. *New foundations for classical mechanics*. Reidel, 1987.

(5) KRASNOV, M., KISSELEV, A., AND MAKARENKO, G. *Recueil de problèmes sur les équations différentielles ordinaires*, Edition Mir, 1981.

Outre l'étude de la libration de la Lune qui permet d'expliquer pourquoi l'on ne voit qu'une face de celle-ci, j'ai abordé le problème restreint des trois corps. Ce problème consiste à considérer deux corps massifs M_1 et M_2 en interaction et qui font subir à un troisième corps de masse quasi-nulle un champ d'attraction gravitationnelle. En supposant que les deux corps massifs sont en trajectoire circulaire et uniforme, le système différentiel régissant le mouvement du troisième corps s'établit aisément. A ce problème, Euler a trouvé trois positions d'équilibre (les points sont les extrema de la fonction potentiel appliquée au corps) : ces points sont alignés avec M_1 et M_2 . Lagrange, plus tard, en a trouvé deux autres qui forment chacun un triangle équilatéral avec M_1 et M_2 .

On se demande si ces points d'équilibre sont stables, c'est-à-dire si la solution constante, égale à ce point critique est stable.

La linéarisation permet de conclure dans le cas des points d'Euler : ils sont instables. Elle ne permet pas de traiter complètement le cas des points de Lagrange :

Annexe 2 :

Etude des points de Lagrange dans le problème restreint des trois corps.

Plus d'un labo de physique s'orne d'un dessin humoristique dont la légende est " Si l'expérience ne marche pas, avant d'incriminer l'électrodynamique quantique, penser à vérifier les fusibles". Ce principe de simplicité, dit "rasoir d'Occam", n'est cependant pas toujours facile à respecter : comme le savent les lecteurs de ces Cahiers, Alexis-Claude Clairaut, fit, en 1743, une lecture devant l'Académie : "l'orbite de la Lune dans le système de M. Newton" ; puis suggéra une loi d'attraction en $kR^{-2} + k'R^{-4}$ avant de se ressaisir en 1749. D'Alembert aussi avait pensé à $kR^{-2} + k'R^{-1}$. On sait depuis Poincaré que même avec la bonne vieille loi de Newton en kR^{-2} le problème des trois corps n'admet pas de solution générale.

1 - Mise en place des équations.

Les trois corps M_1, M_2, M_3 sont supposés de masses respectives $m_1, m_2, 0$ (fig.1). C'est le "problème restreint des trois corps". Leurs distances mutuelles sont $R = M_1M_2, r_1 = M_1M_3, r_2 = M_2M_3$. Le potentiel attractif exercé en M_3 par M_1 et M_2 a donc pour expression :

$$U(r_1, r_2) = G \times \left(\frac{m_1}{r_1} + \frac{m_2}{r_2} \right) \quad (1)$$

on peut simplement démontrer que si le rapport des masses de M_1 et M_2 est compris entre 0,04 et 25, il ne peut y avoir stabilité (Cf. Annexe 2).

Cependant, l'expérience vient à notre secours : en 1966, on a observé un astéroïde, Achille formant un triangle équilatéral avec le Soleil et Jupiter ; on en a découvert d'autres qui forment deux groupes que l'on a nommés les Troyens (avec Hector) et les Grecs (avec Patrocle). Il peut donc y avoir stabilité des points de Lagrange... En 1990, on a découvert Euréka, astéroïde formant un triangle équilatéral avec Mars et le Soleil.

Enfin, dans les années 60, des scientifiques ont trouvé une démonstration du fait que si le rapport des masses de M_1 et M_2 est supérieur à 25, les points de Lagrange sont stables, sauf peut-être pour un nombre fini de valeurs de ce rapport.

La partie technique de mon exposé ne prétend pas donner réponse à tout, puisque la linéarisation ne permet pas toujours de conclure. Cependant, elle permet de montrer une application d'une théorie un peu ardue et abstraite.

Si l'on fait en outre, comme ci-après, l'hypothèse que le mouvement de révolution de M_1 et M_2 autour de leur barycentre O est circulaire uniforme, on parle du "problème restreint et circulaire des trois corps".

On sait que l'interaction gravitationnelle :

$$\vec{F}(r) = -G \frac{m_1 m_2}{r^2} \frac{\vec{r}}{r}$$

amène, dans le cas elliptique, (période T , demi-grand axe a) à la troisième loi de Kepler :

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\mu}{Gm_1 m_2}} \times a^{\frac{3}{2}}$$

où $\mu = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}$ est la "masse réduite" du système.

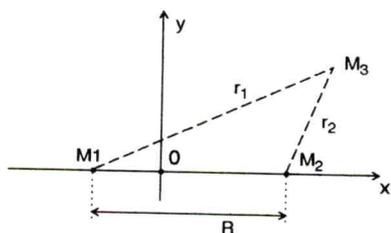
Dans le cas circulaire uniforme (avec $a = R$), la vitesse angulaire $\omega = 2\pi / T$ est donc :

$$\omega = \sqrt{\frac{G \cdot (m_1 + m_2)}{R^3}} \quad (2)$$

On se place alors dans le repère tournant, non galiléen, d'origine $O = \text{Bar} \{(M_1, m_1) ; (M_2, m_2)\}$ lié aux deux corps massifs où l'on a $M_1 : (-\mu R / m_1 ; 0 ; 0)$

$M_2 : (\mu R / m_2 ; 0 ; 0)$ $M_3 : (x ; y ; 0)$ (fig.1).

fig.1



On se restreint donc encore au cas où les conditions initiales font que le mouvement de M_3 a lieu dans le plan de ceux de M_1 et M_2 . On a alors :

$$\begin{aligned} r_1^2 &= (x + \mu R / m_1)^2 + y^2 \\ \text{et } r_2^2 &= (x - \mu R / m_2)^2 + y^2 \end{aligned} \quad (3)$$

Dans ce référentiel tournant avec la vitesse angulaire $\vec{\omega} : (0 ; 0 ; \omega)$, pour une particule de masse m repérée par $\vec{r} : (x ; y ; 0)$, le théorème de Coriolis sur la composition des accélérations s'exprime par :

$$\vec{r}_{gal} = \vec{r} + 2\vec{\omega} \wedge \dot{\vec{r}} + \vec{\omega} \wedge (\vec{\omega} \wedge \vec{r}) \quad (4)$$

où \vec{r}_{gal} est l'accélération dans le repère galiléen

et \vec{r} celle dans le repère tournant ;

$\vec{\Gamma}_c = 2\vec{\omega} \wedge \dot{\vec{r}} : (-2\omega y ; 2\omega x ; 0)$ est l'accélération de Coriolis ;

$\vec{\Gamma}_e = \vec{\omega} \wedge (\vec{\omega} \wedge \vec{r}) : (-\omega^2 x ; -\omega^2 y ; 0)$ est l'accélération d'entraînement.

La relation fondamentale de la dynamique,

$$m(\ddot{\vec{r}} + \vec{\Gamma}_c + \vec{\Gamma}_e) = m \cdot \vec{\nabla} U_{(r)}, \text{ fournit par projection}$$

$$\text{le système : } \begin{cases} \ddot{x} - 2\omega \dot{y} - \omega^2 x = \frac{\partial U}{\partial x} \\ \ddot{y} + 2\omega \dot{x} - \omega^2 y = \frac{\partial U}{\partial y} \end{cases} \quad (5)$$

que l'introduction du "potentiel efficace"

$$V(r_1 ; r_2) = U(r_1 ; r_2) + \omega^2 (x^2 + y^2) / r \quad (6)$$

permet de réécrire :

$$\begin{cases} \ddot{x} - 2\omega \dot{y} = \frac{\partial V}{\partial x} \\ \ddot{y} + 2\omega \dot{x} = \frac{\partial V}{\partial y} \end{cases} \quad (7)$$

Les points du plan xOy vérifiant $dV / dx = dV / dy = 0$ que l'on appelle les "points de Lagrange" sont des points d'équilibre, en ce sens qu'une particule qui est abandonnée avec une vitesse nulle y demeure au repos, son accélération étant nulle.

Remarquons ici que l'usage dans la littérature est de taire l'apport d'Euler. On s'y conformera désormais.

2 - Localisation des points de Lagrange.

(1) (2) et (6) fournissent la relation :

$$V(r_1, r_2) = G\left(\frac{m_1}{r_1} + \frac{m_2}{r_2}\right) + G \frac{(m_1 + m_2)}{r^3} \cdot \frac{x^2 + y^2}{r} \quad (8)$$

Par dérivation (3) donne (8₁) et (8₂)

$$\begin{cases} \frac{\partial r_1}{\partial x} = \frac{1}{r_1} (x + \mu R / m_1) & \frac{\partial r_2}{\partial x} = \frac{1}{r_2} (x - \mu R / m_2) \\ \frac{\partial r_1}{\partial y} = \frac{y}{r_1} & \frac{\partial r_2}{\partial y} = \frac{y}{r_2} \end{cases}$$

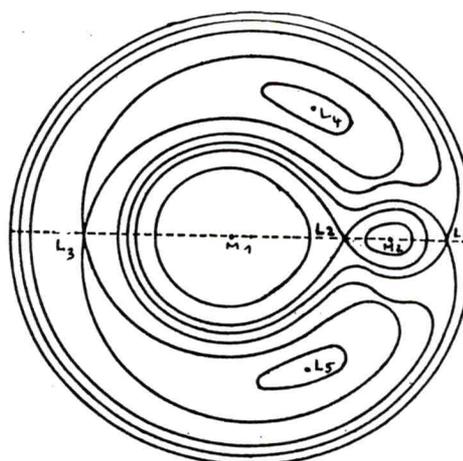
et (8) fournit alors (8₃) et (8₄)

$$\begin{cases} \frac{1}{G} \cdot \frac{\partial V}{\partial x} = x \cdot \left(\frac{m_1 + m_2}{R^3} - \left(\frac{m_1}{r_1^3} + \frac{m_2}{r_2^3} \right) \right) + \mu R \cdot \left(\frac{1}{r_2^3} - \frac{1}{r_1^3} \right) \\ \frac{1}{G} \cdot \frac{\partial V}{\partial y} = y \cdot \left(\frac{m_1 + m_2}{R^3} - \left(\frac{m_1}{r_1^3} + \frac{m_2}{r_2^3} \right) \right) \end{cases}$$

Les points de Lagrange sont donc les solutions du système, formé des relations (9₁) et (9₂) :

$$\begin{cases} x \cdot \left(\frac{m_1 + m_2}{R^3} - \left(\frac{m_1}{r_1^3} + \frac{m_2}{r_2^3} \right) \right) + \mu R \cdot \left(\frac{1}{r_2^3} - \frac{1}{r_1^3} \right) = 0 \\ y \cdot \left(\frac{m_1 + m_2}{R^3} - \left(\frac{m_1}{r_1^3} + \frac{m_2}{r_2^3} \right) \right) = 0 \end{cases}$$

fig.2



points de Lagrange et lignes de niveau du champ V

• Pour $y \neq 0$

$$(9_2) \text{ fournit : } \frac{m_1 + m_2}{R^3} - \left(\frac{m_1}{r_1^3} + \frac{m_2}{r_2^3} \right) = 0 \quad (10)$$

qui reportée dans (9₁) livre $r_2 = r_1$ (11) d'où par (10) $R = r_1 = r_2$ ce qui correspond aux points de Lagrange L_4 et L_5 .

• pour $y = 0$: en posant $\theta = m_2 / m_1$ et $u = 1 + \theta$ (12)

l'équation (9₁) se simplifie en :

$$x(u^2 r_1^2 r_2^2 - uR^3(r_2^3 + \theta r_1^3)) + \theta R^4(r_1^3 - r_2^3) = 0 \quad (13)$$

$$\text{et (3) en } r_1 = |x + \theta R / u| \text{ et } r_2 = |x - R / u| \quad (13_1)$$

On se limitera à la recherche de L_1 ($R / u = x_{M_2} < x$)

pour laisser au lecteur le loisir de traiter L_2 ($\theta R / u = x_{M_1} < x < x_{M_2} = R / u$) puis L_3 ($x < x_{M_1} = -\theta R / u$).

(13) devient alors :

$$u^2 \cdot (x - x_{M_1}) \cdot (x - x_{M_2}) \cdot P_\theta(x) = 0 \text{ avec}$$

$$P_\theta(x) = u^4 x^5 + 2u^3(\theta - 1)Rx^4 + u^2(\theta^2 - 4\theta + 1)R^2x^3 - u(\theta^3 + 5\theta^2 + \theta + 1)R^3x^2 - (2\theta^4 + 4\theta^3 - \theta^2 - 4\theta - 2)R^4x - u^2(\theta^2 - \theta + 1)R^5 \quad (14)$$

dont on peut montrer qu'il possède une unique racine réelle $> x_{M_2}$.

Par exemple pour le système $M_1 = \text{Terre}$; $M_2 = \text{Lune}$ on a $\theta = 0,0123$ et $P_\theta(x) = 0$ admet la solution $x \approx R \cdot 1,15625$. La fig. 2 donne pour $M_1 = \text{Soleil}$ et $M_2 = \text{Jupiter}$ quelques équipotentielles de V et les positions des cinq points de Lagrange.

3 - Résumé mathématique sur les systèmes différentiels.

• Une solution ψ du système différentiel (SD) :

$\frac{dz}{dt} = F(t, z)$, définie pour $t \geq 0$, est dite stable lorsque

$\forall \varepsilon > 0 \exists \delta > 0 ; \forall \varphi$ solution de (SD) :

$$|\varphi(0) - \psi(0)| \leq \delta \Rightarrow \forall t \geq 0 |\varphi(t) - \psi(t)| \leq \varepsilon$$

et asymptotiquement stable si de plus :

$$\lim_{t \rightarrow +\infty} (\varphi(t) - \psi(t)) = 0$$

•• la stabilité de la solution d'un système linéaire

$\frac{dz}{dt} = Az$ avec A matrice inversible de dimension (n, n) ,

dépend des signes des parties réelles des valeurs propres $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$.

$\exists i : \text{Re } \lambda_i > 0 : \rightarrow$ solution instable

$\forall i : \text{Re } \lambda_i \leq 0 : \rightarrow$ solution stable

$\forall i : \text{Re } \lambda_i < 0 : \rightarrow$ solution asymptotiquement stable

••• pour un système non linéaire (S) :

$\frac{dz}{dt} = A \cdot z + f(t, z)$ de système linéaire associé (L) :

$\frac{dz}{dt} = Az$, avec A comme dans ••, et $f(t, z) = o(z)$ uniformément pour $t \geq 0$:

$\exists i : \text{Re } \lambda_i > 0 : \rightarrow$ solution nulle instable

$\forall i : \text{Re } \lambda_i < 0 : \rightarrow$ solution nulle asymptotiquement stable.

Dans les autres cas la considération du système linéarisé (L) ne permet pas de conclusion générale.

4 - Stabilité des points de Lagrange.

En un point de Lagrange $L(x_0, y_0)$ on pose $x = x_0 + \xi$
 $y = y_0 + \eta$ et le système différentiel (7) se réécrit :

$$\begin{cases} \ddot{\xi} - 2\omega \dot{\eta} = \frac{\partial V}{\partial x}(x_0 + \xi, y_0 + \eta) \\ \ddot{\eta} + 2\omega \dot{\xi} = \frac{\partial V}{\partial y}(x_0 + \xi, y_0 + \eta) \end{cases} \quad (15)$$

$$\text{On note : } \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = V_{xx} ; \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} = V_{yy} ; \frac{\partial^2 V}{\partial x \partial y} = V_{xy}$$

La formule de Taylor :

$$\begin{cases} \frac{\partial V}{\partial x} = \xi \cdot V_{xx} + \eta \cdot V_{xy} + O(\xi^2 + \eta^2) \\ \frac{\partial V}{\partial y} = \xi \cdot V_{xy} + \eta \cdot V_{yy} + O(\xi^2 + \eta^2) \end{cases}$$

permet d'écrire le système différentiel (15) sous une forme matricielle $\frac{d}{dt} Z = AZ + B$ adaptée au § 3 •••

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \xi \\ \eta \\ \dot{\xi} \\ \dot{\eta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ V_{xx} & V_{xy} & 0 & 2\omega \\ V_{xy} & V_{yy} & -2\omega & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \xi \\ \eta \\ \dot{\xi} \\ \dot{\eta} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ O(\xi^2 + \eta^2) \\ O(\xi^2 + \eta^2) \end{pmatrix}$$

avec comme polynôme caractéristique :

$$\chi_A(\lambda) = \det(A - \lambda I) = \lambda^4 + (4\omega^2 - V_{xx} - V_{yy})\lambda^2 + (V_{xx}V_{yy} - V_{xy}^2) \quad (16)$$

Les dérivations de (8₃) et (8₄) donnent les équations (17₁), (17₂), (17₃) :

$$\begin{cases} \frac{1}{G} V_{xx} = \frac{m_1 + m_2}{R^3} - \left(\frac{m_1}{r_1^3} + \frac{m_2}{r_2^3} \right) + 3 \cdot \left(\frac{(xm_1 + \mu R)^2}{m_1 r_1^5} + \frac{(xm_2 - \mu R)^2}{m_2 r_2^5} \right) \\ \frac{1}{G} V_{yy} = \frac{m_1 + m_2}{R^3} - \left(\frac{m_1}{r_1^3} + \frac{m_2}{r_2^3} \right) + 3y^2 \left(\frac{m_1}{r_1^5} + \frac{m_2}{r_2^5} \right) \\ \frac{1}{G} V_{xy} = 3y \left(\frac{m_1 x + \mu R}{r_1^5} + \frac{m_2 x - \mu R}{r_2^5} \right) \end{cases}$$

On va (d'abord dans le cas L_4 et L_5 ensuite dans celui de L_1, L_2 et L_3) s'intéresser aux parties réelles des valeurs propres de A connaissables par χ_A , car elles peuvent donner la clé de la stabilité (cf. § 3 •••)

• en L_4 on a $r_1 = r_2 = R$; $y = \frac{R\sqrt{3}}{2}$;

$x = \frac{\mu R}{2} \cdot \left(\frac{1}{m_1} - \frac{1}{m_2} \right)$ donc on obtient (18₁), (18₂), (18₃) :

$$\begin{cases} \frac{1}{G} \cdot V_{xx} = \frac{3(m_1 + m_2)}{4R^3} \\ \frac{1}{G} \cdot V_{yy} = \frac{9(m_1 + m_2)}{4R^3} \\ \frac{1}{G} \cdot V_{xy} = \frac{3\sqrt{3}(m_1 - m_2)}{4R^3} \end{cases}$$

ce qui donne pour le discriminant Δ du trinôme en λ^2 qu'est $\chi_A(\lambda)$:

$$\begin{aligned} \Delta &= (G^2 m_1^2 / R^6) \cdot (\theta^2 - 25\theta + 1) \\ &= (G m_1 / R^3)^2 (\theta - \theta_1) (\theta - \theta_2) \end{aligned} \quad (19)$$

avec $\theta_1 = \frac{25 - 3\sqrt{69}}{2} \approx 0,04$ et $\theta_2 = \frac{25 + 3\sqrt{69}}{2} \approx 25$.

→ pour $\theta \in]\theta_1 ; \theta_2[$ on a donc $\Delta < 0$. Les 4 racines complexes sont alors non nulles, conjuguées deux à deux, opposées deux à deux. Il y en a donc 2 qui ont une partie réelle strictement positive.

Il y a donc instabilité des points de Lagrange L_4, L_5 .

→ pour $\theta \in]0 ; \theta_1[\cup]\theta_2 ; +\infty[$ on a $\Delta > 0$ et, grâce à (18) on a la factorisation (20) :

$$\chi_A(\lambda) = \left(\lambda^2 + \frac{Gm_1}{2R^3}(1+\theta + \sqrt{\theta^2 - 25\theta + 1})\right) \left(\lambda^2 + \frac{Gm_1}{2R^3}(1+\theta - \sqrt{\theta^2 - 25\theta + 1})\right)$$

qui montre que les quatre valeurs propres de A sont imaginaires pures. En conséquence, **la linéarisation ne permet pas de conclure quant à la stabilité des points de Lagrange L_4, L_5 .**

Une théorie mathématique plus sophistiquée, répondant aux questions que Poincaré avait débroussaillées, permettrait de conclure à la **stabilité** de L_4, L_5 pour θ dans cette zone, c'est le **théorème KAM** de 1962 (Kolmogorov, Arnold, Moser).

L'expérience montre, du reste, cette stabilité. Citons les 417 (à ce jour) planètes Troyennes (pour le couple Soleil / Jupiter, $\theta \approx 1047$), l'astéroïde 5261 Eurêka (pour le couple Soleil / Mars, $\theta \approx 3 \times 10^7$).

Pour les couples Soleil / Saturne, et Soleil / Uranus, les récentes recherches américaines sont sans succès à cette date.

Après les points L_4, L_5 (dits "triangulaires") passons à L_1, L_2, L_3 (dits "colinéaires"). Rappelons que la sonde d'observation solaire SOHO est en L_2 (dit "intérieur"). Notre numérotation est celle de Szebehely (biblio), il n'y a pas unanimité dans la littérature.

•• en L_1 on avait (cf. 13) :

$$x \cdot \left[\frac{u}{R^3} - \left(\frac{1}{r_1^3} + \frac{\theta}{r_2^3} \right) \right] + \frac{\theta}{u} R \cdot \left(\frac{1}{r_2^3} - \frac{1}{r_1^3} \right) = 0 \text{ et } y = 0.$$

$$x > 0 ; \theta = m_2 / m_1 > 0 ; r_1 - r_2 = R > 0 ; u = 1 + \theta > 0$$

$$\text{donc } \frac{u}{R^3} - \left(\frac{1}{r_1^3} + \frac{\theta}{r_2^3} \right) < 0.$$

Mais (17₁₂₃) se réécrivent ici, puisque $x + \theta R / u = r_1$ et $x - \theta R / u = r_2$, (22₁, 22₂, 22₃) :

$$\begin{cases} \frac{1}{Gm_1} \cdot V_{xx} = \frac{u}{R^3} - \left(\frac{1}{r_1^3} + \frac{\theta}{r_2^3} \right) + 3 \left(\frac{1}{r_1^3} + \frac{1}{r_2^3} \right) = \frac{\mu}{R^3} + 2 \left(\frac{1}{r_1^3} + \frac{\theta}{r_2^3} \right) \\ \frac{1}{Gm_1} \cdot V_{yy} = \frac{u}{R^3} - \left(\frac{1}{r_1^3} + \frac{\theta}{r_2^3} \right) \\ V_{xy} = 0 \end{cases}$$

avec $V_{xx} > 0$ et $V_{yy} < 0$.

On a donc $V_{xx} \cdot V_{yy} - V_{xy}^2 < 0$ ce qui garantit (cf.16) la factorisation :

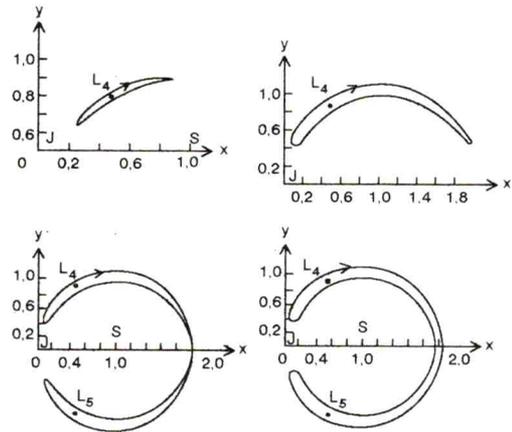
$$\chi_A(\lambda) = (\lambda^2 - \Lambda_1) (\lambda - \sqrt{\Lambda_2}) (\lambda + \sqrt{\Lambda_2})$$

Λ_1 et Λ_2 réels positifs.

La valeur propre $\lambda = \sqrt{\Lambda_2}$ est réelle positive d'où l'instabilité.

Il y a donc instabilité des points de Lagrange L_1, L_2, L_3 .

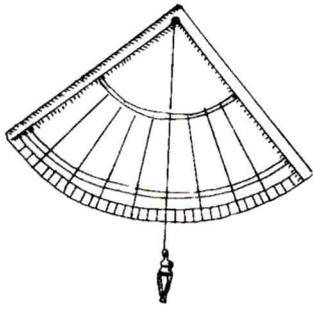
fig.3



quelques mouvements possibles pour les Trojens
($M_J / M_S = 95875 \times 10^{-9}$)

Bibliographie

- ♦ G. PASCOLI : Eléments de Mécanique Céleste ; Colin 1993
- ♦ I. PETERSON : Le Chaos dans le Système Solaire ; Belin, Pour la Science, 1995.
- ♦ J. LASCAR et C. FROESCHLE : Le Chaos dans le Système Solaire, La Recherche 232, mai 1991.
- ♦ J.L. CHABERT et A. DAHAN DALMEDICO : H. Poincaré, le précurseur, La Recherche 232, mai 1991.
- ♦ V. SZEBEHELY : Theory of Orbits ; Academic Press 1967 & Adventures in Celestial Mechanics ; Univ of Texas Press, Austin.
- ♦ B.B. & J. HUBBARD : Loi et Ordre dans l'Univers : le théorème KAM ; pour la Science 188, juin 93. ■



L'histoire de la vitesse de la lumière

Robert Garnier, observatoire de Lyon
avec la complicité de Georges Paturel

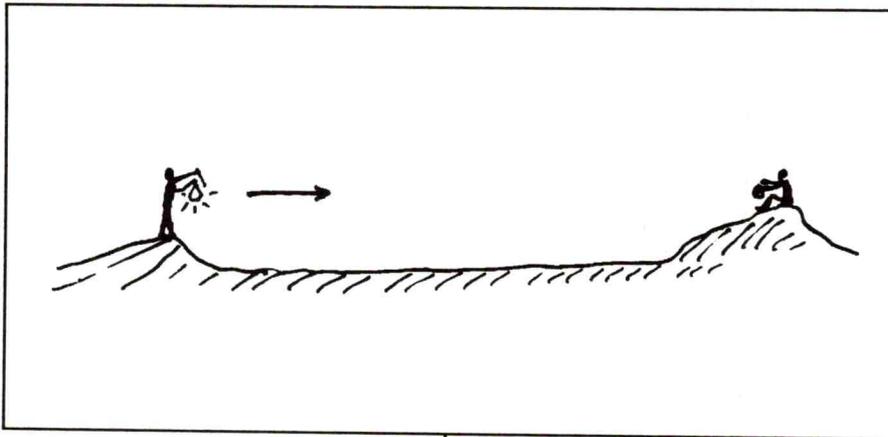
Nous publions cette passionnante histoire sous forme de feuilleton. Le premier épisode est consacré aux mesures du XVII^e et du XVIII^e siècles dominées par Römer et Bradley.

Il serait sans doute difficile de répondre à la question de savoir depuis quand les hommes savent que la lumière se propage. Après tout, que la lumière soit en mouvement n'est pas une évidence pour quiconque observe la nature. Au contraire s'il tombe sous le sens que la lumière solaire, par exemple, baigne notre environnement, il n'est pas contre pas du tout évident que quelque chose se propage du Soleil jusqu'à nous. On objectera peut-être qu'à la suite de Démocrite, un certain nombre de «physiciens» admettent que la lumière est constituée de jets de particules de diverses couleurs se déplaçant en ligne droite et que s'il y a quelque chose en mouvement, ce mouvement implique l'idée de vitesse. Mais ce serait oublier qu'à cette époque le concept de vitesse reste extrêmement flou. Il suffit pour s'en convaincre de se rappeler les fameux «paradoxes» de Zénon d'Elée.

Il ne semble pas que l'on se soit posé de question concernant la vitesse de la lumière avant la fin du seizième siècle ou le début du dix-septième. Peut-être allait-il de soi que cette vitesse était infinie ? Toujours est-il que c'est à cette époque qu'apparaissent deux «écoles», l'une qui affirme que la lumière se propage avec une vitesse infinie et à laquelle

se rallient Johannes Kepler (1571-1630) et René Descartes (1596-1650), l'autre attribuant à la lumière une vitesse finie et dont Galileo Galilei dit Galilée (1564-1642) se fait le champion. Quoi qu'il en soit, ces positions ne reposent que sur «l'intime conviction» de ceux qui les adoptent et non sur une approche expérimentale, et pour cause puisque nous n'en sommes alors qu'à l'aube de l'expérimentation en matière de science et que comme nous le verrons, les moyens de l'époque ne permettent pas de trancher entre les deux hypothèses.

Il convient de souligner que l'Optique n'en est alors qu'à ses débuts. Il s'agit avant tout d'une Optique Géométrique reposant uniquement sur l'hypothèse de l'existence de rayons lumineux et sur les lois de Snellius-Descartes. Or ces hypothèses ne font appel à aucune supposition concernant tant la manière dont la lumière se propage (à l'époque c'est la théorie des corpuscules de lumière qui prévaut) que sa vitesse de propagation. Cette dernière question, si elle n'avait trouvé sa solution antérieurement, ne se serait posée de manière incontournable que lors des premiers développements de l'Optique Physique, c'est-à-dire au début du dix-neuvième siècle.



1 - Galilée tente la première détermination de la vitesse de la lumière.

Si nous ignorons la raison pour laquelle Galilée suppose que la vitesse de la lumière est finie, nous connaissons par contre fort bien tous les détails de sa tentative de mesure réalisée en 1638 puisqu'il les décrit dans son «Discours sur deux sciences nouvelles» publié à Leyde au soir de sa vie alors qu'il vit retiré à Arcetri où l'Inquisition l'a assigné à résidence.

L'expérience est extrêmement simple. Deux opérateurs que nous appellerons A et B se trouvent chacun sur le sommet d'une colline, la distance qui les sépare étant voisine de 1 kilomètre et demi selon certains auteurs, de 3 kilomètres selon d'autres. L'un et l'autre sont munis d'une lanterne qu'ils masquent avec leur main. A écarte brusquement sa main de manière que B voit la lumière émise par la lanterne de A. Dès que B perçoit ce signal lumineux, il démasque à son tour sa propre lanterne. A note le temps écoulé entre le moment où il a écarté sa main et celui où il reçoit le signal de B. En divisant la distance de 3 kilomètres par le temps ainsi mesuré, Galilée en déduit la vitesse de propagation de la lumière.

Il est clair que le temps de réaction des deux opérateurs lors de la perception des signaux lumi-

neux est considérable devant celui mis par la lumière pour franchir une distance de 3 kilomètres et qui est de 10 millièmes de seconde. Galilée en a parfaitement conscience et après avoir longuement fait «répéter» les deux opérateurs, il note ces temps de réponse de manière à corriger sa mesure, après quoi il trouve que la vitesse de la lumière est infinie. Il est trop fin expérimentateur pour ne pas saisir le peu de fiabilité de sa méthode et le peu de signification du résultat obtenu. Il laisse encore la porte ouverte en disant que si la vitesse de la lumière n'est pas infinie, elle est du moins trop grande pour être mesurable. Bien qu'elle ne permette pas de trancher la question de la finitude de la vitesse de la lumière, l'expérience de Galilée a au moins le mérite de montrer que dans l'hypothèse selon laquelle cette vitesse est très grande sans pour autant être infinie, on n'a le choix qu'entre deux solutions : ou bien on allonge le trajet lumineux, ou bien il faut être en mesure d'estimer avec une grande précision des intervalles de temps très courts.

2 - La vitesse de la lumière a une valeur finie.

Ce n'est certes pas un amour débordant pour la science qui, à l'instigation de Colbert, conduit Louis XIV à fonder l'Observatoi-

re de Paris en 1667. Le célèbre ministre a en effet d'autres idées en tête puisqu'il a, pour des raisons d'ordre commercial, décidé d'édifier un empire colonial, ce qui a pour conséquence immédiate de mettre la France en concurrence avec l'Angleterre qui possède depuis bien longtemps déjà une solide vocation maritime. Il lui faut donc disposer à la fois d'une flotte commerciale et d'une flotte de guerre capables d'affronter avec succès les escadres anglaises. A l'époque l'une des difficultés majeures rencontrées par ceux qui, à bord des navires, ont charge de faire le point est de connaître l'heure avec une précision suffisante. Bien que Christian Huygens (1629-1695) ait significativement amélioré les performances de l'horloge à balancier, l'encliquetage à rochet est encore inconnu et les «gardetemps» n'offrent pas une fiabilité suffisante. La meilleure des solutions consiste encore à s'adresser aux phénomènes célestes et pour cela il faut disposer de bonnes éphémérides. Mais qui serait capable de les établir, sinon un bon astronome muni de bons instruments et travaillant dans un bon observatoire ? La construction de l'Observatoire de Paris s'achève en 1672 et l'Angleterre ne tarde pas, pour la même raison, à imiter la France puisque cinq années plus tard, son souverain Charles II ordonne l'érection de celui de Greenwich.

Rien ne destinait a priori Ole Römer (1644-1710) à attacher son nom à la première détermination de la vitesse de la lumière et même rien ne lui aurait laissé supposer qu'un jour il travaillerait à l'Observatoire de Paris sous la houlette du premier Cassini. Compatriote de Tycho Brahé, il commence très jeune sa carrière d'astronome par un véritable travail d'archiviste :

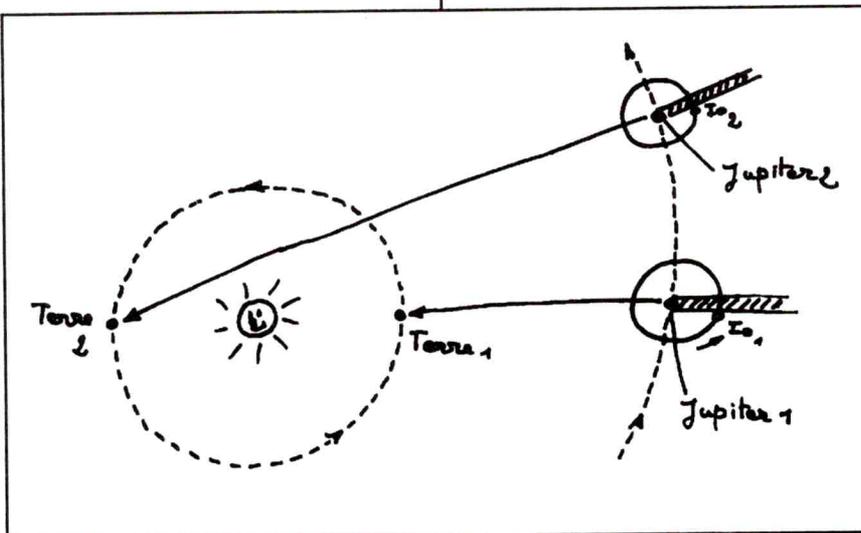
il est chargé de classer les manuscrits de son illustre prédécesseur. Il travaille donc dans son Danemark natal lorsqu'en 1671, il fait la connaissance de l'abbé Jean Picard, un élève de Gassendi qui se trouve en mission dans ce pays afin de déterminer la longitude et la latitude exactes de l'ancien observatoire de Tycho Brahé à Uraniborg et d'y mesurer la longueur du pendule y battant la seconde. L'idée sous-jacente est d'utiliser cette longueur comme «unité de mesure universelle». Séduit par la personnalité du jeune Römer, Picard lui conseille de se rendre à Paris où s'achève la construction de l'Observatoire. Römer accepte et arrive à Paris où il devient, pour des raisons que nous ignorons, précepteur du Dauphin auquel il enseigne les mathématiques. A ce qu'il semble, il ne rejoindra qu'ensuite l'Observatoire qu'il quittera en 1681 lorsqu'il sera rappelé au Danemark par le roi Christian V afin d'occuper une chaire de mathématiques à l'Université de Copenhague.

Dès que Perrault en a achevé la construction, l'Observatoire de Paris voit arriver dans ses murs l'élite du monde scientifique d'alors. A côté des observations astronomiques on s'y livre à nombre d'expériences de physique portant sur des sujets aussi

variés que la thermométrie, la chute des corps, la météorologie ou la mesure de la vitesse du son, cette dernière étant effectuée sous la direction de l'abbé Picard. Ne perdant pas de vue que la raison d'être de l'établissement est de fournir des éphémérides à la marine royale, des astronomes au nombre desquels Römer s'attellent à la tâche. Au moins trois raisons militent en faveur du choix des satellites de Jupiter pour établir des éphémérides nautiques. D'abord cette planète se trouve toujours dans des régions du ciel voisines de l'écliptique et pour cela est facilement observable sur tous les océans où évoluent alors les escadres. Ensuite, les satellites de Jupiter sont brillants, donc aisément repérables avec un instrument modeste d'usage commode à bord d'un navire. Enfin les périodes des satellites galiléens de Jupiter sont assez courtes (de 1,77 jour pour Io à 16,69 jours pour Callisto), ce qui fait que leurs occultations par Jupiter sont fréquentes. Si l'on admet que le mouvement de ces astres autour de la planète est keplérien, on dispose là d'un «garde-temps» d'une précision remarquable. Pour établir les éphémérides en question il suffit d'observer les occultations des satellites joviens sur une durée suffisamment longue pour en déduire leur fréquence et être ensuite en

mesure de les prédire. C'est ce fastidieux travail d'observation et d'analyse des données que Cassini confie à Ole Römer.

Au cours des années 1675-1676 Römer porte son attention sur les éclipses de Io. C'est le satellite le plus proche de la planète et donc celui dont la période de révolution est la plus courte (troisième loi de Kepler). Il ne tarde pas à découvrir que le rythme des éclipses de Io présente des irrégularités et que l'écart entre une éclipse prédite et celle réellement observée peut atteindre dans certains cas 22 minutes. En fait on sait aujourd'hui que l'écart maximal qu'il pouvait observer n'est que de 17 minutes environ (16 minutes et 42 secondes pour être plus précis). Plusieurs historiens ont écrit que Römer donne pour cet écart maximal cette valeur de 17 minutes. C'est inexact ; pour des raisons non précisées dans la littérature, il se trompe bel et bien de 5 minutes mais cela ne change pas grand chose à l'histoire. Il remarque d'autre part que la distribution des écarts mesurés n'est pas aléatoire et que les éclipses sont d'autant plus en avance sur les prévisions que la distance séparant la Terre de Jupiter est plus petite et d'autant plus en retard que cette distance est plus grande. Römer comprend que le phénomène ne peut s'expliquer que s'il admet que la lumière se propage à une vitesse finie, l'observateur n'enregistrant une éclipse qu'au bout du temps mis par la lumière pour franchir la distance séparant Jupiter de La Terre. Comme, par suite de la rotation des deux planètes autour du Soleil cette distance varie, cela explique les écarts temporels entre les prévisions et les observations¹.



L'histoire officielle prétend que Römer attribue l'écart maximal de 22 minutes au temps qu'il faut à la lumière pour franchir une distance égale au diamètre de l'orbite terrestre et qu'il obtient une mesure de sa vitesse de propagation en divisant cette distance par 22 minutes. On affirme même qu'il aurait trouvé la valeur de 212 000 kilomètres par seconde et nombreux sont les auteurs qui citent cette « mesure de la vitesse de la lumière par Römer ». La vérité est que Römer n'a jamais rien publié de tel. Dans le mémoire² à l'Académie des Sciences qu'il présente le 21 Novembre 1676 il se borne à montrer comment l'observation des satellites de Jupiter met un point final au vieux problème de la finitude de la vitesse de la lumière. Précisons qu'à cette époque, l'intérêt d'une mesure de cette vitesse ne se fait pas encore sentir ; il faudra attendre près d'un siècle pour que François Arago devenu directeur de l'Observatoire de Paris en fasse, pour des raisons que nous préciserons alors, l'un des impératifs majeurs de la physique.

Comme cela arrive souvent lorsque se fait jour une idée nouvelle dans un domaine scientifique, le résultat de Römer est accueilli avec plus de circonspection que d'enthousiasme. Si l'on excepte Isaac Newton, la majorité de ses contemporains restent fidèles à une lumière se propageant instantanément. Pour la petite histoire, il est intéressant de souligner qu'au nombre de ses détracteurs Römer a la surprise de compter son propre Directeur Jean-Dominique Cassini qui, après avoir cru un moment à la possibilité d'une vitesse de propagation de la lumière finie, rejette finalement l'idée de son mouvement. Bien sûr ce ne sont pas les observations de Römer qui sont remises en cause, mais l'interprétation qu'il donne des écarts entre les prévisions des

éclipses et leurs observations. D'aucuns imaginent que ce phénomène pourrait s'expliquer en admettant que les orbites des satellites galiléens présentent de très grandes excentricités, d'autres n'imaginent rien du tout et préféreraient invoquer une cause encore inconnue. Et pendant une cinquantaine d'années chacun campe sur ses positions.

Aujourd'hui, alors que la mesure précise de la vitesse de la lumière au laboratoire n'est plus considérée comme un exploit, sa détermination à partir de l'observation des occultations des satellites de Jupiter ne présente guère plus qu'un intérêt historique. Les valeurs les plus récentes obtenues par cette méthode trouvées dans la littérature font état d'une vitesse de 298 800 kilomètres par seconde. C'est un résultat approché à 0,3% par défaut. Il est d'ailleurs peu probable qu'on puisse l'améliorer dans un avenir proche car cette précision somme toute médiocre au regard de celle fournie par les mesures de laboratoire résulte de l'incertitude sur la valeur des dimensions de l'orbite terrestre.

3 - En découvrant l'aberration de la lumière, Bradley confirme le travail de Römer

Ce milieu du dix-septième siècle est décidément très fertile en rebondissements scientifiques. Depuis un certain temps déjà les étoiles ont cessé d'être des joyaux sertis sur une sphère de cristal tournant autour de la Terre une fois par jour. Si elles ont fini par se muer en autant de soleils, chacune d'elles ne continue pas moins d'occuper une position immuable sur la sphère céleste qu'on appelle pour cela la « sphère des fixes ». C'est à cette époque que le « découvreur » de Römer, l'abbé, Jean Picard (1620-1682) réalise,

en collaboration avec Adrien Auzout (1622-1691) (tous deux appartiennent à la « fournée » des 21 premiers membres de l'Académie Royale des Sciences, fondée à Paris en 1666 par Louis XIV, sur la proposition de Colbert), le micro-mètre à fils mobiles destiné initialement à la mesure du diamètre apparent des planètes. Puis tous deux remplacent dans les instruments destinés aux mesures angulaires les simples alidades à pinnules alors en service par des lunettes munies de leur nouveau micromètre. Ces deux perfectionnements techniques vont dès lors conférer aux mesures angulaires une précision encore inégalée. C'est cette instrumentation améliorée qui permet à Jean Picard puis à d'autres astronomes après lui de détecter un curieux mouvement annuel qui affecte l'ensemble des étoiles observées. Il ne semble pas que Picard poursuive ses investigations plus avant. Il est vrai que ce travail est antérieur à la découverte de Römer et que l'interprétation de tels mouvements aurait alors constitué un problème pour le moins épineux. Cette découverte de Picard mérite cependant d'être soulignée car on attribue souvent la découverte des mouvements des étoiles sur la voûte céleste à Halley. En fait la découverte de Halley date de 1718 et est donc postérieure à celle de Picard ; d'autre part, elle concerne le mouvement propre des étoiles qui n'a rien de périodique et donc rien à voir avec la découverte de Picard.

C'est sans doute bien avant le dix-huitième siècle que l'on a acquis la conviction qu'en dépit des apparences, la voûte céleste pouvait avoir une profondeur, c'est-à-dire que toutes les étoiles ne se trouvent pas à une même distance du Soleil. Il pouvait en effet sembler évident qu'une étoile est d'autant plus proche qu'elle est plus brillante.

Mais on savait aussi que par suite de la rotation de la Terre autour du Soleil, les étoiles les plus proches ne doivent pas se projeter toujours à la même place sur le fond stellaire constitué par les plus lointaines mais décrire annuellement des petites orbites elliptiques.

Ce n'est qu'une simple question de géométrie et le fait que ce déplacement apparent des étoiles proches sur la sphère des fixes connu aujourd'hui sous le nom de «parallaxe» ne puisse pas être mis en évidence ne laissait pas d'intriguer les astronomes, fussent-ils les coperniciens les plus convaincus. Il est clair que si, dès la publication par Nicolas Copernic (1473-1543) de son modèle héliocentrique, on avait été en mesure d'observer ce phénomène, l'héliocentrisme n'aurait pas mis près d'un siècle pour s'imposer définitivement. On imaginait mal à l'époque que les étoiles les plus brillantes, donc les plus proches, puissent être encore suffisamment lointaines pour que leur parallaxe ne soit pas décelable avec les alidades alors utilisées.

L'histoire n'a pas retenu le nom de tous ceux qui au cours de la seconde moitié du seizième siècle et pendant tout le dix-septième tentèrent sans succès de mesurer les parallaxes stellaires. En 1726 James Bradley (1693-1762) qui succédera plus tard à Halley dans ses charges d'Astronome Royal et de directeur de l'Observatoire de Greenwich reprend en collaboration avec son ami Samuel Moleynieux (ou Molynieux) le vieux problème de la mesure des parallaxes stellaires. Dans un premier temps, ils concentrent leurs efforts sur la seule étoile Gamma de la constellation du Dragon. C'est un objet qui présente le double avantage d'être brillant et de passer au zénith de Greenwich. Les déplacements angulaires attendus étant très petits, ils s'assurent de la fixité

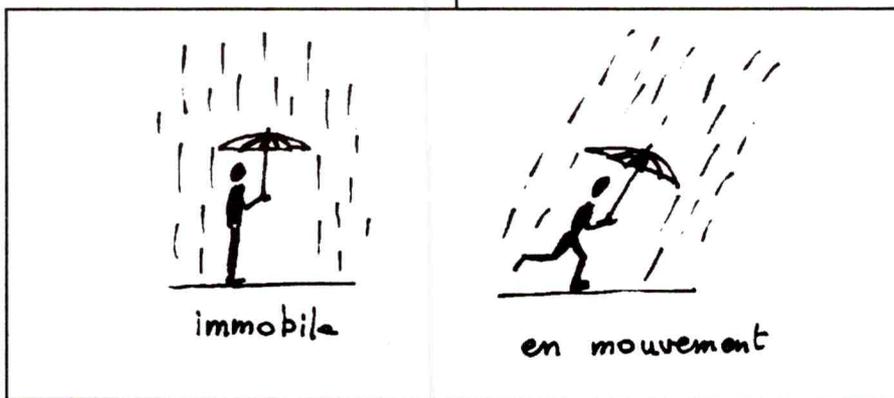
de la direction visée en arrimant solidement leur télescope à une cheminée. Leurs efforts sont couronnés de succès puisqu'ils observent que gamma Draconis décrit bien annuellement une petite ellipse. L'ennui c'est que toutes les étoiles du champ, y compris les plus lointaines, décrivent elles aussi des orbites elliptiques et que ces orbites ont des demi-grands axes ayant tous la même longueur apparente (actuellement cette grandeur est de 20,47 secondes d'arc) alors qu'ils s'attendaient à ce que, conformément aux prévisions, la longueur de ce demi-grand axe soit d'autant plus petite que l'étoile visée est plus lointaine.

Mais ceci ne constitue pas le seul élément de surprise pour Bradley et Moleynieux. En effet la géométrie du problème prévoit que le mouvement parallactique d'une étoile sur la sphère céleste doit, à tout moment s'effectuer dans une direction perpendiculaire à celle du mouvement de la Terre sur son orbite. Or le mouvement observé par Bradley et son compagnon est, à tout instant dirigé suivant la direction du mouvement de la Terre, donc à 90 degrés de la direction attendue. Il leur apparaît clairement qu'il ne peut s'agir là que d'un phénomène inconnu n'ayant rien à voir avec la parallaxe et que Bradley nomme «aberration des étoiles». Aujourd'hui on lui donne le nom d'aberration de la lumière. C'est

seulement un siècle plus tard, en 1838, que Friedrich Bessel (1784-1846) disposera d'une instrumentation suffisamment élaborée pour être en mesure de déterminer la première parallaxe stellaire.

Bradley fournit pour la première fois l'explication du phénomène observé dans une lettre adressée à Halley alors Astronome Royal, datée de Septembre 1728 qui sera lue à la «Royal Society of London» l'année suivante au mois de Janvier. Ses idées concernant la nature de la lumière sont celles héritées de Newton. Pour lui la lumière est constituée d'un courant de particules qui, dans un milieu homogène, se déplacent en ligne droite. Il n'hésite donc pas à leur appliquer la loi de composition des vitesses comme il le ferait pour des gouttes de pluie. En l'absence de vent, un observateur immobile constate qu'elles tombent verticalement. S'il se met à courir, il est surpris de constater que quelle que soit la direction dans laquelle il court la pluie lui arrive toujours de face et que pour ne pas se mouiller, il doit maintenir son parapluie d'autant plus incliné vers l'avant qu'il court plus vite.

Ce phénomène banal n'est pas à imputer à un comportement facticieux de la pluie qui chercherait à importuner les promeneurs mais à un simple théorème de cinématique qui régit la composition des vitesses respectives des gouttes de pluie et du coureur.



Si la Terre était immobile par rapport aux étoiles, Bradley n'aurait rien observé du tout. Somme toute, le résultat qu'il obtient présente un triple intérêt.

Il établit d'une part que la Terre est en mouvement par rapport aux étoiles, les ellipses observées ne pouvant être expliquées que par un mouvement de révolution de la Terre autour du Soleil. Si, en 1729, il s'était encore trouvé un astronome pour douter du bien fondé de l'héliocentrisme, l'expérience de Bradley aurait dû suffire à le convaincre. En second lieu, si la vitesse de la lumière provenant des étoiles avait été infinie, aucun mouvement apparent de l'ensemble de ces astres sur la sphère céleste tel que celui observé par Bradley n'aurait été décelable. La découverte de Bradley, en ce qu'elle établit la finitude de la vitesse de la lumière confirme donc, et d'une manière indépendante, le résultat obtenu par Römer à partir de l'observation des occultations des satellites de Jupiter. Enfin, force est en effet d'admettre que l'Univers est bien plus vaste que ce que l'on avait soupçonné jusqu'alors puisque malgré la précision des mesures astrométriques atteignant quelques secondes d'arc, la détection des parallaxes stellaires reste encore hors de portée.

Revenons à notre promeneur immobile sous la pluie qui tombe verticalement avec une vitesse V par rapport au sol. Lorsqu'il se met à courir avec une vitesse v dans une direction quelconque, s'il veut éviter de se mouiller, il est obligé d'incliner son parapluie devant lui d'un certain angle α (alpha) par rapport à la verticale. Cela signifie concrètement pour notre coureur que la pluie ne tombe pas verticalement mais arrive dans la direction suivant laquelle il a dû incliner son para-

pluie. Cet angle α est appelé l'angle «d'aberration» de la pluie. Sa mesure est liée aux vitesses V et v par la relation : $\tan \alpha = v / V$.

Imaginons maintenant un observateur qui se trouverait sur le Soleil. En première approximation le Soleil est immobile par rapport aux étoiles et notre homme observerait γ -Draconis par exemple, dans une certaine direction. Si maintenant ce même observateur revient sur Terre, il est entraîné par celle-ci dans son mouvement orbital et il en résulte qu'il se déplace à la vitesse v de la Terre sur son orbite par rapport aux étoiles. Il voit donc γ -Draconis dans une direction différente de celle qu'il avait repérée lorsqu'il se trouvait sur le Soleil. De même que le promeneur devait incliner son parapluie, l'astronome doit, de son côté, incliner son télescope d'un certain angle d'aberration α . Les vitesses c de la lumière et v de la Terre sur son orbite sont liées par une relation identique à celle écrite pour l'aberration de la pluie : $\tan \alpha = v / c$.

Au moment où Bradley découvre et explique l'aberration de la lumière (1728), les estimations des dimensions de l'orbite terrestre se sont singulièrement affinées sous l'impulsion de Cassini, le «patron» de Römer. En 1672, Richer à Cayenne et Cassini, Picard ainsi que Römer à Paris s'attellent à une détermination de la parallaxe de la planète Mars qui doit les conduire par le biais de la troisième loi de Kepler à une réévaluation de la distance Terre-Soleil. Les résultats de cette estimation ne seront publiés que douze ans plus tard, en 1684. Il est intéressant de noter qu'au moment où Römer annonce qu'il a démontré la finitude de la vitesse de la lumière (1676), il ne peut pas avoir connaissance de la révision des

dimensions de l'orbite terrestre qui n'interviendra que huit ans plus tard. Tout au plus peut-il savoir que les premiers prédépouillements indiquent que celles-ci ont été jusqu'ici grossièrement sous-estimées. Par contre en 1728, Bradley utilise une distance Terre-Soleil de 138 millions de kilomètres pour calculer la vitesse v de la Terre sur son orbite. Il mesure l'angle d'aberration α avec une précision qui, pour certaines étoiles atteint 3,5% et dispose alors de tous les éléments lui permettant de calculer la vitesse c de la lumière qu'il trouve égale à 303 000 kilomètres par seconde.

De nos jours la détermination de la vitesse de la lumière à partir de l'aberration des étoiles ne présente plus qu'un intérêt historique. Avec les données les plus récentes, on obtient une valeur de 298 500 kilomètres par seconde. Il s'agit d'un résultat médiocre, la vitesse cherchée étant sous-estimée de 3% environ. Comme pour ce qui a été dit à propos de la «méthode de Römer» la cause en est à rechercher dans une connaissance insuffisante des dimensions exactes de l'orbite terrestre.

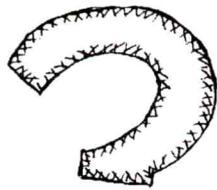
Notes de la rédaction

- 1 - voir le TP : "la vitesse de la lumière et Römer" (J. Sert ; CC57).
- 2 - ce mémoire est reproduit dans l'article : "la découverte de la vitesse finie de la lumière par Römer." (M. Bobin ; CC67).

Indications bibliographiques

- 1 - A SPECTACLE IN TWO ACTS WITH A PROLOGUE AND AN EPILOGUE, American Journal of Physics 53 (7), July 1985.
- 2 - RÖMER ET LA VITESSE DE LA LUMIÈRE, table ronde du CNRS, juin 1976 (éd. Vrin 1976).
- 2 - JEAN PICART ET LES DEBUTS DE L'ASTRONOMIE DE PRÉCISION AU XVIII^e SIECLE, colloque du tricentenaire (éd. CNRS 1987).

suite et fin dans le n°84 ■



À propos de la formation des enseignants

Gilbert Walusinski

Depuis qu'il y a des écoles, on parle de réformer l'enseignement. Le plus souvent pour énoncer de grands principes, ce qui est bon, mais sans attacher toute l'importance à l'action même d'enseigner, c'est à dire justement ce que vit l'enseignant dans sa classe.

L'actualité nous a valu, ces derniers mois, maintes déclarations officielles et encore plus de commentaires médiatiques qui ont eu le don d'irriter beaucoup d'enseignants aux prises avec les réalités scolaires. Il est toujours désagréable d'entendre le bruit des donneurs de leçons, qui est d'autant plus irritant que ses auteurs sont loin, en distance et en temps, des choses quotidiennes d'une classe de CP, de Troisième ou de Première.

Il faut laisser les donneurs de leçon parler comme ils l'entendent. Écoutons les calmement et même avec attention car il peut leur arriver d'avancer de bonnes idées. Mais ne polémiquons pas avec eux, nous avons beaucoup et mieux à faire.

Profitons de notre position privilégiée au sein de la machine éducative, celle que malheureusement je n'occupe plus en raison de mon âge, une classe normale d'école, de collège ou de lycée. C'est là que, pendant 38 années scolaires, j'ai à peu près appris comment enseigner des mathématiques à des lycéens, sans pouvoir prétendre avoir fait des progrès mais en tout cas sans avoir, lors des débuts en 1938, bénéficié d'aucune formation pédagogique initiale.

Cela résultait d'une conception généralement admise à l'époque (et je ne suis pas certain que ce soit une idée définitivement abandonnée) que le titulaire d'une licence ou

d'une agrégation dans telle discipline avait les qualités requises pour l'enseigner. La preuve que cette conviction est encore partagée par beaucoup de gens, je la vois dans les critiques adressées aux chercheurs en didactique qui, soit dans certains IREM soit dans certains IUFM heurteraient les personnes convaincues que toute recherche en pédagogie est superflue. J'ai entendu un grand mathématicien - qui fut aussi un excellent professeur au niveau universitaire - déclarer qu'il ne croyait pas à la pédagogie, que pour bien enseigner il suffit que le maître soit solide sur les connaissances à transmettre et qu'il soit clair et précis dans son exposé. Il est vrai que le don de communication que tout le monde n'a pas de naissance, lui l'avait.

Sous diverses appellations correspondant à des formules également diverses, IPES, IRESP, IUFM, une certaine formation initiale des enseignants a été peu à peu organisée et cette formation se prolonge en formation continue dans les MAF-PEN. Tout cela est certes très loin de pouvoir satisfaire à tous les besoins des collègues débutants mais c'est l'amorce d'une évolution qui devrait conduire à une mutation profonde du métier d'enseignant, pas seulement transmetteur de connaissance et éducateur mais aussi chercheur en pédagogie.

Ce fut une des idées à l'origine de la création des IREM en 1969. On parlait de ce constat : il n'est pas possible d'enseigner les mathématiques en 1969 comme si rien ne s'était passé dans le développement des mathématiques depuis 1940 ; l'enseignant doit continuellement, renouveler, moderniser ses connaissances, sans ignorer la vie de la discipline qu'il enseigne. D'où la nécessité impérieuse de la formation continue (ce qui à l'époque n'était pas officiellement reconnu).

Mais en même temps, on n'enseigne pas de la même façon en Sixième, en Troisième ou en Première, et il y a une vie en pédagogie comme dans la science. Qui est mieux placé pour expérimenten-

ter en pédagogie que le pédagogue dans sa classe ? Les IREM devaient aussi permettre des confrontations d'expériences vécues.

J'ai pris l'exemple des IREM parce que j'ai fréquenté l'enseignement des mathématiques pendant 38 années. J'aurais pu tout aussi bien citer l'exemple plus récent des écoles et universités d'été du CLEA qui ont, dès leur origine, réalisé l'heureux équilibre entre information théorique, travaux pratiques et réalisations didactiques. Entendons nous bien, je ne réclame pas "tout le pouvoir aux enseignants". J'accepte l'apport de tous les donneurs de leçons, les critiques, et les théoriciens. Mais plutôt que de discuter sur des mots, plutôt que de passer du

temps dans des polémiques parfois amusantes mais finalement stériles, je souhaite un travail de réalisations par nous-mêmes qui avons des élèves et qui enseignons du lundi au samedi dans de vraies classes avec des élèves d'aujourd'hui qui ne sont plus ceux qu'examinait Piaget.

Et si, retraité, je dis encore "nous, enseignants" comprenez que tout ce discours est pour vous inviter au relais. Il serait beau que dans ces CC, nous parvenions à faire vivre un foyer pédagogique auquel chacun de nous voudrait apporter une braille...

Quelle formation à l'enseignement des sciences en école élémentaire ?

Claudette Balpe, Docteur en sciences de l'éducation
Professeur-formateur à l'IUFM de Saint-Germain en Laye

Quand on adhère au CLEA, on s'applique forcément à défendre un enseignement vivant et expérimental de l'astronomie... qui généralement passionne les étudiants. Mais cela ne suffit pas si l'on se propose de donner aux futurs maîtres les moyens de conduire des activités scientifiques et astronomiques dans leurs classes. Certes, en arrivant à nos cours, les étudiants d'IUFM appréhendent d'être confrontés aux formules et équations qui ont hanté leur jeunesse. Ils persistent pourtant, confiants dans l'espoir qu'enseigner les sciences ne s'improvise pas : comment introduire un sujet, comment prendre en compte les idées premières (représentations premières) de l'enfant pour lui permettre de les repenser si elles sont erronées ? Comment cons-

truire un concept ? Comment mener une démarche expérimentale, une simulation, une modélisation avec des enfants de cycle 3 (surtout en astronomie) ? Bref, faire construire les savoirs par l'enfant avec la médiation du maître requiert des savoir-faire professionnels. Ou sinon, comment, depuis que l'école existe, expliquer que les maîtres ne sont pas d'emblée sur des bases efficaces ? Il suffit de voir la quantité de leçons de sciences (physiques) pour constater un manque évident.

Les résultats de la recherche en didactique, alliés à l'expérience professionnelle et aux innovations pédagogiques permettent d'avoir les clés que le formateur doit transmettre au stagiaire-professeur. C'est le premier sens de la formation : donner des outils pro-

fessionnels. Il y a donc un risque à cloisonner les deux aspects : l'apprentissage des éléments de la science elle-même (faire de l'astronomie), et celui de la compétence professionnelle. J'ai choisi d'intégrer les deux dimensions, en faisant **expérimenter d'une façon critique** qui permette de prendre du recul et de construire les repères pédagogiques et didactiques. Ainsi, le stagiaire est lui-même formé selon une démarche de construction du savoir, construction qu'on lui demande de transférer à ses élèves en fonction des caractéristiques de cet élève (on explore la formation des ombres dès la maternelle, mais on simule le mouvement de la Terre seulement en cycle 3, en faisant manipuler tous les groupes avec du matériel approprié - lampes,

boule, aiguilles et pâte à modeler par exemple).

Si l'efficacité de la formation est faible, nous affirmons que la responsabilité en incombe davantage au faible quota horaire imparti aux sciences dans les classes, à l'absence de structure d'accompagnement sur le terrain pour les maîtres déjà en place, à une formation continue dont les cadres devraient être redéfinis, à une division exacerbée de l'instrumental (math-français) et de l'ancien "éveil" (pour dire vite).

Aussi, quand on lit le "rapport sur les IUFM par une commission spéciale de la Société Française de Physique" dont des extraits sont publiés dans le bulletin de la Société Française de Physique (mai 1996), sommes-nous surpris de lire que pour une bonne formation, il est inutile de s'appuyer sur la psychologie de l'apprentissage, les représentations enfantines, la construction de savoirs et autres "recettes et kits,... et l'idée que les difficultés du métier seront aplanies grâce à un surcroît de psychopédagogie". Mais alors, on se demande sur quels autres fondements (qu'épistémologiques ou psychopédagogiques) l'on s'appuie pour former les professeurs d'école ? En somme, faire la classe, "c'est naturel", et il suffirait de s'y mettre "naturellement" comme Monsieur Jourdain faisait de la prose... et de "prouver la marche en marchant"... avec l'idée que "bâtir une leçon de sciences c'est possible parce qu'il l'a déjà fait".

Si l'idée que les universitaires physiciens s'intéressent à la formation scientifique de professeurs d'école en IUFM est louable, les conclusions sont pour le moins surprenantes : formons les maîtres en les "entraînant à faire des leçons", sous le contrôle du groupe.... Mais alors, en vertu de quelles références allons-nous pratiquer si ce ne sont les opinions de l'honnête homme ? Le rapport in-

dique que les "critiques" du groupe de formation devraient garantir l'objectivité. Dans ce cas, sur quels fondements théoriques s'appuient-ils ? on craint de ne voir que des fondements indicibles. On pressent bien que le risque est grand de confondre compétence scientifique (je connais la physique et l'astronomie) et compétence pédagogique (donc je sais l'enseigner): l'argumentation du rapport repose sur le fait qu'un enseignement (de faculté ?) se fait "naturellement". Il est vrai que la majeure partie des cours à l'université sont magistraux et que rares sont les innovations pédagogiques qui interviennent, principalement d'ailleurs, en premier cycle où le taux d'échec est patent. Dans ce cas, quelles bases autres que la compétence scientifique ou simplement "l'habitude", sont implicitement invoquées ?

Dans ce cadre d'analyse, il devient simple de penser que le rôle des "maisons de sciences" (proposées par le rapport) se réduit à donner l'occasion de s'adonner à la manip : "(grâce au) libre accès, on fait des sciences comme on fait de l'exercice dans une salle de gymnastique". Aussi, puisque les maîtres ont "peur" des sciences, qu'ils viennent s'apprivoiser ! (ce qui en soi est court comme raisonnement). Car le confiner à cela n'a jamais donné d'outils pour penser la formation : "bidouiller une manip" est-il de l'ordre de "comment introduire une expérience dans la classe" ? Savoir que l'alternance des saisons présente des obstacles que l'on peut franchir ne s'improvise pas : une médiatisation est indispensable. Sinon, le risque est grand pour le maître de se lancer dans une rhétorique vide, ou de se retrouver avec des "manips toutes faites" à l'encontre d'une participation de l'enfant à la **construction de son savoir** : concevoir une expérience, juger, adapter aux observa-

tions, et enfin, questionner de façon autonome. Finalement, ne confondrait-on pas "manipulation de faits de science" et "démarche d'investigation" ? Cette dernière est sous-tendue par la curiosité, les recherches, les questions qui la fondent, et ne peut être confondue avec répétitions et savoir-faire technique. Nous savons bien, au CLEA, que l'enseignement de l'astronomie (cf. le Hors-Série sur l'école élémentaire) se situe du deuxième côté !

Même s'il est indiqué dans la description des maisons de sciences (projet pour l'IUFM de Versailles) qu'on y "trouvera des indications pédagogiques et didactiques" on voit mal comment la mise en forme de lecture d'articles de spécialistes serait transférée miraculeusement dans la pratique. Chacun irait de son interprétation. Assimiler le savoir et le transformer en une pratique consiste précisément en ce que nous appelons la formation professionnelle.

Car sous les suggestions que l'on nous donne, ne voit-on pas poindre les vieilles recettes de l'apprentissage par "entraînement" ? Loin de verser dans le "tout pédagogique", nous pensons qu'une approche par la construction de savoirs allierait la forme et le fond¹. Mettre la main à la pâte, oui, bien sûr, c'est nécessaire mais ce n'est pas suffisant. Offrons aux maîtres d'agir en fonction de cadres théoriques maîtrisés, plutôt qu'en les laissant "errer". Et que l'accompagnement du terrain (animation pédagogique sérieuse et cohérente), la révision des horaires et du découpage des matières apporte de vraies réponses à ce qui nous préoccupe tous.

Note : 1 - on peut en avoir une vue d'ensemble dans BALPE Claudette, les sciences physiques à l'école élémentaire, Colin 1991; ou dans les ouvrages issus des recherches de l'équipe-sciences de l'INRP. ■



**L'EQUATION DU NÉNUPHAR, les plaisirs de la science
ESSAIS DE COSMOLOGIE,
L'INVENTION DU BIG BANG
PHILOSOPHIE, Le manuscrit de 1942**

L'EQUATION DU NÉNUPHAR
les plaisirs de la science,
Albert Jacquard ; 192 p. ;
Calmann-Levy 1998 (92F).

Nous connaissons tous Albert Jacquard qui a souvent l'occasion de prendre parti publiquement pour de bonnes causes. Parmi tous ses livres, rappelons **Éloge de la différence - La génétique et les hommes** (Seuil 1978) que le généticien des populations qu'il est devait à notre information. Dans son nouveau livre, ne vous attardez pas sur le célèbre problème du nénuphar mais prenez plaisir, avec l'auteur, à suivre le récit de ses visites dans des classes et à ses réflexions sur l'enseignement. Jacquard n'est pas du genre donneur de leçon, il sait bien qu'une intervention exceptionnelle dans une classe n'est pas la vie quotidienne avec les élèves. Il a pourtant la façon de s'adresser à nous, les enseignants découragés ou simplement fatigués, en nous redonnant la confiance qu'il faut pour enseigner au sens "ouvrir des portes".

En lisant ce livre, j'ai revu en mémoire quelques unes de mes classes où la communication avait bien eu lieu, par exemple une discussion sur apprendre et savoir à propos de la table de multiplication ; tout le monde est passé par là et certains ont des souvenirs amers ; je me rappelle avoir conclu : "il ne faut pas apprendre la table de multiplication, c'est trop triste, mais il faut la savoir, car l'ignorer est encore plus triste". Je retrouve des débats encore plus sympathiques et passionnants dans le livre de Jacquard sur des sujets tels que race et racisme ou intelligence et QI ou encore espèces humaines et perfection biologique. Je recommande la lecture de ce livre à tous mes amis, surtout s'ils sont enseignants.

Ne pensez vous pas, avec Albert Jacquard, que le rôle du système éducatif n'est plus de préparer les jeunes à entrer dans une société mais de les préparer à construire une nouvelle société ? N'est-ce pas, malgré les difficultés et les obstacles que chacun imagine, donner à notre métier sa vraie grandeur ?

ESSAIS DE COSMOLOGIE,
Alexandre Friedmann et Georges Lemaître,
précédés de **L'INVENTION DU BIG BANG**, par Jean-Pierre Luminet.
Collection "sources du savoir",
340 p. ; Seuil 1997 (160F).
PHILOSOPHIE, Le manuscrit de 1942, Werner Heisenberg
Introduction et traduction
par Catherine Chevalley,
Collection "sources du savoir",
492 p. ; Seuil 1997 (195F).

Pour commencer, rendons hommage aux responsables de cette collection, Jean-Marc Levy-Leblond et Thierry Marcaise, fidèles au principe qui guide leurs choix : "*remettre en circulation - présentés, expliqués et réinterprétés à la lumière des recherches actuelles - les textes fondamentaux, sources du savoir.*" Rappelons quelques uns des titres parus et qui ont été signalés ici. En tête, les six volumes des **Oeuvres choisies** de Albert EINSTEIN ; puis le **Messenger des étoiles** et le **Dialogue sur les deux grands systèmes du monde** de GALILÉE ; **Le Monde, l'homme, de DESCARTES** ; **Forme et croissance** de D'ARCY THOMPSON. Et voici maintenant sur la cosmologie et la physique théorique, des textes fondamentaux traduits, et expliqués de façon magistrale.

Avec l'introduction des **Essais de cosmologie**, J. P. Luminet nous donne les grandes lignes de l'histoire de la cosmologie depuis que la Relativité a donné ses bases à une science jusque là conjecturale. Il existe cinq périodes dans cette histoire du big-bang.

- 1917-1927 : les modèles cosmologiques relativistes sont formulés sans relation avec les observations astronomiques ; exemple Friedmann.

- 1927-1945 : période de développement, en liaison avec les observations astronomiques ; exemple Lemaître.

- 1945-1965 : période de consolidation qui se termine avec l'interprétation du fond diffus cosmologique.

- 1965-1980 : acceptation générale des modèles du Big Bang.

- à partir de 1980 : élargissement et modifications en liaison avec les découvertes en physique des hautes énergies.

Les textes de Friedmann et Lemaître sont donc représentatifs des premières étapes de la théorie, ce qui est un bon moyen pour comprendre les questions et les développements ultérieurs. Il est aussi instructif de comparer les approches très différentes de la part de ces deux savants. N'oublions pas qu'en 1917, l'élaboration de la relativité générale est marquée par la coopération d'Einstein et de Hilbert. Ce qui conduit celui-ci à publier ses **Grundlagen der Physik** sur le mode axiomatique de ses célèbres **Grundlagen der Geometrie**.

Friedmann construit son modèle cosmologique dans le même esprit. Lemaître, au contraire part d'une culture astronomique acquise par ses travaux avec Eddington à Cambridge, puis avec Shapley à Harvard et enfin avec Hubble et Slipher au MIT.

Nous retrouvons ces différences dans les styles. **L'univers comme espace et temps**, par

Friedmann (p.101 à 238) est un ouvrage de vulgarisation de haut niveau développé en trois parties : axiomatisation de la relativité, unification géométrique de la gravitation et de l'électromagnétisme, création de l'espace. Les deux textes : **la création de l'Univers, l'expansion de l'espace** (p.217-238) et **l'hypothèse de l'atome primitif** (p.241-263) par Lemaître donnent l'impression d'une lecture plus facile (mais se méfier parfois des styles trop couulants). En annexe, deux autres textes courts de chacun des deux savants et une correspondance instructive sur le débat Einstein-Lemaître. L'idée de création de l'Univers et de l'atome primitif paraissait naturelle à l'abbé Lemaître alors que pour Einstein, s'il finit par accepter l'idée d'un univers dynamique, c'était contre sa conception initiale d'un Univers statique.

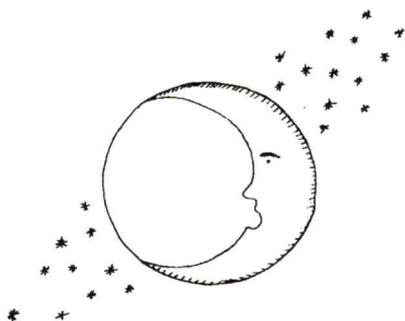
Pour moi, et j'imagine pour beaucoup d'entre nous, c'est la lecture de **La partie et le tout** qui nous a fait connaître la personnalité attachante de Werner Heisenberg et apprécier, en particulier, son goût pour la réflexion philosophique à partir des données de la physique. Pour ce nouveau texte que traduit et présente de façon remarquable Catherine Chevalley, la date de la conception est importante. Quand Hitler a pris le pouvoir en Allemagne (1933), Heisenberg, à l'encontre de la plupart de ses collègues et amis, a refusé l'exil sans doute par attachement politique à son pays mais aussi pour ne pas désertir le combat qu'il menait depuis longtemps contre les tenants de "Deutsche Physik". Ces derniers prétendaient défendre une "physique allemande" contre les artisans de la physique théorique qu'ils rangeaient sous le vocable "la physique juive". Heisenberg savait donc depuis longtemps juger le nazisme.

La guerre venue, il comprend que la réalisation de la bombe atomique est théoriquement possible. L'idée de participer à une telle réalisation heurte son sens moral. Dans les relations obligées avec les autorités nazies, il affirme que la réalisation est hors de la portée pratique de l'Allemagne. Mais il sait aussi que l'opposition au nazisme comporte des risques. Il connaît les jeunes étudiants munitochois qui publient des tracts contre la guerre et sont impitoyablement exécutés. Il écrit son opposition au nazisme et à des aberrations telles que la "physique allemande" mais ne communique son texte qu'à de rares amis sûrs.

En bon théoricien de la physique, il est toujours préoccupé par le concept de réalité. Il voit la nécessité d'approfondir le concept pour tenir compte d'avancées en microphysique, ce qui doit aller de pair avec une réflexion sur le langage. Il trouve dans le Goethe de la théorie des couleurs l'idée de la multiplicité des niveaux de réalité. Le premier niveau est celui où les objets sont perçus et mesurés indépendamment du processus de connaissance, ce qui n'est pas le cas en microphysique, deuxième niveau de réalité.

De ce point de vue, on est étonné que Heisenberg ne considère pas explicitement l'échelle des phénomènes. Le langage courant n'est évidemment pas plus adapté aux phénomènes à l'échelle cosmologique qu'aux phénomènes à l'échelle des particules élémentaires. Dans ce texte **Philosophie** Heisenberg me faisait penser au **Dichtung und Wahrheit** de Goethe et j'imaginai qu'il aurait pu intituler son texte "Science et réalité" à la manière du grand poète qu'il vénérât.

Gilbert Walusinski ■



Les neutrinos, particules massives ?

Lucette Bottinelli

L'expérience Super-Kamiokande de détection de neutrinos naturels vient de montrer que ceux-ci n'ont pas une masse nulle ; quelles en sont les conséquences sur le problème des neutrinos solaires et sur l'identification de la masse manquante dans l'Univers ?

L'expérience Super-Kamiokande.

Cette installation, fruit d'une coopération entre Japon et Etats-Unis, a fait suite en 1996, à la première version Kamiokande, et utilise comme détecteur une énorme cuve d'eau très pure (50 000 m³) installée à 200 km de Tokyo au fond d'une mine de zinc à 1 km de profondeur. L'interaction des neutrinos incidents se manifeste par l'effet Cerenkov des électrons diffusés. Le rayonnement Cerenkov correspondant, produit dans le domaine du visible, est enregistré par 11 000 tubes photomultiplicateurs installés le long des parois de la cuve. Les électrons sont diffusés principalement dans un angle de 15° autour de la direction des neutrinos incidents. Super-Kamiokande est capable de détecter les neutrinos des trois variétés existantes (neutrino électron ν_e , neutrino muon ν_μ et neutrino tau ν_τ) dont l'énergie est supérieure à 7 MeV. Outre l'observation des neutrinos solaires, l'installation est destinée à l'analyse des rayons cosmiques, à l'étude de la désintégration du proton, à la détection des neutrinos produits lors du phénomène de supernova (décelable par hasard, si la supernova n'est pas trop éloignée, comme ce fut le cas

pour SN1987A dans le grand Nuage de Magellan).

Les résultats sur la masse non nulle des neutrinos.

C'est au cours de la conférence internationale de juin 1998 sur les neutrinos, à Takayama au Japon, que ces résultats ont été annoncés. Le modèle standard de physique des particules comporte les trois variétés de neutrinos citées précédemment, avec une masse nulle. Dans le cas où la masse serait non nulle et dans ce cas seulement, il y aurait possibilité de transformation d'une variété en une autre ; comme une telle transformation est périodique, elle est appelée couramment "oscillation du neutrino". C'est ce phénomène que le détecteur Super-Kamiokande vient de mettre en évidence pour la première fois. En classant les neutrinos de variété électronique et de variété muon, détectés dans deux directions opposées (d'un côté de la Terre, au-dessus du détecteur, et du côté opposé, après traversée de la Terre) il apparaît que des neutrinos muon ont disparu (déficit associé au parcours le plus long traversant la Terre) ; on pense qu'ils se seraient transformés en neutrinos tau, non détectés ici. L'effet mesuré se traduit par

une différence de masse entre les variétés oscillantes (τ et μ) décrite par la différence $(\Delta m)^2$ des carrés des masses $(m_\tau)^2$ et $(m_\mu)^2$. Les masses m sont ici exprimées en unités d'énergie équivalente selon la relation d'Einstein : $E = mc^2$ où c est la vitesse de la lumière, et en eV ; ainsi : $1 \text{ eV} = 1,8 \times 10^{-36} \text{ kg}$. Avec ces unités, la différence $(\Delta m)^2$ vaut 10^{-2} à 10^{-3} eV^2 . Il faut bien noter que ce résultat ne fournit pas la masse absolue d'un neutrino mais seulement l'indication que sa masse est non nulle.

Par ailleurs, d'autres expériences se développent en utilisant des sources artificielles de neutrinos dont les caractéristiques sont bien connues (comme par exemple les faisceaux de neutrinos issus de réacteurs nucléaires ou d'accélérateurs de particules) en direction des grands détecteurs de neutrinos. L'un des résultats récents indique que le neutrino électron, au contraire du neutrino muon, n'oscillerait pas...

Le problème des neutrinos solaires.

Le point sur cette question du déficit de neutrinos solaires détectés par rapport aux prévisions théoriques du modèle standard du Soleil, a été exposé par E. Schatzman dans le n° 80 (hiver 1997-1998, p. 7) des Cahiers Clairaut.

Les différentes expériences détectant des neutrinos solaires dans différents domaines d'énergie aboutissent toutes à un déficit de détection allant d'un facteur 1,5 à 3 environ. A noter que ce déficit a été notablement réduit avec la mise en service des expériences au gallium au début des années 1990, qui permettaient d'explorer le domaine d'énergie correspondant aux neutrinos émis les plus nombreux (environ 90% du total). La possibilité de détecter la directivité de l'émission des neutrinos dans les expériences Kamiokande a également confirmé

(en 1989) l'origine solaire des émissions. Ainsi, en première approximation, les caractéristiques essentielles du modèle standard du Soleil avec une production d'énergie par fusion thermonucléaire transformant des protons en noyaux d'hélium via diverses réactions produisant des neutrinos ayant une certaine répartition en énergie, ont été clairement validées par les observations des neutrinos.

Cependant, il restait à expliquer le déficit persistant des observations. Les récentes données obtenues par l'expérience Super-Kamiokande semblent donner corps à l'une des hypothèses avancées depuis quelques années pour l'expliquer, à savoir la transformation des neutrinos électron en neutrinos muon au cours de leur traversée à travers le Soleil. Cette interprétation repose sur des écarts mesurés dans le nombre de neutrinos solaires détectés en fonction de leur énergie.

La masse manquante enfin expliquée ?

Il y a de sérieuses raisons de penser que notre Univers a une densité moyenne pratiquement égale à la densité critique ρ_c qui correspond à la limite au-delà de laquelle l'expansion actuelle devrait être stoppée et être suivie d'une contraction. Cette densité moyenne s'exprime en fonction de la constante de Hubble à l'époque actuelle H_0 et de la constante de la gravitation universelle G par la relation $\rho_c = 3H_0^2 / (8\pi G)$; en adoptant $H_0 = 70$ (en $\text{km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$), on trouve $\rho_c = 10^{-29} \text{ g cm}^{-3}$. Or l'estimation des masses dans l'univers et les contraintes imposées par les abondances des éléments légers fabriqués durant les phases initiales du "big bang", conduisent à une densité en masse baryonique, d'au plus quelques pour cent de ρ_c : l'essentiel de la masse est ainsi sous forme de

"masse cachée". Des neutrinos ayant une masse au repos non nulle, pourraient-ils expliquer ce déficit de masse à l'échelle de l'Univers ?

Il y a eu dans les premières phases de l'évolution de l'Univers décrites dans le modèle du "big bang", une phase initiale d'intense production de neutrinos en forte interaction avec les autres particules en formation, jusqu'à une époque allant de 10^{-4} s à 1 s après le "big bang", suivie d'un découplage des neutrinos qui leur a permis de se propager à travers l'espace sans autre interaction, à mesure que la température et la densité diminuaient. Ces neutrinos primordiaux constituent un fond continu qui remplit uniformément tout l'espace et dont la densité actuelle est estimée à 500 neutrinos par cm^3 environ. Ceux-ci peuvent-ils rendre compte de la masse cachée ?

Pour obtenir une densité massique due aux neutrinos, de l'ordre de ρ_c (soit : $10^{-29} \text{ g cm}^{-3}$) il faut adopter une masse typique du neutrino de 10 eV (soit $1,8 \times 10^{-32} \text{ g}$) avec la densité numérique précédente en neutrinos. Pour comparaison, les estimations actuelles obtenues à partir de l'interprétation d'expériences complexes dans des accélérateurs de particules situent la masse du neutrino électronique au plus à 0,1 eV : la contribution des neutrinos massifs serait donc trop faible de l'ordre d'un facteur 100 pour expliquer la masse cachée. La masse cachée n'est donc pas encore expliquée... A noter que les limites supérieures expérimentales des masses des deux autres variétés de neutrinos (neutrino muon et neutrino tau) sont beaucoup plus élevées et donc moins contraignantes ; par ailleurs la théorie n'exclut pas l'existence de neutrinos lourds à côté des trois variétés de neutrinos légers dont il a été question ci-dessus. ■

Documents pour les fiches CLEA BELIN

DCB

20 exemplaires 70F (abonnés : 65F)

Transparents animés pour rétroprojecteur

(50F-55F)

T1 Le TransSoLuTe
(phases de la lune et éclipses)

T2 Les fuseaux horaires

Filtres colorés

FCR

Six feuilles de filtres colorés
et une feuille de réseaux
70F-75F (abonnés : 65F)

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

DIAPPOSITIVES

Série de 20 vues plus un livret de commentaires
60-65F (abonnés : 50-55F)

Publications du CLEA

Pour chaque publication,
le deuxième prix comprend
la publication et ses frais d'expédition.



Chèques à l'ordre du CLEA

Les fiches d'activité pédagogiques du CLEA

- HS1 L'astronomie à l'école élémentaire
- HS2 La Lune niveau collège 1
- HS3 Le temps, les constellations, niveau lycée
- HS4 Astronomie en quatrième
Chaque HS 60F-68F (abonnés : 40F-48F)
- HS5 Gravitation et lumière, niveau terminale
75F-83F (abonnés : 65F-73F)
- HS6 L'âge de la Nébuleuse du Crabe
avec 4 diapositives et 12 jeux de deux photographies
niveau lycée
100F-110F (abonnés : 90F-100F)
- HS7 Étude du spectre du Soleil
50F-58F (abonnés : 42F-50F)

Numéros hors série des CAHIERS CLAIRAUT
réalisés par le Groupe de Recherche Pédagogique du CLEA

Cours photocopiés d'astrophysique

(M3.C4 de l'université
Paris XI-Orsay)

- CI
Astrophysique générale
- CII
Mécanismes de rayonnement
en astrophysique
- CIII
États dilués de la matière :
le milieu interstellaire
- CIV
La structure interne des étoiles
- CV
Relativité et cosmologie
- CS
Astrophysique solaire : le Soleil

Chaque fascicule : 30F-35F

CONDITIONS D'ADHÉSION ET D'ABONNEMENT POUR 1998

Cotisation simple au CLEA pour 1998	50 F
Abonnement simple aux CAHIERS CLAIRAUT n° 81 à 84	140F
Abonnement aux CAHIERS CLAIRAUT ET cotisation au CLEA pour 1998	190F
Contribution de soutien au CLEA (par an)	50F
Le numéro des Cahiers Clairaut (port compris)	45F
<i>Possibilité de cotiser ou de s'abonner pour deux ans en doublants les tarifs précédents</i>	

COLLECTIONS DES **CAHIERS CLAIRAUT**

- C1** Collection complète du n° 1 au 80 (1 200F - 1 300F)
C88. C89. Collections 1988 ou 1989 (chaque 80F - 90F)
C90 à C97 (chaque 90F - 100F)

NB : Comme toutes les publications, le deuxième prix est celui qui correspond au tarif port compris.

Adresser inscriptions,
abonnements ou commandes à

Chèque à l'ordre du CLEA

CLEA

Laboratoire d'Astronomie Bât. 470
Université Paris Sud
91405 ORSAY Cedex

Publications...

FASCICULES POUR LA FORMATION DES MAITRES EN ASTRONOMIE

- | | |
|--|-----------|
| 1- L'observation des astres, le repérage dans l'espace et le temps | (20F-25F) |
| 2- Le mouvement des astres | (25F-30F) |
| 3- La lumière messagère des astres | (30F-35F) |
| 4- Naissance, vie et mort des étoiles | (30F-35F) |
| 5- Renseignements pratiques, bibliographie pour l'astronomie | (25F-30F) |
| 5 bis- Complément au fascicule 5 | (25F-30F) |
| 6- Univers extragalactique et cosmologie | (30F-35F) |
| 7- Une étape de la physique, la Relativité restreinte | (60F-68F) |
| 8- Moments et problèmes dans l'histoire de l'astronomie | (60F-68F) |
| 9- Le système solaire | (50F-58F) |
| 10- La Lune | (30F-35F) |
| 11- La Terre et le Soleil | (40F-48F) |
| 12- Simulation et astronomie sur ordinateur | (30F-35F) |

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

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

dépot légal 1^{er} trimestre 1979
numéro d'inscription CPPAP 61600
Prix au numéro : 40F