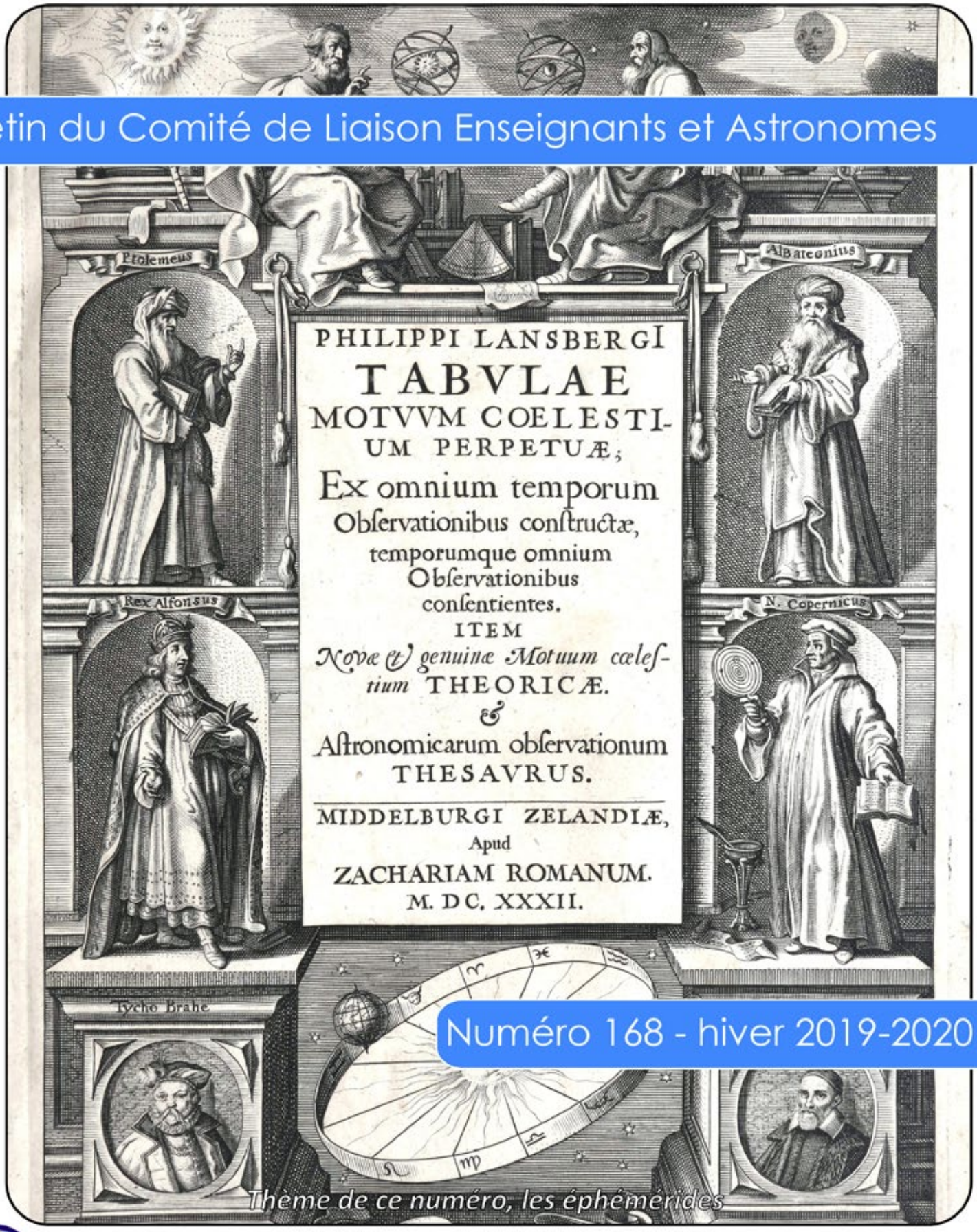
LES CAHIERS CLAIRAUT

N° 168 - Décembre 2019 9 €

Bulletin du Comité de Liaison Enseignants et Astronomes



Numéro 168 - hiver 2019-2020

Thème de ce numéro, les éphémérides

ISSN 0758-234X

Comité de Liaison Enseignants et Astronomes

Le **CLEA**, Comité de Liaison Enseignants et Astronomes, est une association déclarée à but non lucratif (loi de 1901), fondée en 1977. 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.
Le **CLEA** organise des stages nationaux (Écoles d'Été) et régionaux. Ces stages sont ouverts aux enseignants de l'école, du collège et du lycée et, de manière générale, à tous les formateurs. 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.). Le **CLEA** favorise les échanges directs entre enseignants et astronomes, hors de toute contrainte hiérarchique.
L'organe de liaison du **CLEA**, les **CAHIERS CLAIRAUT**, est une revue trimestrielle. On y trouve des articles de fond (astrophysique, histoire, philosophie, enseignement…), des comptes rendus d'expériences pédagogiques, des notes critiques de livres récents, des innovations en matière d'activités pratiques.
Le **CLEA** a mis en place une liste de diffusion afin de permettre des échanges rapides entre les abonnés.

Présidents d'honneur :
Jean-Claude Pecker
Lucienne Gouguenheim
Georges Paturel

Bureau du CLEA pour 2019
Président : Frédéric Pitout
Trésorière : Sylvie Thiault
Trésorière adjointe : Chantal Lecoutre
Secrétaire : Danièle Imbault
Secrétaire adjointe : Nathalie Cartier

Responsables des groupes
Vie associative : Jean-Michel Vienney
Cahiers Clairaut : Christian Larcher
Productions Pédagogiques : Pierre Causeret
École d'Été d'Astronomie : Danièle Imbault
Responsables du site : Jean-Michel Vienney

Merci à celles et ceux qui ont permis la réalisation de ce numéro des Cahiers Clairaut, nous citerons :

Jean-Eudes Arlot, Daniel Bardin, Michel Bobin, Nathalie Cartier, Pierre Causeret, Xavier Collilieux, Christine Daloubeix, Pacômer Delva, François Hurter, Christian Larcher, Chantal Lecoutre, Georges Lecoutre, Pierre Le Fur, Colette Le Lay, Anne-Marie Louis, Frédéric Pitout, Jean Ripert, Béatrice Sandré, Daniel Toussaint.

Les auteurs recevront plusieurs numéros 168 afin de faire connaître la revue autour d'eux.

Page de garde des tables astronomiques de Lansbergen (1632).

On y trouve, de haut en bas, Aristarque de Samos et Hipparque puis Ptolémée et Albategnius, Alphonse X de Castille et Copernic, et sur la dernière ligne, Tycho Brahé et Lansbergen. Le dessin du bas montre un système héliocentrique.

Bien que n'utilisant pas les ellipses de Kepler, Lansbergen avait prévu le passage de Vénus devant le Soleil de décembre 1639 alors que Kepler pensait que Vénus passerait au sud du Soleil. Jeremiah Horrocks possédait une copie de ces tables et c'est grâce à cela qu'il aurait vérifié les calculs et observé ce passage de Vénus.

Avec l'aimable autorisation de SOPHIA RARE BOOKS (www.sophiararebooks.com)

Les Cahiers Clairaut

Hiver 2019

Éditorial

Le lundi 11 novembre 2019 certains d'entre nous ont pu, malgré le mauvais temps, prendre des photos du passage de Mercure devant le Soleil. De nos jours personne ne s'étonne de connaître à l'avance les heures précises de tels phénomènes et des conditions de leurs observations. Il suffit pour cela de consulter les éphémérides astronomiques.

Ce mot féminin, éphéméride, désigne un « journal des événements astronomiques » dans lequel on trouve, pour chaque jour de l'année, les heures des levers et des couchers des principaux astres et beaucoup d'autres choses. C'est le thème de ce numéro.

L'élaboration des éphémérides astronomiques résulte d'un travail long et difficile qui s'est étendu sur plusieurs siècles car pour décrire le mouvement des astres il fallait d'abord connaître précisément leur trajectoire et donc disposer d'un modèle pertinent pour en rendre compte et les prévoir. La loi de la gravitation universelle, bien qu'*empirique et inexplicable (une action à distance* !!*),* se révéla fructueuse au point de permettre la découverte de Neptune, rectifiant ainsi un écart à la loi.

À partir du contenu des éphémérides, il est possible de proposer aux élèves de nombreux exercices. Le nouveau site de l'IMCCE facilite ce travail. Des exemples d'utilisation avec un protocole détaillé sont donnés dans ce numéro.

En dehors du thème vous trouverez l'histoire de la mise en évidence de l'eau sur la Lune ; une nouvelle qui alimente le rêve d'y séjourner.

Un article propose une entrée originale dans le monde de l'astronomie à partir des timbres postaux. Ces timbres, nous dit l'auteur, ont quelque chose à nous apprendre à propos des lieux, de l'Histoire, des découvertes, des femmes, des hommes et du ciel.

Le numéro se termine avec un article de Pacôme Delva sur la relation intime des horloges atomiques avec le champ gravitationnel local, en raison du décalage relativiste (effet Einstein). Cet effet permet de mesurer des altitudes et même de déterminer le géoïde avec une haute résolution.

Christian Larcher, pour l'équipe

Sommaire

Article de fond

Après Apollo : à la recherche de l'eau
Pierre Le Fur p 2

Thème : les éphémérides p 7

Histoire

Les éphémérides, passé, présent, futur
Jean-Eudes Arlot p 7

Avec nos élèves

Utilisation des nouvelles éphémérides de l'IMCCE
Pierre Causeret p 14

Mots croisés
Pierre Causeret p 18

Histoire

L'article Tables astronomiques de l'Encyclopédie de Diderot et d'Alembert
Colette Le Lay p 19

Avec nos élèves

La Lune tourne-t-elle rond ?
Daniel Bardin p 23

Avec nos élèves

La distance Terre Soleil à l'œil nu
Daniel Toussaint p 26

Observation

Ciel de l'hiver 2019
Pierre Causeret p 28

Notions de base

Cartes du ciel, cartes de la Terre (5)
Michel Bobin, Pierre Causeret p 29

Curiosité

L'astronomie dans les timbres (1)
Anne-Marie Louis p 32

Histoire

Des géomètres au service des horloges atomiques de l'Observatoire de Paris
Pacôme Delva, Xavier Collilieux, p 37

Annonce Assemblée générale et EEA 2020 p 40

Solutions des mots croisés p 40

Après Apollo : à la recherche de l'eau

Pierre Le Fur, Toulon

Pourra-t-on un jour habiter sur la Lune ? La question restait très problématique jusqu'à ce que de récentes cartographies en IR révèlent la présence d'eau, sous forme de givre, tout au fond des cratères près des pôles.

Sélénites: à la recherche de l'eau

À la question des anciens « la Lune est-elle habitée ? » l'on préfère maintenant la question « pourra-t-on l'habiter ? ». Et pourtant la distance entre ces deux problèmes n'est peut-être pas si grande.

Les grands observateurs lunaires des siècles passés comme Johann Hieronymus Schroeter [1] ont traqué les traces d'éventuels habitants. Il leur semblait possible que des sélénites habitassent les fonds de vallées et de cratères là où l'atmosphère lunaire pourrait être moins ténue et où l'eau pourrait éventuellement couler. À la fin du XVIIIe siècle, et au début du XIXe siècle, Schroeter avait cru pouvoir mesurer l'épaisseur de l'atmosphère lunaire (estimée à 300 toises, environ 600 mètres) et l'avait comparée à la profondeur des cratères (figure 1).

De plus l'observation de rainures comme celles d'Hyginus l'amenait à supposer qu'il pouvait y avoir une origine artificielle pour ces « canaux » dans lesquels l'eau indispensable à la vie des sélénites devait s'écouler ; ou pour le moins, que ceux-ci les avaient aménagés [2]. Ces idées précèdent de près d'un siècle la théorie des canaux martiens de Percival Lowell (1895).

Il est clair que ces astronomes ne pouvaient envisager de vie sans eau et que celle-ci ne pouvait être présente qu'au fond des cratères, au creux des « mers » lunaires que, par ailleurs, ils savaient désertiques.

Signature infrarouge de l'eau

Deux siècles plus tard, le mystère de l'eau lunaire semble résolu : les observations télescopiques montrent une Lune totalement aride, sans atmosphère. Les roches lunaires rapportées par les astronautes d'Apollo (1970) ont été analysées avec les moyens de l'époque et apparaissaient totalement dépourvues d'eau [3], les seules traces mises en évidence correspondraient à une contamination par contact avec l'atmosphère riche en vapeur d'eau de l'intérieur du Lunar Exploration Module, où vivaient les astronautes.

Mais les méthodes de télédétection planétaire dans le proche infrarouge (IR) se développant depuis les années 2000, la présence d'eau peut être désormais recherchée à distance [4] : les vibrations et déformations de la molécule d'eau, et du radical OH,

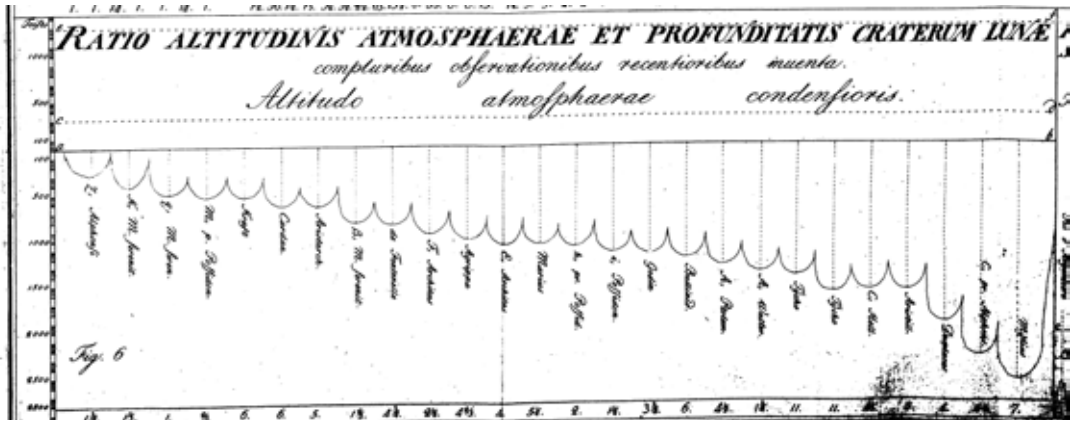


Fig.1. *Travaux de Shroeter sur une comparaison entre l'épaisseur supposée de l'atmosphère lunaire et la profondeur des cratères (1802). Chaque cratère est représenté par un creux associé à son nom (placé verticalement), avec en ordonnée, sa profondeur en toises (1 toise = environ 2 m). Par exemple, le 7e en partant de la gauche est Aristarque, associé à une profondeur de 700 toises. L'épaisseur conventionnelle de l'atmosphère supposée de la Lune se trouve sous la forme du trait pointillé, correspondant à 300 toises d'altitude lisible en ordonnée. Crédit GALLICA-BNF*

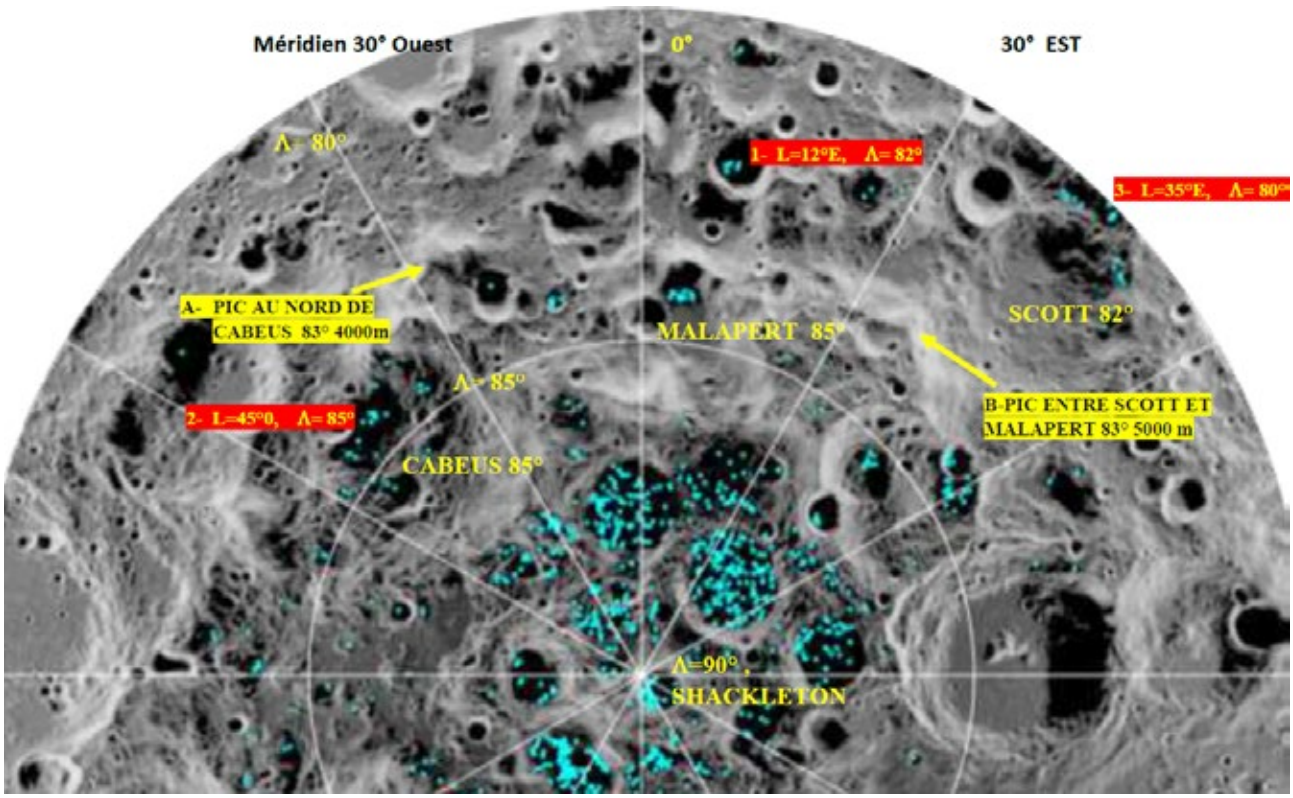


Fig.2. *Carte infrarouge du pôle Sud de la Lune (entre 80° et 90° de latitude), obtenue avec l'instrument M3 de la NASA embarqué sur la sonde Chandrayaan 1 en 2009. Les zones sombres représentent les basses températures et les claires les valeurs élevées. Les points bleus correspondent aux sondages positifs de détection effective d'eau par spectroscopie. En rouge, en haut à droite, les zones (1-) et (3-) visibles sur la figure 3 ci-dessous (SCOTT et nord de MALAPERT). Les altitudes des deux pics (A-) et (B-), en jaune, résultent des mesures de l'altimètre de la sonde Clémentine. Crédit : NASA ;* https://www.jpl.nasa.gov/news/news.php?feature=7218

conduisent à un spectre contenant des « buissons » de raies vers 1,4, 1,9 et 2,8 µm pour un gaz de molécules d'eau. Ce spectre est largement modifié pour les états condensés liquide ou solide, voire pour des états liés avec des solides (hydrates ou composés contenant seulement OH). Les spectres donnent ainsi une bonne idée de l'état physique sous lequel se présente l'eau. Le domaine spectral le plus exploité reste « la bande à 3 µm » située de 2,6 à 4 µm.

Ainsi le détecteur M3 (Moon Mineralogy Mapper) de la NASA voit le jour et la sonde lunaire indienne Chandrayaan 1 l'embarque à son bord le 22 octobre 2008 dans une mission conjointe ISRO-JPL-NASA [5]. (ISRO : Indian Space Research Organization). Les résultats obtenus sont à la hauteur des espoirs. La sonde cartographie les pôles lunaires en IR (figure 2).

De plus elle permet de détecter de l'eau sous forme solide mêlée au matériau du régolithe lunaire et non sous forme de « lacs » gelés. Seuls les fonds de cratères plongés dans l'obscurité « éternelle », à des températures inférieures à -250 °C peuvent conserver cette eau solide, dont l'origine discutée reste probablement liée à la formation de la lune [6]. Ces travaux viennent confirmer les forts soupçons de détection par les précédentes sondes comme Clémentine (NASA, janvier 1994). Par la suite LRO, Lunar Reconnaissance Orbiter, et son compagnon LCROSS (NASA, juin 2009) affinent les données obtenues [7].

Observer les cratères de haute latitude

La carte infrarouge des pôles de la Lune de la figure 2 nous présente ces cratères dont le fond n'est jamais éclairé par le Soleil. Tous correspondent à de très hautes latitudes sud ou nord (de 80° à 90 °). Pour l'observateur terrestre l'effet de perspective rasante apporte une déformation considérable de ces cirques lunaires qui deviennent extrêmement difficiles à identifier. La plupart du temps seules les crêtes des remparts périphériques apparaissent dans le champ visuel télescopique. Il est alors impossible de voir ces ombres éternelles où se cache l'eau lunaire. Malgré tout, au gré des lunaisons, la libration modifie significativement la visibilité ou l'invisibilité des pôles et l'on a parfois la chance d'entrapercevoir ces fameux puits d'ombre, relativement riches en eau-« givre ».

Le cliché de la figure 3 présente deux cratères où de telles zones sont visibles : l'un est au nord de SCOTT

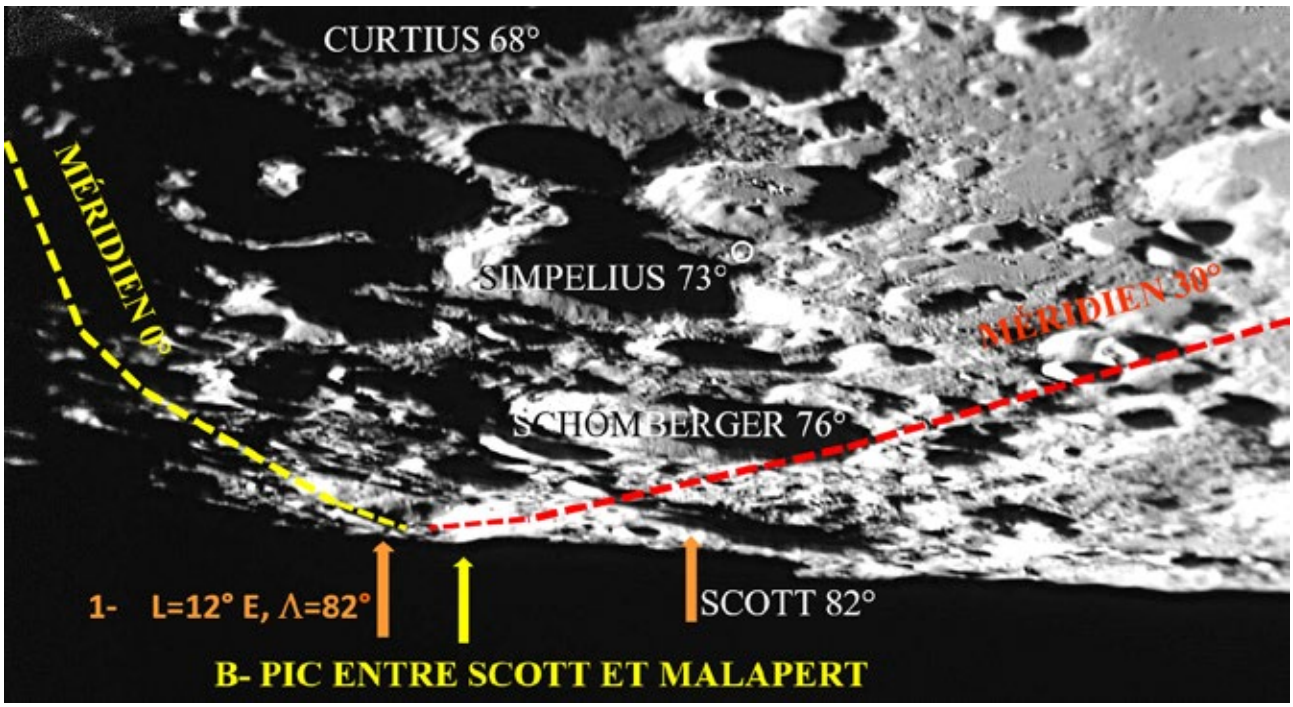


Fig.3. Image du pôle Sud lunaire obtenue au télescope Schmidt-Cassegrain de 300 mm à monture altazimutale (LX90 Meade), focale 25 m, acquisition environ 1 jour après le premier quartier.
En rouge, les zones 1 et 3 repérées sur la figure 2 ci-dessus. On distingue parfaitement les zones d'ombre permanente de MALAPERT (1-) et du nord du cratère SCOTT (3-). Là s'y trouvent des sols « riches » en eau, par opposition au pic (B-) éclairé par le Soleil, donc totalement aride. Les latitudes L sont indiquées. Photo : auteur.

(latitude 80° sud, longitude 35° est) ; l'autre au nord du grand MALAPERT (latitude 82° sud, longitude 12° est). On comparera avec la figure 2 pour comprendre l'extrême déformation liée à la perspective rasante.

Les plus grands télescopes terrestres permettent également d'observer ces régions grâce à l'optique adaptative qui vient compenser la turbulence. Une telle expérience a été réalisée le 6 octobre 2009 avec le télescope du mont Palomar et ses 5 m de diamètre. En effet à cette date, à 11 h 31 min 19 s TU, la NASA a réalisé l'impact de l'étage supérieur de propulsion de sa sonde {LRO, LCROSS} dans le cratère CABEUS.

L'énergie dégagée par la collision de l'étage CENTAUR au fond du cratère devait permettre d'obtenir un panache gazeux et poussiéreux dans lequel l'eau serait probablement détectable [8]. Mais le phénomène

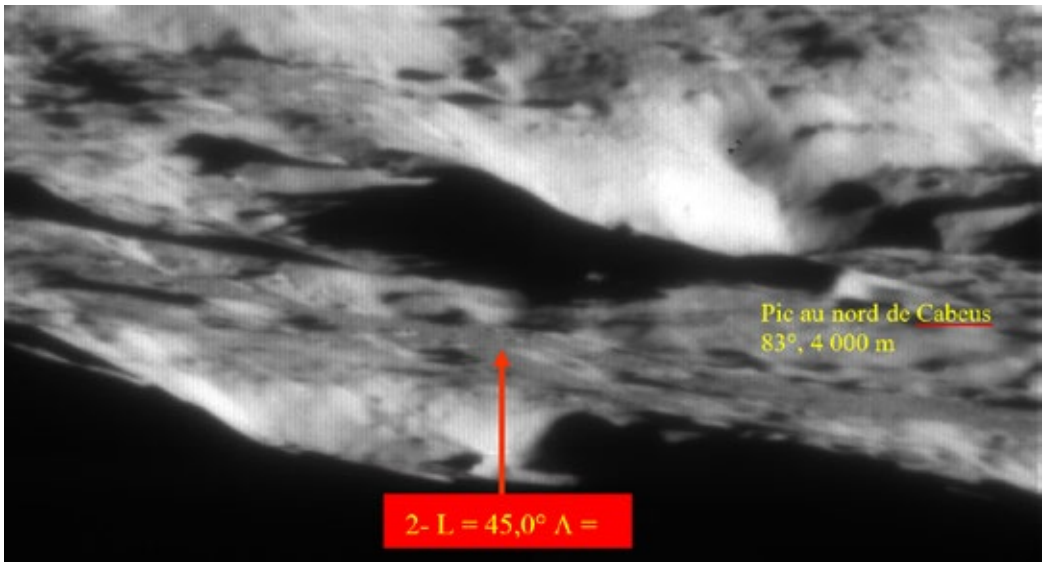


***Fig.4. I**mage du cratère CABEUS obtenue avec une optique adaptative placée sur le télescope du Mont Palomar en Californie (5 m de diamètre) à 11 h 31 min 30 s le 6 octobre 2009 ; soit 11 s après que l'étage Centaur se soit écrasé dans ce cratère. Au centre de l'image, on distingue la montagne au nord de CABEUS (A-) et le cratère éponyme apparaît comme une tache allongée sombre (2-). Aucun panache de gaz et fumées n'est visible, même dans les minutes suivantes.*
Credit : CALTECH; http://www.oir.caltech.edu/twiki_oir/bin/view/Palomar/PalmLGS/Lcross_palomar

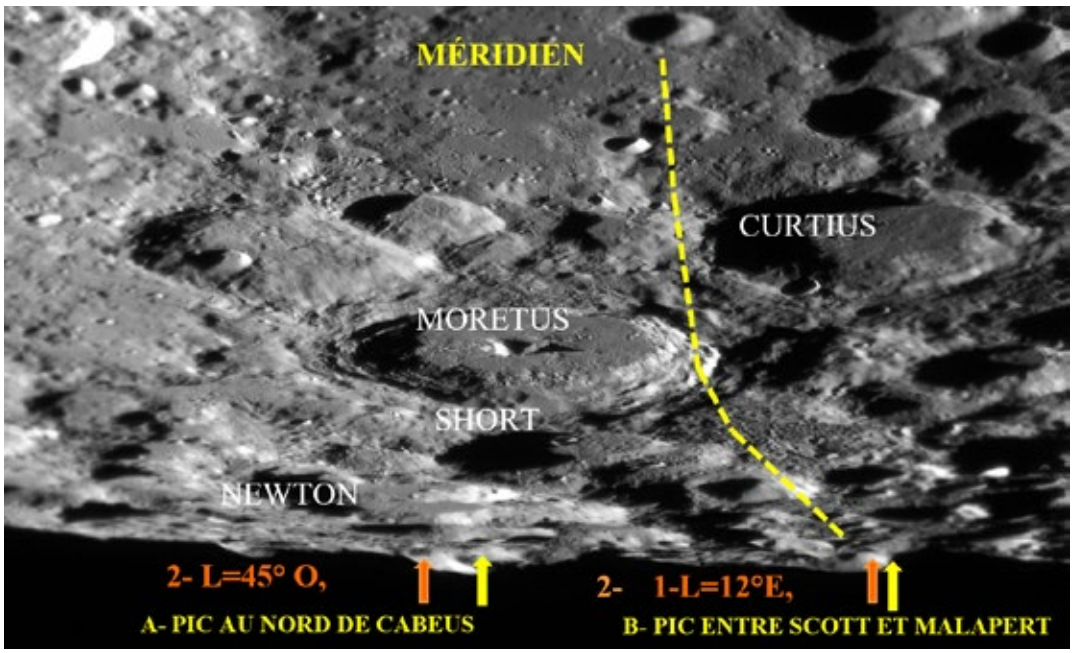


Fig.5. *Image de la région sud de la Lune obtenue au télescope Schmidt-Cassegrain de 300 mm à monture altazimutale (LX90 Meade), focale 25 m. acquisition environ 2 jours avant le dernier quartier. Malgré une libration défavorable, on peut explorer la zone de latitudes comprises entre 60° et 83°. On distingue nettement le pic (A-) visible juste au nord de CABEUS. Il est très souvent observé sur les photos de pleine Lune. CABEUS lui-même (2-) se trouve derrière, caché par la libration moins favorable que sur la figure 4. Photo : auteur.*

ne fut pas observable avec ce télescope, voir la figure 4. Pour autant la sonde LCROSS en orbite lunaire a parfaitement photographié le panache produit (environ 3 km de diamètre 20 s après l'impact). Les spectres infrarouges obtenus comportèrent les raies caractérisant la présence d'eau (1,4 et 1,9 µm entre autres) [9].

Avec un télescope d'amateur on repère parfaitement la zone d'impact ou plus précisément sur ce cliché de la figure 5 : la montagne jouxtant le nord de CABEUS, notée (A-). Au passage on y reconnaît bien le profil émoussé des reliefs lunaires.

On explore les zones de hautes latitudes entre 70 et 80° facilement et si la libration est favorable on peut reconnaître des formations jusqu'à 85°.

De l'eau pour les futurs sélénites

Pour les futurs sélénites, venus de la Terre, ces fonds noirs seront comme des mines d'or, mais un or vital. Pour paraphraser un commentateur américain, sur Terre, une bouteille d'un litre d'eau revient à environ 1 euro. Mais apporter ce kilogramme d'eau sur la lune reviendrait à près de 50 000 euros (emballage non compris). Sur cette seule remarque, on comprend ainsi l'intérêt de rechercher les régions lunaires « riches » en eau. Les brèves missions Apollo se situaient proches de l'équateur là où le sol lunaire ne recèle aucune trace d'eau, les futures installations fixes seront polaires.

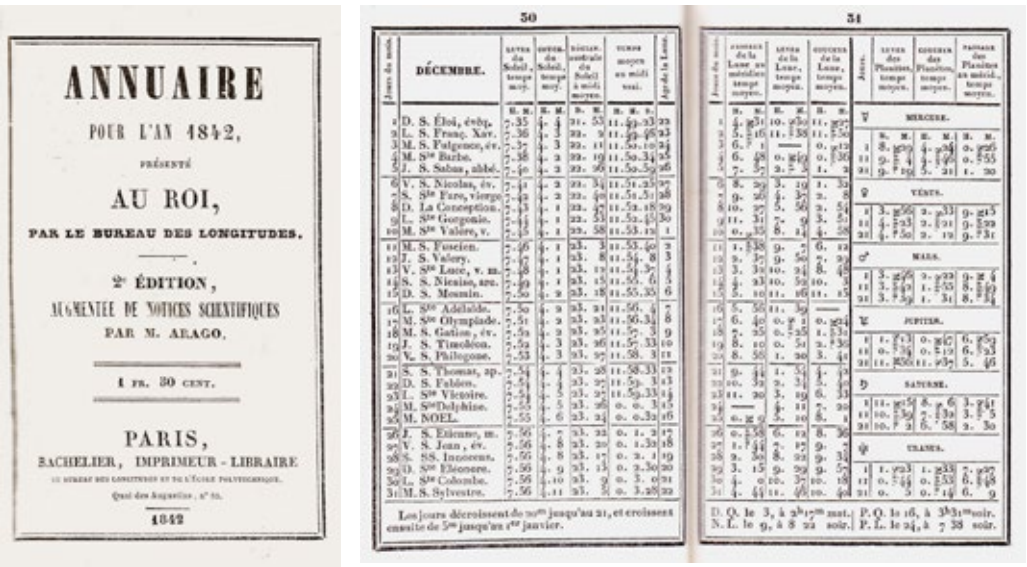
En observant ces régions des pôles Nord et Sud, si on ne rêve plus de sélénites survivants au fond des cirques, on imagine les futures bases lunaires installées sur les hauteurs des remparts violemment baignés de lumière par le Soleil rasant, tirant leur eau de ces fonds noirs d'encre, seulement éclairés par « cette obscure et éternelle clarté tombée des étoiles ».

Biblio-netographie

[1] Selenotopographische fragmente, 1802 J.C. Baier
[2] Selenotopographische fragmente, p 228, § 802
[3] https://sservi.nasa.gov/articles/water-in-moon-rocks-challenges-lunar-formation-theory/
[4] http://ipag.osug.fr/~beckp/Research/Vitae_files/Beck_PR_HDR_light.pdf , p16, p18
[5] https://www.isro.gov.in/pslv-c11-chandrayaan-1
[6] https://www.jpl.nasa.gov/news/news.php?feature=7218
[7] https://www.nasa.gov/mission_pages/LRO/news/water_search.html
[8] http://www.oir.caltech.edu/twiki_oir/bin/view/Palomar/PalmLGS/Lcross_palomar
[9] https://www.nasa.gov/mission_pages/LCROSS/main/prelim_water_results.html

■

THÈME
LES ÉPHÉMÉRIDES



ANNUAIRE

POUR L'AN 1842,

PRÉSENTÉ

AU ROI,

PAR LE BUREAU DES LONGITUDES.

2e ÉDITION,

AUGMENTÉE DE NOTICES SCIENTIFIQUES

PAR M. ARAGO.

1 FR. 50 CENT.

PARIS,

BACHELIER, IMPRIMEUR-LIBRAIRE

1842

Fig.1.

Fig.2.

Fig.1. Annuaire du Bureau des longitudes de 1842. On y trouve pour le Soleil, la Lune et les six planètes (on ne connaissait encore pas Neptune) les heures de lever et de coucher ainsi que l'heure de passage au méridien en temps moyen de Paris ; pour la Lune, on indique aussi son âge (1 pour la nouvelle Lune). Dans les premières pages, sont indiquées les éclipses de l'année, les dates de commencement des saisons et d'entrée du Soleil dans les signes du zodiaque, l'obliquité de l'écliptique (23° 27' 41,2")... On trouve aussi les heures de marée dans différents ports., les apogées et périgées de la Lune, de nombreuses conversions d'unités de mesure (longueur, poids, monnaies), des statistiques sur la population, des renseignements sur les départements (chefs-lieux, population...), des densités, des altitudes... bref, une vraie encyclopédie.

Fig.2. En 2019, l'Institut de mécanique céleste et de calcul des éphémérides (IMCCE) et le Bureau des longitudes (BdL) publient toujours sur papier des éphémérides, Connaissance des temps mais l'IMCCE a développé un site Internet permettant de donner un nombre nettement plus important de renseignements (Soleil, Lune, planètes, satellites, astéroïdes, comètes...)

Les éphémérides, passé, présent, futur

Jean-Eudes Arlot (IMCCE/observatoire de Paris)

C'est tout d'abord les fondements de la construction des éphémérides qui sont présentés, c'est-à-dire à partir de quel modèle, s'appuyant sur quelle loi ? Avant d'aborder leur longue histoire. Enfin ce sont les besoins auxquels elles répondent dans le monde actuel et futur qui sont analysés.

Une éphéméride est une table des événements journaliers et par extension, une éphéméride astronomique prévoit les événements astronomiques de chaque jour. Chacun a déjà eu en main des éphémérides astronomiques : le calendrier des postes ou les éphémérides publiées par le Bureau des longitudes ou par d'autres institutions.

Il s'agit toujours de prédictions soit de positions d'astres ou de leur visibilité ou non dans le ciel nocturne, soit de phénomènes astronomiques, éclipses ou plus simplement lever et coucher du Soleil, de la Lune ou d'un autre astre. Mais comment réalise-t-on ces éphémérides ? Sont-elles exactes ? Avec quelle précision ? Jusqu'à quand peut-on prévoir ?

Comment construire les éphémérides ?

Prédire les phénomènes astronomiques

Le but premier des éphémérides est de prévoir les phénomènes astronomiques. Pour cela il faut connaître le mouvement des astres impliqués dans ces phénomènes. Cette connaissance doit être assez précise pour plusieurs raisons : d'abord, ne pas trop se tromper sur l'heure du phénomène.

Dans le cas d'un lever ou coucher de Soleil, une erreur de quelques minutes sur la course du Soleil entraînera une erreur de quelques minutes sur l'heure du lever ou du coucher.

L'expérience des observations passées permettra de prévoir non seulement le phénomène mais aussi la précision de la prédiction.

Cependant dans le cas de phénomènes tels que les éclipses, la précision de la connaissance des mouvements devient plus cruciale : une imprécision dans le mouvement peut entraîner tout simplement l'inexistence du phénomène. Il est très différent de prévoir une éclipse avec 5 ou 10 minutes de retard ou de prévoir une éclipse qui n'aura pas lieu ou ne sera pas visible des observateurs qui l'attendent (des astronomes l'ont payé de leur vie…). La précision de la connaissance des mouvements est donc très importante.

La visibilité des planètes dans les constellations © LI-IMCCE.

Construire un modèle extrapolable

Concrètement, la connaissance du mouvement des astres se traduit par la fabrication d'un modèle. Le Soleil revenant chaque jour avec une périodicité de 24 heures permet de construire un modèle de mouvement circulaire uniforme de période 24 heures.

Connaissant l'inclinaison de l'axe de la Terre, on peut prédire les heures de lever et coucher du Soleil… avec une précision de l'ordre du quart d'heure, pas mieux ! Pourquoi ? Parce que le mouvement du Soleil est beaucoup plus complexe ; en particulier, l'orbite de la Terre est elliptique. On s'en est aperçu dès l'Antiquité et il a fallu construire des outils mathématiques pouvant mieux décrire le mouvement du Soleil.

On peut remarquer qu'on parle ici de mouvement du Soleil et non de mouvement de la Terre. Les mouvements sont relatifs et il suffit de modéliser le mouvement apparent du Soleil.

Pour les planètes, le problème est beaucoup plus complexe car leur mouvement apparent est assez erratique !

Par exemple la planète Mars avance puis recule puis avance à nouveau sur le fond d'étoiles pour un observateur terrestre : il n'y a pas de modèle mathématique simple qui décrit un tel mouvement et qui est surtout extrapolable dans le futur.

La rétrogradation de Mars est difficile à modéliser sans avoir une bonne représentation du Système solaire© Tunç Tezel.

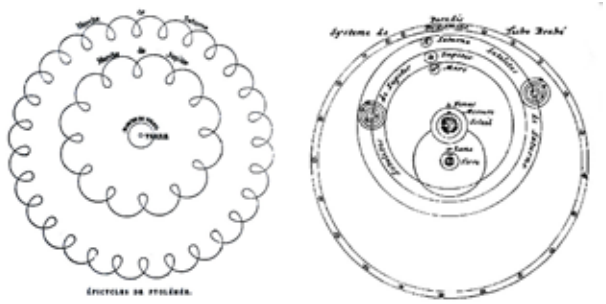
Quel modèle pour les mouvements célestes ?

La première approche pour disposer d'un modèle de mouvement est l'approche cinématique. On observe le mouvement en notant les variations de positions et on cherche le modèle mathématique le plus proche qui pourra simuler au mieux ce mouvement. L'inconvénient est que l'extrapolation est assez aléatoire. Ainsi, un polynôme peut simuler n'importe quel mouvement avec une bonne précision en étant ajusté sur des observations régulières mais l'extrapolation est impossible : il y a divergence immédiate dès que l'on sort de la période des observations. La seconde approche consiste à essayer de trouver quelles sont les « lois naturelles » qui régissent ce mouvement. Kepler, le premier, énonce des lois simples qui décrivent bien le mouvement des planètes : il a étudié les observations de Tycho Brahé pour cela. Le problème est que ses lois ne concernent que le mouvement de deux corps dont l'un est prépondérant, alors que le Système solaire est plus peuplé. Par chance, ce système peut se décomposer en une suite de mouvements à deux corps : Soleil et une planète ou planète et un satellite et les éphémérides construites sur ces bases permettront une meilleure prédiction des phénomènes astronomiques. Ainsi, à partir de ces lois, Horrocks prévoit et observe un passage de Vénus devant le Soleil ce qui n'était pas possible auparavant. Newton va élargir et démontrer les lois de Kepler et ramener ces trois lois à une seule : la loi de la gravitation universelle. Comme les lois de Kepler, cette loi est empirique et inexplicable (une action instantanée à distance !) mais à partir de ce principe et des lois de la mécanique tous les mouvements du Système solaire s'expliquent, de même que l'aplatissement des corps en rotation et les marées. On peut désormais construire des modèles mathématiques pour tout mouvement dans le Système solaire (la mécanique céleste) avec une précision inégalée. Mieux, un écart entre les éphémérides et les observations va être résolu en ajoutant une planète encore inconnue –Neptune– pour qu'éphémérides et observations s'accordent pleinement. Le Verrier consacre là le triomphe de la mécanique céleste. Le Verrier rencontrera le même problème avec Mercure mais ce sera alors l'échec du principe de Newton incapable de décrire le mouvement de Mercure (le périhélie de Mercure avance trop vite !). La relativité générale va remplacer le principe de Newton, il n'y aura plus d'action à distance mais une courbure de l'espace pour faire mouvoir les planètes et les éphémérides seront encore plus précises. Ainsi les éphémérides servent non seulement à prévoir les positions des astres mais aussi, par comparaison à l'observation, à valider les lois qui régissent l'univers.

Historique des éphémérides : hier et aujourd'hui

De Ptolémée à Kepler

Dès l'Antiquité, la prédiction des phénomènes astronomiques revêtait une grande importance de par l'effroi produit sur des populations redoutant le pire. Une éclipse, phénomène inexpliqué, engendrait des peurs du fait que chaque phénomène constituait un présage, en général d'un malheur à venir. Les astronomes tentaient de faire ces prédictions en repérant la périodicité de certains phénomènes. Avec le système complexe mis en place par Ptolémée, on pouvait faire des éphémérides et des prédictions de phénomènes. Malgré une erreur de base sur le mouvement des planètes supposées tourner autour de la Terre, les prédictions d'éclipses étaient possibles mais sans précision et sans pouvoir dire où on les verrait à la surface de la Terre. Les Arabes étant de grands navigateurs eurent besoin d'éphémérides et on peut citer les tables de Tolède, réalisées au XIe siècle. Plus tard, le roi Alphonse X de Castille demanda à une équipe d'astronomes d'améliorer les tables de Tolède à l'aide de nouvelles observations et les tables alphonsines furent publiées au XVe siècle. Elles reposaient toujours, bien entendu, sur le système de Ptolémée. À la même époque, Ulugh Beg construisait les tables sultaniennes à Samarcande. Au XVIe siècle, les nouvelles idées de Copernic incitèrent Erasmus Reinhold à construire de nouvelles tables, les tables pruténiques[1] avec de nouvelles observations.



À gauche, le Système solaire selon Ptolémée et à droite selon Tycho Brahé. Ce dernier est valable au point de vue cinématique mais pas au point de vue dynamique.

1 Nommées ainsi en l'honneur du duc de Prusse, protecteur de Reinhold.

C'est au XVIIe siècle que Kepler établit les tables rudolphines[2] qui reposaient sur les lois qu'il avait énoncées et sur les observations de Tycho Brahé. Ce fut une révolution : tous les phénomènes astronomiques purent être prédits avec plus de précision. Des phénomènes tels que les passages de Vénus et Mercure devant le Soleil purent être prévus ce qui n'était pas possible auparavant.

Les « temps modernes »

Les éphémérides étaient jusqu'alors réservées à une élite autour des princes et des rois. Le mécénat permettait aux astronomes de travailler. À côté de recherches menées pour améliorer les prédictions de phénomènes, les astronomes pratiquaient l'astrologie, beaucoup plus lucrative. Le XVIIe siècle voit l'arrivée de la science telle qu'on la conçoit aujourd'hui : des sociétés scientifiques et des institutions officielles voient le jour : en France, Colbert crée l'Académie des sciences en 1666 et l'Observatoire de Paris en 1667. Il est désormais interdit aux astronomes de faire de l'astrologie qui utilise les éphémérides astronomiques mais en effectue des interprétations sujettes à caution….

La Connaissance des temps pour 1713.

En 1679, paraissent les premières éphémérides officielles françaises : la Connaissance des temps. D'emblée, cet ouvrage veut se distinguer des nombreux almanachs qui paraissent à l'époque et rester une publication scientifique. Il comprend 4 parties :

- la première partie simple compréhensible par « les moins intelligents » est surtout destinée au grand public (calendrier, Soleil, visibilité de la Lune et des planètes) ;
- la deuxième partie concerne les marées et le réglage des pendules. On voit que les marins et la détermination du temps sont les préoccupations principales ;
- la troisième partie, plus astronomique, est destinée « aux curieux » et aux astronomes, et donne les positions des planètes ;
- la quatrième partie concerne la physique et la météorologie et peut inclure des domaines scientifiques très éloignés de l'astronomie.

Dès 1685, la Connaissance des temps pour 1685 publie les prédictions des éclipses de Lune.

Les autres pays européens suivront rapidement la France pour publier leurs éphémérides nationales. Les informations sur le temps et le réglage des horloges ainsi que sur la navigation montre bien les problèmes de l'époque. Les satellites de Jupiter vont vite avoir une place importante car ils servent aux géographes à se caler sur le temps de Paris par l'observation des éclipses de ces satellites. De même les distances lunaires utiles pour la navigation seront publiées jusqu'à l'avènement d'horloges mécaniques fiables.

De Kepler à Lalande

Quels sont les modèles mathématiques utilisés dans la Connaissance des temps ? Prenant la suite des tables rudolphines, la Connaissance des temps va, au début, être fondée sur des modèles cinématiques et sur les lois de Kepler. La précision des observations augmentant, l'imprécision des éphémérides va vite apparaître. En 1763, les éphémérides des satellites de Jupiter (dont le mouvement est particulièrement complexe) sont mauvaises. Pour le Soleil et les planètes, les astronomes et en particulier Lalande réussissent à obtenir de bons modèles cinématiques en identifiant les « inégalités », c'est-à-dire les écarts à un mouvement circulaire uniforme et à les quantifier grâce aux observations.

2 En l'honneur de Rodolph II empereur du St-Empire.

De Lalande à Le Verrier

À partir de 1770, Laplace étudie les conséquences de l'application de la loi de la gravitation universelle de Newton. Cela va lui permettre de résoudre les problèmes rencontrés jusqu'alors. Les perturbations mutuelles que les lois de Kepler ignoraient (les « inégalités ») peuvent maintenant être calculées précisément et non plus empiriquement. Le problème est alors d'écrire correctement les équations qui régissent le mouvement des corps du Système solaire sans rien oublier puis de trouver les meilleures méthodes pour les résoudre sachant – cela a été démontré – qu'il n'y a pas de solution analytique à ces équations. Le Verrier va parfaire les éphémérides en reprenant les modèles de chacun des corps. La construction d'une éphéméride pour Uranus va être l'occasion de débusquer la planète Neptune, inconnue jusqu'alors mais perturbant le mouvement d'Uranus. Malgré l'échec des éphémérides de Mercure, la mécanique céleste semble tout expliquer.

De Le Verrier à aujourd'hui

À la fin du XIXe siècle, les éphémérides sont parfaites pour les besoins de l'époque et ne progresseront plus durant un siècle jusqu'à l'apparition de l'exploration spatiale et des premiers lancements de satellites artificiels et de sondes interplanétaires. Les éphémérides n'avaient alors plus la précision requise et la mécanique céleste avait encore son mot à dire. C'est à cette occasion que fut créé un service de recherche au Bureau des longitudes consacré aux méthodes nouvelles de la mécanique céleste assistées par ordinateur. Ce service deviendra l'IMCCE (Institut de mécanique céleste et de calcul des éphémérides) en 1998.

Qu'en est-il aujourd'hui ? Quel est le niveau de précision des éphémérides ? Jusqu'à l'apparition des calculateurs électroniques, les méthodes mathématiques de résolution des équations différentielles des mouvements restaient incontournables et s'améliorèrent jusqu'à ce que l'informatique puisse intégrer numériquement les équations. La mécanique céleste se limitait ainsi à l'écriture des équations des mouvements, les ordinateurs se chargeant de les résoudre et de construire les tables des éphémérides. Les éphémérides publiées dans la Connaissance des temps reposent aujourd'hui (depuis 2007) sur des intégrations numériques qui évitent de chercher une solution approchée aux équations du mouvement. À partir de conditions initiales (positions et vitesses du corps), les ordinateurs peuvent calculer les positions successives pas à pas.. La relativité générale n'a pas chassé la loi de Newton mais a apporté les corrections « relativistes » aux équations classiques de la mécanique céleste. Les astéroïdes, autrefois considérés comme négligeables, doivent aujourd'hui être pris en compte dans les équations pour obtenir des éphémérides très précises. La dynamique du Système solaire doit être considérée de manière globale.

Dates	1610	1650	1700	1800	1890	1920	1980	2010
Précision	60	4	0,5	0,08	0,02	0,01	0,005	0,001

L'ordre de précision des modèles de mouvements des satellites galiléens de Jupiter au cours du temps en secondes d'arc : la précision des éphémérides est plus faible étant donné que les observations ne se font pas avec une telle précision.

Les éphémérides aujourd'hui pour quoi faire et pour qui ?

La Connaissance des temps : les éphémérides officielles françaises

Publiées sans interruption jusqu'à aujourd'hui, la Connaissance des temps va évoluer :

- une précision accrue d'années en années ;
- une adaptation aux besoins du moment ;
- une permanence de publication des positions du Soleil, de la Lune et des planètes ainsi que des phénomènes astronomiques.

À partir de 1795, l'Annuaire du Bureau des longitudes va rassembler les éphémérides pour le grand public (lever et coucher des astres, calendriers, phénomènes astronomiques, positions des étoiles) et la Connaissance des temps va publier des données plus précises pour les astronomes et les marins.

En 1889, les marins disposeront d'une nouvelle éphéméride extraite de la Connaissance des temps et adaptée à leurs besoins : les Éphémérides nautiques.

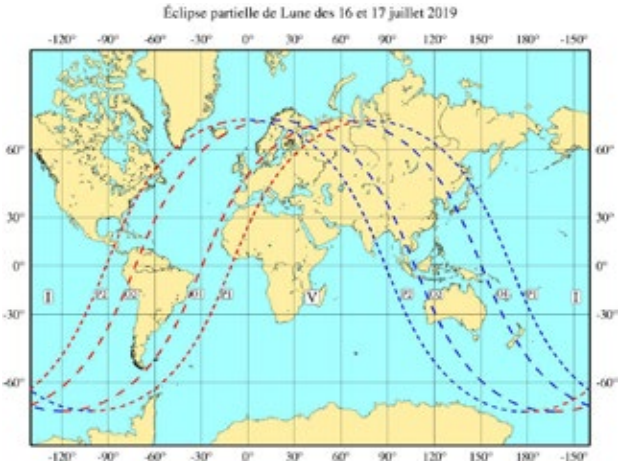
En 1980, l'apparition des calculateurs électroniques va entraîner la disparition des éphémérides tabulées mais la publication d'éphémérides précises de référence va continuer malgré la disponibilité de ces éphémérides sur ordinateur.

Des éphémérides pour la société civile

Aujourd'hui les éphémérides sont disponibles sous diverses formes, en particulier via Internet. Des éphémérides imprimées simples restent nécessaire comme référence et pour comprendre ce qui est proposé, ce que sont les coordonnées de position des astres et comment comprendre les phénomènes

astronomiques prévus. Des éphémérides spécifiques sont fournies pour des besoins particuliers :

- les configurations du Soleil et de la Lune dans le ciel sont souvent demandées pour servir de preuve ou d'argument dans certaines affaires criminelles ou civiles ;
- les heures de lever et coucher du Soleil ont force de loi pour l'éclairage public ou les horaires de pêche et de chasse ;
- les aéroports ont besoin de connaître les heures de lever de Soleil et l'azimut au lever pour éviter les éblouissements des pilotes ;
- les historiens demandent la configuration des astres pour certaines époques et certains monuments ;
- les architectes ont besoin des éphémérides du Soleil pour l'orientation des bâtiments et des panneaux solaires ;
- les phénomènes tels qu'éclipses qui sont attendus par le public.



La prédiction des zones de visibilité de l'éclipse de Lune de juillet 2019 (V indique la zone de visibilité et I la zone d'invisibilité ; en France, la Lune s'est levée au moment de la totalité). © P. Rocher/IMCCE.

Pour suivre les astres mobiles, les radiotélescopes ont besoin d'éphémérides. Ici, le radiotélescope de l'observatoire de Kun-Ming (Chine). © JEA.

Des éphémérides pour les astronomes

Les astronomes eux-mêmes ont besoin des éphémérides pour pointer leurs télescopes vers les astres qu'ils souhaitent observer.

La préparation des observations doit être minutieuse pour trouver le meilleur site (les astres doivent être hauts dans le ciel au moment le plus sombre de la nuit) au meilleur moment (les astres doivent être levés !). Les télescopes automatiques doivent être programmés avec des éphémérides permettant de suivre le mouvement des astres tout au long de la nuit.

Des éphémérides pour la recherche

Les éphémérides sont aussi un outil puissant pour la recherche et l'exploration du Système solaire. Par exemple, comment avoir des informations sur la nature interne des corps du Système solaire ?

Il se trouve que le comportement d'un corps dans son orbite va différer selon qu'il est solide ou liquide : des effets de marée entre les corps vont dissiper de l'énergie et modifier les orbites. Les éphémérides construites à partir de conditions initiales bien définies seront confrontées à des observations très précises : les différences pourront être le signe d'un modèle erroné. La dissipation d'énergie entraîne des effets cumulatifs bien visibles sur les observations comparées aux éphémérides et la structure interne des corps peut en être déduite.

Des éphémérides pour la navigation maritime : les éphémérides nautiques

Dès l'origine, les éphémérides avaient pour but d'aider les marins à faire le point en mer mais peu à peu des outils nouveaux remplacent la navigation astronomique.

Dès le XIXe siècle, on n'utilise plus les satellites de Jupiter ni les distances lunaires[3] pour régler les horloges mécaniques qui sont désormais suffisamment fiables pour garder le temps. Aujourd'hui, le GPS remplace les éphémérides nautiques et l'observation des astres pour faire le point. Cependant, ces éphémérides restent obligatoires pour les navires de haute mer ou l'aviation militaire pouvant subir une panne de ses systèmes électroniques.

3 En observant un phénomène astronomique – position des satellites de Jupiter ou distance angulaire de la Lune à un astre (étoile ou Soleil) – on pouvait régler une horloge à bord sur l'heure du méridien de référence grâce aux éphémérides de ce phénomène calculées justement pour ce méridien. La différence entre l'heure locale et l'heure du méridien de référence donnait la longitude.

Des éphémérides pour la navigation spatiale

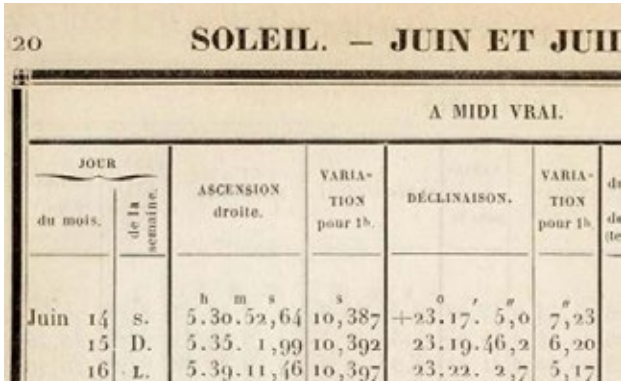
La préparation et l'exploitation des données des missions spatiales dans le Système solaire exigent aussi d'avoir des éphémérides bien à l'avance sur des temps longs puis très précises au moment des manœuvres des sondes près des planètes. Il s'agit d'éphémérides spécifiques ajustées au mieux pour la période de la mission. En retour, les données de navigation des sondes sont utilisées pour l'amélioration des modèles.

La représentation des éphémérides

Il ne suffit pas de disposer de modèles sophistiqués décrivant le mouvement des astres, il faut aussi être capables de fournir une position à tout instant selon les besoins d'un utilisateur.

Tabulées et interpolées

Les éphémérides de positions des corps se présentent sous la forme de coordonnées, en général ascension droite et déclinaison (mais aussi coordonnées différentielles X et Y par rapport à un astre connu et facilement repérable, par exemple la planète Jupiter pour les satellites galiléens). Ces données étaient autrefois (et le sont toujours dans certaines éphémérides pour amateurs) présentées sous forme de tables de valeurs pour des dates successives entre lesquelles les coordonnées variaient peu. On pouvait alors les interpoler pour des dates intermédiaires.



20 SOLEIL. — JUIN ET JUII

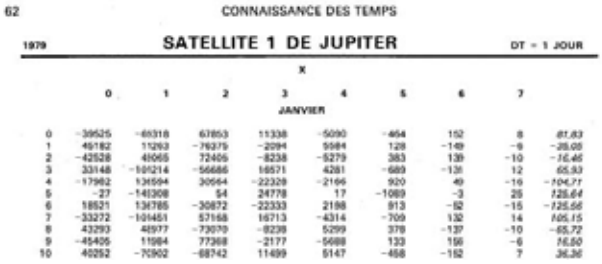
A MIDI VRAI.

JOUR du mois.	JOUR de la semaine.	ASCENSION droite.	VARIATION pour 1h.	DÉCLINAISON.	VARIATION pour 1h.
		h m s	s	° ′ ″	″
Juin 14	S.	5.30.52,64	10,387	+23.17. 5,0	7,23
15	D.	5.35. 1,99	10,392	23.19.46,2	6,20
16	L.	5.39.11,46	10,397	23.22. 2,7	5,17

Les éphémérides du Soleil sous forme de table dans la Connaissance des temps de 1890. Le nombre de décimales données correspond à la précision des calculs : ici le dixième de seconde d'arc. On aura le centième un siècle plus tard et le millième aujourd'hui.

Représentation polynômiale ou mixte

Avec les ordinateurs personnels, cette représentation permet de faire un calcul pour chaque coordonnée avec l'argument « temps » en entrée. On entre la date précise et on obtient les coordonnées souhaitées dans le repère souhaité. Il n'est pas possible d'effectuer le calcul avec le modèle complet qui comprend des milliers de termes ou qui nécessite une intégration numérique et on va construire un modèle simple valable sur un temps court, période où l'on souhaite obtenir l'éphéméride. La représentation la plus simple est évidemment le polynôme du temps mais les mathématiciens ont proposé d'utiliser des polynômes plus élaborés : les polynômes de Chebychev qui ont l'avantage de nécessiter moins de termes à précision égale.



62 CONNAISSANCE DES TEMPS

1979 SATELLITE 1 DE JUPITER DT = 1 JOUR

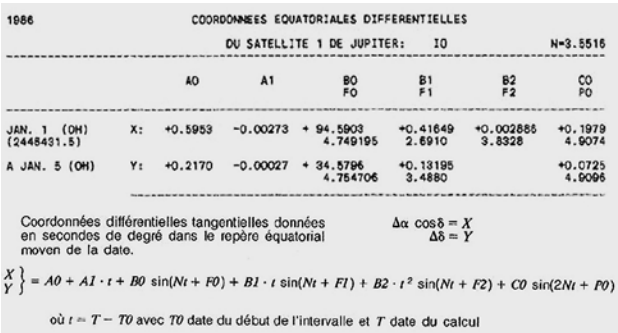
X

JANVIER

	0	1	2	3	4	5	6	7	
0	-39525	-46318	67853	11338	-5090	-464	152	8	81,83
1	49182	11263	-76375	-2094	5984	128	-149	-9	-28,08
2	-42528	49065	72406	-8238	-5279	383	139	-10	-16,46
3	33148	-109214	-56686	18571	4281	-689	-126	12	65,93
4	-17962	134594	30564	-22328	-2166	920	49	-16	-104,71
5	-27	-140308	54	24778	17	-1089	-3	25	125,64
6	18521	134785	-30872	-22333	2188	913	-52	-15	-125,66
7	-33272	-109451	57168	18713	-4314	-709	132	14	105,15
8	43293	48977	-73070	-8238	5299	378	-137	-10	-65,72
9	-45405	11984	77368	-2177	-5688	133	156	-6	16,50
10	40252	-70902	-68742	11499	5147	-468	-152	7	36,36

La représentation des éphémérides d'Io sous forme de polynômes de Chebychev : les coefficients sont donnés de jour en jour et permettent de calculer les positions d'Io avec la même précision que le modèle.

Enfin, dans le cas d'un mouvement rapide pour lequel un terme périodique prépondérant apparaît, on utilise des fonctions mixtes qui allient un ou deux termes périodiques et des polynômes du temps. Cela permet de limiter le nombre de données nécessaires à précision égale. C'est le cas des satellites galiléens de Jupiter.



1986 COORDONNEES EQUATORIALES DIFFERENTIELLES

DU SATELLITE 1 DE JUPITER: IO N=3.5516

		A0	A1	B0 F0	B1 F1	B2 F2	C0 P0
JAN. 1 (0H) (2448431.5)	X:	+0.5953	-0.00273	+ 94.5903 4.749195	+0.41649 2.6910	+0.002885 3.8328	+0.1979 4.9074
A JAN. 5 (0H)	Y:	+0.2170	-0.00027	+ 34.5796 4.754706	+0.13195 3.4880		+0.0725 4.9096

Coordonnées différentielles tangentielles données en secondes de degré dans le repère équatorial moyen de la date.

$\Delta\alpha \cos\delta = X$
$\Delta\delta = Y$

$$\left.\begin{matrix} X \\ Y \end{matrix}\right\} = A0 + A1 \cdot t + B0 \sin(Nt + F0) + B1 \cdot t \sin(Nt + F1) + B2 \cdot t^2 \sin(Nt + F2) + C0 \sin(2Nt + P0)$$

où $t = T - T0$ avec $T0$ date du début de l'intervalle et T date du calcul

Les coefficients des fonctions mixtes représentant le mouvement de Io sur 4 jours et les formules à appliquer pour calculer les positions.

Les éphémérides aujourd'hui et demain

La précision

Les progrès encore possibles pour les éphémérides concernent bien entendu la précision. Il y a cependant des limites à cette précision.

D'abord au niveau observationnel : il faut bien comprendre que les éphémérides donnent les positions des centres de masse des objets concernés et que ce centre de masse n'est pas observable. Le

passage de la figure observée d'une planète à son centre de masse est incertain, dépassant la précision de calcul de l'éphéméride. Une chose reste certaine : les satellites naturels ou artificiels tournent autour du centre de masse du système concerné ce qui simplifie l'analyse des observations. Ainsi il vaut mieux observer un petit corps dont le centre de masse est aisément identifiable en orbite autour d'une planète plutôt que la planète elle-même pour obtenir des données qui amélioreront l'éphéméride.

Ensuite il faut que les équations dynamiques posées pour modéliser les mouvements soient complètes et n'oublient aucun corps perturbateur ni aucune force non gravitationnelle. Les corrections relativistes sont aussi désormais indispensables. Une multitude d'astéroïdes perturbent le mouvement des planètes et ils ne sont pas tous connus ou pris en compte, en particulier au-delà de Neptune. Leur influence est faible mais elle existe et peut affecter le reste du système et les prendre en compte est une façon d'améliorer les éphémérides.

Les observations utilisées pour ajuster le modèle sont cruciales : pour les planètes comme Mars qui sont observées par des sondes in situ, la précision atteint quelques centimètres mais pour les planètes lointaines telles Uranus et Neptune, la précision n'est pas meilleure que plusieurs centaines de kilomètres.

Enfin, ce qui est important, c'est de pouvoir extrapoler les éphémérides dans l'avenir pour la prédiction des phénomènes ou la préparation des missions spatiales. Or, la précision des éphémérides que l'on détermine à partir de celles des observations et du modèle n'est valable que pour la période durant laquelle on a des observations. Comment la précision évolue-t-elle lorsqu'on extrapole les éphémérides ? Il existe plusieurs méthodes pour évaluer cette précision d'extrapolation et il apparaît que cette précision est d'autant meilleure que l'échantillonnage des observations utilisées pour ajuster le modèle répond à des critères précis, critères qui ne sont en général pas satisfaits (répartition régulière des observations, loi des erreurs d'observation commises connue). L'utilisation indispensable d'observations anciennes dont on ignore en général les repères entraîne des biais : une nouvelle analyse de ces données est une piste pour améliorer la précision d'extrapolation dans l'avenir.

La diffusion

Les éphémérides doivent être calculées et diffusées auprès des utilisateurs. On a vu qu'une représentation simple est indispensable. Les éphémérides imprimées n'ont plus aujourd'hui d'intérêt que pour valider et vérifier des éphémérides électroniques dont l'utilisation est souvent complexe et il faut être sûr de ce que l'on calcule. La multiplicité des repères, pas toujours simples à définir, nécessite une grande vigilance pour obtenir des données précises. Les éphémérides proposées sur le réseau Internet sont multiples et on trouvera ci-dessous les différentes possibilités offertes aux utilisateurs par l'astronomie « officielle » des laboratoires de recherche. À noter que seuls deux laboratoires (IMCCE/Bureau des longitudes et Jet Propulsion Laboratory/NASA) proposent des éphémérides originales, toutes les autres n'étant que des copies plus ou moins fiables. Ces laboratoires offrent la possibilité de construire soi-même ses propres éphémérides en mettant à disposition les modèles dynamiques eux-mêmes mais leur utilisation est complexe pour le néophyte.

Éphémérides proposées par l'IMCCE [4]:

Éphémérides pour les observateurs (Multisat) :
http://nsdb.imcce.fr/multisat/nssephmf.htm

Éphémérides accessibles au travers d'un script permettant d'obtenir une grande variété de données (Miriade) :
http://vo.imcce.fr/webservices/miriade/?forms

Éphémérides de tous les corps du Système solaire présents sur une image astronomique (Skybot) :
http://vo.imcce.fr/webservices/skybot/?forms

Phénomènes astronomiques :
https://promenade.imcce.fr/fr/pages3/321.html

Calendriers :
https://promenade.imcce.fr/fr/pages2/279.html

Éphémérides proposées par le JPL/NASA (Horizons) :
https://ssd.jpl.nasa.gov/horizons.cgi

Conclusion

Les éphémérides des corps du Système solaire restent très utilisées et représentent de mieux en mieux les mouvements de ces corps. La demande des chercheurs ou des agences spatiales oblige à garder un niveau de qualité constant et une précision accrue. Il n'existe plus que deux laboratoires dans le monde construisant des éphémérides indépendantes et l'attention a été attirée par les astronomes sur l'importance de conserver ces expertises. En particulier, dans le cas des astéroïdes géocroiseurs pouvant présenter un danger pour la Terre, il est important que des calculs totalement indépendants puissent être faits. ■

4 Sans oublier le nouveau site décrit dans l'article p. 14 https://ssp.imcce.fr

Utilisation des nouvelles éphémérides de l'IMCCE

Pierre Causeret, Esbarres, pierre.causeret@wanadoo.fr

Il y a quelques années, le site de l'IMCCE était piraté. Cela a pris un peu de temps, mais un nouveau site est né, très facile à utiliser même par nos élèves. Voici quelques exemples d'utilisation des éphémérides de ce nouveau portail de l'IMCCE (Institut de mécanique céleste et de calcul des éphémérides).

Si vous tapez ssp.imcce.fr dans la ligne d'adresse de votre navigateur préféré, vous devriez arriver à cette page d'accueil :

Fig.1. *Page d'accueil du site https://ssp.imcce.fr/forms*

Trois choix vous sont proposés :

1. Visibilité des astres

« Ce formulaire permet de calculer les instants de lever, de passage au méridien et de coucher du Soleil, de la Lune et des planètes, pour un lieu géographique donné et pour une date ou une période de temps (limitée à 730 jours) comprise entre le 1er janvier 1951 et le 31 décembre 2024 ».

Le lieu géographique peut-être simplement un nom de ville (à partir du code postal par exemple), éventuellement une adresse plus précise ou des coordonnées géographiques.

Il est d'ailleurs possible de demander la précision de la seconde de temps.

2. Observation des planètes

« Ce formulaire permet de calculer les éphémérides utiles à l'observation du Soleil, de la Lune, des planètes, de leurs satellites, des astéroïdes et des comètes depuis la Terre. »

Pour un lieu donné, une date et une heure données (ou plusieurs, jusqu'à 10 000), et pour l'astre choisi, on obtient une multitude de renseignements :

coordonnées équatoriales topocentriques, angle horaire, azimut et hauteur, distance à l'observateur, magnitude visuelle, élongation solaire, phase...

3. Éphémérides de position

« Ce formulaire permet de calculer les éphémérides de position du Soleil, de la Lune, des planètes, de leurs satellites, des astéroïdes et des comètes pour un système de coordonnées et une époque donnés ».

On peut choisir le centre du repère (Soleil, Terre, observateur...), le plan de référence (équateur, écliptique), le type de coordonnées (sphériques ou cartésiennes)[1]... On obtient les coordonnées demandées, la magnitude, la phase, l'élongation...

Quelques remarques :

- pour le choix de l'astre, pas de problème pour le Soleil, la Lune ou les planètes. Pour les comètes ou les astéroïdes, il faut noter le nom international (par exemple Ceres pour Cérès, Europa pour Europe) dans la fenêtre « Planètes naines, satellites, astéroïdes et comètes ». Si vous tapez Halley, vous aurez le choix entre Halley (Asteroid) et 1P, P/halley (Comet) ;
- si vous voulez revenir à la page d'accueil de la figure 1, cliquez sur le logo de l'IMCCE en haut ;
- tous les résultats sont exportables pour pouvoir être exploités ensuite, avec un tableur par exemple, en format xml, csv ou txt. Dans la suite, nous avons privilégié le format csv ;
- lors de l'export en csv ou txt, on peut demander à ce que les angles (ascension droite, déclinaison, longitude et latitude écliptiques...) soient sous forme décimale. Cela facilite les calculs pour la suite.

Voici quelques exemples d'utilisation de ces éphémérides.

Étudier la durée de la journée au cours de l'année

On voudrait étudier les variations de la durée de la journée tout au long de l'année, pour un lieu donné, son école par exemple.

La première étape consiste à récolter les données, les heures de lever et de coucher du Soleil pour une année (voir le premier encadré page suivante).

1 Pour ces différents repères, on pourra se reporter à l'article Repérage, notions de base, dans le numéro 155 des Cahiers Clairaut.

Récolte des données

1. Aller sur https://ssp.imcce.fr
2. Choisir Visibilité des astres.
3. Dans la barre d'adresse, entrer le nom de la commune ou le code postal ou une adresse complète.
4. Pour choisir les dates, cliquer sur ∨ à droite de *Époque* et rentrer la première date au format AAAA-MM-JJ, par exemple 2019-12-21 pour le 21 décembre 2019. Indiquer ensuite le nombre de dates.
5. Cliquer sur ∨ à droite de *Corps du Système solaire* et cocher Soleil (décocher les autres).
6. Cliquer sur *Calculer*.

On obtient alors les heures de lever, de passage au méridien et de coucher du Soleil pour les dates choisies.

7. On peut cliquer sur Az↓ pour que l'azimut soit compté à partir du sud comme les astronomes traditionnellement et non du nord comme les géographes. Si on clique sur .00, on aura la précision de la seconde au lieu de la minute.
8. On enregistre les données en cliquant sur ⬇.

Choisir le format csv par exemple.
Choisir sexagésimal pour garder le format h : min (ou décimal pour avoir des heures décimales).
Enregistrer le fichier. Choisir le répertoire et le nom du fichier.
On peut ensuite fermer la page du site de l'IMCCE.

Visibilité des astres

Date (UTC)	Lever heure	Lever azimut	Méridien heure	Méridien hauteur	Coucher heure	Coucher azimut
Soleil						
2020-01-01	7:27	124°18'	11:42	19°53'	15:58	235°45'
2020-01-02	7:27	124°09'	11:43	19°58'	15:59	235°54'
2020-01-03	7:27	124°01'	11:43	20°03'	16:00	236°03'

Fig.2. *Les résultats affichés par le site de l'IMCCE.*

Dans une deuxième étape, on utilise un tableur. On pourra limiter les données si on fait le traitement à la main. On ne gardera par exemple que le 1er de chaque mois. Pour un traitement informatique, on pourra garder les 365 (ou 366) dates de l'année (voir l'encadré ci-dessous).

Mise en forme des données

1. Ouvrir le fichier avec son tableur préféré. Bien choisir le point-virgule comme séparateur.
2. Supprimer les colonnes inutiles pour ne garder que la date, les heures de lever et de coucher du Soleil.
3. Supprimer éventuellement les lignes inutiles. On peut ne garder par exemple que le 1er de chaque mois ; ceux qui voudraient le faire vite peuvent ajouter une colonne ne gardant que les deux caractères de droite de la date (le jour du mois), classer les lignes en fonction de ce jour et ne garder que les 01.

	A	B	C	D
1	Corps	Date (UTC)	Instant du lever (heure)	Instant du coucher (heure)
2	Soleil	2020-01-01	7:27	15:58
3	Soleil	2020-02-01	7:07	16:39
4	Soleil	2020-03-01	6:20	17:24
5	Soleil	2020-04-01	5:19	18:08
6	Soleil	2020-05-01	4:24	18:49
7	Soleil	2020-06-01	3:49	19:26

Fig.3. *Début du fichier ouvert et traité avec le tableur de LibreOffice.*

La dernière étape consiste à traiter les données, en réalisant un graphique par exemple.
Pour des élèves d'école primaire, différentes représentations sont proposées dans le hors-série *Astronomie à l'école* (p. 73). On peut par exemple placer les heures de lever et de coucher du Soleil sur un graphique pré imprimé sans aucun calcul (figure 4). On peut ensuite chercher à quelles dates la journée est la plus longue, la plus courte, égale à 12 h.

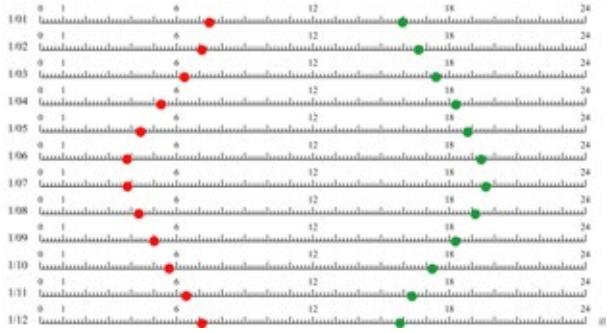


Fig.4. *Représentation des heures de lever et de coucher du Soleil à Esbarres le 1er de chaque mois.*

En collège, on pourra demander à calculer la durée de la journée et la représenter sur un graphique.
Si on choisit un traitement informatique, on peut conserver tous les jours de l'année, faire calculer à l'ordinateur la longueur de la journée et lui faire tracer le graphique.

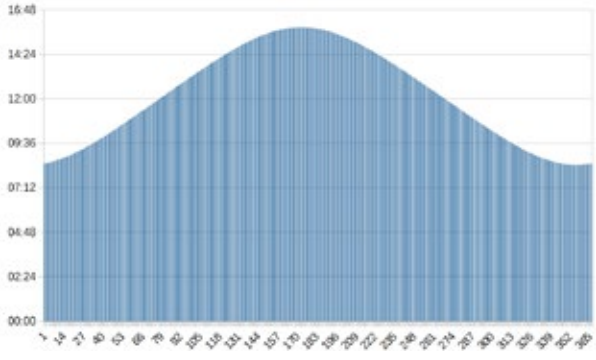


Fig.5. *Durée de la journée pour chaque jour de l'année. Graphique réalisé avec un tableur.*

Trouver le sud

Quand on veut installer un cadran solaire, il faut connaître avec précision la direction du sud. Les éphémérides de l'IMCCE sont très pratiques pour

cela. On cherche l'heure précise de passage du Soleil au méridien un jour donné pour le lieu désiré. Ce jour-là et à l'heure donnée par l'IMCCE à la seconde près, l'ombre d'un fil à plomb sur un sol horizontal indique la direction nord-sud.

Attention, l'heure est donnée en temps universel. Il reste à ajouter une heure (en heure d'hiver) ou deux heures (en heure d'été) pour avoir l'heure de sa montre

Comparer l'heure de passage de la Lune au méridien avec les horaires de marée

Autre proposition d'activité, toujours avec ce premier formulaire de l'IMCCE *Lever et coucher des astres*, mais en sélectionnant la Lune.

On ne garde comme information que l'heure de passage de la Lune au méridien et on compare avec les horaires de marée. On s'aperçoit que ce passage au méridien est suivi quelques heures plus tard par une marée haute. Ce décalage, assez variable, dépend du port. On l'appelle l'établissement du port. Le décalage est dû au temps que l'onde de marée se forme et arrive sur la côte. Il vaut environ 3 h sur la côte atlantique, 6 h à Saint-Malo, 9 h au Havre... La marée est donc en relation avec la Lune.

Il faut rappeler qu'il y a une deuxième marée haute chaque jour quelques heures après le passage de la Lune à l'antiméridien, côté nord et sous l'horizon.

Observation des planètes

Le deuxième formulaire concerne les positions des astres vus depuis un lieu donné sur Terre. Il peut servir à préparer une soirée d'observation mais les logiciels de type planétarium sont davantage utilisés. L'intérêt particulier de ces éphémérides, c'est d'une part que l'on peut facilement avoir des données pour une série d'heures ou de dates et d'autre part, qu'elles sont plus précises et plus sûres.

On peut les utiliser par exemple pour une occultation d'étoile par un astéroïde, pour simuler une éclipse de Soleil, pour retrouver des observations anciennes...

Le formulaire est là aussi très simple à compléter.

Représenter la rétrogradation de Mars

On peut la représenter vue du centre de la Terre ou vue depuis sa surface, la différence ne sera pas visible. On utilise ici le 3e formulaire, éphémérides de position.

Dans une première étape, il s'agit de récupérer les coordonnées de la planète chaque jour pendant 6 mois au moins, aux alentours de l'opposition. La prochaine opposition ayant lieu le 13 octobre 2020, nous allons suivre Mars du 1er juillet 2020 au 31 janvier 2021.

Il faudra ensuite dessiner la trajectoire apparente de Mars devant les constellations. La méthode la plus simple consiste à utiliser les coordonnées géocentriques écliptiques de Mars et à représenter les positions de la planète en projection quadratique avec la longitude écliptique en abscisse et la latitude écliptique en ordonnée (voir CC n° 164). Si on veut représenter également quelques constellations en fond, c'est un peu plus compliqué.

Récolte des données

1. Aller sur https://ssp.imcce.fr
2. Choisir Éphémérides de position.
3. Corps du Système solaire. Choisir Mars.
4. Époque
   Date. Mettre la 1ère date à 0 h : 2020-07-01T00:00:00
   Échelle de temps : UTC
   Nombre de dates : 215
   Pas de calcul : 1 jour.
5. Système de coordonnées
   Centre du repère : géocentre
   Plan de référence : écliptique
   Type d'éphémérides : J2000
   Coordonnées : sphériques
   Options (théorie planétaire) : n'importe.
6. Exporter sous csv.
   Format des angles : décimal
   Format des dates : ISO.

Enregistrer le fichier. Choisir le répertoire et le nom du fichier.

On peut ensuite fermer la page du site de l'IMCCE.

Mise en forme et traitement des données

1. Ouvrir le fichier avec son tableur préféré. Bien choisir le point-virgule comme séparateur.
2. Supprimer les colonnes inutiles pour ne garder que date, longitude, latitude et éventuellement magnitude.
3. Éventuellement, remplacer tous les points par une virgule après avoir tout sélectionné (suivant ce qu'admet votre tableur).
4. Sélectionner les longitudes et latitudes.
5. Insérer un diagramme (type nuage de points).
6. Modifier la hauteur ou la largeur du diagramme pour avoir la même échelle en abscisse et en ordonnée.

Fig.6. *La rétrogradation de Mars du 1er juillet 2020 (à droite) au 31 janvier 2021 (à gauche).*

Cette rétrogradation peut aussi être représentée à l'aide d'un logiciel de dessin pouvant lire des données, comme GeoGebra ou Processing.

Tracer la trajectoire d'une comète

« Début décembre, la comète 2I/Borisov est passée au plus près du Soleil, au périhélie. On a montré qu'elle devait provenir de l'extérieur du Système solaire. Peut-on représenter sa trajectoire ? À partir des coordonnées de l'IMCCE, le problème n'est pas si simple puisqu'elle n'orbite ni dans le plan de l'équateur, ni dans le plan de l'écliptique. Nous supposerons néanmoins qu'elle orbite dans un plan contenant le Soleil, ce qui est proche de la réalité, les perturbations dues aux différentes planètes étant faibles à côté de l'attraction du Soleil.

Pour tracer cette trajectoire, nous allons chercher, dans le plan de son orbite, les coordonnées de la comète en coordonnées polaires : il faut donc trouver la distance au centre du repère, ρ, et l'angle avec la direction origine, θ. Le Soleil S sera l'origine du repère et la direction SP (Soleil - Périhélie) sera l'axe à partir duquel on mesure les angles. La distance au Soleil est donnée dans les éphémérides. Il manque l'angle. On peut le trouver à partir du produit scalaire de deux vecteurs.

Petit rappel mathématique :

Si on appelle C la position de la comète, S le Soleil et P le périhélie :

$$\overrightarrow{SC} \cdot \overrightarrow{SP} = SC \times SP \times \cos\theta$$

Si on appelle (X, Y, Z) les coordonnées cartésiennes de la comète dans un repère de centre S et X_p, Y_p, Z_p, celles du périhélie, on a aussi :

$$\overrightarrow{SC} \cdot \overrightarrow{SP} = X \times X_P + Y \times Y_P + Z \times Z_P$$

Avec les éphémérides, on peut connaître SC, SP ainsi que les coordonnées de C et de P, on en déduit facilement θ. Les calculs sur tableur sont dans l'encadré 2.

Récolte des données

Même principe que pour la rétrogradation de Mars avec ces quelques différences :

3. Corps du Système solaire. Taper Borisov et choisir
   2I, Borisov (Comet)
4. Mettre la 1ère date à 0 h : 2017-01-01T00:00:00
   Nombre de dates : 350
   Pas de calcul : 7 jours.
5. Centre du repère : héliocentre
   Coordonnées : rectangulaires

Mise en forme et traitement des données

1. Ouvrir le fichier avec le point-virgule en séparateur.
2. Supprimer les colonnes inutiles pour ne garder que la date, px, py, pz (les coordonnées cartésiennes) et Dobs (ici la distance au Soleil) dans les colonnes A à E.
3. Éventuellement remplacer tous les points par une virgule après avoir tout sélectionné, suivant ce qu'admet votre tableur.
4. Repérer le périhélie (Dobs minimal). On le trouve à la ligne 155.
5. Calculer cos theta dans la colonne F. Pour cela, on tape, en F2 :
=(B2*B$155+C2*C$155+D2*D$155)/E2/E$155
6. Calculer theta dans la colonne G. Taper en G2 :
= ACOS(F2)
7. Calculer les coordonnées cartésiennes X et Y de la comète dans le plan de son orbite.
Dans case H2, taper "=E2*SIN(A2)"
Dans case I2, taper "=E2*COS(A2)"
8. Recopier les cases F2 à I2 vers le bas.
9. Quand on passe le périhélie, il faut que l'angle change de signe. Taper en G156 : = –ACOS(F2) et recopier vers le bas.
10. Sélectionner les colonnes H et I et créer un graphique type nuage de points ou XY.
11. Modifier la hauteur ou la largeur du diagramme pour avoir la même échelle en abscisse et en ordonnée.

	px (au)	py (au)	pz (au)	Dobs (au)	cos theta	theta	X1	Y1
2	7,32382	14,5236	14,5455	21,82075	-0,083794	1,65469	21,744	-1,82845
3	7,26518	14,4426	14,4507	21,68398	-0,083032	1,65392	21,6091	-1,80046
4	7,20653	14,3616	14,356	21,54721	-0,08226	1,65315	21,4742	-1,77247
5	7,14788	14,2805	14,2612	21,41043	-0,081478	1,65236	21,3392	-1,74448

Fig.7. *Le tableur avec les données d'origine et les quatre colonnes supplémentaires. L'unité de distance (au), est l'unité astronomique soit environ 149 600 000 km.*

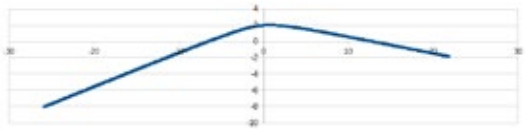


Fig.8. *Trajectoire de la comète 2I/Borissov de 2017 à 2023.*

Étudier les positions des satellites de Jupiter

On veut tracer sur le mois de janvier 2020 l'évolution des quatre satellites galiléens de Jupiter.

Récolte des données

Même principe que précédemment mais à faire 5 fois puisqu'il faut récupérer les coordonnées de Jupiter ainsi que celles de Io, Europe, Ganymède et Callisto.

Pour Io, par exemple :

3. Corps du Système solaire. Taper Io.
4. Mettre la 1ère date à 0 h : 2020-01-01T00:00:00
   Nombre de dates : 745
   Pas de calcul : 1 heure
5. Centre du repère : géocentre
   Plan de référence : écliptique
   Coordonnées : sphériques

Mise en forme et traitement des données

1. On ne garde dans chacun des tableurs que la longitude écliptique de Jupiter et de chacun des satellites.
2. On réunit les 5 colonnes sur une même feuille de calcul.
3. Pour chaque satellite, on calcul l'écart de longitude écliptique à Jupiter.
4. On utilise un logiciel de dessin pour traduire l'évolution de ces écarts en courbe.

Le graphique de droite donne le résultat obtenu avec le logiciel gratuit Processing.

Cet article vous a proposé quelques utilisations des éphémérides de l'IMCCE mais vous pourrez en trouver de nombreuses autres.

Le nouveau site ssp.imcce.fr doit encore évoluer, il pourra donner lieu à d'autres applications avec des élèves.

■

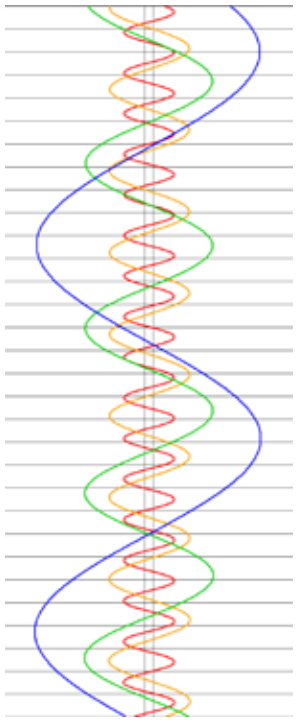


Fig.9. *Graphique des positions des satellites de Jupiter en janvier 2020.*

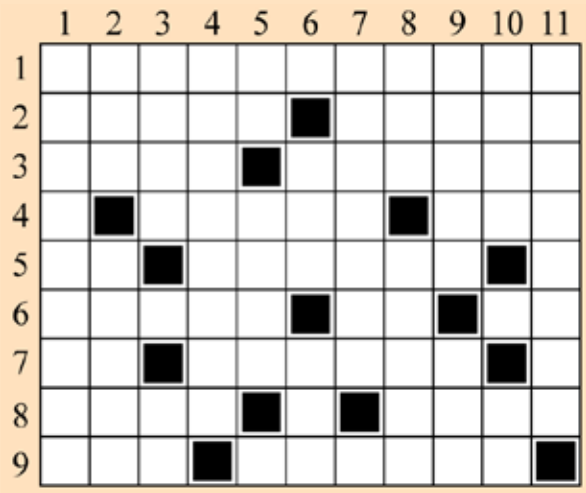
Chaque ligne horizontale correspond à un jour à 0 h.

Les deux lignes verticales indiquent la planète Jupiter.

Chaque satellite est représenté d'une couleur différente, de Io en rouge à Callisto en bleu.

Le graphique pourrait être amélioré, on n'a pas indiqué par exemple si le satellite passait devant ou derrière la planète.

Mots croisés éphémérides



Horizontalement

1. Tables astronomiques du XIIIe siècle qui furent utilisées jusqu'à Copernic.
2. Empereur à la cruelle réputation. Tordis.
3. Trou au centre de la Galaxie. Ce que fait l'IMCCE.
4. Groupe musical ou industriel. Telle une planète hors Système solaire.
5. Au cœur du Paon. On doit connaître parfaitement celle de chaque planète pour faire des éphémérides.
6. Seul organisme avec la NASA à calculer des éphémérides. Ce symbole contient autant de lettres que l'élément qu'il représente. Unité utilisée par l'IMCCE pour les distances des planètes.
7. n° 37. Il est à l'origine des tables rudolphines.
8. Il a permis de mieux connaître les distances des planètes au début du siècle dernier. Un modèle pour les astronomes.
9. Comme s mais à tort. Il a permis d'améliorer très nettement la précision des éphémérides.

Verticalement

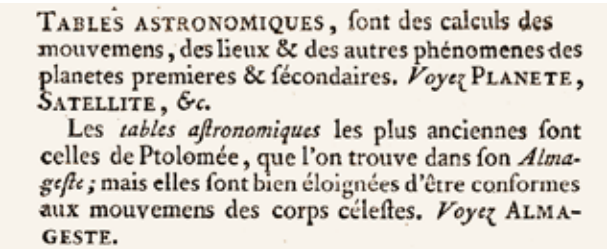
1. Le bureau des longitudes en a publié plus d'une centaine depuis 1795.
2. Sous Ursa Major. Ce qui permet de lire l'heure sur un cadran solaire.
3. Attrapa. Parlé au Sud.
4. C'est en améliorant les tables de Kepler qu'il put observer un passage de Vénus devant le Soleil.
5. Pronom. A éliminer.
6. Les débuts du CNES à Brétigny. De quoi brouter.
7. Comme le télescope Hubble.
8. Passe dans la ville du CDS ou centre de données astronomiques. Fatiguent.
9. C'est là que fut fixée la date de Pâques. Grande brésilienne.
10. Elles peuvent être liquides dans la zone habitable. Aux deux extrémités du Chien.
11. Ensilage.

L'article Tables astronomiques de l'*Encyclopédie* de Diderot et d'Alembert

Colette Le Lay, *Centre François Viète, Université de Nantes*

Cet article relate certains épisodes et certaines controverses qui apparurent entre les grands scientifiques de l'époque comme Euler, Clairaut et d'Alembert à l'occasion de l'élaboration des Tables Astronomiques de l'Encyclopédie de Diderot et d'Alembert.

Le XVIIIe siècle offre une position surplombante d'où regarder l'histoire des tables astronomiques car il est le siège d'un changement de paradigme fondamental. Dès les origines, les hommes ont établi des tables du mouvement des astres à de multiples fins (religieuses, astrologiques, scientifiques). Elles reposaient essentiellement sur leurs observations et des modèles géométriques. Avec l'arrivée des *Principia* de Newton en 1687, la gravitation universelle fournit un cadre théorique qui permet désormais de calculer le cours des planètes, les observations servant à vérifier la conformité de la loi avec la nature. Conjointement, des outils mathématiques de calcul différentiel sont développés pour donner une solution approchée au « problème des trois corps » dont le cas emblématique est celui de la Lune qui subit deux influences gravitationnelles majeures : celle de la Terre et celle du Soleil. Les trois grands géomètres du siècle des Lumières s'attachent les services d'un astronome pour confronter leurs calculs de l'orbite de la Lune aux observations. Pour Leonhard Euler (1707-1783), c'est Tobias Mayer (1723-1762) ; pour Alexis Clairaut (1713-1765), c'est l'abbé Nicolas Lacaille (1713-1762) et pour d'Alembert (1717-1783), c'est Pierre Charles Le Monnier (1715-1799).


TABLES ASTRONOMIQUES, ſont des calculs des mouvemens, des lieux & des autres phénomenes des planetes premieres & ſécondaires. *Voyez* PLANETE, SATELLITE, *&c.*

Les *tables aſtronomiques* les plus anciennes ſont celles de Ptolomée, que l'on trouve dans ſon *Almageſte*; mais elles ſont bien éloignées d'être conformes aux mouvemens des corps céleſtes. *Voyez* ALMAGESTE.

Fig.1. *Le début de l'article de l'Encyclopédie.*

J'ai choisi de passer l'histoire des éphémérides anciennes au crible de l'article Tables Astronomiques de l'*Encyclopédie* de Diderot et d'Alembert dont nous verrons qu'il ne s'arrête que sur les tables observationnelles.

L'article de *l'Encyclopédie*

L'accès le plus simple à l'article est l'ENCCRE (Edition Numérique Collaborative Critique de l'*Encyclopédie*[1]).

L'ENCCRE donne accès gratuitement à tous les articles en double version originale / transcription et à toutes les planches en excellente définition. Quelques centaines d'articles sont annotés par les meilleurs spécialistes actuels et quelques dossiers thématiques (dont « L'astronomie dans l'*Encyclopédie* » et « Les planètes dans l'*Encyclopédie* ») sont d'ores et déjà disponibles, le travail s'inscrivant dans la longue durée…

Parallèlement, l'Institut de France a mis en ligne un dossier pédagogique dont le premier volet s'intitule « Les sciences dans l'*Encyclopédie* : l'exemple de l'astronomie »[2].

Enfin, pour ceux d'entre vous qui souhaiteraient en savoir plus sur le monument des Lumières, un petit fascicule intitulé *Oser l'*Encyclopédie *Un combat des Lumières* a été publié en 2017 chez edpsciences, pour accompagner la mise en ligne de l'ENCCRE. Il est désormais gratuit en e-book sur le site de l'éditeur[3]

L'article figure au volume XV paru en 1765, comme tous les volumes de VIII à XVII, à la suite de l'interdiction qui frappe l'entreprise en 1759. Il ne porte pas de marque de contributeur. D'Alembert, qui a pris en charge la plupart des articles d'astronomie, a quitté le navire à la suite de l'interdiction et ne

1 L'article TABLES ASTRONOMIQUES est disponible à l'adresse http://enccre.academie-sciences.fr/encyclopedie/article/v15-2661-3/

2 http://www.institut-de-france.fr/fr/l-encyclopédie-un-combat-pour-la-connaissance

3 https://laboutique.edpsciences.fr/

contribuera plus que rarement.

Deux hypothèses sont plausibles. Peut-être l'article a-t-il été rédigé très tôt par d'Alembert. Deux indices accréditent cette supposition, validée par l'ENCCRE. Le premier est l'existence dans le volume I de l'*Encyclopédie* d'un article de deux lignes, ALPHONSINES, *tables Alphonsines*, signé par d'Alembert et renvoyant à TABLE. Cela prouve qu'à l'origine, d'Alembert entendait rédiger un article général consacré aux tables. Le second est la mention de Le Monnier dont j'ai dit plus haut qu'il est « son » astronome. Mais l'article qui nous occupe pourrait aussi avoir été composé par Jaucourt qui prit en charge plus de 17 000 articles, et assura, avec Diderot, la responsabilité éditoriale des derniers volumes. L'article résulte essentiellement de la traduction de l'homologue anglais, la *Cyclopædia* de Chambers, d'où la présence de plusieurs sources anglo-saxonnes[4]. Les seules différences sont les mentions dans l'*Encyclopédie* de Le Monnier et Lacaille et l'absence d'un dernier paragraphe de la *Cyclopædia* consacré à l'apport de Halley.

Les différentes tables mentionnées

À tout seigneur tout honneur, l'article débute par les célèbres tables de Ptolémée (orthographié « Ptolomée » dans l'*Encyclopédie*) publiées dans l'*Almageste* au IIe siècle. Le regard du siècle des Lumières sur Ptolémée est toujours critique car l'époque milite encore pour l'adoption du système de Copernic et la sortie de l'*Index des livres prohibés* de l'œuvre de Galilée[5].

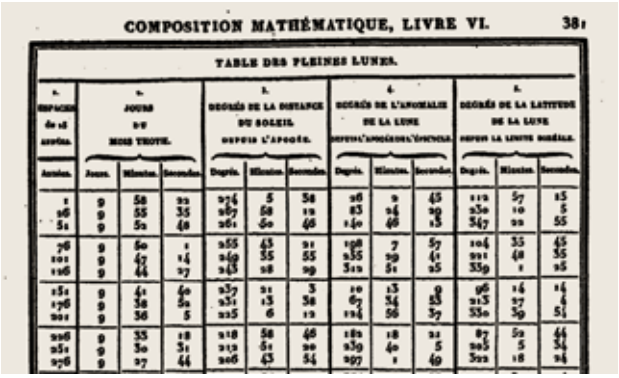

COMPOSITION MATHÉMATIQUE, LIVRE VI. 381

TABLE DES PLEINES LUNES.

Fig.2. *Table des pleines lunes dans l'Almageste de Ptolémée, traduction de M. de Halma. On y trouve aussi les éléments de calcul des longitudes et latitudes des planètes. (image BnF).*

Pour les hommes des Lumières, dénigrer le système de Ptolémée, encore soutenu par la hiérarchie catholique, est un passage obligé pour valoriser le système de Copernic.

La recherche actuelle se garde bien d'un tel jugement dépréciatif sur les magnifiques travaux de Ptolémée.

Viennent ensuite les Tables Alphonsines. Jalon fondamental dans l'astronomie médiévale, elles auront cours jusqu'à la Renaissance. La mention d'un astronome juif rappelle l'importance d'Al Andalus dans la vie culturelle et scientifique de la période [6].

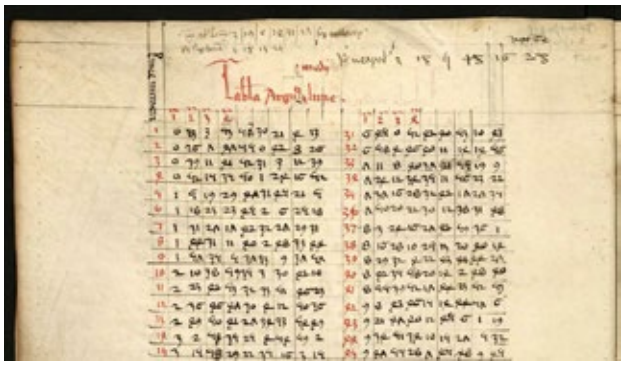


Fig.3. *Extrait des tables alphonsines. Au XIIIe siècle, Alphonse X, roi de Castille, fait établir de nouvelles tables astronomiques pour mettre à jour les tables de Tolède, du XIe siècle. Souverain érudit, il faisait travailler des savants et traducteurs juifs, chrétiens et musulmans. (Document bibliothèque nationale d'Espagne).*

Le même paragraphe mentionne les deux pré-coperniciens Peuerbach (1423-1461) et Regiomontanus (1436-1476) qui contribuèrent au perfectionnement des Tables Alphonsines. De nos jours, les historiens de l'astronomie ont à cœur de mettre à bas la figure de savant génial et solitaire de Copernic, véhiculée par les images d'Épinal de la vulgarisation scientifique du XIXe siècle. Il ne s'agit en aucune façon de diminuer le mérite de l'astronome polonais mais de montrer qu'il est ancré dans une époque, la Renaissance, au cours de laquelle l'univers centré sur la Terre subit des coups de boutoir de la part de nombreux savants.

Copernic n'est mentionné que par deux lignes, sans renvoi à l'article éponyme. Les tables contenues dans le *De Revolutionibus* contribuent à une meilleure connaissance des mouvements de la Lune, de Jupiter et de Saturne. Pour le reste, les progrès par rapport aux dernières versions des Tables Alphonsines sont minimes.

4 L'édition de 1743 de la Cyclopædia est disponible sur Google Books. L'article Astronomical Tables est situé à la page 113 du volume II.

5 Voir à ce sujet mon annotation de l'article Copernic : http://enccre.academie-sciences.fr/encyclopedie/article/v4-343-0/.

6 Pour en savoir plus sur les tables alphonsines, on pourra se reporter à un article d'Emmanuel Poulle en accès libre sur https://www.persee.fr/doc/crai_0065-0536_1987_ num_131_1_14461. Sur les tables astronomiques médiévales, voir la bibliographie réalisée par Matthieu Husson de l'équipe d'histoire du Syrte sur http://www.sphere.univ-paris-diderot.fr/spip.php?article634.

L'article passe aussi très rapidement sur Erasmus Reinhold (1511-1553) dont les Tables Pruténiques eurent pourtant un important retentissement. Toutefois deux mots sont à retenir du paragraphe : « Copernic », car il s'agit d'une des premières mises en œuvre de la nouvelle théorie, et « imprimées » car l'irruption de l'imprimerie change la donne. Aux tables manuscrites vont se substituer des tables imprimées à la diffusion plus vaste, en dépit des coûts prohibitifs des premiers ouvrages.

Viennent ensuite deux astronomes que l'histoire réunit souvent, Tycho Brahe (1546-1601) et Kepler (1571-1630). L'article y adjoint Longomontanus (1562-1647), astronome danois, qui, à l'image de Kepler, s'appuya sur les merveilleuses observations de Tycho pour compiler ses tables. La différence majeure entre les deux disciples de Tycho réside dans le cadre théorique : Longomontanus est un propagateur du système géo-héliocentrique de Tycho (dans lequel le Soleil tourne autour de la Terre pendant que les autres planètes tournent autour du Soleil) tandis que Kepler est copernicien. Les tables modernes sont héritières des Tables Rudolphines de Kepler comme le rappelle Guy Boistel dans son introduction à l'histoire de la *Connaissance des temps*[7].

Fig.4. *Frontispice et page de titre des tables rudolphines de Johannes Kepler. Basées sur ses lois du mouvement des planètes, elles sont nettement plus précises que les précédentes. Elles permettront en particulier de prévoir les passages de Mercure ou de Vénus devant le Soleil. Ces tables contiennent également un catalogue d'étoiles issu des observations de Tycho Brahe. Leur nom provient de l'empereur Rodolphe II (image wikimedia/ NOAA).*

Les hommes des Lumières font une place aux femmes ; aussi je ne suis pas étonnée de voir figurer le nom de Maria Cunitz (1610-1664) dans l'article. Il était déjà présent, avec quelques-unes de ses consœurs dans l'article ASTRONOMIE. Dans son *Urania propitia*, publié en latin et en allemand, Maria Cunitz propose une simplification des tables de Kepler. Son œuvre, connue au XVIIIe siècle comme en atteste l'article, fut longtemps oubliée pour n'être redécouverte que récemment et mise en valeur par le courant des *gender studies*.

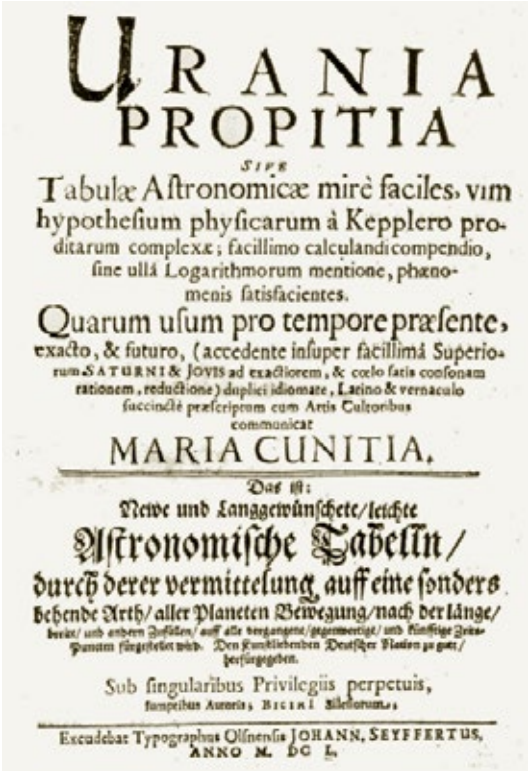

URANIA PROPITIA
SIVE
Tabulæ Astronomicæ mirè faciles, vim hypothesium physicarum à Kepplero proditarum complexæ; facillimo calculandi compendio, sine ullâ Logarithmorum mentione, phænomenis satisfacientes.
Quarum usum pro tempore præsente, exacto, & futuro, (accedente insuper facillimâ Superiorum SATURNI & JOVIS ad exactiorem, & cœlo satis consonam rationem, reductione) duplici idiomate, Latino & vernaculo succinctè præscriptum cum Artis Cultoribus communicat
MARIA CUNITIA.
Das ist:
Newe und Langgewünschete/leichte
Astronomische Tabellen/
durch derer vermittelung auff eine sonders behende Arth/ aller Planeten Bewegung/nach der Länge/ breite/ und andern Zufällen/ auff alle vergangene/gegenwertige/ und künftige Zeiten Punctum fürgetrieben wird. Den Kunstliebenden Deutscher Nation zu gutt/ herfürgegeben.
Sub singularibus Privilegiis perpetuis, sumptibus Auctoris, BICINI Bibliopolæ.
Excudebat Typographus Olsnensis JOHANN, SEYFFERTUS, ANNO M. DC L.

Fig.5. *Frontispice des tables astronomiques de Maria Cunitz, de 1650, écrites en latin et en allemand.*
Pour réaliser ces tables, elle a simplifié la résolution de la fameuse équation de Kepler :

$$M = E - e \sin E.$$

Attention au Mercator mentionné au paragraphe suivant ! Il ne s'agit pas du célèbre cartographe Gérard Mercator (1512-1594) mais de son homonyme Nicolas Mercator (1620-1687), aujourd'hui plus connu pour ses travaux sur les logarithmes que pour ses tables astronomiques.

Un inventaire de plusieurs tables, dont une bonne part sont anglaises, suit. Nous y reconnaissons quelques noms : Newton (il s'agit ici de John et non pas d'Isaac), mais aussi Riccioli (1598-1671) resté fidèle à Ptolémée qu'il défend dans son *Almagestum novum*, et Flamsteed (1646-1719), le premier Astronome royal officiant à Greenwich. D'autres figures sont moins connues qui eurent toutefois une importante aura à l'époque. Ainsi en est-il d'Ismaël Boulliau (1605-1694) (ici orthographié Bouillaud), ami de Gassendi, Mersenne, Pascal, dont l'*Astronomia philolaïca*, accompagnée de tables, fut lue et commentée par tous les contemporains dont Newton.

7 https://cdt.imcce.fr/exhibits/show/introduction----l---histoire-d/introduction

Les Tables Carolines du Britannique Thomas Street (1621-1689) sont également méconnues de nos jours mais elles furent très utilisées par les astronomes d'outre-Manche, tels Flamsteed déjà évoqué et Halley.

La *Cyclopædia* de Chambers utilise plusieurs sources continentales et en particulier les Mémoires de l'Académie royale des sciences de Paris. Cassini y est fréquemment cité, comme Philippe de la Hire (1640-1718) dont il est question ici à propos de ses tables astronomiques dédiées à Louis XIV.

Comme je l'ai écrit plus haut, l'article se conclut par quelques lignes ne figurant pas dans l'encyclopédie anglaise. Elles sont l'occasion de rendre hommage à Le Monnier dont les *Institutions astronomiques*, source fondamentale de d'Alembert pour ses articles d'astronomie dans l'*Encyclopédie*, ne seront détrônées que par l'*Astronomie* de Lalande vingt ans plus tard. Les tables de Lacaille n'ont pas le droit à semblable mise en avant. Il faut y voir une trace de la controverse qui oppose à l'époque Clairaut et d'Alembert sur la théorie de la Lune. Lacaille étant l'astronome proche de Clairaut en fait les frais.

Au final, les références fournies par l'article sont toutes largement antérieures au premier volume de l'*Encyclopédie*. Rien d'étonnant puisque la source anglaise *Astronomical* Tables est un article publié dans l'édition de 1728 de la *Cyclopædia* qui ne subit pas de modifications dans les éditions ultérieures. L'auteur de l'article de l'*Encyclopédie* n'y ajoute que la mention plus récente aux tables de Le Monnier (1746).

Quelques autres titres de l'*Encyclopédie*

Les procédés de traduction et de compilation sont très naturellement à la base de l'*Encyclopédie*. Par essence, celle-ci regroupe des connaissances produites ailleurs. Dans les articles d'astronomie, d'Alembert, qui est généralement à la manœuvre, traduit l'article correspondant de l'encyclopédie anglaise puis procède à une actualisation des savoirs en puisant largement dans les *Institutions astronomiques* de Le Monnier. Quelques articles sortent de ce schéma et sont des œuvres originales du grand géomètre. Tel est le cas de COPERNIC déjà évoqué plus haut. C'est le cas également de l'article LUNE[8].

Toute la deuxième partie, datée du 15 novembre 1759, de ce très long article est de la plume de d'Alembert qui y cite ses propres travaux et lance des flèches acérées en direction de Clairaut avec lequel il est en guerre ouverte. Il y fait référence à de nombreuses reprises aux tables de la Lune composées par ses concurrents et lui-même, avec le concours de « leurs » astronomes respectifs. Ces tables lunaires représentent un double enjeu : scientifique, d'une part, puisqu'elles montrent la puissance de la gravitation newtonienne, pratique et politique, d'autre part, puisqu'elles servent de base aux méthodes lunaires de détermination des longitudes en mer qui auront cours jusqu'à la fin du XIXe siècle. L'article LUNE offre un témoignage incomparable, bien que très partial, de la quête des meilleures tables lunaires au milieu du XVIIIe siècle. On ne peut réécrire l'histoire mais il est fort vraisemblable que, si d'Alembert n'avait pas abandonné l'entreprise encyclopédique à la suite de la censure de 1759, il aurait complété l'article Tables astronomiques par une partie consacrée aux nouvelles tables déduites des lois de la gravitation.

Les évolutions de l'*Encyclopédie*

Qu'advient-il dans les suites et métamorphoses de l'*Encyclopédie* ? Dans l'*Encyclopédie* d'Yverdon publiée par De Felice entre 1770 et 1780, l'article Tables astronomiques est entièrement réécrit par l'astronome Jérôme Lalande (1732-1807) qui précise en introduction « les tables sont le résultat de toutes les observations, de toutes les recherches, de tous les calculs des astronomes ». L'article est bien plus technique, décrivant tous les paramètres des mouvements planétaires que l'on trouve dans les tables. Un bref paragraphe cite les tables anciennes de Ptolémée, alphonsines, de Copernic, de Kepler, de Halley et de Cassini, et se conclut par « les dernières tables sont les miennes qui ont paru dans la seconde édition de mon astronomie en 1771, & qui sont le résultat des observations & des calculs les plus récents & les plus exacts. » Lalande y montre une nouvelle fois sa propension à faire son auto-promotion.

Dans ses contributions encyclopédiques (au *Supplément*, à l'*Encyclopédie* d'Yverdon, à l'*Encyclopédie méthodique*), Lalande ne se prive pas de critiquer son illustre devancier d'Alembert avec lequel il a peu d'atomes crochus (c'est un euphémisme…) et, plus généralement, les articles d'astronomie. S'il a souvent tort, nous ne pouvons que reconnaître que l'article Tables astronomiques ne fait pas partie des pages les plus originales de l'*Encyclopédie*. Toutefois, il nous a permis de poser quelques jalons essentiels dans l'histoire des tables astronomiques anciennes.

■

8 http://enccre.academie-sciences.fr/encyclopedie/article/v9-2074-0/

AVEC NOS ÉLÈVES

La Lune tourne-t-elle rond ?

Petite promenade dans les éphémérides de la Lune

Daniel Bardin, Marseille

La Lune ne tourne pas rond ; on s'en doutait mais, en utilisant les éphémérides, ce phénomène devient clairement compréhensible.

Les éphémérides astronomiques sont des ouvrages qui paraissent chaque année. Ils fournissent, pour l'année suivante, une foule d'informations concernant essentiellement les objets mobiles du Système solaire.

Les calculateurs travaillent au sein de l'Institut de mécanique céleste et de calcul des éphémérides (IMCCE). En 1792, le Bureau des longitudes, à l'observatoire de Paris, a publié le premier bulletin.

Nous allons essayer, en utilisant les éphémérides de la Lune (figure 1), de « retrouver » certaines caractéristiques des mouvements de notre satellite. Inutile de vous cacher qu'il faudra nous limiter aux problèmes les plus élémentaires.

Les phases de la Lune

Dans sa révolution autour de la Terre, la Lune passe par quatre célèbres points de son orbite (figure 2) : la nouvelle Lune (NL), lorsque cet astre est en conjonction en longitude avec le Soleil.

La Lune, « vue » de la Terre, est alors éclairée à contre-jour et reste donc invisible. Les points suivants sont le premier quartier (PQ), la pleine Lune (PL) et le dernier quartier (DQ).

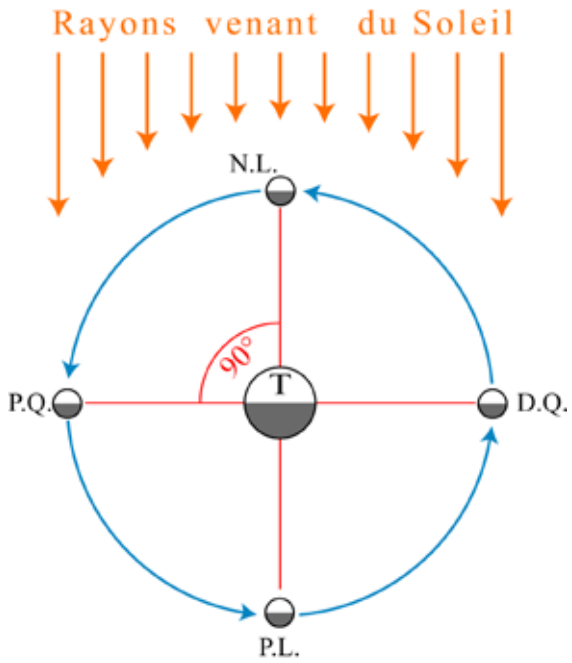


Fig.2. *Les phases de la Lune.*

Lune — Août 2019

Jour du mois	à 0h UT								à Paris		
	Ascension droite	Déclinaison	Paral. horiz. équat.	Frac. écl.	Libration l	Libration b	Angle de pos. axe	Angle de pos. phase	lever	pass.	couch.
	h m	° ′	′ ″		°	°	°	°	h m	h m	h m
1	8 37.9	+20 17	60 46	0.00	−2.73	−2.20	16.08	147.3	4 26	12 21	20 04
2	9 40.0	+17 05	61 00	0.01	−0.93	−3.79	20.28	275.7	5 47	13 21	20 40
3	10 39.7	+12 44	60 56	0.05	+0.95	−5.11	22.96	284.0	7 10	14 17	21 09
4	11 36.9	+ 7 38	60 36	0.12	+2.77	−6.07	24.02	287.9	8 31	15 11	21 36
5	12 31.7	+ 2 10	60 03	0.21	+4.39	−6.61	23.55	289.6	9 51	16 02	22 01
31	11 12.7	+ 9 49	61 22	0.01	+0.65	−5.67	23.73	264.4	6 03	12 57	19 35

		h m				h	diam.	distance
N.L.	1 aou	3 12		périgée	2 aou	7	33′ 15″	359 398 km
P.Q.	7 aou	17 31		apogée	17 aou	11	29′ 25″	406 245 km
P.L.	15 aou	12 29		périgée	30 aou	16	33′ 27″	357 176 km
D.Q.	23 aou	14 56						
N.L.	30 aou	10 37						

Fig.1. *Extrait d'une page des éphémérides de la Société Astronomique de France (réalisation Jean Meeus).*

Notons ici que les points des phases se trouvent toujours aux extrémités d'une croix centrée sur la Terre, chaque branche orientée à 90° de ses voisines, la branche Terre – NL visant toujours le centre du Soleil.

Premiers calculs, phases et lunaison

Les éphémérides permettent de calculer la durée de chaque phase. Si on le fait pour le mois d'août 2019 (données sur la figure 1), on obtient :

- de la NL au PQ : 6 j 14 h 19 min ;
- du PQ à la PL : 7 j 18 h 58 min ;
- de la PL au DQ : 8 j 2 h 27 min ;
- du DQ à la PL : 6 j 19 h 41 min.

On observe des différences importantes, incompatibles avec une trajectoire circulaire de la Lune parcourue à vitesse constante.

Un autre calcul consiste à compter le nombre de jours entre deux nouvelles lunes, la lunaison. Si on compte en nombre entier de jours, on obtient pour 2019 : 29 j, 30 j, 30 j, 29 j, 30 j, 29 j, 30 j, 29 j, 29 j, 30 j, 29 j, 30 j, soit 6 lunaisons de 29 jours et 6 lunaisons de 30 jours, ce qui donne une moyenne de 29,5 jours.

Si on tient compte de l'heure, on trouve comme durée de la lunaison en jours : 29,82 j, 29,79 j, 29,7 j, 29,58 j, 29,47 j, 29,38 j, 29,33 j, 29,31 j, 29,33 j, 29,38 j, 29,48 j, 29,59 j (moyenne 29,51 jours). On voit ici une seconde irrégularité : la lunaison varie entre 29,33 jours et 29,82 jours.

L'orbite de la Lune

Notre Lune se déplace sur une orbite elliptique dont la Terre occupe l'un des foyers.

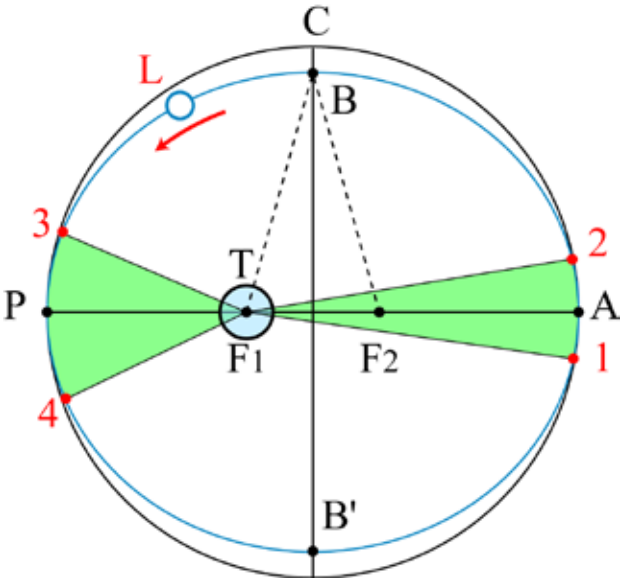


Fig.3. L'orbite de la Lune et la loi des aires.

La figure 3, qui montre une ellipse un peu plus aplatie qu'en réalité pour la rendre plus lisible, se compose comme suit :

- AP, le grand axe avec A, l'apogée, éloigné de T (la Terre) et P le périgée, plus proche de T ;
- BB', le petit axe, CB étant l'aplatissement par rapport au cercle ;
- F_1 et F_2, les deux foyers de l'ellipse.

Kepler découvrit la loi des aires : si un corps, en orbite autour d'un autre (l'orbite étant une ellipse), se déplace de 1 à 2 puis de 3 à 4 dans le même temps, les deux zones en vert auront la même aire. Le corps en orbite doit donc se déplacer plus vite entre 3 et 4 qu'entre 1 et 2. La Lune ne tourne donc pas à vitesse constante autour de la Terre (voir le paragraphe vitesse de la Lune). C'est d'ailleurs la même chose pour le couple Terre Soleil. Pour l'instant, seuls deux corps sont impliqués dans notre promenade...

Périgée et apogée

Les éphémérides indiquent les distances des périgées et apogées (données depuis le centre de la Terre). Si nous en dressons un tableau à chaque lunaison sur une année, cela donne la figure 4.

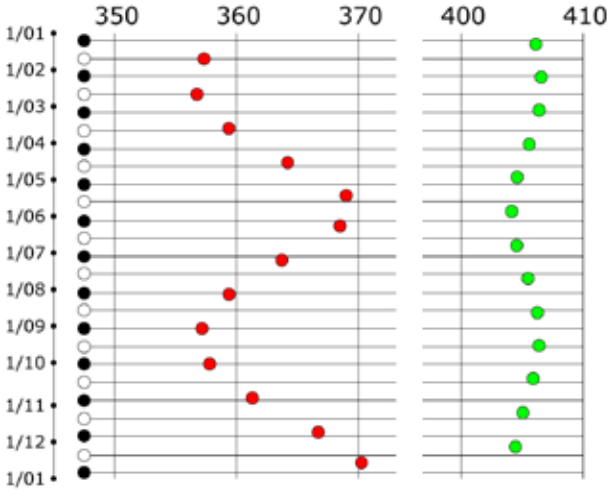


Fig.4. Passages de la Lune au périgée (en rouge) et à l'apogée (en vert) en 2019 (distances en milliers de km). On a également indiqué à gauche les phases de la Lune, NL et PL.

Les périgées varient entre 357 000 km et 369 000 km avec deux minimums ; les apogées font presque de même, mais entre 404 000 et 406 500 km.

Il nous semble que le Soleil intervient dans les oscillations de nos graphiques : en effet, le grand axe et le petit axe de l'orbite gardent approximativement leur position par rapport aux étoiles (sur des temps « pas trop longs »[1]).

1 Le grand axe se déplace quand même mais lentement avec une période de près de 9 ans.

Il arrive donc que le grand axe pointe en direction du Soleil, deux fois par an en moyenne. Ce fut le cas mi février (périgée en même temps qu'une pleine Lune) et début septembre (périgée en même temps qu'une nouvelle Lune). Les attractions Soleil – Terre – Lune s'échangent sur une ligne à peu près droite d'où ce couplage des positions : quand les apogées s'éloignent de la Terre, les périgées se rapprochent. On dit que l'excentricité de l'orbite augmente. Nous venons de plonger dans le fameux problème des trois corps. Les calculs des astronomes deviennent beaucoup plus complexes mais les ordinateurs, alimentés par des milliers de données, rendent le travail moins long.

Vitesse de la Lune

Puisque notre satellite accélère en partant de son apogée vers le périgée et ralentit ensuite jusqu'à l'apogée, il est normal que les intervalles entre les différentes phases n'aient pas la même durée. Il est possible de calculer les temps de passage entre chacune des phases.

Mois	NL à PQ	PQ à PL	PL à DQ	DQ à NL
janvier	8,22	6,94	6,66	8
février	8,06	6,73	6,82	8,19
mars	7,77	6,64	7,1	8,19
avril	7,43	6,67	7,46	8,02
mai	7,1	6,83	7,81	7,73
juin	6,83	7,11	8,05	7,4
juillet	6,65	7,45	8,15	7,08
août	6,6	7,79	8,1	6,82
septembre	6,69	8,06	7,92	6,66
octobre	6,93	8,18	7,65	6,62
novembre	7,28	8,13	7,32	6,75
décembre	7,66	7,93	6,99	7,01

Fig.5. *Durée d'une phase à une autre en 2019, comptée en jours décimaux. Le mois indiqué est celui du milieu de la lunaison.*

Les éphémérides nous donnent les dates et les heures de ces phénomènes et, en face, les dates et heures des minimums et maximums des distances Terre-Lune (figure 1).

On peut faire quelques remarques :

• en début d'année, la pleine Lune avait lieu en même temps que le périgée (sur la figure 4, rond blanc et rond rouge sur la même ligne). La vitesse de la Lune étant alors plus grande, les périodes autour de la pleine Lune sont plus courtes, moins de 7 jours de PQ à PL ou de PL à DQ ;

• en septembre, c'est la nouvelle Lune qui avait lieu en même temps que le périgée et ce sont les périodes autour de la nouvelle Lune les plus courtes, avec moins de 7 jours de DQ à NL ou de NL à PQ.

Mais les résultats ne présentent pas, dans leurs répétitions, de régularité saisissante.

On peut voir, là encore, les interactions entre tous les facteurs définissant les mouvements de la Lune : orbite inclinée en moyenne de 5° par rapport au plan de l'écliptique ; mouvement de précession de cette orbite sur 18 ans ½ environ ; rotation du grand axe de l'orbite en 9 ans, dans son propre plan ; évection[2]; librations, équation annuelle et même de petites variations dues aux planètes proches !

La Lune ne passe jamais deux fois au même endroit ; vous pouvez alors apprécier la grande précision dans le calcul des éclipses !

Bon courage en utilisant les éphémérides et n'oubliez pas la sublime beauté d'un joli ciel étoilé.

■

2 Variation périodique du mouvement de la Lune causé par l'attraction solaire du fait de l'excentricité de l'orbite lunaire.

Les éphémérides dans les productions du CLEA

Dans le hors-série n° 11 Les constellations texte sur les coordonnées pages 49 à 54 et diaporama sur le CD

Sur le site du CLEA (www.clea-astro.eu), onglet lunap puis onglet coordonnées (avec une présentation ppt)

Dans les anciens numéros des Cahiers Clairaut (clea-astro.eu/archives).

(tous les numéros de plus de 3 ans sont en libre accès sur notre site clea-astro.eu, archives des CC).

Utiliser les éphémérides avec des élèves CC n° 160 (2017).
Les coordonnées célestes, notions de base n° 155 (2016).
Les planètes médicéennes de Jupiter, de la «découverte» aux calculs astronomiques de Galilée CC n° 130 (2010).
Vitesse de la lumière : Römer revisité CC n° 130 (2010).
Du bon usage des éphémérides obtenues à l'IMCCE avec l'aide d'un tableur CC n° 116 (2006).
Origines du Bureau des Longitudes CC nos 55-56-57 (1991-1992).

La distance Terre Soleil à l'œil nu

Daniel Toussaint, Aix-en-Othe

Une expérience simple qui ne donne évidemment pas une valeur précise de la distance du Soleil mais qui montre que le Soleil est beaucoup plus éloigné de nous que la Lune.

Pour estimer la distance de la Terre au Soleil, nous vous proposons trois expériences.

Expérience préliminaire n° 1

Éclairons 2 boules blanches B_1 et B_2 par une source S assez puissante proche des boules ; par exemple, la source S est mise de telle façon que le triangle B_1SB_2 soit équilatéral (figure 2).

Un observateur O se place presque dans l'alignement de ces 2 boules et regarde la forme de leurs ombres propres ; il vise vers la boule B_2 en fermant un œil de telle sorte que B_1 soit masquée par B_2 puis il se déplace latéralement très légèrement pour voir apparaître la boule B_1.

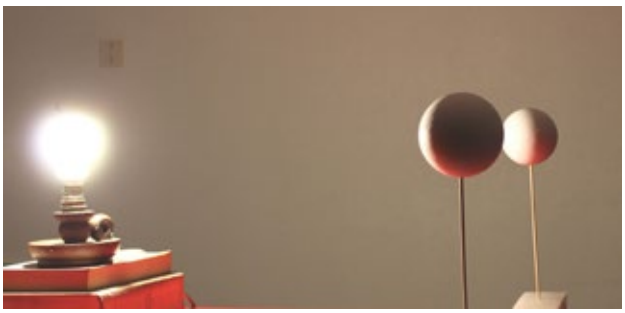


Fig.1. *L'observateur voit les deux boules côte à côte mais leurs phases (leurs parties éclairées) semblent différentes.*

Il fait le schéma de ce qu'il voit dans ces circonstances.

Normalement, les 2 boules apparaissent côte à côte.

Si la boule B_2 semble un peu plus grosse que B_1, c'est parce qu'elle est un peu plus proche de lui.

Les ombres propres des boules – les ombres qu'elles se font à elles-mêmes – ne semblent pas avoir la même forme. Pourtant chaque ombre couvre un hémisphère de la boule, et chacun de ces hémisphères est à l'opposé des rayons lumineux SB. C'est l'angle entre les rayons lumineux qui fait que l'observateur voit les ombres différemment :

- la boule B_2 qui est la plus proche de lui a une partie éclairée qui ressemble à un croissant de Lune.
- la boule B_1 ressemble à une Lune gibbeuse, c.-à-d. que sa partie éclairée semble avoir un gros ventre (ce qui s'appelle une gibbosité).

Le schéma ci-contre, montre le trajet des rayons lumineux qui vont de la source S vers les 2 boules.

C'est parce que le triangle SB_1B_2 est équilatéral que les rayons qui éclairent les deux boules ne sont pas parallèles.

Les terminateurs des 2 hémisphères dans l'ombre ne sont pas parallèles non plus. C'est ce qui provoque les aspects différents des ombres propres sur chaque boule : on dit que ces boules ont des phases différentes.

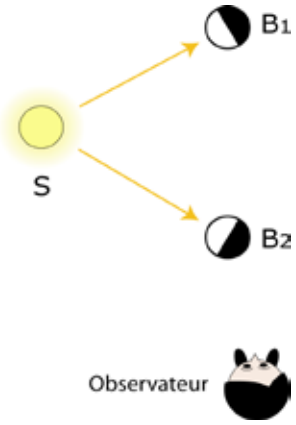


Fig.2. *Schéma pour l'expérience n° 1.*

Expérience préliminaire n° 2

(à faire dans un long couloir)

Ne changeons rien aux positions relatives des points B_1, B_2 et O qui restent alignés (ou presque), mais éloignons le plus loin possible la lampe puissante S.

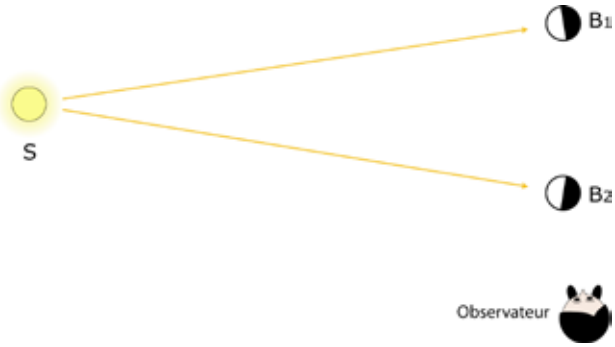


Fig.3. *Plus la source de lumière est éloignée, plus les phases des deux boules se ressemblent pour l'observateur.*

Sur le schéma, on a dessiné cette lampe au bord de la feuille, mais dans l'expérience réelle, il faut placer les 3 points (B_1, B_2 et l'observateur) à l'entrée d'un couloir et la source S au fond.

Quand on recommence l'expérience, l'observateur O voit que, pour lui, les parties éclairées de chaque boule présentent presque la même phase (figure 4). Plus la source est éloignée, plus les phases des deux boules se ressemblent.

Fig.4. *Ici, les deux boules présentent presque la même phase, avec une source lumineuse placée à 6 fois leur écartement.*

Expérience réelle n° 3

Changeons la nature des boules :

- B_1, la plus lointaine de l'observateur, sera la Lune, par exemple au voisinage d'un quartier, et la lampe sera le Soleil (S veut dire Source ou Soleil.). Dans ce cas, en l'absence de nuages, on peut voir la Lune dans le ciel bleu pendant une grande partie de la journée ;
- B_2, la boule la plus proche de l'observateur sera à environ 2 mètres (par exemple au bout d'un bâton) si on veut simplement faire l'expérience visuellement.

Mais pour faire une photo des deux boules, il faudra régler la mise au point sur l'infini. La plus proche devra être assez éloignée de l'observateur (par exemple en haut d'un arbre ou d'un mât) pour que la Lune et la boule paraissent nettes toutes les 2 en même temps. Si B_2 est trop proche, une seule des deux boules sera nette tandis que l'autre sera floue.

Conclusion

On voit (figure 5) la phase de la Lune orientée comme la phase de la boule B_2, c'est donc que les rayons qui frappent la Lune et la boule B_2 sont quasiment parallèles.

Ce que l'on voit prouve que la distance de la boule au Soleil est beaucoup plus grande que la distance de la boule à la Lune ; et comme la boule est un objet terrestre, cela revient à dire que la distance de la Terre au Soleil est beaucoup plus grande que la distance de la Terre à la Lune.

■

Fig.5. *La boule au bout d'un mât et la Lune sont toutes les deux éclairées par le Soleil. Comme elle semblent présenter la même phase, c'est que les rayons du Soleil sont quasiment parallèles. Le Soleil doit donc être très éloigné.*
Les zones d'ombre sur les boules (côté droit à l'opposé du Soleil) ont des aspects différents car la zone de nuit sur la Lune est masquée par l'atmosphère bleutée de la planète Terre alors que la boule en haut du mât est au premier plan, ici devant des nuages.

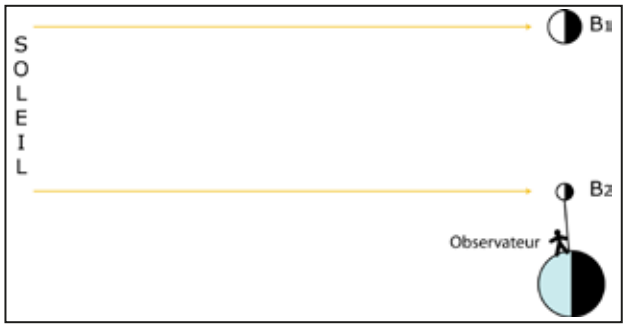
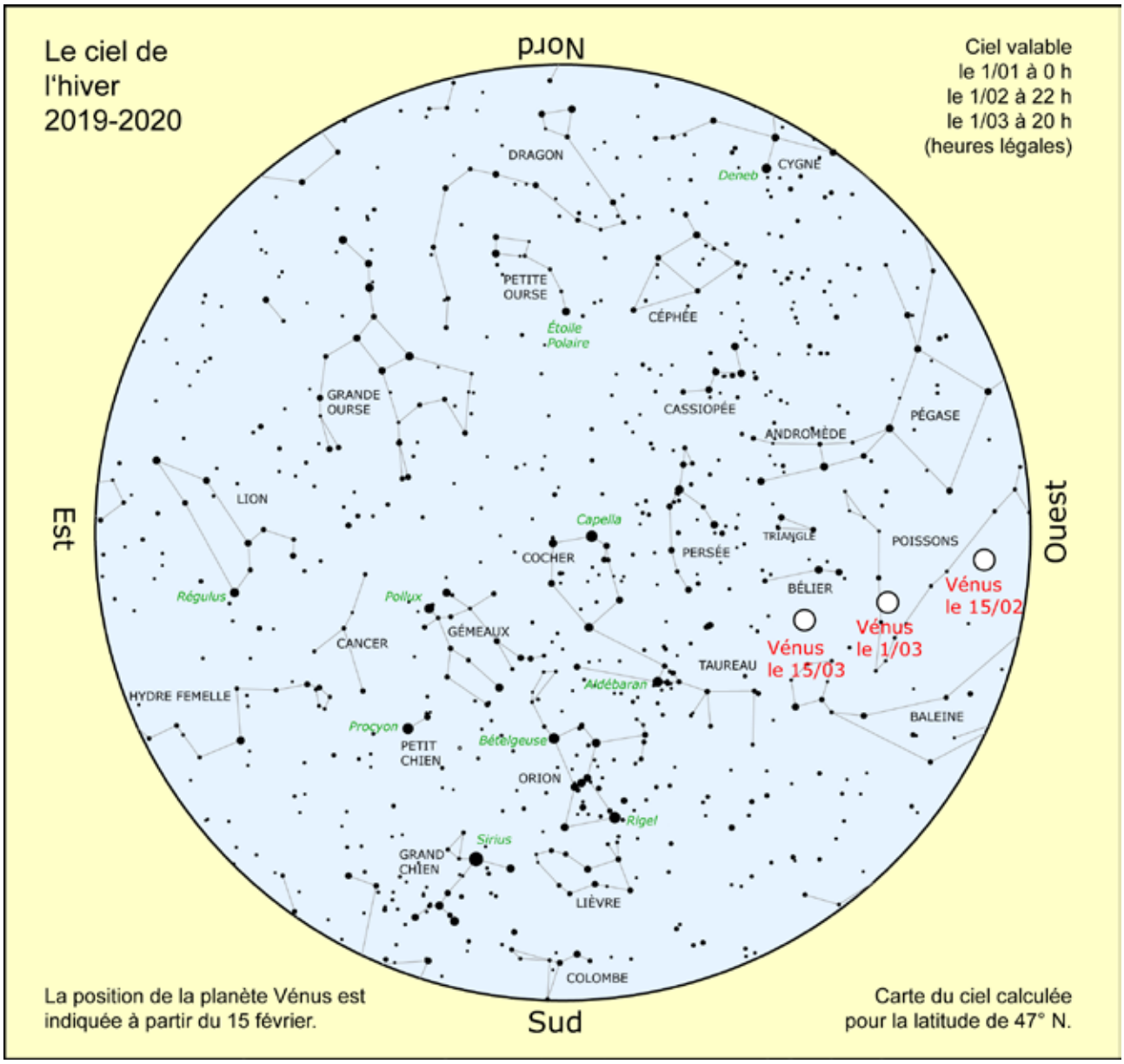


Fig.6. *Schéma pour l'expérience n° 3.*

Fig.7. *La même expérience avec un croissant de Lune en haut et une Lune gibbeuse en bas. La boule en polystyrène étant proche, elle est floue sur la photo.*



Visibilité des planètes

Mercure est visible le soir les 15 premiers jours de février, peu après le coucher du Soleil (direction OSO).
Vénus resplendit le soir en hiver à l'horizon ouest (élongation maximale le 24 mars). L'« étoile du Berger » est bien le premier astre visible le soir. À noter de beaux rapprochements avec la Lune les 29/12, 28/01, 27/02.
Mars commence à être visible le matin mais reste peu lumineuse. Elle augmentera peu à peu d'éclat jusqu'à son opposition en octobre prochain.
Jupiter passe derrière le Soleil le 27 décembre. Elle réapparaît ensuite le matin.
Saturne est en conjonction avec le Soleil le 13 janvier. On la retrouve le matin à partir de février mars.

Quelques évènements (heures légales)

22/12 : solstice de décembre à 5 h 19 min.
23/12 : maximum des Ursides (étoiles filantes).
26/12 : éclipse annulaire de Soleil (Inde, Bornéo).
5/01 : la Terre passe au périhélie, au plus près du Soleil, à 147 091 000 km.
10/01 : éclipse de Lune par la pénombre (spectacle de peu d'intérêt).
18/03 (matin) : conjonction Lune Jupiter Mars avec Saturne à proximité.
20/03 : équinoxe de printemps à 4 h 49 min.

Lune

Nouvelle Lune : 26/12, 24/01, 23/02.
Pleine Lune : les 10/01, 9/02, 9/03.

NOTIONS DE BASE

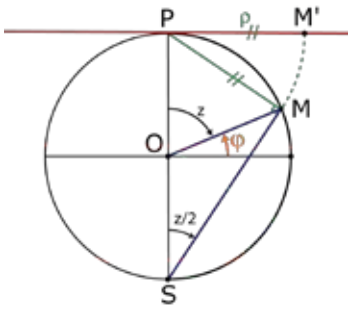
Cartes du ciel, cartes de la Terre (5)

Michel Bobin, Pierre Causeret

La projection de Hammer-Aïtoff est très utilisée en astronomie pour représenter le rayonnement à 3K ou la distribution des galaxies sur l'ensemble du ciel.

Nous avons vu dans le précédent numéro la projection azimutale équivalente de Lambert.

Il s'agit d'une projection azimutale équivalente, c'est-à-dire qui conserve les aires. On projette ici sur un plan tangent à la sphère céleste en P (pôle Nord) de telle manière que PM' = PM.
Le calcul montre que l'on a PM = 2 sin (z/2).



Aspect transverse de la projection de Lambert

Au lieu de projeter sur le plan tangent à la sphère en P, il est possible de projeter sur un plan tangent en n'importe quel point de la sphère, par exemple en un point de l'équateur. C'est un passage obligé pour comprendre la prochaine projection de Aïtoff-Hammer. La construction vue précédemment où PM' = PM, devient, dans la figure suivante (fig. 42) GM' = GM. La construction étant identique, il s'agit d'une projection équivalente.

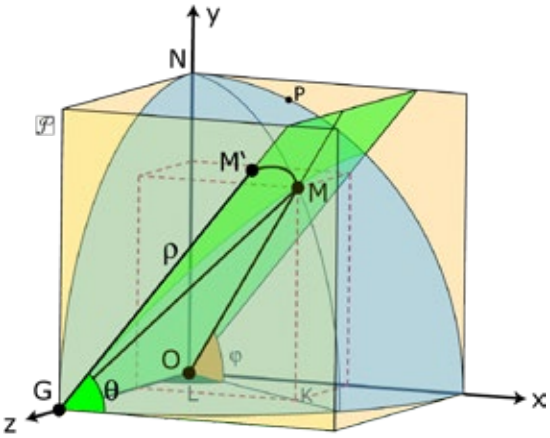


Fig.42. *Projection azimutale de Lambert en version transverse. N est le pôle Nord, (xOz) est le plan de l'équateur, 𝒫, en jaune, est le plan de projection tangent à la sphère en G. On n'a représenté qu'un huitième de la sphère ici. Le point M de coordonnées sphériques (L, φ) est projeté en M' de coordonnées polaires (φ,θ) de telle manière que :*
M' appartient au plan (OGM) en vert et GM' = GM.

Calcul pour la projection transverse

On cherche déjà les coordonnées cartésiennes du point M dans le repère de la figure 42. On obtient :

$x_M = \cos\varphi \sin L$; $y_M = \sin\varphi$; $zM = \cos\varphi \cos L$

L'angle θ est aussi l'angle entre le plan de l'équateur et le plan OGM en vert. On a :

$$\tan\theta = \frac{y_M}{x_M} = \frac{\tan\varphi}{\sin L}$$

On prendra : θ = atan2 (tan φ, sin L)

Note : la fonction atan2 à deux variables est souvent utilisée en programmation. Entre autres avantages sur la fonction atan, elle donne un résultat dans]–π,π] au lieu de]–π/2,π/2[. atan2(y,x) est l'angle θ du point de coordonnées (x, y).

Calcul de ρ :

$$\rho = GM' = GM = \sqrt{x_M^2 + y_M^2 + (z_M - 1)^2}$$

Après quelques simplifications, on arrive à :

$$\rho = \sqrt{2 - 2\cos\varphi\cos L}$$

Il est possible de déterminer les coordonnées cartésiennes de M' en fonction de φ et de L. Là encore, les calculs nécessitent quelques simplifications à base de formule trigonométriques. On obtient :

$$x = \frac{\sqrt{2}\cos\varphi\sin L}{\sqrt{1+\cos\varphi\cos L}} \quad \text{et} \quad y = \frac{\sqrt{2}\sin\varphi}{\sqrt{1+\cos\varphi\cos L}}$$

Projection de Hammer - Aïtoff

En 1889, Aïtoff inventa une modification de l'aspect transverse de la projection azimutale de Postel (ou mérid-équidistante) décrite dans le numéro précédent). Cette modification consiste à diviser par 2 les longitudes, puis à doubler les abscisses.

Diviser par 2 les longitudes consiste à condenser la sphère en une demi-sphère, à la manière d'une boule en papier alvéolée que l'on replie (figure 43).

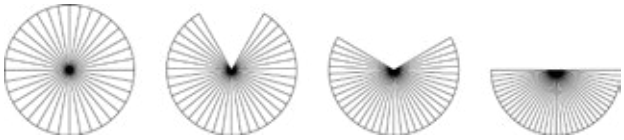


Fig.43. *On divise les longitudes par deux.*
Au centre se trouve le pôle Nord (terrestre ou céleste.

Si on projette cette demi-sphère par une projection transverse, la limite de la carte sera un cercle. En effet, si on prend n'importe quel point P sur le méridien contenu dans le plan xOy (cf. figure 42), GP est constant donc GP' aussi et l'image de ce méridien sera le cercle de rayon GN soit .

Mais au centre de la carte projetée, l'image sera déformée. Pour retrouver une quasi identité, il faut multiplier les abscisses par 2. Le cercle limitant la carte devient alors une ellipse dont le grand axe est le double du petit axe.

En 1892, Hammer applique ce processus à la projection azimutale équivalente de Lambert. Cette projection est appelée projection de Hammer-Aïtoff (parfois simplement de Hammer). Comme la projection de Lambert, elle conserve les aires.

Calculs pour la projection de Hammer-Aïtoff

Il suffit de reprendre les formules de l'encadré précédent, diviser la longitude L par 2 et multiplier l'abscisse x par 2.

Si on utilise les formules des coordonnées polaires, on calcule ρ et θ ainsi :

$$\rho = \sqrt{2 - 2\cos\varphi\cos\frac{L}{2}} \quad \text{et} \quad \theta = \operatorname{atan2}\left(\tan\varphi, \sin\frac{L}{2}\right)$$

puis les coordonnées x et y avec :

$$x = 2\rho\cos\theta \text{ et } y = \rho\cos\theta$$

On peut aussi utiliser les formules des coordonnées cartésiennes. On obtient alors :

$$x = \frac{2\sqrt{2}\cos\varphi\sin\frac{L}{2}}{\sqrt{1+\cos\varphi\cos\frac{L}{2}}} \quad \text{et} \quad y = \frac{\sqrt{2}\sin\varphi}{\sqrt{1+\cos\varphi\cos\frac{L}{2}}}$$

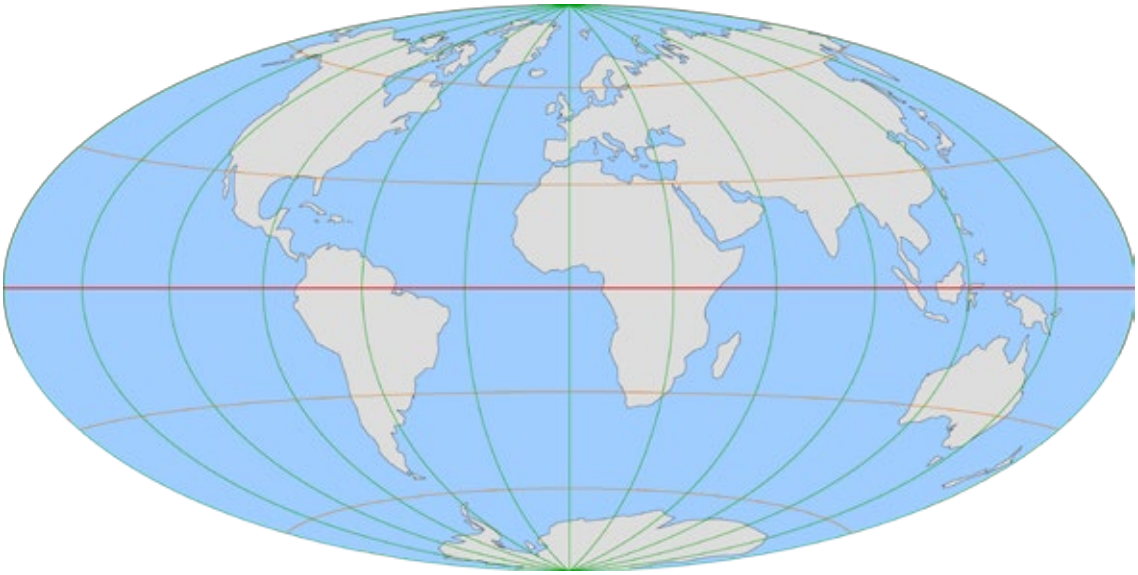


Fig.44. *Carte de la Terre en projection de Hammer-Aïtoff.*

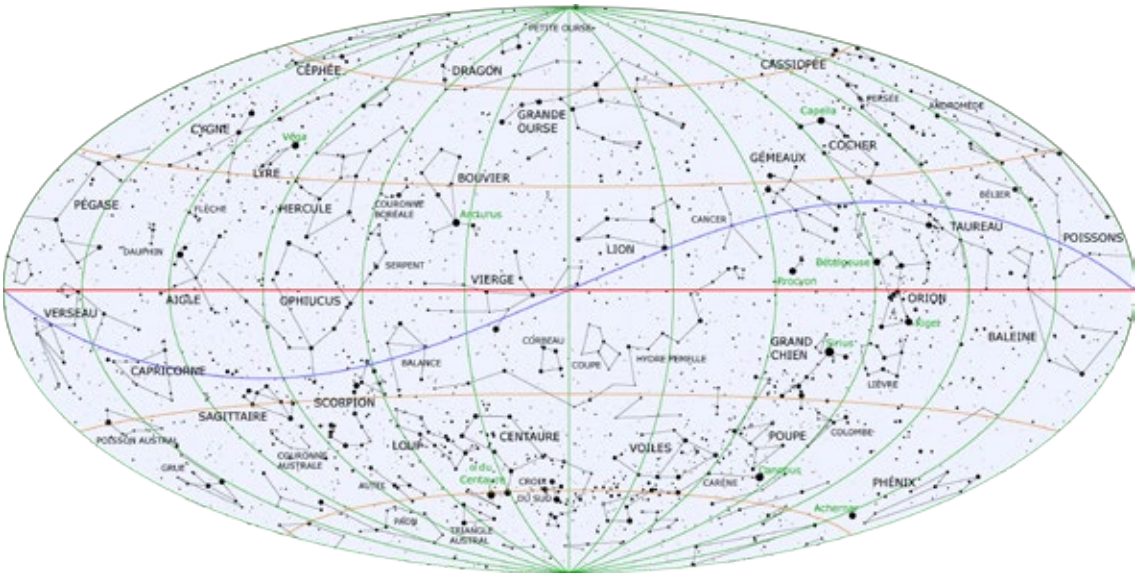


Fig.45. *Carte de la sphère céleste en projection de Hammer-Aïtoff. On a utilisé ici des coordonnées équatoriales.*

Conclusion

Il existe un nombre très important de projections pour représenter la sphère céleste. Dans les formules présentées, on a utilisé le plan de l'équateur comme plan de référence, mais on peut utiliser n'importe quel autre plan, comme le plan de l'écliptique ou le plan de la Galaxie.

Fig.46. *La Voie lactée, observée par le satellite Gaia, en projection de Hammer (Crédit ESA/Gaia/DPAC).*
Pour cette carte, on a utilisé des coordonnées galactiques, le grand axe de l'ellipse représente alors l'équateur galactique.

Les projections équivalentes, qui conservent les aires, sont intéressantes lorsque l'on veut montrer une densité d'objets comme la répartition des galaxies par exemple. Les plus utilisées semblent être la projection sinusoïdale de Flamsteed, la projection de Mollweide (voir CC 165) et celle de Hammer-Aïtoff (CC 168). On trouve assez peu de cartes en projection azimutale de Lambert qui donne une carte circulaire (CC 167).

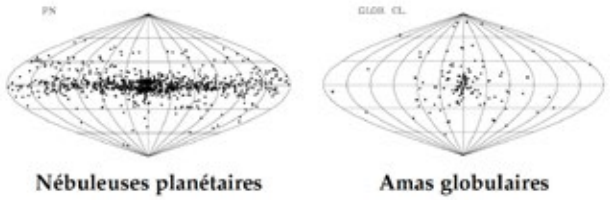


Fig.47. *Les nébuleuses planétaires sont réparties dans le plan de la Galaxie (carte de gauche) alors que les amas globulaires sont situés autour du centre de la Galaxie (carte de droite). Ces deux cartes sont en projection sinusoïdale de Flamsteed.*

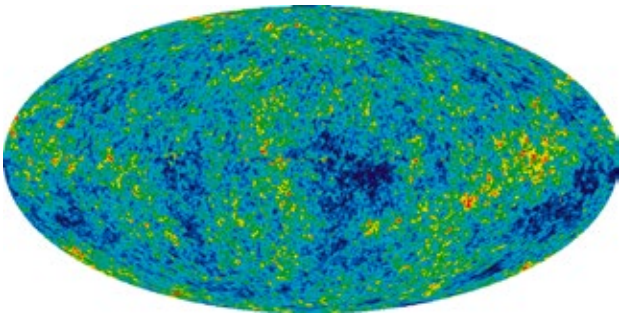


Fig.48. *Le rayonnement du fond cosmologique observé par le satellite WMAP représenté en projection de Mollweide. Le plan de référence est celui de la Galaxie dont le rayonnement a été soustrait.*

Les projections conformes, qui conservent les formes, sont intéressantes si l'on veut reconnaître l'aspect des constellations.

Fig.49. *La constellation d'Orion sur une carte tournante du ciel à gauche (en projection azimutale équidistante non conforme) et avec Stellarium à droite (en projection stéréographique conforme). Si on compare avec le vrai ciel, c'est bien l'image de droite qui ressemble à ce que l'on observe.*

Dans les logiciels d'astronomie, on visualise le ciel sur un écran d'ordinateur plat, il faut donc utiliser une projection.

Le logiciel *Stellarium* utilise par défaut la projection stéréographique (voir CC 167) qui conserve les formes. D'autres projections sont disponibles (dans réglage, affichage du ciel), par exemple gnomonique, orthographique, azimutale équidistante, sinusoïdale, de Hammer-Aïtoff...

Carte du ciel est un autre logiciel gratuit souvent utilisé par les amateurs. Il utilise par défaut la projection gnomonique (CC 167) jusqu'à 90° de champ, puis la projection de Mercator (CC 165) entre 90 et 360°. D'autres projections sont également disponibles (orthographique, de Hammer-Aïtoff...).

Dans les cartes et atlas du ciel, on utilise différentes projections.

Pour les cartes tournantes, c'est habituellement la projection azimutale équidistante (cf. CC 168).

Dans l'*Atlas du ciel 2000* de Wil Tirion, les cartes sont réalisées avec différentes projections : azimutale équidistante pour les régions polaires (CC 168), cylindrique avec parallèles équidistants type projection quadratique pour la région équatoriale (CC 165) et sécante conique équidistante pour les régions intermédiaires (CC 166).

■

L'ASTRONOMIE dans les TIMBRES (1)

Anne-Marie Louis, anne-marie.louis@wanadoo.fr

Le thème est vaste. Le monde aussi. La première émission représentant une constellation remonte à 1897. Donc nous ne pourrons montrer ici que quelques échantillons sélectionnés pour leur intérêt esthétique et documentaire, sans avoir la prétention de faire un travail exhaustif. Il y aura une seconde partie voire même plusieurs. Combien ? Bonne question…

1ère partie - Les années en « 9 » : 2009, 1609, 1969, 1919, 2019

D'accord, les dates ne sont pas dans l'ordre chronologique. S'il est plaisant d'avoir à écrire un article sans schéma, sans calcul, avec une documentation abondante à portée de main, il n'est pas évident de trouver par où commencer et quoi éliminer. Certains sites proposent d'emblée une armée de singes, chiens, cochons… : nous laisserons de côté le zodiaque chinois et son bestiaire. Nous n'évoquerons que brièvement, vue la surabondance de documents, la conquête spatiale mais vous aurez quelques pistes pour aller plus loin. Et nous nous demanderons si les timbres ont quelque chose à nous apprendre, à propos des lieux, de l'Histoire, des découvertes, des femmes, des hommes et du ciel. S'il faut choisir, je choisirai les moins célèbres. Et puisque les faits, même récents, ont tendance à être effacés par des complotistes en panne de rêves, commençons par quelques commémorations.

AMA09 : Premier épisode

L'année **2009** avait été déclarée **Année mondiale de l'astronomie** par l'Unesco. Elle coïncidait avec le 400e anniversaire des premières observations au moyen d'une lunette astronomique en **1609**. Le thème de l'Astronomie avait donc été retenu pour la série Europa et 64 pays d'Europe, et aussi des autres continents ont émis des timbres à cette occasion. Le même logo fut utilisé par tous les pays, qui déclinèrent le thème à la convenance des créateurs, ce qui explique qu'ils soient partis dans toutes les directions ! Mais le but était de montrer que toutes ces observations nous rassemblent à travers les siècles.

Comme **Andorre**, la **Slovénie** affiche le logo officiel sur le timbre bleu et aussi la découverte de la comète C/2008 Q1 Matičič, ainsi que les positions qu'occupaient ce jour-là les planètes Mercure, Vénus, Terre et Mars. Le timbre rose célèbre les 50 ans de l'observatoire Golovec, proche de Ljubljana.

L'**Argentine** associe le logo, Galilée et la Croix du Sud. Pourquoi commencer par la Croix du Sud ? Parce que c'est la constellation qui apparaît en 1897 sur deux timbres de **Nouvelle-Galles du Sud** pour le jubilé de la Reine Victoria : première représentation du ciel sur timbre,

semble-t-il. Bien que rares, on peut les voir sur des sites (liens dans les références), ainsi que la première série mexicaine consacrée au ciel, en 1942.

Plusieurs pays ont représenté des constellations : **Chypre** (grec) a choisi Cassiopée et Andromède.

La République de **Macédoine du Nord** associe constellations et croyances populaires traditionnelles macédoniennes : voyez, sur le timbre à 50 denars, la constellation de Kvatchka la *Mère Poule*, avec ses poussins, qui correspond à l'amas des Pléiades, tandis que Vénus est présentée comme étant *du soir* !

Sur celui à 100 denars : Oratch le laboureur (Bételgeuse dans la constellation d'Orion). Et sur celui à 150 denars : Pétel le coq (cherchez la correspondance) et non loin la Lune !

L'**Espagne** a choisi une présentation artistique de la Lune, plus jolie en l'éclairant au moyen d'une lampe UV (lampe pour le contrôle et la détection des faux billets, environ 14 €) mais qui n'apporte rien de plus.

Beaucoup d'autres pays en revanche ont rendu hommage à Galilée et à leurs astronomes, sur lesquels vous saurez tout dans la saison 2 ! Hélas aucun timbre, à ma connaissance, n'a rappelé que c'est **Thomas Harriot** qui fit les premiers dessins de la Lune quatre mois avant **Galilée**. Les découvertes des montagnes lunaires, des taches solaires, des étoiles de la Voie lactée, des phases de Vénus et des satellites de Jupiter ont ensuite révolutionné l'astronomie.

L'**Azerbaïdjan** a édité un superbe bloc-feuillet évoquant les travaux de Galilée.

Son portrait est inspiré du dessin au crayon que fit *Ottavio Leoni* en 1624. Les dessins des phases de la Lune sont extraits de son ouvrage *Sidereus Nuncius* (Le Messager des étoiles) écrit et publié au début de l'année 1610.

Autre portrait : le **Luxembourg** a choisi celui peint en 1636 par le flamand *Joost Sustermans*. On distingue aussi un extrait des notes manuscrites de Galilée et sa célèbre lunette, tandis que l'autre timbre évoque le bonheur procuré par l'apparition d'une étoile filante.

Et **Malte** reproduit un célèbre portrait de Galilée attribué à *Francesco Boschi* (Musée national du château de Versailles) ainsi qu'un dessin de la Lune par Galilée, complété par le module lunaire Eagle ! On voit aussi une partie de la constellation d'Orion, qu'observa Galilée. L'autre timbre représente le grand télescope de l'anglais William Lassell, installé à Malte vers 1865, et la nébuleuse d'Orion M42 souvent observée par Lassell. Un exemple de projet bien pensé par ses auteurs !

Une certaine ressemblance avec la série de **Lituanie,** mais ici ce sont les taches solaires qui figurent sur le timbre de droite avec l'université de Vilnius et son observatoire.

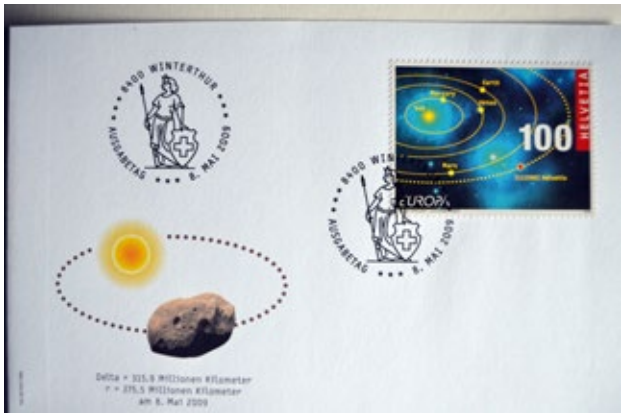
Sur un timbre la **Roumanie** réussit à afficher une carte du ciel, les conceptions du monde, et les phases de la Lune. Sur l'autre Galilée figure avec sa lunette, la tour de Pise, ville où il naquit et étudia, les dessins de la Lune et la fameuse citation qui lui est attribuée : *E pur si muove*. Tant de choses sur un si petit format !

Le parallèle passé-présent est traité de belle manière aussi par l**e Kazakhstan**.

La **Serbie** a eu la bonne idée de montrer Uranie, muse de l'Astronomie, à côté de la lunette de Galilée avec la Voie lactée en arrière-plan. Sur le timbre de droite : un radiotélescope et la nébuleuse de la Tête de Cheval. Joli rapprochement qui montre le caractère intemporel de l'astronomie.

Deux pays, l'**Allemagne** et la **République tchèque**, ont choisi de rendre hommage à Kepler qui en 1609 également, publia ses deux premières lois dans son ouvrage *Astronomia Nova*.

Enfin pour terminer (provisoirement…), voici pour la **Suisse** l'astéroïde Helvetia 113390, ainsi que le Système solaire dans la configuration du 8 mai 2009, premier jour d'émission du timbre !



Le sujet est loin d'être épuisé, il y aura une suite (avec en particulier le bloc français) !

1969 : Conquête ou voyage ?

Honneur aux **USA** : Apollo 8 fut lancé en décembre 1968, le timbre fut émis en 1969. Sans commentaire sur la légende… Le 21 juillet de la même année, alunissage du LM, ou LEM (Lunar Excursion Module).

En 1994, le thème des émissions Europa est *Grandes découvertes*. La **Moldavie** commémore les 25 ans.

En 2009, comme beaucoup d'autres pays, l'**Île de Man** commémore les 40 ans.

2019 : la commémoration des 50 ans est planétaire.

2019 : **Bilan d'une grande année**

Combien y a-t-il eu, en **France** en 2019, de timbres faisant référence aux sciences ou à l'astronomie ? A-t-on vu un timbre sur les 80 ans du CNRS ? sur l'astéroïde Eros ? Verra-t-on un timbre ou un bloc pour l'Année internationale du tableau périodique des éléments chimiques de Mendeleïev ? Pas non plus de timbre commémorant le bicentenaire de la naissance de Léon Foucault, physicien et astronome français aux nombreuses découvertes dans des domaines très variés, qui démontra la rotation de la Terre autour de son axe grâce à une expérience très connue du grand public : voici donc en hommage l'enveloppe premier jour de 1958 !

À part le timbre des premiers pas sur la Lune, il n'y a eu que deux émissions : Augustin Fresnel le 6 mai et Émilie de Breteuil, marquise du Châtelet (1706 – 1749) le 18 janvier. C'est mieux que rien par rapport à certaines années mais c'est trop peu, même si nous sommes reconnaissants envers le Service philatélique de la Poste d'avoir célébré celle qui traduisit en français les *Philosophia naturalis principia mathematica* de Newton.

1919 – 2019 : Bel épilogue avec la commémoration, par le Portugal, du **100e anniversaire de l'éclipse du 29 mai 1919**, dite ***éclipse d'Einstein*** ou ***éclipse de la relativité générale***, puisqu'elle en permit la confirmation expérimentale grâce aux mesures d'Eddington. ■

À suivre : autres astronomes, autres lieux, éclipses, phénomènes lumineux…

L'ensemble des riches références se trouvent sur le sites du CLEA.

Des géomètres au service des horloges atomiques de l'Observatoire de Paris

Pacôme Delva, maître de conférences SYRTE, Observatoire de Paris
Xavier Collilieux, enseignant chercheur IGN, Institut de physique du globe de Paris

Le SYRTE à l'Observatoire de Paris participe à une campagne internationale de comparaison d'horloges atomiques. Ces horloges contribuent à l'établissement du TAI (Temps Atomique International). La mesure de chaque horloge varie avec le champ gravitationnel local qui dépend de l'altitude de chaque horloge (décalage relativiste, ou effet Einstein). Réciproquement l'extraordinaire précision de ces horloges permet de mesurer des variations d'altitude.

L'unité mixte de recherche Système de Référence Temps Espace (SYRTE), localisée à l'Observatoire de Paris, est chargée par le Laboratoire National de Métrologie et d'Essais (LNE) de la responsabilité des références nationales de temps et de fréquence, et participe à l'établissement du Temps Atomique International (TAI). À ce titre, elle mène des recherches en métrologie du temps et des fréquences qui débouchent sur le développement d'horloges atomiques extrêmement précises. De plus, le SYRTE participe régulièrement à des campagnes internationales de comparaison d'horloges, visant ainsi à établir des standards et étudier des méthodes de comparaison dans des gammes de précision encore inégalées. Un des enjeux majeurs est la redéfinition de la seconde à l'aide d'un nouveau standard. Nous allons voir ici comment les géomètres ont mesuré les différences d'altitudes des horloges atomiques de l'observatoire de Paris et en quoi ces quantités sont utiles[1].

Les horloges atomiques et leurs précisions

Une horloge est un instrument qui est basé sur l'étude d'un phénomène périodique. L'écoulement du temps est mesuré par le nombre de cycles accumulés par ce phénomène. Historiquement, ce sont les cycles d'alternance jour/nuit qui étaient utilisés pour la mesure du temps, un jour étant subdivisé en 24 heures. Le phénomène à la base du fonctionnement des horloges atomiques est lié à une propriété des atomes. En effet, les électrons d'un atome ne peuvent atteindre qu'un nombre limité de niveaux d'énergie. Pour changer de niveau d'énergie, ils émettent ou absorbent une onde électromagnétique à une fréquence spécifique. Depuis 1967, deux niveaux de la structure hyperfine du césium ont été promus étalon pour la définition de la seconde par la Conférence générale des poids et mesures. La fréquence associée à ces deux niveaux, 9 192 631 770 battements par seconde, a ainsi été décrétée et sa valeur est, par conséquent, exacte. Une horloge est donc liée à un élément spécifique, par exemple le césium 133 pour les horloges à césium.

L'exactitude relative d'une horloge atomique est exprimée à l'aide de la quantité $\Delta f / f$, où f est la fréquence de l'onde et Δf la précision à laquelle cette fréquence peut être maintenue. Ce moyen d'exprimer l'exactitude est plutôt commode. Si deux horloges ont des fréquences différant de Δf, la différence de temps comptabilisée au bout d'un temps t serait $(\Delta f / f) \cdot t$. Autrement dit, $\Delta f / f$ peut être interprété comme la dérive d'une horloge en seconde par seconde. L'exactitude relative $\Delta f / f$ des meilleures horloges à césium est aujourd'hui de l'ordre de quelque 10^{-16}, c'est-à-dire qu'elles retardent d'une seconde au bout d'environ 300 millions d'années !

Cependant, des horloges utilisant d'autres atomes les surclassent en exactitude. La fréquence de ces horloges est si grande qu'elle correspond à une onde dans le domaine visible, on parle alors d'horloges optiques. Elles sont basées sur l'utilisation de laser pour interroger les atomes. Elles présentent une exactitude relative de 10^{-17}-10^{-18}, atteinte en cumulant seulement 30 minutes de mesures. Autrement dit ces horloges retardent d'une seconde au bout d'environ 30 milliards d'années, deux fois l'âge de l'Univers !

Fréquence de battement d'une horloge et différence d'altitude

La précision de la mesure de l'écoulement du temps est directement reliée à la précision à laquelle la

1 Cet article est adapté d'un article publié en 2018 dans le volume 156 de la revue XYZ dont la référence complète est la suivante: Collilieux, X., P. Delva, L. Heydel, G. Lion, F. Bergerault, R. Delaugerre, L. Evrard, S. Gonnet, D. Pesce and P. Prezat (2018) À quelles altitudes se trouvent les horloges atomiques de l'observatoire de Paris ? , XYZ, vol. 156, pp 26-30

fréquence de l'onde émise en direction des atomes peut être maintenue. Mais il s'avère que l'intensité du champ de pesanteur influence la façon dont le temps s'écoule. Ce phénomène est prédit par la théorie de la relativité générale : la différence de fréquence entre deux horloges fixes sur Terre est liée à la valeur de la différence du potentiel de pesanteur entre les positions de chacune des horloges. Cet effet est appelé de manière générale décalage relativiste des horloges[2]. Il est composé d'une partie liée au champ gravitationnel (le décalage vers le rouge gravitationnel, ou effet Einstein), et une partie liée aux vitesses des deux horloges (par rapport aux étoiles lointaines). La différence de fréquence relative entre une horloge parfaite localisée au point A et une autre au point B, soumises respectivement aux potentiels de pesanteur W_A et W_B, est :

$$\frac{f_B - f_A}{f_B} = \frac{W_B - W_A}{c^2} \qquad (1)$$

avec c la vitesse de la lumière dans le vide. Cette équation est valable jusqu'à une précision de 10^{-19}. A noter que cet effet de décalage relativiste est l'objet de tests poussés utilisant les horloges atomiques du système de positionnement par satellites Galileo[3], ou encore l'horloge PHARAO, dans le cadre de la mission ACES, prévue pour être arrimée à la Station spatiale internationale début 2020.

Pour obtenir la différence théorique de fréquence entre deux horloges optiques d'exactitude relative de 10^{-18} localisées en deux points distincts, il faut donc connaître la différence de potentiel de pesanteur entre ces 2 points à environ $10^{-18} \cdot c^2 \approx 0.1$ m².s^{-2}. Comme l'accélération de pesanteur est le gradient du potentiel de pesanteur, on déduit la relation suivante :

$$dW = -gdH \qquad (2)$$

avec dW la variation du potentiel liée à une variation de hauteur dH. Le vecteur accélération de pesanteur dirigé vers le bas explique le signe négatif de cette relation. En prenant $g \approx 10$ m.s^{-2}, on déduit que la différence d'altitude entre deux horloges optiques doit être connue à 1 cm près. La relation ci-dessus étant linéaire, une horloge à césium 100 fois moins exacte, nécessitera une correction relativiste basée sur une différence d'altitude de précision métrique.

Inversement, la connaissance de la différence de fréquence entre 2 horloges ayant une précision relative de 10^{-18} permettrait de calculer la différence de potentiel et donc la différence d'altitude avec une précision de 1 cm.

Ce phénomène de décalage vers le rouge relativiste est bien connu et est déjà exploité par le Bureau international des poids et mesures (BIPM) pour déterminer l'échelle de temps atomique internationale (TAI) à partir d'environ une dizaine de fontaines atomiques situées à des altitudes différentes. En réalité, chacune des fontaines atomiques utilisées pour le calcul du TAI mesure sa propre échelle de temps. Pour contribuer au TAI, les mesures d'une horloge doivent être corrigées du décalage vers le rouge relativiste : le temps d'une horloge contributrice (assimilable à un temps propre au sens de la relativité générale[4]) est ainsi transformé au temps qu'aurait mesuré une horloge fictive localisée sur une équipotentielle du champ de pesanteur dont le potentiel *W0* est défini par convention. Cette équipotentielle est aujourd'hui confondue avec le géoïde à la précision des horloges près. Pour mémoire, le géoïde est une équipotentielle du champ de pesanteur servant de référence aux altitudes. La formule (1) peut donc être appliquée pour calculer le décalage de fréquence.

En conclusion, la connaissance du potentiel de pesanteur à l'emplacement des horloges (donc des altitudes) est requise :

- pour comparer des horloges (distantes ou proches). Dans ce cas, seule la différence de potentiel (donc d'altitude) doit être connue.
- pour convertir l'échelle de temps locale réalisée par l'horloge en une échelle de temps globale telle qu'elle serait observée sur le géoïde. Dans ce cas, c'est W_0 - W la cote géopotentielle qu'il faudra connaître.

Ainsi, la différence d'altitude entre les horloges optiques doit être connue à mieux que 1 cm, soit 0.1 m².s^{-2}. Pour cela, l'Observatoire de Paris a fait appel à plusieurs reprises aux géomètres du « Service de géodésie et métrologie » de l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN).

Les horloges atomiques

Le SYRTE héberge une grande variété d'horloges atomiques dans différents locaux du parc, citons notamment :

- des horloges à césium et rubidium et en particulier des horloges destinées à des applications industrielles et spatiales ;

2 Voir Morfouli, M. et Delva, P. (2016) Introduction à la géodésie chronométrique, Cahiers Clairaut, vol. 156, p. 2

3 Voir Delva, P. (2019) Quand Galileo confirme les prédictions d'Einstein, Cahiers Clairaut, vol. 165, p. 36

4 Voir Delva, P. et Angonin, M.-C. (2015) Promenons-nous dans l'espace-temps, Cahiers Clairaut, vol. 152, p. 2

• une horloge optique basée sur l'atome de mercure ;

• deux horloges optiques basées sur l'atome de strontium affichant une exactitude de 4.10^{-17}.

Par ailleurs, au printemps 2017, l'horloge optique transportable du PTB d'exactitude 7.10^{-17}, hébergée dans une remorque, a été stationnée dans le parc de l'Observatoire de Paris. Reliée par fibre optique à une autre horloge, elle permet la comparaison de fréquences mesurées en des endroits non accessibles par des horloges fixes.

Campagne de mesures

L'objectif des campagnes de mesures effectuées à l'Observatoire de Paris était de déterminer les altitudes des différentes horloges. Deux repères de nivellement du réseau NGF/IGN69 sont présents dans l'enceinte de l'Observatoire de Paris. Ces repères, fixés à un mur extérieur de bâtiment, ont une altitude connue, car préalablement déterminée par l'IGN, dans le référentiel d'altitude légal français.

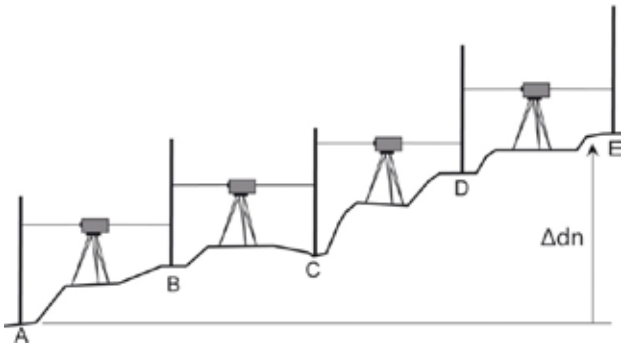


***Fig.1**. Principe du nivellement. La différence d'altitude entre les points A et E est mesurée en effectuant la différence des lectures des graduations d'une mire (« règle ») déplacée du point A vers le point E en passant par un nombre quelconque de points intermédiaires.*
Source : https://geodesie.ign.fr consulté en juillet 2019.

En 2013, une première campagne a été l'occasion d'installer et de déterminer l'altitude d'un réseau de repères laiton scellés à la verticale dans le sol ou horizontalement dans des murs. Ce réseau comprend des points :

• dans le parc de l'Observatoire, c'est-à-dire à l'extérieur des laboratoires ;

• sur les toits de deux bâtiments ;

• à l'intérieur des bâtiments abritant les horloges ou gravimètres.

La méthode utilisée s'appelle le nivellement, voir figure 1. Elle consiste à utiliser des mires (règles graduées, aujourd'hui, la graduation est remplacée par un code-barres) et un niveau pour mesurer des différences de hauteur entre des points stationnés par la mire, voir les figures 2a et 2b). La figure 2b montre notamment la « règle » utilisée par les géomètres pour niveler une des tables portant une horloge optique. Les altitudes relatives des horloges de l'Observatoire ont été déduites avec une précision inférieure au millimètre.

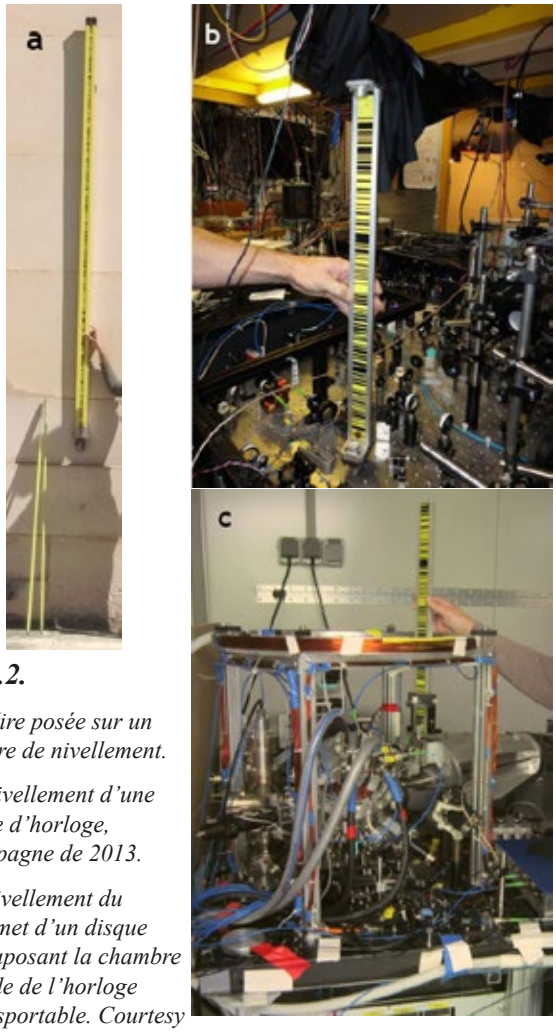


Fig.2.

***a.** Mire posée sur un repère de nivellement.*

b. Nivellement d'une table d'horloge, campagne de 2013.

c. Nivellement du sommet d'un disque juxtaposant la chambre à vide de l'horloge transportable. Courtesy of Physikalisch-Technische Bundesanstalt.

En 2017, ce réseau a été réutilisé pour déterminer l'altitude de l'horloge optique transportable du PTB stationnée dans le parc de l'Observatoire de Paris, dans une remorque (voir la figure 2c). Une campagne de mesure a été effectuée à l'installation, début mai 2017, puis une autre fin juin 2017 avant le démontage afin de contrôler la stabilité de l'équipement. Un écart inférieur à 0.5 mm a été évalué entre les deux campagnes.

Le détail des mesures et de leur exploitation a été écrit dans la revue XYZ, vol. 156 : Collilieux, X. et al. (2018) dont la référence est fournie en préambule.

Horloges et nivellement chronométrique

Le nivellement à l'aide d'horloges atomiques est appelé nivellement chronométrique. Une démonstration expérimentale de ce concept a été

effectuée pour la première fois en 2010 par l'équipe de C. W. Chou du NIST (USA) : le déplacement vertical entre deux horloges atomiques optiques d'une trentaine de centimètres a pu être détecté dans la différence de fréquence mesurée. Plus récemment, une mesure de nivellement d'une précision de 5 cm entre 2 points séparés de 15 km a été effectuée par horloges atomiques reliées par fibre optique, par l'équipe de H. Katori au Japon. Une distance plus importante a été franchie avec la comparaison des horloges du PTB à Braunschweig et de l'Observatoire de Paris reliées par fibre optique sur une distance de 1 415 km.

De plus, un programme de recherche entre le SYRTE et l'IGN vise à étudier l'apport des horloges atomiques pour la détermination à haute résolution du géoïde, c'est-à-dire à des échelles spatiales de 10 km sur la base de simulations numériques. Ceci en attendant demain les premières horloges atomiques destinées au nivellement, mais il faudra pour cela résoudre le problème de la transmission à distance de la fréquence entre deux horloges pour des applications opérationnelles. Un premier pas sera franchi avec la mission ACES/PHARAO qui reposera sur la mise en orbite d'une horloge à atomes froids sur la station ISS pour du transfert de temps avec une stabilité inégalée inférieure à la picoseconde après un passage de l'ISS d'une durée de l'ordre de 300 s. Une synchronisation meilleure encore à hauteur de 10^{-18} pourrait être obtenue par l'utilisation de signaux laser transmis à une constellation de satellites, comme celle de futurs GNSS, mais aujourd'hui, seule la fibre optique permet d'atteindre cette précision.

Remerciements :

Un grand merci aux géomètres du Service de géodésie et métrologie de l'IGN : Fabien Bergerault, Raphaëlle Delaugerre, Loïc Evrard, Sylvain Gonnet, Damien Pesce, Patrice Prezat ; à Laurent Heydel, chef des travaux spéciaux IGN ; à Guillaume Lion, chercheur IGN rattaché à l'UMR IPGP ; aux chercheurs du SYRTE/Observatoire de Paris : Jérôme Lodewyck, Rodolphe Le Targat, Paul-Eric Pottie et Eva Bookjans ; ainsi qu'aux partenaires du Physikalisch-Technische Bundesanstalt. ■

Une date à retenir

L'assemblée générale du CLEA

se déroulera le dimanche 29 mars 2020
à la FIAP Jean Monnet à Paris

École d'été d'astronomie du CLEA

En 2020, elle se déroulera à Gap-Bayard du 18 au 25 août
Avec pour thème « Le temps en astronomie »

Inscriptions à partir de l'équinoxe de printemps

À travers des ateliers de base, ce thème pourra intéresser tous les enseignants y compris les professeurs d'école. Pensez à diffuser largement l'information auprès de vos collègues et amis.

Solutions des mots croisés page 17

Horizontalement

1. Alphonsines. **2.** Néron. Pliai. **3.** Noir. Calcul. **4.** Trust. Exo. **5.** AO. Orbite. **6.** IMCCE. Au (Or). UA (Unité astronomique). **7.** Rb (rubidium). Kepler. **8.** Éros. Nice. **9.** Sec (que certains utilisent encore pour seconde). Newton.

Verticalement

1. Annuaires. **2.** Leo. Ombre. **3.** Prit. Oc. **4.** Horrocks. **5.** On. Urée. **6.**CSB (Centre Spatial de Brétigny). Pré. **7.** Spatial. **8.** Ill (qui passe à Strasbourg, ville du centre de données astronomique). Tuent. **9.** Nicée (Concile de Nicée en 325). Rio. **10.** Eaux. CN. **11.** Silotage.

Vous souhaitez débuter ou
vous perfectionner en astronomie ?

Vous avez envie de développer vos
savoir-faire pédagogiques au contact de
collègues expérimentés ?

Venez participer au col Bayard, à une école
d'été d'astronomie, dans un cadre majestueux.

Exposés accessibles à tous, ateliers pratiques et observations du ciel : toutes les activités sont encadrées par des astronomes professionnels et des animateurs chevronnés.

Renseignements et vidéo sur :
http://clea-astro.eu/aLaUne/EcolesdEtedAstronomie

Les productions du CLEA

En plus du bulletin de liaison entre les abonnés que sont les Cahiers Clairaut, le CLEA a réalisé diverses productions.
Fruit d'expérimentations, d'échanges, de mises au point et de réflexions pédagogiques d'astronomes et d'enseignants d'écoles, de collèges, de lycées, ces productions se présentent sous différentes formes :

Fiches pédagogiques

Ce sont des hors-série des Cahiers Clairaut conçus par le Groupe de recherche pédagogique du CLEA : astronomie à l'école, mathématique et astronomie, le Soleil, …
HS10 Mathématiques et astronomie (2012)
HS11 Les constellations (2014)
HS12 L'astronomie à l'école (2016)
HS14 Le Soleil (2018)

Fascicules thématiques de la formation des maîtres, en astronomie

Repérage dans l'espace et le temps, le mouvement des astres, la lumière messagère des astres, vie et mort des étoiles, univers extragalactique et cosmologique, …

Matériel

Filtres colorés et réseaux de diffraction.

Maquettes

Astrolabes, cartes du ciel, fuseaux horaires, lunoscopes, nocturlabes, zodiaques ou lot des six maquettes.

Vous pouvez retrouver ces productions sur le site de vente : http://ventes.clea-astro.eu/

Le formulaire de commande est sur le site.

Le site web

Une information toujours actualisée

http://www.clea-astro.eu

LES CAHIERS CLAIRAUT

Publiés quatre fois par an, aux équinoxes et aux solstices, les Cahiers Clairaut offrent des rubriques très variées :

Articles de fond
Réflexions
Reportages
Textes (extraits, citations, analyses)
Pédagogie de la maternelle au supérieur
TP et exercices
Curiosités
Histoire de l'astronomie
Réalisations d'instruments et de maquettes
Observations
Informatique
Les Potins de la Voie Lactée

COMMENT NOUS JOINDRE ?

Informations générales :
http://www.clea-astro.eu

Siège social :
CLEA
Case courrier 7018
Université Paris Diderot - Paris 7
Bâtiment Sophie Germain
IREM de Paris
8, place Aurélie Nemours
75205 Paris cedex 13

École d'Été d'Astronomie :
daniele-imbault@laposte.net

Cahiers Clairaut :
christianlarcher3@gmail.com

Ventes des productions :
http://ventes.clea-astro.eu/

Site web :
contact@clea-astro.eu

Adhésion / Abonnement :

Adhésion CLEA pour 2019 :	**10 €**
Abonnement CC pour 2019 :	**30 €**
Adhésion + abonnement CC :	**35 €**
Adhésion + abonnement CC + abonnement numérique :	**40 €**

Les adhésions, abonnements et achats peuvent se faire directement en ligne sur le site : http://ventes.clea-astro.eu/

Directeur de la Publication : Frédéric Pitout
Rédacteur de publication : Christian Larcher
Imprimerie Grapho12, 12200 Villefranche de Rouergue
Premier dépôt légal : 1er trimestre 1979
Numéro CPPAP : 0315 G 89368
Prix au numéro : 9 €
Revue trimestrielle : numéro 168 hiver 2019