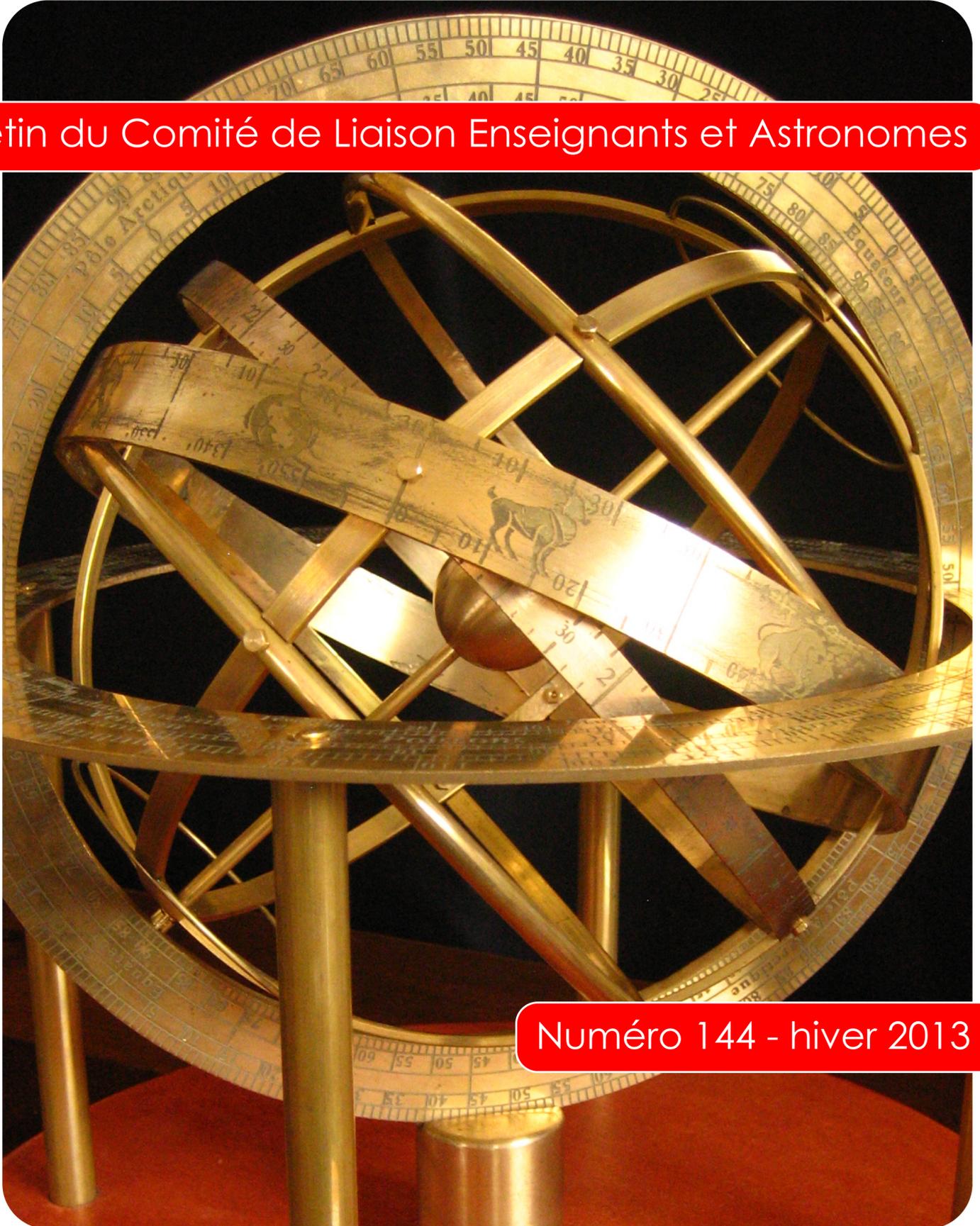


LES CAHIERS CLAIRAUT

N° 144 - Décembre 2013 7 €

Bulletin du Comité de Liaison Enseignants et Astronomes



Numéro 144 - hiver 2013



ISSN 0758-234X

Les Cahiers Clairaut

Hiver n° 144

Éditorial

Supposez qu'à la suite d'un cataclysme : typhon, tsunami, tremblement de terre, chute de météorite ou de comète, guerre etc. - liste non exhaustive - vous soyez brutalement privé de l'usage de l'électricité. L'actualité nous montre que, dans ce domaine, rien n'est véritablement impossible. Imaginez donc qu'après l'un de ces événements dramatiques la « fée électricité » vienne à disparaître. Plus d'électricité donc plus d'ordinateur ni de données informatiques, plus de portable ni de GPS, plus de transports, plus de médicaments, plus de carte bleue, plus... Que pourraient faire les survivants dans une telle situation ? Nécessairement, ils seraient amenés à réinviter les instruments jugés de nos jours comme archaïques mais cependant utilisés pendant des siècles par nos ancêtres. Par exemple, pour se repérer dans l'espace et le temps, redécouvrir l'usage des instruments comme l'arbalestrille (ou bâton de Jacob), l'astrolabe, l'octant ou le sextant, le quartier de Davis, le nocturlabe, le sablier et même reconstruire des sphères armillaires pour modéliser le mouvement des astres. Alors, comme nous ne savons pas ce que l'avenir nous réserve, je vous conseille d'étudier attentivement, dans la partie thématique, le principe et le maniement de ces instruments d'antan.

Mais, même si ces instruments paraissent obsolètes aujourd'hui, l'étude que l'on peut en faire avec nos élèves et leur utilisation permet d'aborder de nombreux sujets et de mieux comprendre le ciel.

Dans ce numéro nous ferons exceptionnellement un retour vers le passé, avec la vie et l'œuvre de deux grands astronomes nés il y a trois siècles : Alexis Clairaut (1713 -1762) et Nicolas La Caille (1713 -1762).

Nous retrouvons l'actualité avec d'une part les élèves de Jean-Brice Meyer surfant si bien sur les « vagues de Jupiter » qu'en fin de course ils sont récompensés par l'Académie des sciences et d'autre part l'espoir de retrouver la comète ISON en pleine gloire après son passage derrière le Soleil.

Christian Larcher, pour l'équipe.

Histoire

Clairaut astronome

Jean-Claude Pecker p 2

Avec nos élèves

Quand le LP2I surfe sur Jupiter

Jean-Brice Meyer et ses élèves p 6

Thème : INSTRUMENTS ANCIENS

p 10

Instrument

Le nocturlabe

Véronique Hauguel p 11

Instrument

L'arbalestrille

Philippe Merlin p 16

Avec nos élèves

L'astrolabe

Philippe Peurière p 20

Instrument

La sphère armillaire

Jean-Luc Fouquet p 25

Les lignes des sphères armillaires et des astrolabes

Pierre Causeret p 29

Histoire

Nicolas-Louis de La Caille, astronome et géodésien

James Lequeux p 30

Dernière minute

Rétrogradation de Mars

Jean-Michel Vienney p 34

Avec nos élèves

ISON et la gravité en classe de troisième

Roseline Primout —Jamet p 35

Ciel d'automne

Pierre Causeret p 36

Coin des petits curieux

Qu'est-ce qu'une comète ?

Jean Ripert p 37

Lecture pour la marquise

Quelle est notre place dans l'Univers ?

Christian Larcher p 38

Jeux

Mots croisés

Pierre Causeret p 39

Vie de l'association

AG 2014 et EEA 2014

ISON et réponses des mots croisés p 40

Voir Assemblée Générale et École d'Été d'Astronomie 2014 page 40

CLAIRAUT ASTRONOME

Jean-Claude Pecker, astrophysicien, membre de l'Académie des sciences,
président d'honneur du CLEA

À travers les Cahiers Clairaut, le CLEA continue à fêter le tricentenaire de la naissance d'Alexis Clairaut.

Clairaut a abordé la recherche scientifique par la géométrie. Devenu très jeune Membre de l'Académie des Sciences, il se lie avec Maupertuis, son aîné de quinze ans. Maupertuis, militaire converti à la science, a été élu membre de l'Académie des Sciences, puis de la Royal Society, à l'occasion d'un voyage en Angleterre. À Londres, il s'initie aux idées d'Isaac Newton, et devient en France le ferme propagandiste des théories newtoniennes, contre les Cassini, les plus influents des astronomes parisiens. D'Alembert rend à Maupertuis un hommage appuyé dans son chapitre introductif à la grande Encyclopédie : « *Le premier qui ait osé parmi nous se déclarer ouvertement newtonien, est l'auteur du Discours sur la figure des astres [...]. Maupertuis a cru qu'on pouvait être bon citoyen sans adopter aveuglément la physique de son pays, et pour attaquer cette physique, il a eu besoin d'un courage dont on doit lui savoir gré.* »

La forme de la Terre

Sous l'influence de Maupertuis, l'Académie des sciences décide de mesurer un arc de méridien dans le Grand Nord, un autre près de l'équateur. Il s'agit, *stricto sensu*, d'une opération de géodésie. Mais elle n'a pas pour but, comme la géodésie de la France, de tracer le contour des côtes, ou de déterminer la position d'un observatoire. Il s'agit bel et bien d'un problème astronomique tout à fait fondamental : la Terre est-elle une sphère parfaite ? Est-elle une sphère aplatie dans ses régions polaires (comme une pomme) ? Ou au contraire est-elle étirée dans ces régions (comme un citron) ? La théorie de Descartes, admise par tous en France, autour de Cassini, prévoyait l'écrasement des régions équatoriales par des tourbillons interplanétaires : le citron donc ; les théories newtoniennes prévoyaient au contraire que la rotation d'une sphère partiellement fluide devait entraîner un aplatissement : la pomme.

Pour trancher sans ambiguïté, il fallait donc faire la mesure de deux arcs de méridien, près du pôle, et

près de l'équateur. Citons ici Maupertuis¹ : « *J'exposai, il y a dix-huit mois, à la même assemblée, le motif et le projet du voyage au cercle polaire ; je vais lui faire part aujourd'hui de l'exécution. Mais il ne sera (...) pas inutile de rappeler (...) les idées qui ont fait entreprendre ce voyage...* ». Maupertuis évoque donc les mesures, par Richer (1672), de la pesanteur proche de l'équateur, plus faible là qu'en France. Huygens avait proposé alors de rendre compte de cette mesure par un aplatissement de la Terre, dont il fait une théorie. Newton, avec une méthode différente, aboutissait au même résultat que Huygens². Les excellentes mesures de Picard (vers 1669-70) confirment cet aplatissement, mais limitées à une portion du méridien autour de Paris (d'Amiens à La Ferté-Allais), elles ne sont pas concluantes. L'Académie décide donc de l'expédition. Mais, comme le remarque Maupertuis, sans citer le nom de l'obstiné cartésien Jacques Cassini, alors l'astronome le plus influent en France : « *L'Académie [restait] partagée ; ses propres lumières (allusion notamment à Cassini) l'avaient rendue incertaine, lorsque le Roy (Louis XV) voulut faire décider cette grande question, qui n'était pas de ces vaines spéculations, dont l'oisiveté ou l'inutile subtilité des philosophes s'occupe quelquefois, mais qui doit avoir des influences réelles sur l'astronomie et sur la navigation* ».

Il fallait donc aller vers l'équateur et vers les pôles ; deux missions furent organisées, financées par M. de Maurepas, sur ordre du roi. Celle de Laponie, préparée et organisée par Maupertuis et le jeune Clairaut, fait l'objet du long mémoire de Maupertuis. Nous n'entrerons pas ici dans le détail de ce récit passionnant. Notons-y seulement la place éminente que Maupertuis, bien qu'il se considère

¹ Maupertuis, nov. 1737, *La Figure de la Terre déterminée par Messieurs de l'Académie royale des Sciences, qui ont mesuré le degré de Méridien au Cercle Polaire*, Mémoires de l'Académie des Sciences, 1737, p 389 et sq.

² Carlo Denis, *Le développement historique de la Géodésie*, 1999, Université de Liège.

comme le véritable et presque seul héros de l'expédition, réserve au jeune Alexis Clairaut.

L'expédition³ est composée, outre Maupertuis (né en 1696), de l'abbé Outhier (né en 1694), Le Monnier (né en 1715), Camus (né en 1693) et Clairaut (né en 1713) ; Anders Celsius (né en 1701), savant d'Upsal en Suède, les avait rejoints. On consultera avec profit sur ces observations l'excellent ouvrage de Jean-Jacques Levallois⁴ et celui, non moins excellent d'Olivier Courcelle.

La ville de Tornea (aujourd'hui Tornio), proche du golfe de Bothnie, sur la frontière actuelle entre Suède et Finlande, sera le centre vital de cette expédition qui remontera vers le nord, jusqu'à Kittis, à environ 100 km de Tornea pour établir le système des triangles de l'opération géodésique menée entre deux points localisés au voisinage de chacune de ces deux villes, et sur un même méridien. On mesurera les angles de ces triangles par des visées précises de proche en proche, en utilisant comme repères des piquets plantés sur chacun des neuf sommets qui forment une chaîne montagneuse entre les deux villes. On n'aura plus alors qu'à mesurer ensuite la longueur d'un des côtés de l'un de ces triangles, la « base », pour connaître tous les côtés de tous les triangles, entre autres la longueur de l'arc de méridien entre les deux points ci-dessus évoqués.

L'expédition arrive à Tornea le 6 juillet 1736. C'est avec Clairaut que Maupertuis installe un signal géodésique sur le Nawa, montagne de Laponie... Au mont Cultaperi, un autre signal est installé par Maupertuis, Outhier et Clairaut. On va ensuite faire des mesures sur le mont Pullingl, le plus haut de la chaîne montagneuse. Le groupe se sépare à plusieurs reprises. Nos deux amis se dirigent vers Avasaxa, une montagne à 15 lieues (environ 60 km) de Tornea. Sur le lac qui s'étend au pied de cette montagne, c'est Clairaut et Camus qui se partagent le travail. Le jeune Le Monnier est malade. On est arrivé au cercle polaire. Le voyage continue avec les nécessaires stations pour effectuer les installations ; les mesures se feront au cours du retour à Tornea.

L'hiver commençait à être pénible. Maupertuis décrit ainsi les conditions de la vie des astronomes : « *Nous nous partageâmes en deux bandes (...) Je ne dirai rien des fatigues, ni des périls de cette*

opération. On imaginera ce que c'est de marcher dans une neige haute de deux pieds, chargés de perches pesantes qu'il fallut continuellement poser sur la neige et relever, pendant un froid si grand que la langue et les lèvres se gelaient sur le champ contre la tasse, lorsqu'on voulait boire de l'eau-de-vie qui était la seule liqueur qu'on put tenir assez liquide pour le boire, & ne s'en arrachant que sanglantes (...). Tandis que les extrémités de nos doigts étaient glacées, le travail nous faisait suer. (...) Cependant, l'ouvrage avançait ». Clairaut plantait les piquets avec les autres. Avec les autres, il observait les étoiles, visait les signaux installés sur des sommets proches, et calculerait les résultats au retour à Tornea. Tel était en 1736 le quotidien de l'astronome académicien !

Maupertuis décrit en détail les instruments, quart de cercle, pendules, instruments des passages etc., et leur usage. Les mesures des temps de passage et de la hauteur au-dessus de l'horizon du Soleil et des étoiles au méridien complètent la mesure des distances entre les différentes stations, dont le réseau forme une série de triangles qui couvrent l'arc de méridien que l'on mesure. Les mesures seront réduites en tenant compte de l'aberration découverte par Bradley en 1729, et de la nutation (découverte aussi par Bradley à la même période, mais publiée seulement en 1749, après une vingtaine d'années d'observations assidues). L'existence de ces phénomènes conduit à de très légères corrections soigneusement effectuées par l'équipe. Les latitudes sont ainsi calculables pour chaque signal. Et l'extension de l'arc de méridien (c'est-à-dire la différence de latitude) entre les deux extrémités est donc connue. Elle est de 57' 27".

Une fois les signaux installés en des points dont on a mesuré la latitude, on repart en expédition pour achever les mesures d'angle et de latitude aux différents sommets des triangles. « *Nous arrivâmes à Pello où nous nous trouvâmes tous réunis* ». Après une série de mesures effectuées près de Tornea, on peut enfin mesurer la « base » de la triangulation choisie sur le terrain idéalement horizontal du fleuve gelé. Cette opération se fait en décembre, par deux équipes séparées, dont les mesures concordent à 4 pouces près - sur 7406 toises ! Les calculs vont maintenant être possibles. Nous sommes en décembre, revenus à Tornea C'est la période du dépouillement des données, de la détermination de leur exactitude relative, etc. La conclusion scientifique de cette expédition tient dans un court paragraphe (tandis que leur description détaillée occupe une cinquantaine de pages du mémoire de Maupertuis). Je cite donc

³ Olivier Courcelle, *Vie de Clairaut (1713-1765)*.

⁴ Jean- Jacques Levallois, *Mesurer la Terre (300 ans de géodésie française — De la toise du Châtelet au satellite)*, Ponts et Chaussées (Presses), 1988.

Maupertuis : « *Nous connaissions l'Amplitude de notre arc ; & toute notre figure déterminée n'attendait plus que la mesure de l'échelle à laquelle on devait la rapporter - que la longueur de la Base. Nous vîmes donc, aussitôt que cette base fut mesurée, que la longueur de l'arc de méridien interceptée entre les deux parallèles qui passent par notre observatoire de Tornea et celui de Kittis était de 55 023 toises ½, que cette longueur ayant pour amplitude 57' 27" le degré du méridien sous le cercle polaire était plus grand de près de 1000 toises qu'il ne devrait l'être* » selon les déterminations faites à latitude moyenne.

Quelques nouvelles observations occupent nos académiciens de mars à mai 1737. Le 9 juin, le temps étant redevenu propice à la navigation, les astronomes prennent le chemin de la France. Qui pourra encore défendre les vues cartésiennes des Cassini ? Le triomphe du newtonianisme est désormais de plus en plus probable !

Clairaut ne se désintéressera jamais de la mesure de l'aplatissement terrestre. Il en débat, par exemple dans sa correspondance avec MacLaurin, mathématicien écossais (en 1741): « *Faites-moi la grâce de me mander aussi si vous croyez qu'il [Newton] sut que la Terre dans l'hypothèse d'une densité uniforme, était une ellipse au moins à très peu près. Si c'était au hasard qu'il choisissait cette figure, il pouvait craindre de ne pas trouver les vrais rapports des axes, et s'il savait que l'ellipse était la figure de la Terre, pourquoi ne l'affirmait-il pas ?* ».

La théorie de la Lune

Clairaut, en mathématicien et « newtonianiste », fut comme tout mathématicien de cette époque, fasciné par le problème des trois corps, problème quasiment insoluble en toute rigueur par l'analyse, mais que l'on peut aborder numériquement, avec des simplifications raisonnables, notamment par une théorie de perturbations, que Clairaut développera en utilisant des développements en série. Nous n'en dirons pas plus ici sur la généralité du problème (voir Jean-Pierre KAHANE, *tricentenaire de Clairaut, mathématicien et géomètre*, séance publique de l'Académie Française, présentation générale et introduction, 14 mai 2013). Clairaut s'intéressa toujours au problème des trois corps, et ce fut souvent l'occasion de débats. Malheureusement, l'auteur de ces lignes n'a pu trouver l'original de la lettre que Clairaut reçut du mathématicien italien le père Riccati, une lettre qui doit être passionnante, si l'on en croit Lalande.

Celui-ci nous dit: « *J'avais espéré faire imprimer dans nos Mémoires la lettre du P. Riccati à M. Clairaut, mais je n'ai pu surmonter les oppositions de M. d'Alembert et de ses adhérents qui haïssent les jésuites et qui sont mécontents en particulier du P. Riccati.* » On en débat à l'Académie. En 1766, M. Bézout fait un rapport verbal sur cette lettre du P. Riccati sur le problème des trois corps, trouvée dans les papiers de M. Clairaut ; il a été décidé qu'elle serait gardée au secrétariat de l'Académie.

Un cas particulier du problème des trois corps, un cas bien simple, typique pourrait-on dire, auquel s'attaqua d'abord Clairaut, c'est celui du système Soleil - Terre - Lune, dans ses importants mémoires sur la théorie de la Lune. On peut bien, et c'est ce que fait Clairaut pour la commodité de l'expression, décrire le système à la manière pré-copernicienne, en parlant de l'« orbite » du Soleil. Le mathématicien se propose de décrire au mieux les « orbites » de la Lune et du Soleil, en appliquant les lois de la mécanique newtonienne, c'est-à-dire celles de la gravitation universelle. Chacun des trois corps exerce sur les deux autres une force d'attraction décrite par l'équation newtonienne : $F = GMm/r^2$, où M et m désignent la masse des deux astres en interaction, r la distance qui sépare leurs centres, et où G désigne la constante de la gravitation universelle.

Clairaut traite le problème en le simplifiant de façon raisonnable : il suppose que les orbites sont toujours dans un même plan, et que celle du Soleil est sans excentricité. Il suppose aussi, ce terme intervenant dans les équations, que le carré du rapport de la distance Terre-Lune à la distance Lune-Soleil est négligeable. Cela le conduit à écrire deux équations, représentant la force d'attraction de la Terre sur la Lune et celle du Soleil sur la Lune. Je n'entrerai pas ici (j'aurais aimé y entrer !!) dans l'écriture, très différente de celle que nous utiliserions aujourd'hui, de ces deux équations. Pour les résoudre, et calculer les solutions, Clairaut *n'a* « *besoin que de deux éléments astronomiques : l'un est le rapport de la révolution du Soleil à la révolution périodique de la Lune, l'autre est l'excentricité de l'orbite de la Lune* » ... « *ces deux éléments ainsi choisis* » (0,00559518 et 0,05505), « *c'est encore une recherche très longue et très pénible que de déterminer par leur moyen les coefficients des deux équations précédentes, & le calcul en serait peut-être entièrement rebutant, si l'on n'employait pas ma méthode de "fausse position"* ». Nous n'irons pas plus loin dans la théorie difficile en question, ni dans les longs, très longs, calculs détaillés par

Clairaut dans ses deux mémoires de 1745 et de 1752.

Ayant ainsi résolu le problème analytique, et en ayant déterminé les constantes astronomiques, Clairaut peut en déduire des « Tables de la Lune ». Son mémoire sur la construction des Tables est aussi une longue liste de calculs qu'il n'est pas nécessaire de reproduire ici. Essentiellement, elles donnent la position de la Lune (ascension droite, déclinaison du centre du disque lunaire) à chaque instant, ainsi que la position des points importants de l'orbite lunaire autour de la Terre. Les méthodes de Clairaut furent toutefois critiquées par d'Alembert, pour ces raisons liées à la convergence des séries. D'Alembert (que peut-on dire de plus précis, et de plus exact ?) critiqua la méthode de Clairaut, basée sur les perturbations d'une orbite képlérienne par une masse, celle du Soleil dans le cas présent, celle d'une (ou deux) planètes dans le cas que nous allons examiner, celui de la comète de Halley. Après Clairaut, des Tables de la Lune furent publiées notamment en 1755, par l'astronome allemand Tobie Mayer, et par le Bureau des Longitudes, en 1812, tables dont l'auteur était Burkhardt, un astronome allemand, élève de Jérôme Lalande. Bien entendu, le Bureau des Longitudes publie régulièrement des tables concernant entre autres le mouvement apparent de la Lune.

La comète de Halley

Les lois de Kepler nous disent que la trajectoire d'une planète autour du Soleil est elliptique. Les lois de son mouvement sont prédites par la mécanique céleste newtonienne. Parmi les astres voyageurs, quelle trajectoire suivent donc les comètes, que l'on voit surgir dans le ciel, que l'on peut observer pendant quelques jours, et qui disparaissent dans l'infini ? Ont-elles une orbite ? Si c'est le cas, ce ne peut être (Newton) qu'une orbite *parabolique* ; la comète vient de l'infini, contourne le Soleil, et repart vers l'infini.

À moins qu'il ne s'agisse d'une orbite *elliptique*, certainement très allongée, à très forte excentricité. Dans le dernier cas, on doit les voir réapparaître à chaque fois qu'elles s'approchent de leur périhélie. Or Sir Edmond Halley (astronome anglais, 1656 – 1742), disciple et ami de Newton, avait remarqué, dans les récits historiques, que les comètes de 1531, 1607, et 1682, brillantes, et d'allure comparable, n'étaient qu'une comète unique, se mouvant sur une trajectoire elliptique, avec une période de 76 ans. Halley prédit donc une réapparition de cette brillante comète en 1758. Mais il meurt bien avant

d'avoir eu la possibilité de l'observer, éventuellement !

Or le jeune Jérôme Lalande (1732-1807), devenu très jeune membre de l'Académie des sciences en 1753, s'intéressait aux travaux de Halley, dont il publia une édition. De son côté, Clairaut avait travaillé sur la théorie difficile des trois corps, et l'avait appliquée à la Lune. Orienté par son confrère Lalande vers le cas de la comète de Halley, il réfléchit au problème. Son idée était que la trajectoire d'un astre comme une comète, susceptible au cours de son orbite de ne pas passer très loin de Jupiter, de Saturne... devait en avoir subi l'influence. Maîtrisant les équations de la mécanique newtonienne, Clairaut propose donc d'appliquer sa théorie mathématique des perturbations à la prévision du passage prochain de la comète, – prochain, si la mécanique newtonienne est fiable, et si la périodicité proposée par Halley est correcte. Mais Clairaut ne peut ou ne veut pas, seul, s'attaquer à ce gros et difficile calcul. Lalande accepte avec enthousiasme de s'y atteler ; il habite alors chez un célèbre horloger parisien, Jean-André Lepaute, dont la femme, Nicole-Reine Lepaute s'intéresse à l'astronomie (et sans doute au jeune Lalande) très activement. Ils passent trois ans à déterminer la distance de la comète, dans son orbite supposée parabolique, aux planètes Jupiter et Saturne. Ils calculent l'effet des perturbations et, le 14 novembre 1758, Clairaut peut annoncer que la comète passera à son périhélie vers la mi-avril 1759, prévision (plus ou moins un mois) plus précise de beaucoup que celle de Halley.

La comète est observée en décembre 1758, et passe à son périhélie le 13 mars 1759. Elle est retardée par rapport à la prévision de Halley, en raison de l'effet perturbateur de Jupiter et de Saturne. Quoi qu'il en soit, ce fut un succès populaire... et le triomphe assuré des théories newtoniennes de la gravitation. Certes, on chercha noise à Clairaut. Son « bon ami » Le Monnier est accusé par Lalande d'être l'auteur de lettres anonymes ; c'est peut-être d'Alembert, un autre « bon ami », qui en est l'auteur.

Ce succès éclatant a assuré la victoire définitive des idées de Newton, mais a aussi assuré la célébrité de Halley, plus que de Clairaut, de Lalande ou de Mme Lepaute ! Il n'en reste pas moins que Clairaut, comme d'Alembert, fut un mathématicien phare, ouvert à toutes les applications des mathématiques, et dont l'influence, parfois méconnue, est considérable. ■

AVEC NOS ÉLÈVES

Quand le LP2I surfe sur Jupiter

Jean-Brice Meyer et ses élèves
Lycée Pilote Innovant International de Jaunay-Clan

Dans le système solaire, un couple se fait particulièrement entendre : le couple Io – Jupiter. Leurs colères retentissent parfois jusque sur Terre. Nous avons tenté de nous mêler de leurs querelles et d'en comprendre l'origine, ce qui a nécessité la réalisation d'une antenne.

Le couple Io-Jupiter

Jupiter possède de nombreux satellites. Parmi eux, Io a la réputation de posséder les plus gros volcans du système solaire, un statut dû notamment à sa proximité avec Jupiter qui lui fait alors d'autant plus subir son champ gravitationnel. Les particules éjectées des volcans s'ionisent sous l'effet du vent solaire, ce qui ne sera pas sans conséquences sur leur devenir, comme nous l'expliquons ensuite.

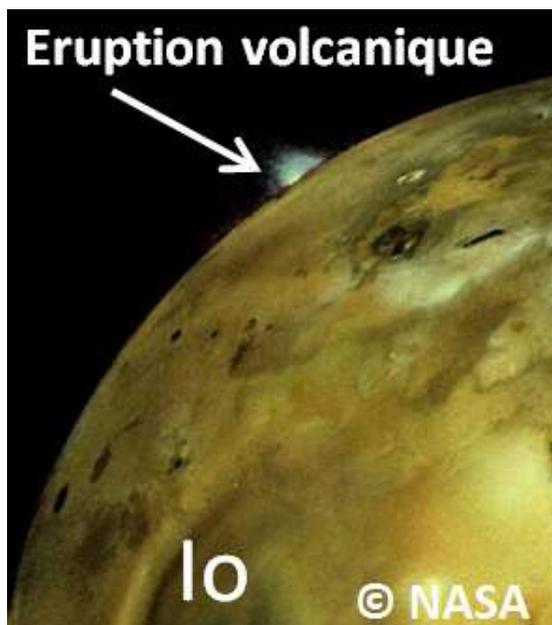


Fig.1. Io.

En effet, Jupiter possède également un champ magnétique (en rouge sur la figure 2) d'intensité environ dix fois celui de la Terre, non uniforme, dont la topographie ressemble à celle d'un aimant dipolaire : aux pôles se trouvent ainsi les champs forts, tandis que dans le plan équatorial se situent les champs faibles. À ceci près qu'il subit une déformation causée par le vent solaire.

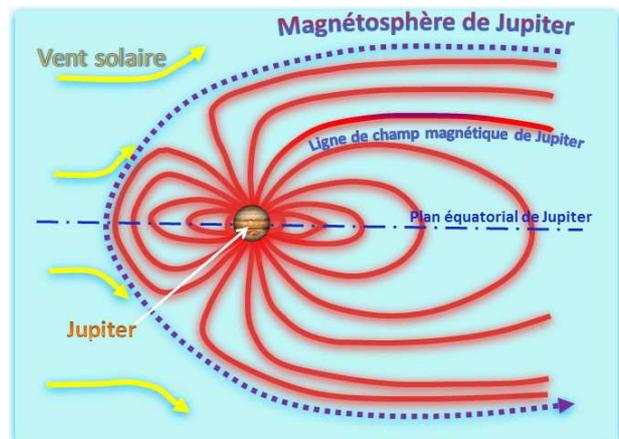


Fig.2. Magnétosphère de Jupiter.

On sait que dans un tel champ, les particules électriquement chargées vont se localiser là où le champ est faible, donc dans le plan équatorial de Jupiter, ce qui va constituer une sorte de bouée appelée « tore de plasma » (en vert sur la figure 3). Ce tore va tourner à la même vitesse que celle du champ magnétique, donc du noyau de Jupiter qui en est à l'origine.

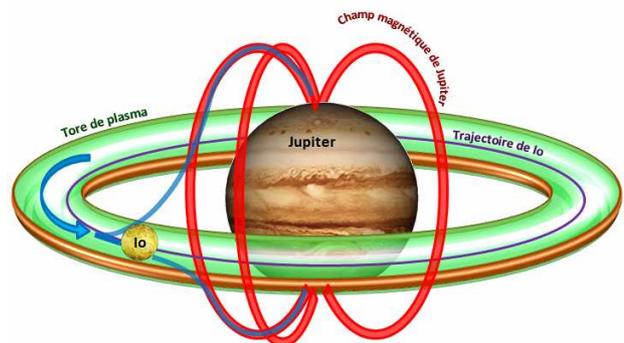


Fig.3. Io et Jupiter.

Or, la trajectoire de Io se situe justement dans ce tore de plasma. Mais comme sa vitesse de rotation (qui répond aux lois de Newton) autour de Jupiter est plus lente que celle du tore de plasma, le

satellite Io va dévier les particules du tore en les projetant (en bleu) vers les pôles de Jupiter. Conformément à la force de Lorentz, les particules du tore, (surtout les électrons) vont, lors de cet assaut vers Jupiter, tourner autour des lignes du champ magnétique (figure 4). Or, toute particule électriquement chargée subissant une accélération émet un rayonnement électromagnétique dont la fréquence de l'onde correspond à la gyrofréquence des électrons, c'est-à-dire la fréquence de rotation des électrons autour des lignes du champ magnétique.

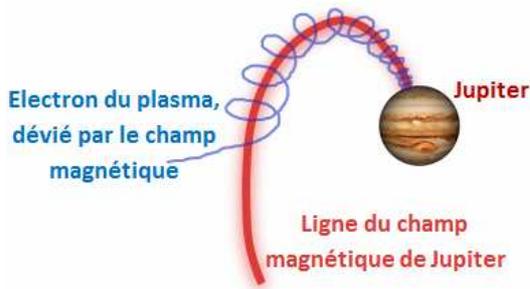


Fig.4. Mouvement d'un électron dans un champ magnétique non uniforme.

Les « orages de Jupiter » correspondent à des émissions d'ondes électromagnétiques particulièrement intenses, à la fréquence de 20,1 MHz. Une telle fréquence correspondrait alors aux ondes émises par les électrons lorsqu'ils se trouvent proches des pôles de Jupiter.

Mais est-ce que ce simple mouvement des électrons suffit à expliquer les ondes radio émises par le couple Io-Jupiter ? Pas du tout, selon Philippe Louarn (directeur de recherche à l'université de Toulouse) avec qui nous avons pu échanger sur le sujet, et sans qui il nous aurait été impossible d'avancer aussi loin dans la compréhension de ce projet. En effet, un simple rayonnement synchrotron ne peut pas expliquer le caractère polarisé du rayonnement émis. Il a fallu imaginer un processus plus complexe.

L'effet MASER Cyclotron

Le point crucial à prendre en compte est le caractère polarisé du rayonnement émis. Ceci ne peut pas s'expliquer simplement par un rayonnement synchrotron, dans lequel les électrons étant indépendants les uns des autres, émettent des rayonnements électromagnétiques incohérents, donc une polarisation globale nulle. Il y a donc un phénomène plus subtil que nous expliquons ici, et qui se passe dès l'interaction entre les électrons du tore et le satellite Io. Ces électrons, dans le tore, ont tous la même vitesse. Mais leur déviation par Io ne se fera par contre pas avec une orientation unique.

Ceux qui sont déviés de telle sorte que leur direction est quasi perpendiculaire aux lignes de champ magnétique de Jupiter vont réussir à atteindre les pôles. Arrivant à leur fin, ils signeront par la même occasion leur fin, laissant comme souvenir éphémère une aurore polaire.

Mais les autres électrons, soumis au champ magnétique devenant trop intense à l'approche des pôles, subiront un « effet miroir » : la majorité des électrons rebrousse alors chemin sans pouvoir atteindre le pôle de Jupiter (figure 5). Le champ magnétique de Jupiter piègera alors ces électrons dans une sorte de « bouteille magnétique » dans le plan équatorial de Jupiter.

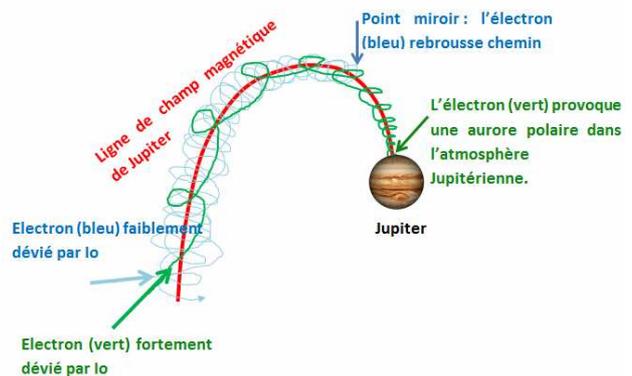


Fig.5. Naissance d'une cavité.

Il s'ensuit alors une cavité raréfiée en électrons au niveau des pôles de Jupiter, dans laquelle un champ électrique va pouvoir s'établir du fait de la différence de charge électrique entre le haut et le bas de cette cavité.

Les électrons vont subir ce champ électrique et être aspirés vers le pôle en tournant dans la cavité, et seront pris entre deux feux : le champ magnétique plus intense qui tentera de les faire remonter, et le champ électrique qui tentera de les faire descendre (figure 6).

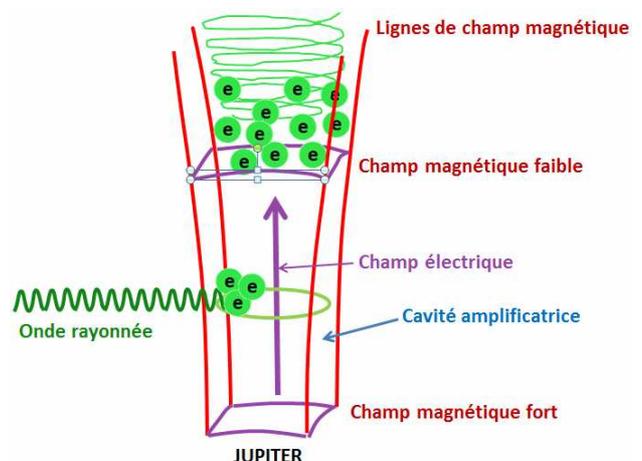


Fig.6. Rayonnement dans la cavité.

Les électrons vont alors osciller dans la cavité pendant un certain temps durant lequel les ondes qu'ils émettent vont entrer en résonance avec le mouvement même des électrons, conférant ainsi au rayonnement des propriétés (intensité et polarisation) observées depuis la Terre.

Réalisation de l'antenne



Ces ondes trouvant un maximum d'intensité à 20,1 MHz, nous avons réalisé une antenne adaptée à cette fréquence. Nous avons pu pour cela compter sur l'aide précieuse d'Armand Thomas, président du radio club de Poitiers, ainsi que sur les conseils très avisés de Jean-Charles le Tarnec, président du club d'astronomie de Saint-Benoît, près de Poitiers. Nous avons ainsi choisi une antenne de longueur $\lambda/2$, où λ est la longueur d'onde de la radiation recherchée. Cette longueur permet effectivement de se placer dans des conditions de résonance, donc d'amplifier le signal de fréquence 20,1 MHz. De manière à augmenter le gain de l'antenne, nous en avons en réalité construit deux, conformément au plan fourni par la NASA ci-dessous (figure 7).

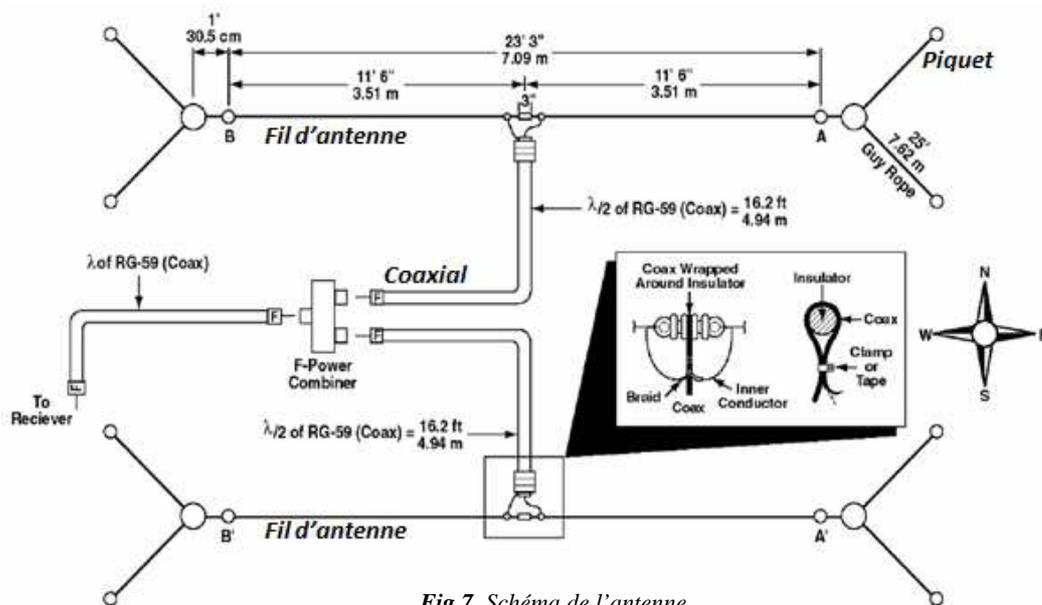


Fig.7. Schéma de l'antenne.

Au centre de chacune d'entre elles, nous avons récupéré le signal recherché, au moyen d'un câble coaxial, de longueur également $\lambda/2$, qui a acheminé l'information vers le récepteur.

Des expériences complémentaires nous ont permis de comprendre l'intérêt de prélever le signal au milieu de l'antenne.

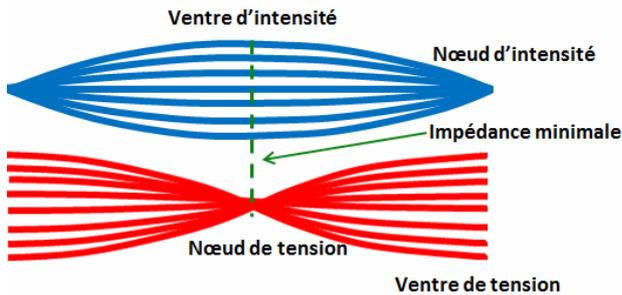


Fig.8. Onde stationnaire électrique dans l'antenne.

C'est à cet endroit en effet que l'impédance Y est minimum (ce qui se traduit par un ventre d'intensité, ou encore un nœud de tension, comme le montre la figure 8), de valeur environ 73Ω , donc proche de l'impédance du câble coaxial de 70Ω .

L'adaptation d'impédance permet alors au signal d'être transmis vers le détecteur de façon efficace. Ce dernier avait pour but de filtrer, d'amplifier, et de transposer l'onde électromagnétique de fréquence 20,1 MHz en un signal de fréquence audible après transformation en onde acoustique.

Une fois l'antenne réalisée, nous avons mesuré sa bande passante de manière à vérifier si elle résonnait bien à la fréquence recherchée. Ces mesures ont été réalisées avec un TOSmètre, c'est-à-dire un appareil mesurant le taux d'ondes stationnaires. Les mesures ont alors montré un pic de résonance pour une fréquence de 19,7 MHz, ce qui selon l'expérience de monsieur Armand Thomas, était convenable pour détecter les signaux de Jupiter. Ce qui s'est avéré exact dès les premières observations.

Les « écoutes »

Les orages du couple Io Jupiter retentissent sur Terre à des moments qui peuvent être calculés. Tout d'abord, pour les percevoir, il est nécessaire que le Soleil soit couché, afin qu'il ne noie pas le signal du couple dans ses propres émissions et que Jupiter soit suffisamment haut dans le ciel, afin de se trouver dans le diagramme de rayonnement de l'antenne.

Des observations menées sur une cinquantaine d'années ont permis d'établir de façon statistique les dates des prochains orages.

Ces dates dépendent à la fois de l'orientation du champ magnétique de Jupiter par rapport au Soleil et de la position de Io par rapport à Jupiter. Enfin, même si une émission intense a lieu, il faut savoir

que l'onde est alors émise à la surface d'un cône (figure 9) dont l'axe coïncide avec les lignes de champ magnétique de Jupiter. Il faut donc que la Terre soit sur ce cône pour intercepter ce signal.

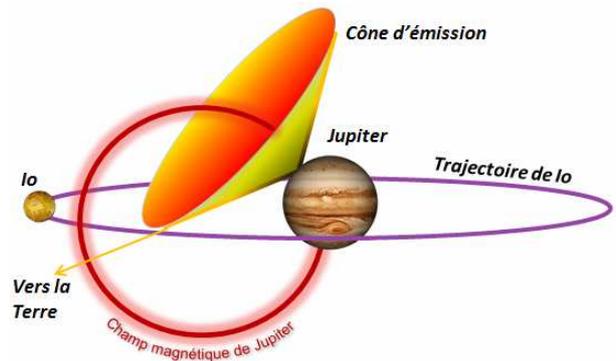


Fig.9. Cône d'émission.

Les écoutes ont été fructueuses. Trois phénomènes particuliers sont mentionnés dans la littérature, et nous avons pu entendre chacun d'entre eux. Le plus caractéristique est le phénomène nommé « Io B », car il laisse percevoir un bruit de vague. C'est pour cette raison que nous avons appelé ce projet « Surfer sur Jupiter ».

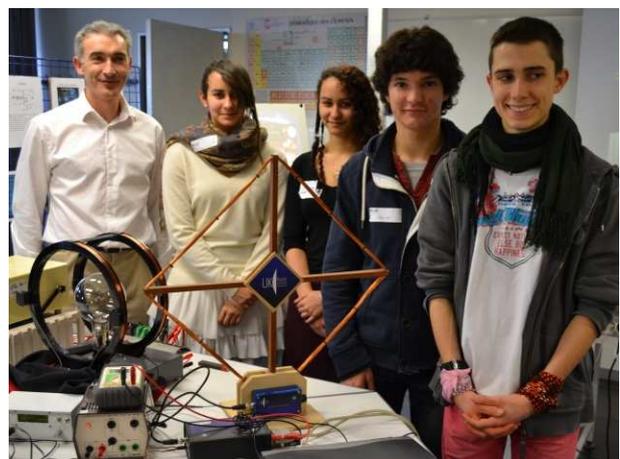
Nous avons ainsi surfé jusqu'à la finale des Olympiades de physique où nous avons reçu un premier prix national, et nous avons continué de surfer car l'Académie des Sciences nous a fait l'honneur de récompenser notre travail le 26 novembre 2013.

Remerciements

Jean-Charles le Tarnec, Président du club d'astronomie de Saint-Benoît

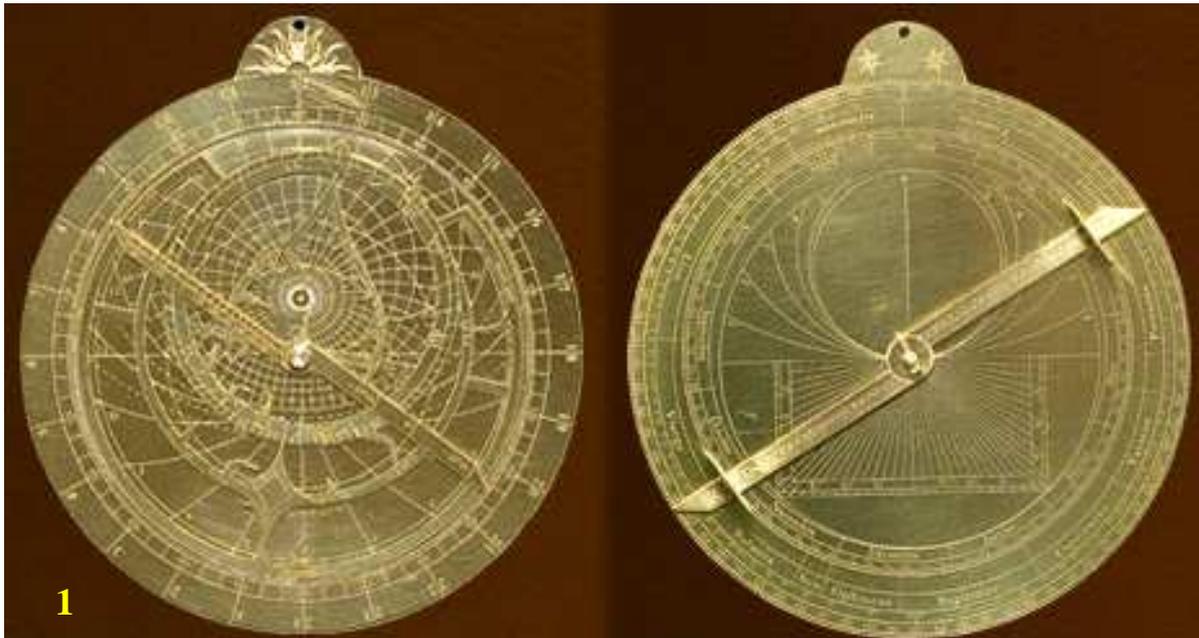
Philippe Louarn, Directeur de recherche, Université de Toulouse

Armand Thomas, Président du radio club de Poitiers.



De gauche à droite : Jean-Brice Meyer, Alice Tahir, Clara Tahir, Arthur Julien, Valentin Luksza.

THÈME : INSTRUMENTS ANCIENS



1



2



3



4



5

1. Astrolabes modernes de Brigitte Alix ; 2. Atelier de construction d'astrolabes EEA 2005 ; 3. Sphère armillaire en carton et son concepteur ; 4. Sphère armillaire du cabinet de physique du collège Gambetta à Cahors ; 5. Atelier de construction de sphères armillaires EEA 2005.

Le nocturlabe

Véronique Hauguel, Rouen

Vous trouverez dans cet article le principe et l'utilisation du nocturlabe, un instrument pratique utilisé par les navigateurs, beaucoup plus simple que l'astrolabe mais aussi moins précis.

Le nocturlabe, nocturnal ou encore cadran aux étoiles, est un instrument utilisé de la fin du XV^e siècle jusqu'au XVIII^e pour connaître l'heure locale la nuit dans l'hémisphère nord grâce à l'observation de la position de certaines étoiles.

Sur l'invention de l'instrument, on sait peu de choses ; les connaissances astronomiques sur lesquelles repose le nocturlabe existent depuis les astronomes grecs qui les avaient déjà mises en pratique. Le nocturlabe s'est répandu et a été amélioré à partir du XVI^e siècle avec le développement de la navigation à travers les océans.

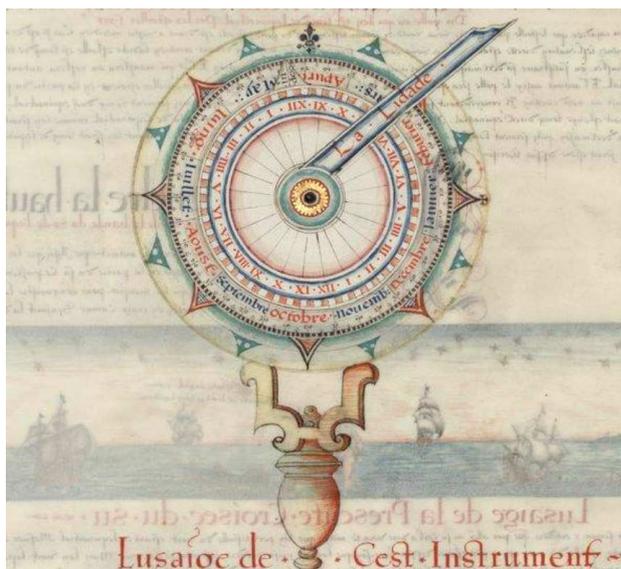


Fig.1. Dessin de nocturlabe dans « Les Premières Euvres de JACQUES DEVAULX, pilote en la marine », 1583 (Gallica).

On pouvait connaître l'heure le jour grâce aux cadrans solaires s'il faisait beau mais les caprices de la météorologie demandaient de multiplier les possibilités de mesurer le temps sur un ciel découvert. Déterminer l'heure la nuit de manière assez précise devenait une nécessité. Puis, au fil des années, sur le nocturlabe ont été inscrites d'autres données qui montrent le grand intérêt de l'instrument pour les navigateurs. Certains nocturlabes donnaient la différence de hauteur entre l'étoile

Polaire et le pôle Nord céleste¹. Cette différence servait à rectifier la latitude du lieu en mesurant la hauteur de l'étoile Polaire.

Au centre du nocturlabe, était souvent ajouté un calculateur de marée : la position de la Lune, la date, l'heure étaient des données nécessaires pour connaître l'heure de la marée dans un port.

Principe de fonctionnement

Le nocturlabe a été conçu en observant les deux principaux mouvements de la Terre.



Fig.2. Mouvement relatif Terre/voûte céleste (pose photo d'une heure). L'étoile Polaire est au centre du mouvement apparent.

La Terre tourne autour de l'axe des pôles, dans le sens direct² si on la regarde depuis le pôle Nord. Au cours de la nuit, on peut observer la voûte céleste tourner dans le sens direct autour de l'étoile Polaire.

En première approximation :

- la Terre fait un tour sur elle-même en 24 h ;
- en 1 heure, la voûte céleste tourne de 15° ;
- en 2 heures, elle tourne de 30° ...

Conséquences pour le nocturlabe

- Le nocturlabe possède un cercle gradué en heures, appelé « cercle des heures », dans le sens direct.
- Ce cercle doit être centré sur l'étoile Polaire.
- On doit utiliser des étoiles proches de la Polaire.

¹ Le pôle Nord céleste est l'intersection de l'axe de la Terre avec la voûte céleste. En 1500, la Polaire (α UMi) était à 3° 24' du pôle Nord céleste. Actuellement, en 2013, elle est à 40° 45'.

² Sens inverse des aiguilles d'une montre.

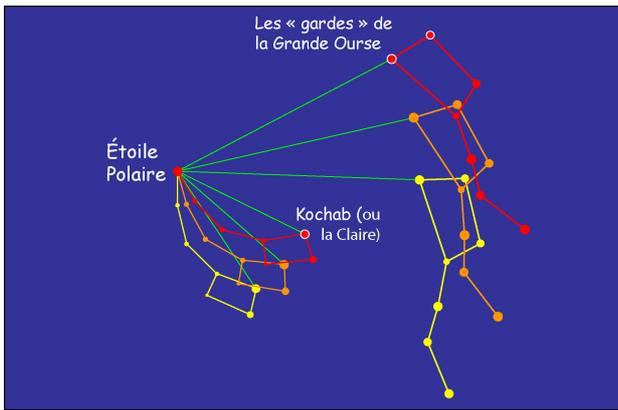


Fig.3. Petite Ourse et Grande Ourse représentées le 1^{er} décembre à 0 h (en jaune), 1 h (en orange) et 2 h (en rouge).

Plus précisément, la Terre fait un tour sur elle-même non pas en 24 h mais en 23 h 56 min 4,09 s si on se repère aux étoiles. C'est la durée du jour sidéral (déplacement de M₁ à M₂ sur la figure 4). Donc, en 24 heures en moyenne (durée du jour solaire), la Terre fait un peu plus d'un tour pour se retrouver dans une même position par rapport au Soleil (même heure en un lieu donné).

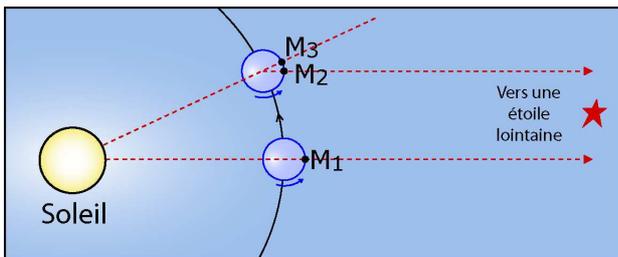


Fig.4. Mouvement relatif Terre/voûte céleste/Soleil sur un jour. En M₁, il est minuit, un observateur voit une étoile. Après un jour sidéral (environ 23 h 56 min), il se retrouve en M₂ et voit l'étoile dans la même position. Mais il faut encore près de 4 minutes pour qu'il se retrouve à minuit en M₃.

Chaque jour, la Terre se déplace sur sa trajectoire autour du Soleil d'un angle de 1° environ (360°/365,25). L'observateur sur Terre voit le Soleil se déplacer du même angle sur la voûte céleste. Entre 2 jours consécutifs, à une même heure, les étoiles se sont décalées de presque 1°, elles semblent prendre de l'avance autour de l'axe des pôles dans le sens direct (figure 5). La Terre a alors fait 361° sur elle-même.

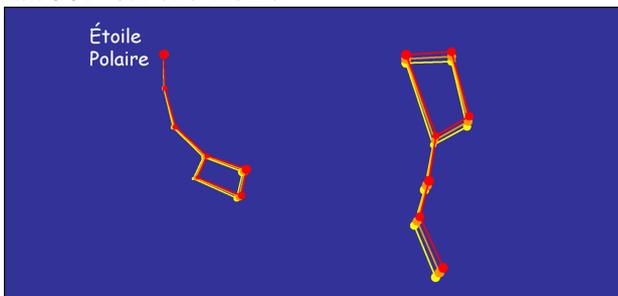


Fig.5. Petite Ourse et Grande Ourse représentées le 1^{er} décembre à minuit (en jaune), le 2 décembre à minuit (orange), le 3 décembre à minuit (rouge).

Quelle que soit l'année, au même jour, à la même heure, la position Terre/Soleil/voûte céleste est identique. La date, pour l'utilisation du nocturlabe, ne dépend donc pas de l'année.

Conséquences pour le nocturlabe.

- Le nocturlabe est gradué, dans le sens direct, en douze mois, avec des subdivisions en jours, un « cercle des jours », fixe et indépendant du « cercle des heures ».
- On repère une étoile qui passe à la verticale de la Polaire³ à 0 heure, heure locale, un jour donné qui servira d'« origine ».

Récapitulatif

- D'une heure à l'autre, la voûte céleste tourne de 15° environ autour de l'axe de la Terre, soit de 1° en 4 minutes. Si on connaît la position d'une étoile un jour donné à une heure donnée, son décalage d'environ 15° par heure nous permet de trouver l'heure la nuit.
- Entre deux jours consécutifs, à la même heure, la voûte céleste tourne de 1° environ. On peut suivre le décalage de l'étoile repérée d'un jour à l'autre.
- Entre deux années consécutives, au même jour, à la même heure, la position de chaque étoile reste la même.

Description et mode d'emploi

Choix des étoiles



Fig.6. Quelques étoiles proches de la Polaire.

L'instrument devant être centré sur l'étoile Polaire, proche du centre de rotation de la voûte céleste, les étoiles visées sont, soit les « Gardes » de la Grande Ourse, Merak (β UMa) et Dubhe (α UMa), presque alignées avec la Polaire, soit Kochab (β UMi) appelée aussi la Claire, étoile la plus brillante des Gardes de la Petite Ourse. La Claire était le plus souvent utilisée. On peut avancer quelques hypothèses :

- comme on le verra, il faut viser 2 étoiles en même temps avec le nocturlabe. Cette action est plus facile si les étoiles sont proches ;

³ Comme on utilise des étoiles proches de la Polaire, on repère le passage d'une étoile au nord, au-dessus ou en dessous de la Polaire.

- la Petite Ourse est circumpolaire (visible toute l'année) pour une latitude supérieure à 16° alors que les Gardes de la Grande Ourse restent au-dessus de l'horizon pour une latitude supérieure à 33° . Or, la traversée de l'Atlantique à partir des îles Canaries se fait à une latitude inférieure à 30° .

Selon le choix des étoiles, l'origine du « cercle des jours » sera différente. C'est d'ailleurs comme cela qu'on reconnaît les nocturlabes qui fonctionnent avec les Gardes de la Grande Ourse ou de la Petite Ourse : actuellement, Dubhe passe à la verticale de la Polaire à 0 h (heure solaire) le 8 septembre (sous la Polaire) et le 9 mars (au-dessus de la Polaire) alors que c'est le 3 novembre et le 5 mai pour Kochab. Certains nocturlabes ont deux index ce qui permet de lire l'heure en prenant les Gardes de l'une ou de l'autre des deux ourses. L'angle entre ces deux index représente l'angle Kochab / Polaire / Dubhe, valant environ 55° ⁴.

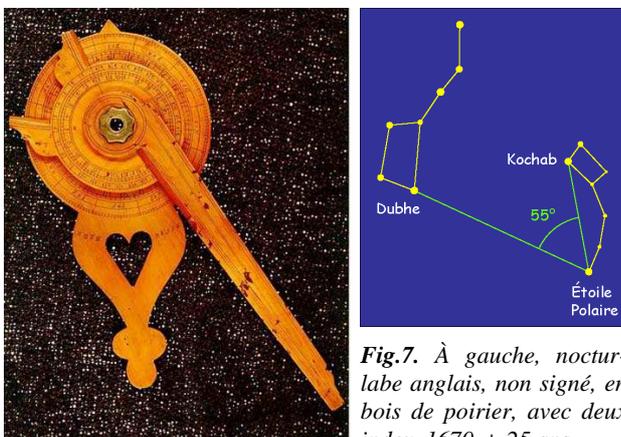


Fig.7. À gauche, nocturlabe anglais, non signé, en bois de poirier, avec deux index, 1670 ± 25 ans.

Description

Le nocturlabe est composé de trois pièces :

- Un disque dont la couronne extérieure, le « cercle des jours », est divisée en 12 parties pour les douze mois du calendrier solaire utilisé à l'époque et éventuellement les 12 signes du calendrier du zodiaque, en tournant dans le sens direct. Chaque mois est subdivisé en jour. Est fixé sur ce disque un manche indiquant le bas de l'instrument ou un anneau indiquant le haut. Dans les ouvrages de navigation, les nocturlabes à manche sont les plus fréquents.

- Un disque mobile plus petit, concentrique, le « cercle des heures », gradué dans le sens direct de 0 à 24 heures ou 2 fois de 0 à 12 heures, ou encore, avec uniquement les heures utiles pour le lieu d'utilisation, de 16 h à 8 h par exemple. Il est souvent entouré de petites dents avec une plus longue pour 0 heure/24 heures ce qui permettait aux

marins, semble-t-il, de lire l'heure la nuit, sans lumière, avec le toucher !

- Une alidade, dépassant du disque fixe et tournant autour du centre du nocturlabe qui est troué et laisse la possibilité de faire une visée par cet orifice. Un côté est aligné avec le centre de l'instrument.

La plupart des nocturlabes étaient certainement faits en bois (bois de poirier ou de buis), d'autres, ceux le plus souvent conservés, sont en laiton.

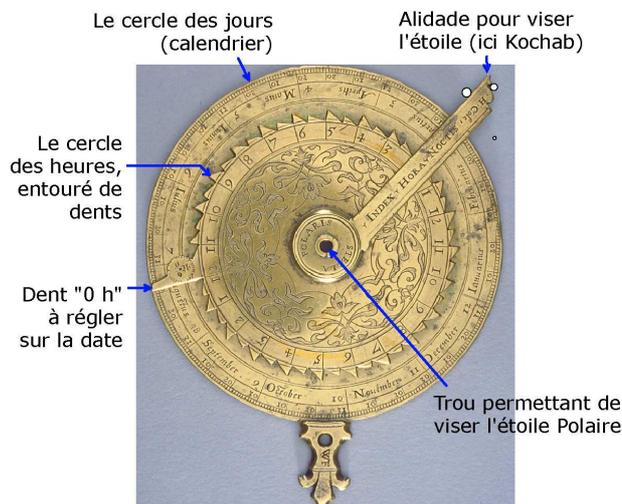


Fig.8. Les trois pièces du nocturlabe.

Pour l'observation à l'aide des Gardes de la Grande Ourse, l'alidade doit être assez longue. Merak est à 34° de la Polaire. Si on estime qu'en tendant légèrement le bras, l'instrument est à 30 cm de notre œil, l'alidade doit mesurer plus de 20 cm. Dans les mêmes conditions, pour l'observation avec la Claire située à $16,5^\circ$ de la Polaire, le rayon du grand disque doit être inférieur à 9 cm (diamètre maximum de 18 cm).

Mode d'emploi avec les Gardes de la Grande Ourse

Mettre la grande dent de 0 h / 24 h (ou 12 h) sur la date et la maintenir dans cette position.

Viser l'étoile polaire par le trou au centre du nocturlabe.

Tendre le bras en maintenant bien le manche de l'instrument dans la main. Les graduations doivent être dans le plan de l'équateur donc perpendiculaire à la ligne de visée œil-Polaire et le manche doit être dans le plan du méridien, le plan vertical nord-sud. L'étoile Polaire étant toujours en ligne de mire, tourner l'alidade pour marquer l'alignement du centre avec les Gardes, Dubhe et Merak.

Lire l'heure sur le « cercle des heures » indiquée par l'alidade.

⁴ Sur le nocturlabe anglais en bois, cet angle dépasse 60° .

Quelle heure lit-on ? Avec quelle précision ?

Les dates sont graduées régulièrement sur le « cercle des jours », ce qui fait que l'on considère une durée de jour constante. Donc le nocturlabe donne l'heure solaire moyenne locale.

Chaque soir, le nocturlabe est réglé sur la position des Gardes à minuit, heure solaire moyenne. Puis c'est le mouvement des étoiles qui donnent l'heure confondant ainsi temps sidéral et temps solaire. L'erreur reste minime (inférieure à 2 minutes) par rapport à l'imprécision des mesures.

Un navigateur habile pouvait réaliser une lecture avec une précision de plus ou moins 15 minutes si on énumère toutes les causes d'erreurs :

- étalonnage du « cercle des jours » approximatif ;
- visée de la Polaire et non pas du pôle Nord ;
- difficultés dans l'utilisation (positionnement de l'instrument, visée des astres, lecture des graduations resserrées sur un petit instrument).

L'étalonnage du cercle des jours

Pour étalonner le cercle des jours, il faut savoir quel jour passe l'étoile choisie à la verticale de la Polaire à 0 heure. Elle y passe d'ailleurs deux jours de l'année, un jour au-dessus de la Polaire et un jour au-dessous.

Ces jours dépendent bien sûr de l'étoile choisie mais pour une même étoile, ils dépendent du calendrier, julien ou grégorien, et de l'époque.

1^{er} problème : le calendrier

Entre les nocturlabes fabriqués avant la réforme du calendrier grégorien et après, il y a une différence de 10 jours (éventuellement 11 jours pour les nocturlabes du XVIII^e), jours qui ont été supprimés lors de l'application de la réforme pour caler à nouveau l'équinoxe de printemps le 21 mars⁵, date nécessaire à l'église catholique pour fixer Pâques. Avant la réforme, en 1582, le 1^{er} jour du Bélier (donc le jour de l'équinoxe) était le 11 mars.

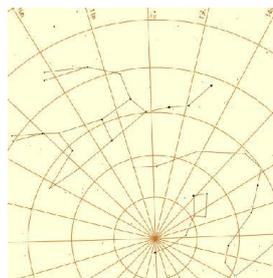
2^e problème : le phénomène de précession des équinoxes

Ce phénomène peu sensible sur quelques dizaines d'années a des conséquences significatives sur plusieurs siècles, même pour le nocturlabe peu précis. Il s'agit d'un lent déplacement de l'axe de la Terre qui a deux conséquences pour l'instrument :

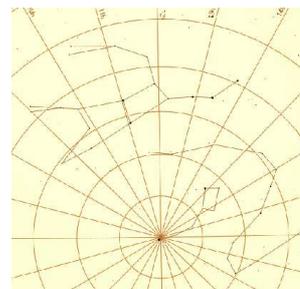
- d'une part, l'écart entre l'étoile Polaire et le pôle Nord céleste varie, il diminue actuellement.
- d'autre part, le calendrier basé sur les saisons se décale par rapport aux étoiles d'environ un jour et demi par siècle.

Dubhe passait à la verticale, au dessus de la Polaire à 0 heure le 21 février 1582, le 3 mars après la réforme du calendrier et y passe le 9 mars actuellement (décalage de 6 jours en 4 siècles).

⁵ Date de l'équinoxe fixé par le comput ecclésiastique. L'équinoxe de printemps, défini astronomiquement, est entre le 19 et le 21 mars.



Autour de 1500



Autour de 2000

Fig.9. Mise en évidence du rapprochement de la Polaire et du pôle Nord céleste (à l'intersection des méridiens) et du décalage des étoiles dans un repère équatorial de la voûte céleste (Dubhe recule de 32 minutes ou 8°) entre 1500 et 2000.

Temps sidéral, moyen, vrai, légal

- Le temps sidéral est l'heure aux étoiles. Un jour sidéral vaut 23 h 56 min 4,1 s.
- Le jour solaire moyen vaut exactement 24 h. Le temps solaire moyen se décale donc chaque jour de 3 min 55,9 s par rapport au temps sidéral.
- Le temps solaire vrai est l'heure au Soleil ; midi correspond au passage du Soleil au méridien (plein sud en France métropolitaine). Mais il n'est pas régulier d'où l'utilité d'un temps solaire moyen. L'écart entre temps solaire vrai et temps solaire moyen dépend de la date. On l'appelle l'équation du temps. Elle varie de -16 à +14 min.
- L'heure légale en France correspond au temps solaire moyen de Greenwich auquel on ajoute 1 h (heure d'hiver) ou 2 h (heure d'été). L'écart de longitude avec Greenwich est donc aussi à prendre en compte pour passer du temps solaire local au temps légal, à raison de 1 heure pour 15° ou 4 minutes par degré. On a donc :

$$H_L = H_M + L + (1 \text{ h ou } 2 \text{ h}) \text{ et } H_M = H_S + E$$
où H_L : heure légale ; H_M : heure solaire moyenne ; L : décalage en longitude ; (1 h ou 2 h) : heure hiver/été ; H_S : heure solaire vraie ; E : équation du temps.

Pour dater un nocturlabe

Le tableau suivant donne la date inscrite sur le diamètre vertical en haut de nocturlabes plus ou moins anciens. C'est la date où l'étoile choisie passe à la verticale de la Polaire à 0 heure. Par exemple, pour un nocturlabe du début du XVI^e siècle, la date ainsi définie pour Claire de la Petite Ourse est autour du 20 avril⁶.

	Position de l'étoile à la verticale à 0 h		
	Avant la réforme	Après la réforme, XVI ^e	Actuellement
Kochab (la Claire) Petite Ourse	21 avril	1 ^{er} mai	5 mai
Les Gardes de la Grande Ourse	21 février	3 mars	9 mars

⁶ Cette date varie effectivement d'un nocturlabe à l'autre et trouve relativement souvent le 15 avril. Il semble que les nocturlabes ne brillaient pas particulièrement par leur précision.

Exercices d'applications

1. Trouver l'heure



Fig.10. Ciel du 24 août 2013, à Gap mais à quelle heure ?
Le bas de l'image est horizontal (image Stellarium).

- À partir de l'image du ciel de Gap le 24 août 2013 et à l'aide du nocturlabe, déterminer l'heure (temps moyen) comme les marins.
- Retrouver alors l'heure légale sachant que la longitude de Gap est $6^{\circ} 5' E$.

Solution :

Le nocturlabe donne 2 h (heure solaire moyenne).

b. Avec la formule : $H_L = H_m + L + 2h$ (été)

$L \approx 6^{\circ} E = -24 \text{ min}$

$H_L = 2 \text{ h} - 24 \text{ min} + 2 \text{ h} = 3 \text{ h } 36 \text{ min.}$

(l'image a été faite avec Stellarium pour 3 h 30).

2. Pour fabriquer un nocturlabe

Avec Stellarium (ou tout autre logiciel d'astronomie), retrouver le jour de 2013 où Dubhe passe au méridien (côté zénith) à minuit (heure moyenne) puis à la verticale de la Polaire.

Solution

Il faut déjà trouver à quelle heure affichée correspond 0 h, heure moyenne. Si on veut rester en heure légale et dans un lieu quelconque, on utilise la

formule $H_L = H_M + L + 1 \text{ h}$ (heure d'hiver), ce qui donne par exemple 0 h 35 min 40 s à Gap.

Pour simplifier, on peut se mettre en heure TU et se placer à Greenwich. Dans ce cas, aucune correction n'est à faire, 0 h heure moyenne = 0 h TU.

On s'oriente au nord et on trace le méridien.

On se place à 0 h, heure moyenne et on fait défiler les jours (= ou - sur Stellarium) jusqu'à ce que Dubhe soit sur le méridien au dessus de la Polaire.

On trouve le 8 mars.

Dubhe et la Polaire sont presque à la verticale (azimuts très proches) le 9 mars.

Pour que le nocturlabe fonctionne actuellement avec Dubhe, il faut donc que le 9 mars soit sur le diamètre vertical en haut de l'instrument.

On peut refaire la manipulation pour le mois de septembre (heure d'été) pour retrouver le jour où Dubhe passe à la verticale (côté opposé au zénith) à 0 h, heure moyenne. On trouve le 9 septembre.

D'une année à l'autre, on peut avoir un décalage d'un jour du fait que la période de révolution de la Terre n'est pas exactement de 365 jours.

Le CLEA vous propose sur son site un nocturlabe à imprimer et à construire (avec le 9 mars comme date repère).

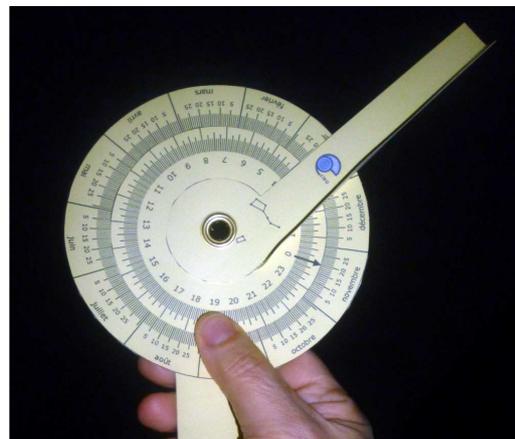
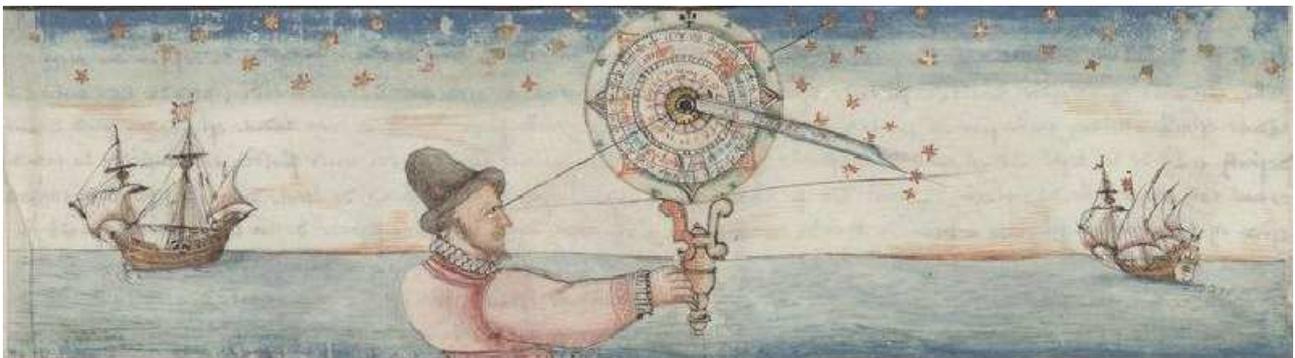


Fig.11. Nocturlabe proposé sur le site du CLEA.
(www.clea-astro.eu, archive des Cahiers Clairaut, hiver 2013)



Les premières œuvres de Jacques De Vaulx, hydrographe, 1584.

Arbalestrille, arbalète, bâton de Jacob, rayon astronomique, croix géométrique, verge d'or ou radiomètre, un instrument obsolète à fabriquer soi-même !

Philippe Merlin, observatoire de Lyon, merlin@obs.univ-lyon1.fr

L'arbalestrille, instrument de mesure d'angles, bien connue des pilotes de navire du XIV^e au XVIII^e siècle a toujours manqué de précision. Les découvertes de l'octant puis du sextant l'ont complètement sortie du matériel de mesure. Pourtant avec quelques connaissances de mathématique et d'habileté manuelle, elle était facile à construire. Nous partirons de quelques documents historiques et explicatifs avant de proposer d'en fabriquer une, soit à partir d'un fichier à imprimer sur bristol, soit, pourquoi pas, en la traçant entièrement.

L'étymologie du mot ne pose aucun mystère c'est la forme même de l'instrument proche de l'arbalète. Le ou les créateurs de l'arbalestrille ou bâton de Jacob sont restés inconnus. La littérature donne des noms, mais sans certitude. Elle apparaît dans les textes au XIV^e siècle avec mention du « bâton de Jacob » chez Levi ben Gerson (1288-1344). Le livre de Pierre de Médine *L'Art de naviguer* (1545, 1^{ère} édition française 1554) la mentionne seulement comme instrument. On trouve une bonne description complète de son tracé, donc de sa fabrication, dans le livre de Pierre Apian (Petrus Apianus 1495-1552) *Cosmographie*, de nombreuses fois réédité et complété à partir de 1524 aux XVI^e et XVII^e siècles dans toutes les principales langues européennes.

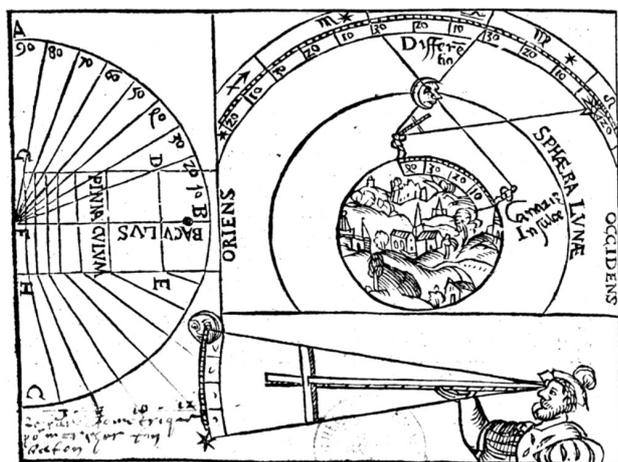


Fig.1. *Cosmographie*, de Pierre Apian (1544). Dessin, tracé et usage de l'arbalestrille : hauteurs et distances lunaires.

Dans la première partie du XVIII^e siècle, tous les traités de navigation décrivent l'arbalestrille, sa fabrication et son utilisation, tel le livre de P.

Bouguer¹ *Nouveau traité de navigation* 1753 qui la décrit sur 10 pages avec plusieurs schémas. Ce traité revu par l'abbé La Caille en 1760 ne la cite que sur quelques lignes pour la déclarer imprécise et obsolète. C'est la disgrâce totale². Car viennent d'apparaître le quartier anglais, l'octant puis le sextant, bien plus précis et commodes.

Pezenas (1692-1776), dans *Astronomie des marins ou nouveaux éléments d'Astronomie à la portée des marins* (1766), la snobe complètement :

J'Abandonne aux Pilotes ignorans l'Arbalestrille ou la flèche, qui est le plus mauvais de tous les Instruments à prendre hauteur. Comme les degrés en font iné-

Description

Comme les auteurs devaient et savaient le faire au XVIII^e siècle, la description des instruments, ici de l'arbalestrille, est minutieuse et complète. Ci-dessous celle de Bouguer dans *Le Nouveau Traité de Navigation* de 1753. Elle correspond à la figure 3 de l'article.

Description de l'Arbalestrille.

20. Les Pilotes se sont servi pendant très-long-tems & ils se servent encore actuellement de l'Arbalestrille, qui est un instrument composé de deux pièces principales, qui forment une espèce de croix. L'une de ces pièces, qui est ordinairement d'ébène ou de quelqu'autre bois dur, se nomme la *Flèche*. C'est un bâton quarré qui a deux piers

¹ Pierre Bouguer (1698-1758) est un mathématicien, astronome, physicien et hydrographe français. Il est connu des astronomes photométristes par la « droite de Bouguer » qui permet de s'affranchir de l'absorption atmosphérique. Il est aussi connu pour son voyage au Pérou pour la mesure du degré d'arc de méridien près de l'équateur avec La Condamine, Godin et Jussieu.

² L'arbalestrille n'a cependant pas disparu brusquement et a continué d'être utilisée en particulier par les Hollandais.

& demi ou trois pieds de longueur, lequel passe perpendiculairement au travers de l'autre pièce qu'on nomme le *Marteau*, qui est percée d'un trou carré. La *Flèche* doit glisser librement dans ce trou, mais ne doit pas y jouer; & il faut que les deux pièces fassent toujours des angles exactement droits, ce qui oblige de rendre le *marteau* beaucoup plus épais vers le milieu.

21. La *Flèche* est graduée sur chacune de ses quatre faces; on voit sur chacune deux rangées de chiffres, l'une vient en augmentant vers le bout de la *Flèche*, qui est plat, & qu'on nomme le *Bout de l'œil*, par la raison qu'on verra dans un instant. Cette rangée ou colonne de chiffres finit à 90 degrés, qui est la plus grande hauteur, & l'autre colonne marque le complément ou les distances de l'*Astre* au *Zénith*. Celle-ci commence par zéro qui est marqué vis-à-vis de 90 degrés de hauteur; on trouve 10 degrés de complément vis-à-vis de 80 degrés de hauteur; 20 degrés de complément vis-à-vis de 70, &c. La marche des deux rangées de chiffres se fait en sens contraire; il faut bien que cela soit ainsi, puisque l'*Astre* ne peut pas monter ou s'éloigner de l'*Horizon* sans approcher du *Zénith*.

22. Chaque face de la *Flèche* ayant sa graduation particulière, elle a aussi son *marteau*. On reconnoît le *marteau* qui appartient à chaque face, en voyant si la moitié de sa longueur est égale à la distance qu'il y a sur la *Flèche* depuis le bout de l'œil jusqu'à 90 degrés de hauteur ou zéro de complément. On doit toujours dans les observations préférer les plus grands *marteaux*; mais lorsque l'*Astre* est fort bas, il faut nécessairement avoir recours aux plus petits, comme les *Lecteurs* vont s'en convaincre.

Usage et utilisation

Son usage, que l'on associe souvent aux marins pour la mesure de hauteurs ou des distances lunaires comme sur la figure 1, pouvait s'étendre aux géomètres et arpenteurs pour des relevés sur la terre ferme: dimensions de bâtiments, profondeur de puits, distance à un objet inaccessible (artilleurs), etc. Dans ce cas, l'instrument était adapté et parfois perdait sa forme symétrique d'arbalète, et la graduation donnait plutôt des tangentes (figure 2) pour calculs ultérieurs. Les astronomes la trouvaient trop imprécise et inutilisable.

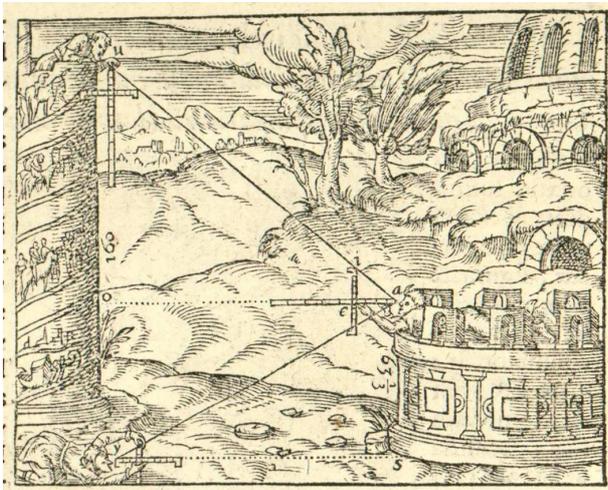


Fig.2.- *Arithmeticae libri duo...* Pierre de la Ramée (1569) [6].

Avec l'arbalétrille, la mesure directe (figure 3) est difficile, car elle demande la visée de deux directions simultanément avec des accommodations de l'œil très différentes: très proche pour l'origine de la tige, mi-distance sur le marteau et à l'infini pour l'objet et l'horizon.

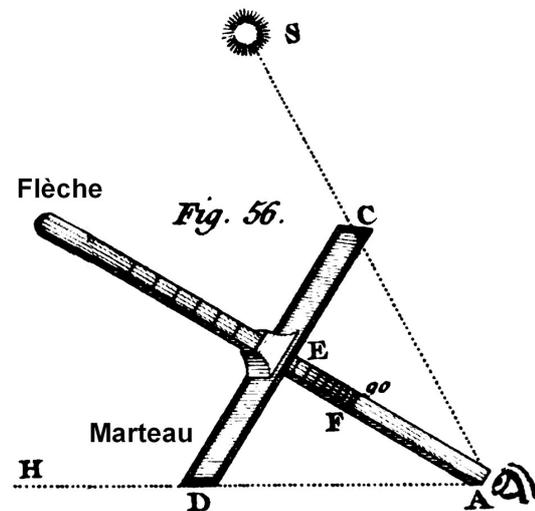


Fig.3. Arbalétrille: visée par devant. (Bouguer 1753).

La lecture de l'angle en degrés se fait sur la flèche par la graduation se rapportant au marteau. Si à terre sur un sol stable, la mesure était déjà faite avec un handicap visuel, sur un bateau il fallait ajouter la non stabilité due au roulis et au tangage. Y a-t-il eu des accidents et quelques marins se sont-ils fait éborgner en se mettant la flèche dans l'œil (intermédiaire entre la paille et la poutre) et ont camouflé cet accident en glorieuse blessure au combat?

Pour éviter de viser le Soleil sans protection, on pouvait s'en servir en visée arrière par la visée de l'ombre d'un marteau (figure 4).

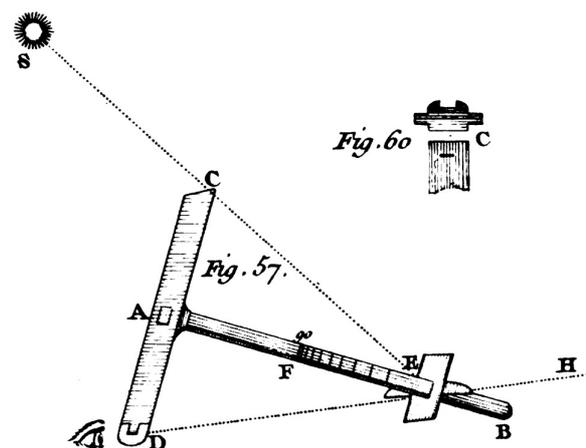


Fig.4. Arbalétrille: visée par derrière (Bouguer 1753).

Dans ce cas, la difficulté de viser deux directions est réduite, il y a une seule ligne de visée, l'ombre solaire du bord C à amener en E se superpose à la visée de l'horizon. Un œilleton en D peut aussi

faciliter la visée. Mais seule la hauteur du Soleil peut être mesurée ainsi.

Il y avait des corrections (illusoires ?) à faire pour les effets d'ombre floue dus au diamètre angulaire du Soleil et pour la courbure de la Terre pour l'horizon en fonction de l'altitude de l'observateur.

Principe de construction

Le schéma de gauche de la figure 1 agrandi dans la figure 5 résume toute la construction et le tracé des graduations de la flèche pour un marteau.

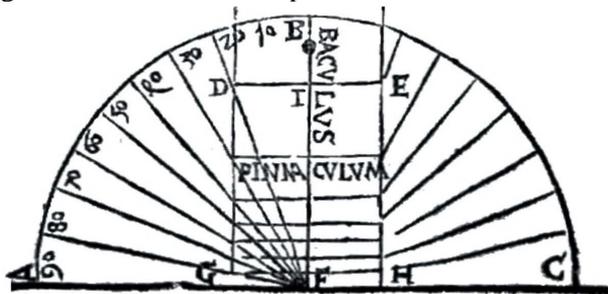


Fig.5. Le graphique du tracé des graduations chez Pierre Apian en fonction de la largeur du marteau DE.

Remarque : le graphique était dessiné à l'échelle 1 et les traits étaient directement reportés sur le support de la flèche.

La flèche est le segment FB (que l'on peut prendre comme unité). Noter que le point B est sur le demi-cercle. Le marteau dont il faut faire la graduation sur la flèche a pour longueur GH ou DE, écart entre les segments parallèles GD et HE symétriques par rapport à la flèche. La graduation du demi-cercle ABC permet de graduer la flèche pour ce marteau de longueur DE. Par exemple, ici, la marque 40° sera à l'intersection I de la flèche et du segment DE construit à partir des rayons du demi-cercle orientés à 20° , angle moitié et coupant les deux segments. Si I est l'intersection des segments FB et DE, ID/FI est la tangente de 20° et l'angle DFE vaut 40° . I est le repère 40° sur la flèche.

Il y avait autant de tracés à faire que de marteaux à fabriquer.

L'arbalestrille de carton

C'est une mini arbalestrille avec trois marteaux ; le tracé de toutes les pièces tient sur une page A4. Cette page est à imprimer sans changement d'échelle sur carton bristol. La fabrication demande soins et minutie afin d'avoir un découpage et des pliages nets.

Pour rigidifier l'instrument, une règle carrée de bois de $11 \text{ mm} \times 11 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ peut être glissée dans le corps de la flèche..

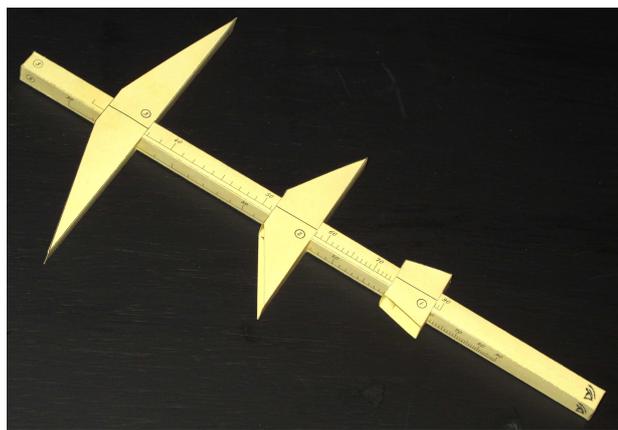


Fig.6. L'arbalestrille avec ses trois marteaux. En pratique, on monte un seul marteau adapté à la grandeur de l'angle à mesurer.

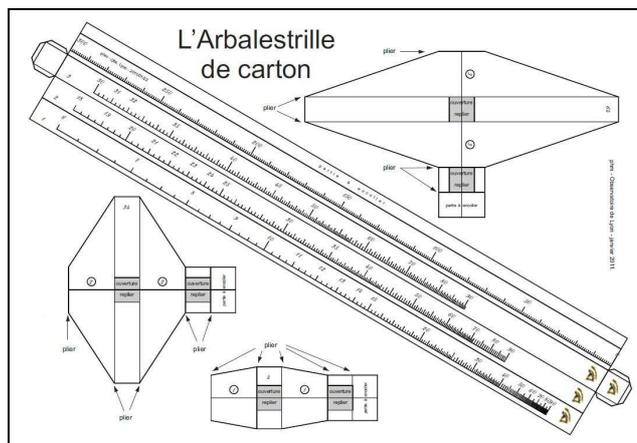


Fig.7. La planche à imprimer, découper, monter et coller.

Pour ne pas charger le dessin, la règle est graduée en degrés pour la mesure des hauteurs en vision directe.

Elle pourrait aussi comporter les compléments des angles donnant directement la distance zénithale.

Si l'on construit soi-même une arbalestrille en faisant le tracé des graduations, on peut suivre la méthode de Pierre Apian en utilisant la figure explicative de la figure 5.

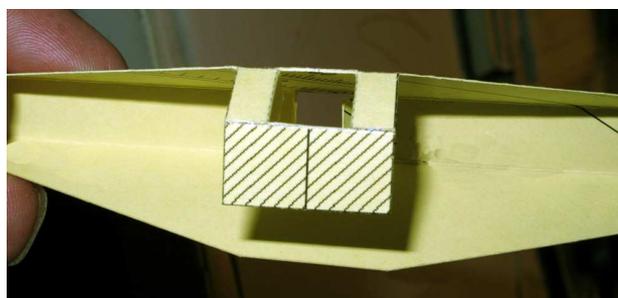


Fig.8. Un marteau en pliage avant collage.

Avec les moyens informatiques modernes, l'usage de GeoGebra facilite le tracé en permettant de faire varier à l'aide de curseurs les différentes dimensions de la flèche et des marteaux. En imprimant avec une

échelle adaptée, les graduations peuvent être découpées et collées ou reportées sur une flèche en bois ou en carton.

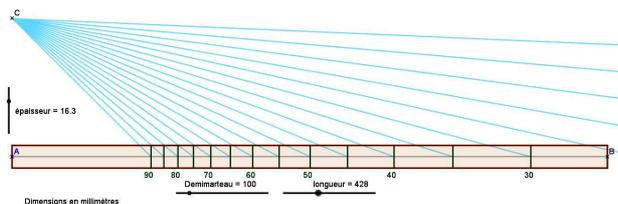


Fig.9. Le tracé modulaire des graduations des degrés sous GeoGebra.

En utilisant sous GeoGebra des séquences de valeurs et de segments, on peut faire apparaître sans difficultés toutes les subdivisions de degrés et écrire les valeurs correspondantes.

Le tracé personnel de l'arbalestrille a souvent tenté des gens de toute formation, par son côté géométrique, graphique et manuel. Il est intéressant d'aller consulter le livre de Denoville [4], manuscrit colorié à la main. Marin dieppois, Jean-Baptiste Denoville aurait été fait prisonnier par les Anglais durant la guerre de succession d'Autriche (1756-1763). Durant sa captivité, il écrit un gros livre avec de nombreuses illustrations de toutes ses connaissances : mathématique, physique, navigation, etc.

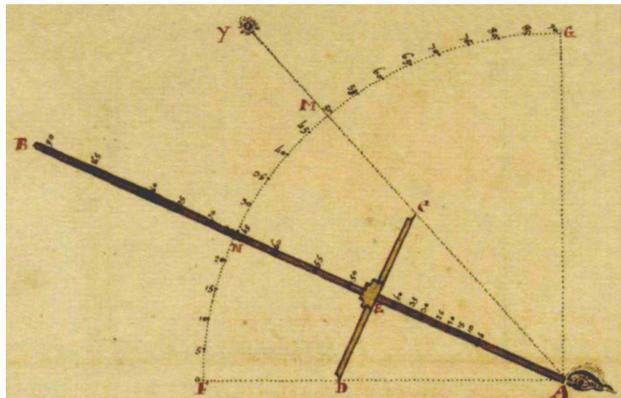


Fig.10. Le tracé de l'arbalestrille par devant par Denoville.

Il décrit dans un français difficile pour nous par son écriture et orthographe, deux procédures pour tracer l'arbalestrille, l'une géométrique et l'autre basée en partie sur la trigonométrie.

La première s'apparente au tracé proposé par Pierre Bouguer, la deuxième est celle que l'on emploie dans l'exemple d'utilisation de GeoGebra, avec l'utilisation de table de tangentes.

Note : l'usage des décimales en trigonométrie est récent. Dans les tables jusqu'au XVIII^e siècle les valeurs des sinus, cosinus, tangentes... étaient données en entier, en rapport avec l'unité de longueur de référence ou *sinus total* valant suivant la précision de la table, 60 000 (Ptolémée pour les cordes), 10^6 et jusqu'à 10^{10} .



BNP Univ. Strasbourg

Fig.11. Soyez aux anges avec l'arbalestrille comme dans Harmonia Macrocosmica d'Andreas Cellarius (1660).

Quelques livres très intéressants et d'époque.

Ces textes en ancien français et caractères d'imprimerie sont accessibles à la lecture sans difficultés après quelques temps d'accoutumance.

[1] *Cosmographie, ou description des quatre parties...* Pierre Apian corrigée et augmentée par Gemma Frison 1586. (Parmi de nombreuses autres éditions).

[2] *Nouveau traité de Navigation* Bouguer Pierre 1753

[3] *Traité de la construction et des principaux usages des instrumens de mathématique* Bion Nicolas (1652-1733) Éditions multiples 1709, 1723, 1752, etc.

[4] *Traité de Navigation* Jean-Baptiste Denoville (1732-1783). Livre manuscrit de la Bibliothèque Municipale de Rouen réédité chez Éd. Point De Vues sous forme de fac-similé par l'ASSP-Rouen avec de nombreux documents sur le site <http://assprouen.free.fr/denoville/>

[5] *Institutiones astronomicae & geographicae*, Metius, 1621 (en allemand d'époque). Livre très intéressant par les dessins de nombreux instruments d'usage astronomique et géométrique.

[6] *Arithmeticae libri duo : geometriae septem et viginti* P. Rami ou Pierre de La Ramée Ramus (dit Petrus.) 1559 (en latin). <http://docnum.u-strasbg.fr/cdm/compoundobject/collection/coll7/id/41040/rec/53>

À part les textes de Denoville, tous ces livres se trouvent sous forme de fichier PDF dans les grandes librairies numériques : Gallica, E-rara, Google Books et pour certains, en meilleure définition à la Bibliothèque numérique patrimoniale de l'Université de Strasbourg (<http://docnum.u-strasbg.fr/cdm/>).

Sur le Web

L'arbalestrille dans les pages du site *Mesurer le Ciel et la Terre* : <http://www.astrolabium.be/mesurercieletterre/Arbalestrille>

Documents complémentaires à télécharger sur les pages de la Formation Continue de l'Observatoire de Lyon : www-obs.univ-lyon1.fr/labo/fc/navigation/astronavig.htm et plus particulièrement sur <http://www-obs.univ-lyon1.fr/labo/fc/navigation/arbalestrille> : la fiche bristol, la fiche conseil de montage, et les textes originaux et interprétés pour l'arbalestrille selon Denoville.

À noter aussi "astronomy picture of the day" du 28/10/13 apod.nasa.gov/apod/ap131028.html avec arbalestrille et grande comète de 1680. ■

L'astrolabe planisphérique en classe

Frédéric PEURIÈRE¹, professeur de sciences physiques au Lycée français de Lisbonne

Frédéric Peurière nous montre dans cet article comment il est possible d'utiliser cet instrument avec des élèves à partir de questions concrètes comme ce qu'il intitule l'énigme de la place St-Pierre. Tout en le lisant, vous pourrez découvrir son site qui contient, entre autres choses, un astrolabe virtuel facile à manipuler et qui dispose de fonctionnalités supplémentaires comme l'affichage du Soleil sur l'écliptique, même si cela ne remplace pas le contact physique avec ce qui fut sans doute le plus bel instrument astronomique d'avant Galilée

L'objet est exposé sur le bureau depuis la veille. Le professeur salue la classe, tente de faire taire le brouhaha, puis annonce le thème du jour : l'électricité. Des doigts se lèvent en s'agitant. Des élèves l'interpellent directement : « C'est quoi là sur le bureau ? »

« C'est un astrolabe. » Puis il reprend le fil du cours, qui va bien devoir commencer.

« Et alors, c'est tout ? »

« Si vous voulez, nous en parlerons un jour. »

Les élèves rejouent souvent la scène de l'étonnement et de la curiosité qu'inspire l'astrolabe depuis l'Antiquité. Les savants de l'Orient musulman publièrent à son sujet des centaines de traités dès le VIII^e siècle. Les traducteurs éclairés de l'Occident latin le découvrirent dans la péninsule ibérique musulmane du Moyen Âge. Depuis longtemps, l'astrolabe planisphérique réjouit l'œil par l'harmonie de ses lignes, suscite la curiosité par le savoir mathématique dont il procède, ainsi qu'une certaine fascination pour ces astronomes grecs qui l'ont imaginé.

Présentation de l'instrument

Traiter de l'astrolabe en classe n'est pas chose aisée car l'instrument paraît complexe. Afin d'éviter certaines difficultés lors de la prise en main de l'instrument, j'en ai réalisé une version informatique qui sera le support de cette présentation. C'est l'instrument transdisciplinaire par excellence. On peut mener son étude en classe à tous les niveaux du secondaire. En sixième, afin d'illustrer le cours d'histoire sur la civilisation grecque, au cycle central du collège en complément du cours sur la lumière en sciences physiques ou des mesures d'angles en mathématiques.

Ou encore en classe de troisième comme prolongement du cours de trigonométrie.

Au lycée, il peut faire l'objet d'une présentation dans la partie Univers du cours de sciences physiques de seconde. On peut également mener une étude approfondie en MPS, TPE ou en groupe restreint dans le cadre de l'accompagnement personnalisé.

Pour appréhender l'astrolabe, il n'est pas nécessaire d'en maîtriser la théorie. On remarque vite que les élèves en comprennent intuitivement le fonctionnement à partir de quelques exemples. Ils découvrent ensuite, en fonction de leur niveau, les notions d'astronomie, de mathématiques et d'histoire qui lui sont associées.

C'est donc à partir d'exemples commentés que je vous propose de partir à la découverte de l'instrument. Je donnerai en fin d'article des références qui permettent d'aller plus loin. Vous trouverez également des contacts pour vous procurer de vrais instruments.

Rappelons que l'astrolabe s'appuie sur un modèle dépassé : le géocentrisme. Il permet pourtant de faire des prévisions d'une remarquable exactitude. Ce n'est pas le moindre de ses charmes.

La version informatique de l'astrolabe que je présente ici peut être utilisée librement. Rendez-vous à cette adresse :

<http://www.fredpeuriere.com/astro/astro.swf>

Puis cliquez sur " l'astrolabe planisphérique".

« Monsieur, on peut en parler tout de suite »

« Bon, c'est d'accord. Allons-y. »

¹ Ancien professeur relais au musée des Arts et Métiers pour l'académie de Paris, il continue de faire partager sa passion pour l'astronomie ancienne et l'histoire des sciences en animant des stages de formation pour les enseignants

Le **tympan** est un disque de métal qui se fixe à l'intérieur de la matrice comme sur le dessin. La partie colorée en bleu représente le ciel visible.

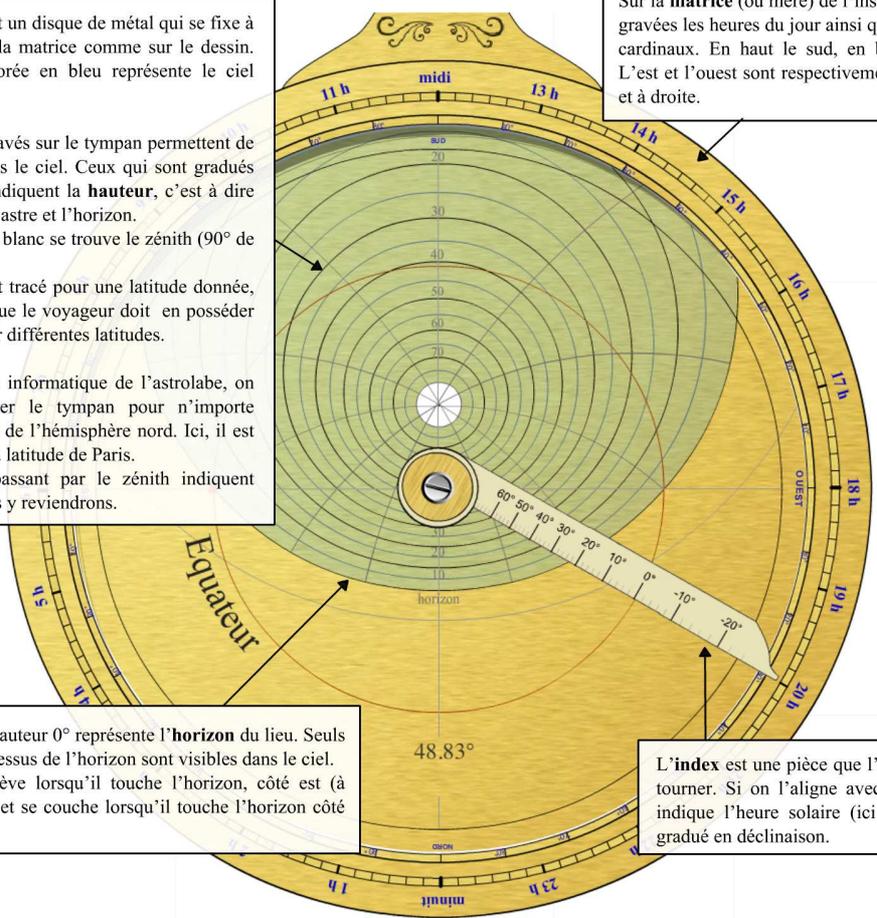
Les cercles gravés sur le tympan permettent de se repérer dans le ciel. Ceux qui sont gradués de 0° à 90° indiquent la **hauteur**, c'est à dire l'angle entre l'astre et l'horizon. Dans le cercle blanc se trouve le zénith (90° de hauteur).

Un tympan est tracé pour une latitude donnée, cela signifie que le voyageur doit en posséder plusieurs pour différentes latitudes.

Sur la version informatique de l'astrolabe, on peut configurer le tympan pour n'importe quelle latitude de l'hémisphère nord. Ici, il est calculé pour la latitude de Paris.

Les cercles passant par le zénith indiquent l'**azimut**, nous y reviendrons.

Sur la **matrice** (ou mère) de l'instrument sont gravées les heures du jour ainsi que les points cardinaux. En haut le sud, en bas le nord. L'est et l'ouest sont respectivement à gauche et à droite.



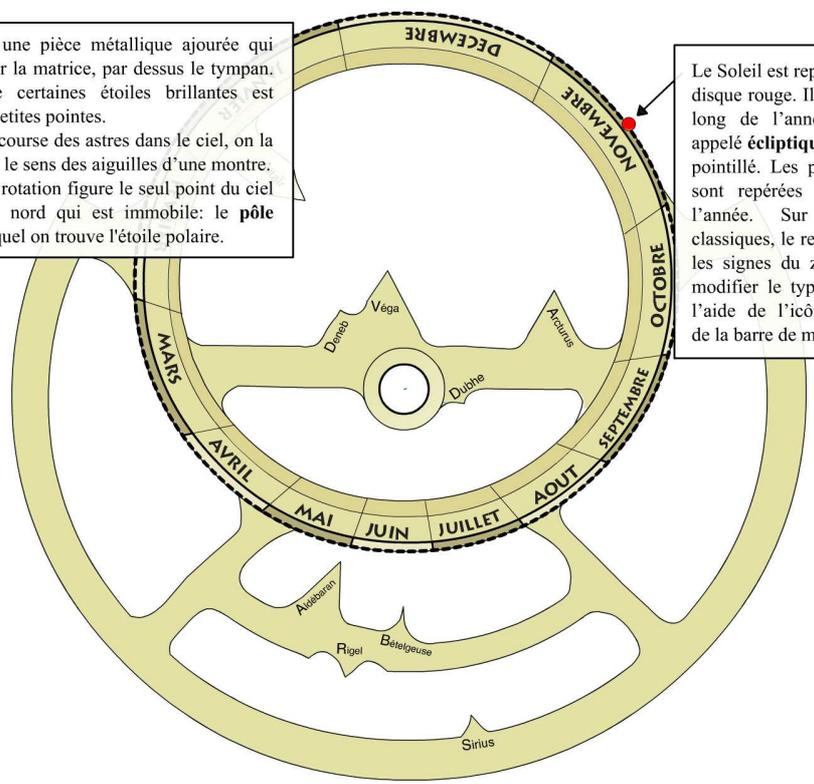
Ce cercle de hauteur 0° représente l'**horizon** du lieu. Seuls les astres au dessus de l'horizon sont visibles dans le ciel. Un astre se lève lorsqu'il touche l'horizon, côté est (à gauche donc) et se couche lorsqu'il touche l'horizon côté ouest.

L'**index** est une pièce que l'on peut faire tourner. Si on l'aligne avec le soleil, il indique l'heure solaire (ici 20h). Il est gradué en déclinaison.

L'**araignée** est une pièce métallique ajourée qui vient se fixer sur la matrice, par dessus le tympan. La position de certaines étoiles brillantes est repérée par les petites pointes.

Pour simuler la course des astres dans le ciel, on la fait tourner dans le sens des aiguilles d'une montre. Sur le centre de rotation figure le seul point du ciel de l'hémisphère nord qui est immobile: le **pôle céleste**, près duquel on trouve l'étoile polaire.

Le Soleil est représenté par le petit disque rouge. Il se déplace tout au long de l'année sur un cercle appelé **écliptique** représenté ici en pointillé. Les positions du Soleil sont repérées par les mois de l'année. Sur les astrolabes classiques, le repérage se fait avec les signes du zodiaque. On peut modifier le type de graduation à l'aide de l'icône «graduations» de la barre de menu.

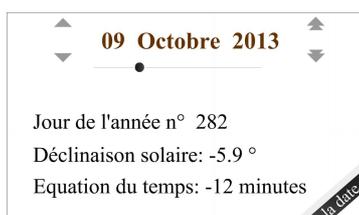


Quelques problèmes résolus avec l'astrolabe

Le temps

À quelle heure le Soleil se lève-t-il à Paris le 9 octobre ?

Nous sommes le 9 octobre, il faut d'abord positionner le soleil à cette date. Pour cela utilisez le bouton glissière dans le cadre « la date » comme indiqué ci-dessous. Utilisez les petites flèches pour ajuster. L'ordinateur calcule le rang du jour de l'année, la déclinaison du Soleil et l'équation du temps pour cette date.

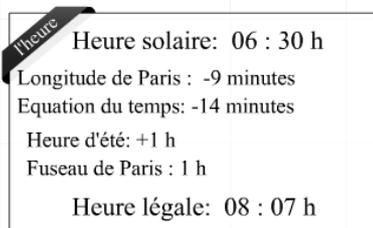


Nous sommes à Paris, il faut donc utiliser un tympan pour la latitude de la capitale. C'est ici le réglage par défaut. Le Soleil se lève côté Est. Il se trouve donc exactement sur le cercle de hauteur 0° (l'horizon) du côté gauche de l'astrolabe.

Tournez l'araignée pour bien positionner le soleil.



Alignez l'index avec le centre du disque solaire. Lisez enfin l'heure sur le bord de l'astrolabe : il est 6 h 30 du matin. Est-ce l'heure indiquée par notre montre ? Hélas non, ce serait trop simple ! L'astrolabe donne l'heure solaire.



L'heure indiquée par notre montre, l'heure légale, diffère de l'heure solaire pour des raisons civiles (référence au méridien de Greenwich, heures d'hiver et d'été, fuseaux horaires) et astronomiques (l'équation du temps)¹. Pour épargner aux élèves de trop longues explications, l'ordinateur convertit

¹ Voir aussi l'encadré sur les heures page 14.

automatiquement l'heure solaire en heure légale dans le cadre « la date » : le Soleil se lève donc à 08 h 07 en heure légale.

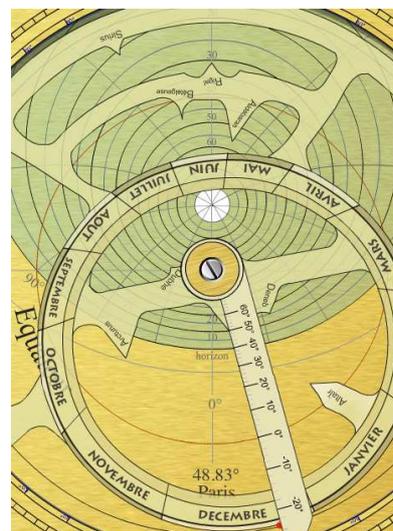
On peut bien sûr trouver un résultat légèrement différent. J'estime l'incertitude sur l'heure lue à plus ou moins deux minutes.

Quelle est l'heure du coucher du Soleil à Paris le jour de l'équinoxe de printemps ?

Positionnez le soleil à la date du 20 mars, jour de l'équinoxe de printemps. Tournez ensuite l'araignée pour que la position du soleil coïncide avec le cercle de hauteur 0° (sur l'horizon) mais sur le bord Ouest cette fois. Alignez l'index avec le centre du disque solaire. On lit : Le Soleil se couche à 18 h 00 heure solaire, 18 h 59 heure légale de Paris.

À quelle heure l'étoile Rigel de la constellation d'Orion passe-t-elle au méridien sud de Paris la veille de Noël ?

Positionnez le soleil à la date du 24 décembre. Tournez ensuite l'araignée de manière à placer la pointe correspondant à l'étoile Rigel sur le méridien sud comme montré ci-contre. Alignez l'index avec le centre du disque solaire. On lit :



Il est 23 h 00 heure solaire, 23 h 50 heure légale.

Observez l'araignée, elle nous donne à voir la configuration du ciel de Paris le soir de Noël à 23 h 00. Le Soleil est couché, très en dessous de l'horizon. L'étoile Rigel est à 30° de hauteur, au sud exactement. Aldébaran du Taureau est plus haute dans le ciel, à environ 55°. Côté nord, l'étoile Dubhe de la Grande Ourse est à 45° de hauteur. Sirius, l'étoile la plus brillante de l'hémisphère Nord, légèrement à l'est de Rigel, scintille à 20° de hauteur. Altaïr de l'Aigle est couchée et Arcturus n'est pas encore levée. Elle le fera à 00 h 30 solaire (1 h 20 légale). À cette heure c'est Sirius qui passera au méridien Sud, à presque 25° de hauteur. Vérifiez-le.

L'espace

Quelle est la hauteur du Soleil à midi solaire² à Paris le jour du solstice d'été ?

Configurez l'astrolabe à la latitude de Paris et positionnez le soleil à la date du 21 juin. Placez-le ensuite sur le méridien sud en tournant l'araignée. En effet, à midi solaire, par définition, le Soleil passe au méridien sud (azimut 180° donc). Sa hauteur est maximum. Pour lire la hauteur du Soleil plus facilement, passez votre souris sur l'icône « voir le tympan »: La hauteur du Soleil vaut un peu moins de 65° .

À quelles dates notre ombre disparaît-elle sous nos pieds à Dakar?

Il faut d'abord configurer l'astrolabe à la latitude de Dakar. Pour cela, cliquez sur l'icône « changer de latitude » dans la barre de menu. Vous pouvez ainsi configurer l'astrolabe pour n'importe quel lieu de l'hémisphère Nord en complétant la fenêtre « configuration du lieu ». En cliquant sur les points qui figurent sur la carte, l'astrolabe est configuré automatiquement pour la latitude de la ville qui correspond. Cliquez sur Dakar.

Si notre ombre disparaît, c'est que le Soleil est à la verticale du lieu. Il faut donc trouver les deux positions du soleil qui passent par le point de hauteur 90° , qu'on appelle le zénith.

Tournez l'araignée jusqu'à ce que son bord extérieur, l'écliptique, touche le point qui correspond au zénith sur le tympan, au centre du disque blanc. Avec le bouton glissière du cadre « la date » cherchez la position du soleil qui correspond à ce point.



Renouvelez la manipulation en tournant l'araignée pour trouver la deuxième solution : à Dakar, le Soleil passe au zénith le 17 août et le 30 avril. Sous le Soleil exactement.

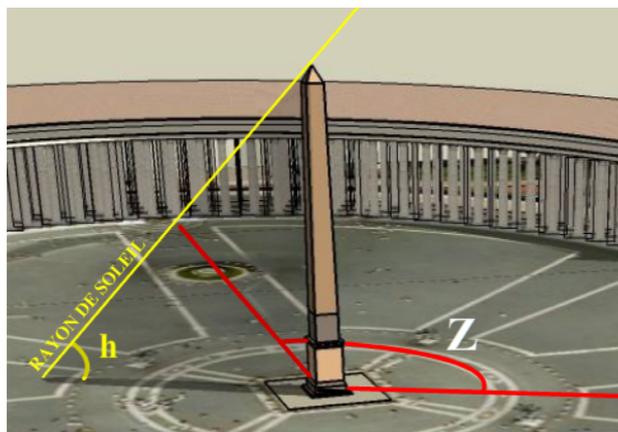
L'énigme de la place Saint-Pierre

Il s'agit d'un exemple intéressant d'utilisation de l'astrolabe. Rendez-vous à l'adresse :

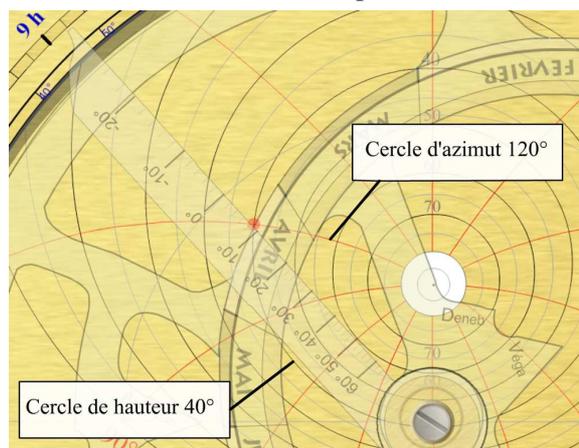
<http://www.fredpeuriere.com/astro/astro.swf>

Cliquez sur « l'énigme de la place Saint-Pierre » et tentez de la résoudre ! Il faut trouver l'heure et la date d'une image de la place Saint-Pierre provenant de Google Earth

² Il est midi solaire lorsque le Soleil passe au méridien sud (parfois nord sous les tropiques et dans l'hémisphère Sud), il atteint sa plus grande hauteur dans le ciel de la journée.



Aide à la résolution (le site propose une règle et un rapporteur) : la longueur de l'ombre est de 3 cm à la règle, correspondant à 30 m. On en déduit la hauteur du Soleil : 40° (dans le triangle rectangle). L'azimut du Soleil (angle avec le nord géographique³) déterminé avec le rapporteur est de 120° . Cliquez ensuite sur « résolution avec l'astrolabe ». On cherche à faire coïncider le cercle écliptique de l'araignée avec l'intersection du cercle de hauteur 40° et du cercle d'azimut 120° . Les cercles d'azimut sont en rouge et gradués tous les 30° . En modifiant la date, amenez le soleil sur ce point.



On trouve deux solutions : Le 11 avril (à un jour près) à environ 10 h 25 (légale) et le 2 septembre à la même heure.

Remarquez que la graduation de l'index donne une déclinaison du Soleil d'un peu plus de 8° (voir le calcul un peu plus loin).

Quelques applications en mathématiques

Voici quelques exemples de vérification des indications de l'astrolabe que l'on peut faire en cours de mathématiques.

³ On peut aussi compter l'azimut à partir du sud, les deux conventions coexistent.

Au collège

Nous sommes le 12 mai à Paris. Les élèves cherchent la hauteur du Soleil à 10 h 35 heure légale avec l'astrolabe. On trouve 40° . Ils mesurent ensuite la hauteur du Soleil à l'heure dite dans la cour :

- En utilisant une réplique d'instrument de mesure d'angle.

- En mesurant la longueur de l'ombre d'un objet de taille connue (un gnomon) posé verticalement sur le sol. On retrouve la tangente de l'angle dans le triangle rectangle (programme de troisième).

Au lycée

L'astrolabe permet une résolution géométrique de la détermination d'angle. La résolution analytique des problèmes résolus par l'astrolabe peut aussi se faire par les deux formules issues de la trigonométrie sphérique :

$$\sin h = \sin \varphi \times \sin \delta + \cos \varphi \times \cos \delta \times \cos H$$

$$\sin \delta = \sin \varphi \times \sin h + \cos \varphi \times \cos h \times \cos Z$$

Elles s'appliquent à n'importe quel astre. Je prends ici le Soleil en exemple. Les angles sont en degrés.

- h : hauteur du Soleil. φ : latitude du lieu.

- δ : déclinaison ; c'est l'angle entre les rayons solaires et l'équateur. Elle varie de $-23,4^\circ$ le jour du solstice d'hiver à $+23,4^\circ$ le jour du solstice d'été. Elle est nulle aux équinoxes. Une table de déclinaison permet de relier la déclinaison du Soleil au jour de l'année. Sa valeur est calculée dans le cadre « la date ». On peut lire directement la déclinaison du Soleil sur l'index. Il suffit de l'aligner sur le disque solaire.

- H : angle horaire. C'est l'angle que fait le méridien contenant le Soleil avec le méridien du lieu. C'est une manière de déterminer l'heure solaire. H vaut 0° à midi solaire, 15° à 13 h, 30° à 14 h, 90° à 18 h, 180° à minuit...

- Z est l'azimut du Soleil.

Ces formules ne font pas partie des programmes de lycée mais leur utilisation permet d'utiliser le calcul trigonométrique dans le cadre de notre étude.

[Retour sur deux problèmes résolus avec l'astrolabe](#)

L'énigme de la place Saint-Pierre

Hauteur du Soleil : 40° , azimut : 120° , latitude du Vatican : $41,9^\circ$. Utilisons la deuxième formule pour connaître la déclinaison du Soleil :

$$\sin \delta = \sin 41,9 \times \sin 40 + \cos 41,9 \times \cos 40 \times \cos 120$$

On trouve : $\delta = 8,29^\circ$, soit $8^\circ 17'$.

La lecture d'une table de déclinaison (que vous pouvez retrouver dans l'animation « énigme de la place Saint-Pierre » dans la rubrique « résolution par le calcul ») confirme les dates trouvées avec l'astrolabe : entre le 11 et le 12 avril et entre le 1er et le 2 septembre.

Quelle est la hauteur du Soleil à midi solaire à Paris le jour du solstice d'été ?

On cherche h . À midi solaire, $H = 0$. Le jour du solstice d'été, la déclinaison du Soleil vaut $23,4^\circ$. Latitude de Paris : $48,8^\circ$. On utilise la première relation :

$$\sin h = \sin 48,8 \times \sin 23,4 + \cos 48,8 \times \cos 23,4$$

On obtient : $h = 64,6^\circ$. Comparez au résultat obtenu avec l'astrolabe.

On peut aussi de manière plus élégante et pédagogique utiliser la relation :

$$\sin a \times \sin b + \cos a \times \cos b = \cos(a - b)$$

Lorsque $H = 0$, c'est-à-dire à midi solaire, la première relation peut s'écrire :

$$\sin h = \sin \varphi \times \sin \delta + \cos \varphi \times \cos \delta = \cos(\varphi - \delta)$$

$$\sin h = \cos(\varphi - \delta) \quad \cos(90^\circ - h) = \cos(\varphi - \delta)$$

Donc : $90^\circ - h = \varphi - \delta$

Ce qui donne : $h = (90 - \varphi) + \delta$ à midi solaire.

ou $\varphi = (90 - h) + \delta$

Dès la fin du XV^e siècle, les marins portugais savent mesurer à midi la hauteur du Soleil avec leur astrolabe nautique. À l'aide de cette formule et des tables de déclinaison calculées par les mathématiciens du roi dom João II, ils peuvent déterminer précisément leur latitude en mer et poursuivre loin des côtes leurs aventures. Jusqu'aux Indes.

Où se procurer un astrolabe ?

www.astrolabes.fr. Brigitte Alix fabrique elle-même de nombreux instruments, notamment des petits astrolabes pédagogiques pour la latitude de votre choix.

www.antiquus.es. Un fabricant espagnol qui vend un très bel astrolabe en métal (seulement pour la latitude de Madrid) et une sphère armillaire de très bonne qualité.

www.planetarium-provence.com/manifestations.htm

L'association Planétarium Ventoux Provence fournit les gabarits et les explications pour réaliser son astrolabe planisphérique ainsi que d'autres instruments anciens.

Autres références

Parmi toutes les sources disponibles, je propose :

- Un livre : les instruments de l'astronomie ancienne (Philippe Dutarte). L'auteur passe en revue les instruments phares de l'astronomie ancienne avec rigueur et pédagogie. Un livre incontournable.

- Et un site pour aller plus loin dans l'étude de l'astrolabe. L'ENS de Lyon a réalisé une étude mathématique très complète de l'instrument :

www.ens-lyon.fr/RELIE/Cadran/activpedago/TextesCours/WebAstrolabe/Astrolabe.htm

Le CLEA et les astrolabes : Le hors série des Cahiers Clairaut n°10 maths et astronomie propose un astrolabe à construire ainsi que quelques exercices sur la projection stéréographique. ■

INSTRUMENT

La sphère armillaire, un bon outil pédagogique

Jean-Luc Fouquet, La Flotte

Jean-Luc Fouquet a longtemps animé un atelier de construction de sphère armillaire lors des écoles d'été d'astronomie du CLEA. Il nous montre ici que ce que l'on prend souvent pour un bel objet décoratif est aussi un réel outil pédagogique permettant d'expliquer les mouvements célestes.

La sphère armillaire est un instrument très ancien, vraisemblablement conçu par les pythagoriciens. Elle permettait d'expliquer facilement les phénomènes observés et donc de « sauver » les apparences, en réalisant une matérialisation concrète du modèle géocentrique, des savants grecs jusqu'au XVII^e siècle. Beaucoup ont dit qu'elle était le symbole même de l'astronomie. Bon nombre d'astronomes ou d'érudits ont été représentés la tenant à la main ou posant à côté d'elle, car elle représentait à elle seule toute la sagesse et le savoir de l'époque. Elle figure au centre du drapeau du Portugal, associée aux grandes découvertes des XV^e et XVI^e siècles, car elle semble concentrer pour ces peuples de navigateurs tout le savoir et la connaissance nécessaires pour entreprendre ces longs voyages.



*Fig.1. Portrait de Ptolémée, par Juste de Gand et Pedro Berruguete, 1476,
(C) RMN-Grand Palais (musée du Louvre) / Gérard Blot.*



Fig.2. Le drapeau du Portugal avec sa sphère armillaire.

Au plus loin que l'on puisse remonter l'histoire, la sphère armillaire apparaît pour la première fois dans le *Timée* de Platon qui décrit des maquettes de combinaisons de sphères, puis Eudoxe et surtout Gémios de Rhodes en font l'éloge en l'appelant « astrolabos ». Dans les écrits de Cicéron, sont décrites deux sphères attribuées à Archimède et faisant partie du butin de guerre rapporté de Syracuse par le général Marcellus, à Rome en 60 avant Jésus-Christ. Les premiers instruments peuvent être suspendus ou tenus à la main, simplifiés avec un cercle horizon absent. Au temps de Ptolémée, la sphère armillaire est décrite comme un instrument d'observation. Mais pour vraiment permettre de faire des visées et de repérer avec suffisamment de précision les positions de quelques étoiles, il faudra attendre l'âge d'or de cet instrument, la fin du XVI^e siècle, avec de grandes dimensions, et un pied fixe bien orienté. Tycho Brahé en fit construire plusieurs dans son laboratoire, avec des diamètres de 1,7 à 3,5 mètres, ce qui est vraiment la limite de stabilité !

Au Moyen Âge et à la Renaissance, les sphères armillaires seront de superbes instruments en bois ou en laiton utilisés pour la recherche et la démonstration. Le « *Traité de la sphère* », écrit en 1230 par Jean de Sacrobosco, fut maintes fois recopié et plus de deux cents fois imprimé jusqu'à la fin du XVI^e siècle. Il fait une description précise de la fonction de chaque anneau ou armille composant les deux sphères constituant l'instrument, la sphère céleste libre de tourner autour de l'axe du monde et reliée par les deux pôles célestes à la sphère locale.

Composition de la sphère armillaire

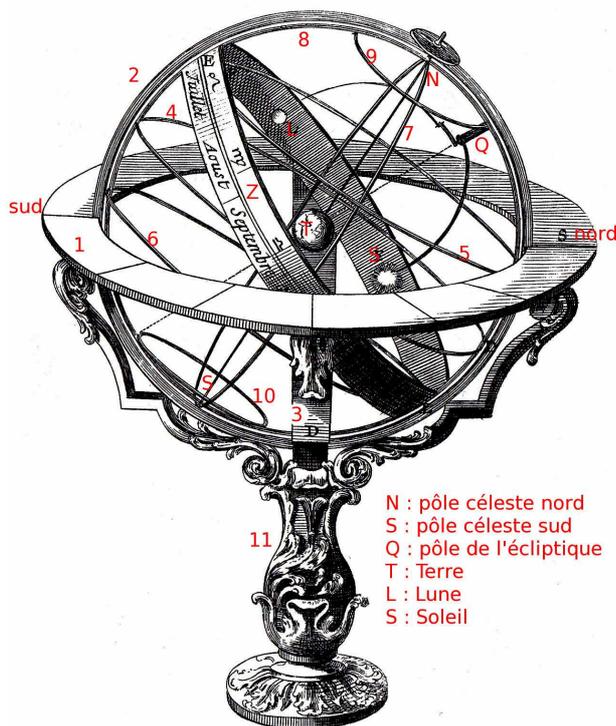


Fig.3. La sphère armillaire dans l'encyclopédie Diderot et d'Alembert (ajouts en rouge).

La sphère mobile ou sphère céleste (8 anneaux)

4 : l'équateur céleste, dont le plan contient l'équateur terrestre et qui est gradué de 0 à 24 heures dans le sens direct pour la lecture des ascensions droites. Parfois, à l'intérieur de cet anneau, une deuxième armille coulissant librement et graduée de 0 à 24 heures dans le sens rétrograde permet de lire les heures de lever ou de coucher du Soleil ou de la Lune, ou de calculer des durées. On appelle cet anneau intérieur « horloge locale ».

5 et 6 : les deux tropiques célestes du Cancer et du Capricorne.

9 et 10 : les deux cercles polaires célestes arctique et antarctique.

7 et 8 : les deux colures des solstices et des équinoxes, ou méridiens célestes, passant par les pôles et par les positions du Soleil sur l'écliptique aux solstices ou aux équinoxes.

Z : la bande zodiacale, portant en son milieu l'écliptique gradué en dates, bande pouvant s'orner des signes astrologiques avec leurs délimitations en dates.

La sphère fixe ou sphère locale

(3 anneaux)

1 : l'horizon, lié au pied fixe **11** et qui doit être parfaitement horizontal si la sphère se veut un instrument d'observation. Cet anneau porte les quatre points cardinaux et est gradué de 0 à 360° dans le sens rétrograde à partir du sud local pour permettre la lecture des azimuts.

2 : le méridien local, grand cercle vertical passant par le zénith et les deux pôles célestes. Sa graduation de 0 (au niveau de l'horizon nord ou sud) jusqu'à +90° (au zénith) ou jusqu'à -90° (au nadir), permet de lire les hauteurs des astres ou d'afficher la latitude du lieu.

3 : le vertical, grand cercle perpendiculaire au méridien local et passant par le zénith, le nadir et les deux positions ouest et est sur l'horizon. Sur certaines sphères, une moitié de cet anneau (partie supérieure passant par le zénith) n'est pas matérialisée.

À noter que pour permettre de faire varier sur l'instrument la position des pôles célestes par rapport à l'horizon, et donc de faire varier la latitude, il existe deux techniques de fabrication :

- soit l'axe du Monde est directement lié au méridien local et celui-ci peut glisser dans deux encoches taillées dans un large anneau horizon ;
- soit l'axe du Monde est lié à un anneau supplémentaire appelé « flasque », coulissant à l'intérieur du méridien local. Ce nouvel anneau est alors gradué de 0 (en regard de l'équateur céleste) jusqu'à 90° (au pôle céleste Nord) et permet d'afficher les latitudes et de lire directement les déclinaisons.

On pourrait penser qu'après la publication de l'ouvrage de Copernic, cet instrument matérialisant le système géocentrique aurait pu tomber en désuétude, mais il n'en fut rien. Certes, des sphères ayant le Soleil en leur centre apparaurent à partir du milieu du XVII^e siècle, mais les modèles géocentriques restaient mieux adaptés à la description des mouvements apparents et au repérage du Soleil, de la Lune et des planètes par rapport à l'observation directe. Et puis, l'héliocentrisme ne fut accepté que bien tardivement par l'Église... C'est pourquoi les sphères armillaires ont été construites jusqu'à nos jours sur les deux types de modèles : les sphères géocentriques et les sphères héliocentriques.



Fig.4. Dessin de la sphère de Tycho Brahé (1598).
Modèle géocentrique d'observation, muni de pinnules.



Fig.5. Planétaire héliocentrique dans une sphère armillaire de démonstration. Musée d'histoire des sciences Genève.

Exemples d'utilisation

Pendant quelques années, au cours des stages de formation et les écoles d'été du CLEA, un atelier de construction et d'utilisation d'une sphère armillaire en carton a été proposé. Cet instrument géocentrique était d'un intérêt pédagogique certain, car il permettait comme au temps de la Renaissance de découvrir et de visualiser facilement de très nombreuses notions.

Repérages : correspondances entre coordonnées horizontales, horaires, équatoriales ou écliptiques.

Jour : position du Soleil un jour donné, description de son mouvement apparent et variation de sa déclinaison.

Saisons : relevé des heures de lever et de coucher du Soleil et durée du jour, variation de l'azimut et de la hauteur du Soleil suivant la date.

Lune : sa place sur l'écliptique en fonction de celle du Soleil, son lever et son coucher, sa culmination en fonction des saisons.

Latitude : influence de son changement sur la durée du jour ou des saisons, sur la durée des crépuscules ou sur l'aspect de la

Point vernal : son repérage ainsi que celui du pôle de l'écliptique, la précession des équinoxes.

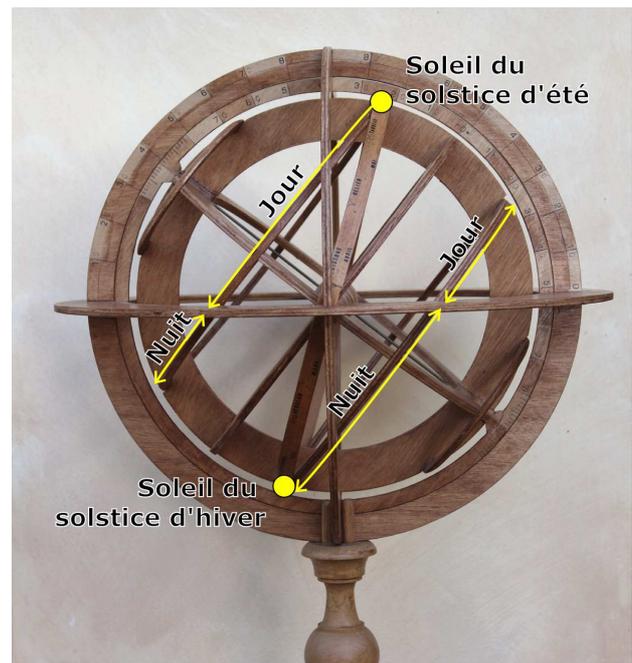


Fig.6. La durée de la journée aux solstices d'été et d'hiver à une latitude d'environ 40° expliquée par la sphère armillaire. (modèle Alphonse Delavergne).



Fig.7. La Lune au premier quartier va bientôt passer au méridien alors que le Soleil va se coucher. Nous sommes à l'équinoxe de printemps.

Pour les Grecs par exemple, qui n'avaient pas pour la plupart cette facilité de se déplacer et de parcourir le Monde que l'on connaît aujourd'hui, la sphère armillaire confirma des phénomènes étonnants décrits par les voyageurs téméraires, tels Pythéas en 330 avant Jésus-Christ.

Cet instrument démontrait que dans les régions polaires, le Soleil pouvait ne pas se coucher et la

nuit pouvait durer plusieurs mois. Dans d'autres régions inconnues proches de l'équateur, les pôles pouvaient raser l'horizon et l'égalité du jour et de la nuit se remarquait quelle que soit la saison, avec des crépuscules très courts.



Fig.8. Sphère réglée sur la latitude 0° (équateur)



Fig.8. Sphère réglée sur la latitude 90° (pôle Nord).

Parmi les sphères armillaires laissées par les Anciens et encore visibles dans les musées, on pourrait citer la plus ancienne, datant de 1425 et présentée au musée d'histoire des sciences d'Oxford, ou la plus complexe, de plus de deux mètres de diamètre, fabriquée par Antonio Santucci en 1585, visible au musée de l'histoire des sciences à Florence, comportant de très nombreux anneaux supplémentaires supports de planètes ou participant à la matérialisation de leur trajectoire.



Fig.9. Sphère armillaire de Santucci, 1585. Musée d'histoire des sciences à Florence.

D'autres instruments, parfois très anciens eux aussi, s'inspireront de la même conception géocentrique du Monde, avec des sphères devenant planétaires, animées parfois par des mouvements d'horlogerie complexes, ou avec des globes célestes dans lesquels la sphère mobile est remplacée par un globe plein en cuivre ciselé ou en papier mâché peint et portant les constellations.



Fig.10. Globe céleste dans le fameux tableau « Les ambassadeurs » de Holbein le Jeune.

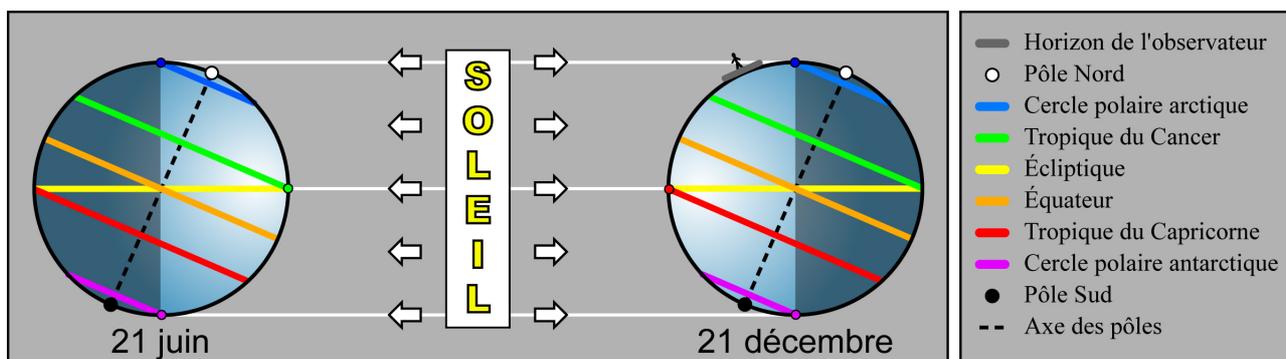
À l'école d'été du CLEA, c'est une maquette de grande dimension dans laquelle la sphère céleste est en plexiglas et porte les étoiles, les principales lignes célestes et l'écliptique, qui remplace la sphère armillaire, avec le même intérêt pédagogique si évident.



Fig.11. Sphère céleste du CLEA

COMPLÉMENT

D'où viennent les lignes des sphères armillaires et des astrolabes ?



L'axe de la Terre et son inclinaison par rapport au plan de l'écliptique (plan de son orbite) permettent de définir différentes lignes sur le globe terrestre ou, par prolongement, sur la sphère céleste. Le schéma est en modèle héliocentrique mais on obtient les mêmes lignes en géocentrique si on fait tourner le Soleil en un an sur la sphère céleste.

La sphère bleue représente ici la Terre, mais elle peut aussi représenter la sphère céleste si on place l'observateur en son centre.

Le plan de l'écliptique est le plan de l'orbite terrestre. Sur la sphère céleste, cela donne le cercle écliptique sur lequel se trouve le Soleil. Les planètes et la Lune sont approximativement situés sur l'écliptique.

L'axe de la Terre et ses pôles sont définis par la rotation de la Terre sur elle-même.

L'équateur est situé dans le plan perpendiculaire à l'axe des pôles passant par le centre de la Terre.

Sur le tropique du Cancer, on voit le Soleil passer au zénith (à la verticale) le jour du solstice de juin. Sur le tropique du Capricorne, c'est au solstice de décembre. Le cercle écliptique est tangent aux deux tropiques.

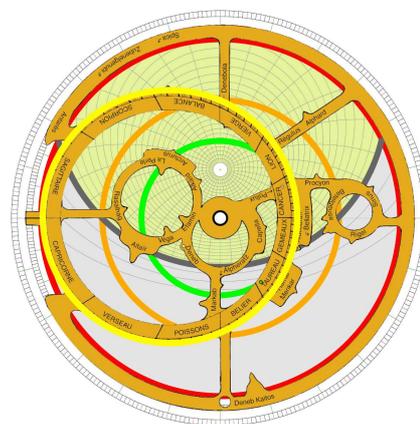
Au nord du cercle polaire arctique, le Soleil ne se couche pas le 21 juin. Au sud du cercle polaire antarctique, il ne se lève pas le 21 juin. C'est l'inverse au solstice de décembre.

Sur le premier schéma, côté 21 décembre, on a représenté sur la Terre un observateur placé à midi solaire avec son horizon.

Sur la sphère armillaire (photo du haut), tous les cercles sont représentés. L'horizon est fixe et la sphère céleste tourne autour d'un axe dont l'inclinaison se règle en fonction de la latitude. La Terre est au centre, immobile.

Sur l'astrolabe (schéma du bas), les lignes sont obtenues par projection stéréographique. L'écliptique est situé sur l'araignée, la partie mobile supérieure qui représente la sphère céleste (en

orange sur ce schéma). Les tropiques et l'équateur sont aussi représentés. Ils pourraient être situés sur l'araignée mais il est plus simple de les placer en-dessous sur la partie fixe (le tympan). Cela revient au même puisqu'ils restent fixes quand la Terre (ou le ciel) tourne.



Nicolas-Louis de La Caille, astronome et géodésien

James Lequeux, astronome émérite à l'Observatoire de Paris

Il y a trois siècles naissait Nicolas Louis La Caille (1713 – 1762), la même année qu'Alexis Clairaut (1713 – 1767). Nous avons abondamment parlé de Clairaut mais La Caille joua aussi un rôle important dans la connaissance du ciel surtout de l'hémisphère sud. Il réalisa un catalogue contenant 9 766 étoiles et donna des noms d'instruments scientifiques anciens à 14 nouvelles constellations. James Lequeux nous fait revivre dans cet article un des aspects du siècle des Lumières.

On fête cette année le tricentenaire de la naissance de Nicolas-Louis de La Caille (1713-1762). Une biographie vient de paraître et une exposition lui est consacrée à l'Observatoire de Paris. La Caille n'est certainement pas le plus connu des astronomes français, mais c'est cependant un des plus accomplis et des plus productifs. Il est surtout connu pour avoir dressé la première bonne carte du ciel austral et nommé quatorze nouvelles constellations, au cours d'un long séjour au Cap de Bonne-Espérance.

Il a aussi donné la première description objective de la vie des colons du Cap. C'était également un remarquable géodésien et un enseignant hors pair.

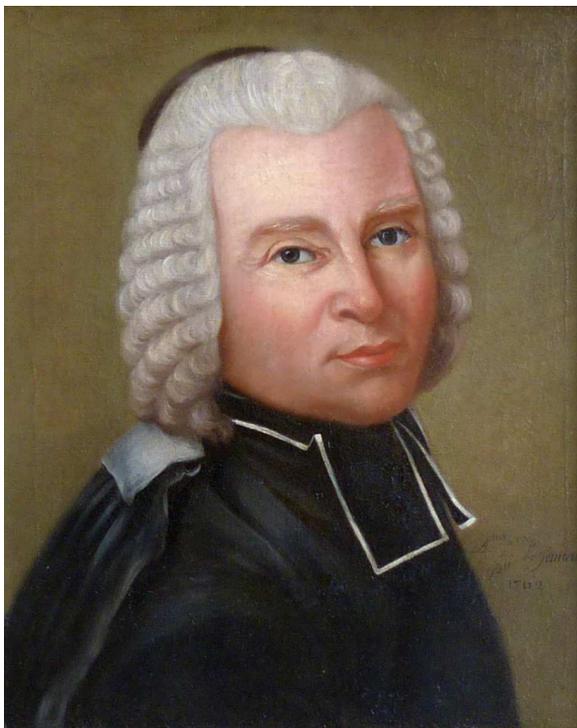


Fig.1. Portrait de La Caille par Anne-Louise Le Jeuneux.
© A. Geoffroy, Observatoire de Paris.

La Caille est né le 28 décembre 1713 à Rumigny (Ardennes), dans une famille noble peu fortunée¹. Il étudie au collège de Mantes sur Seine (aujourd'hui Mantes-la-Jolie, Yvelines), puis entre à Paris au collège de Lisieux, qui dépend de l'Université de Paris. En 1732 il étudie la théologie au collège de Navarre avec l'intention de devenir prêtre. Mais il est de plus en plus attiré par les mathématiques et l'astronomie, et n'accèdera pas à la prêtrise : il restera diacre, prenant alors le titre d'abbé que l'on donne aux diacres. En principe, ces abbés reçoivent le bénéfice d'une abbaye, d'où leur nom, mais ce ne sera pas le cas de La Caille, peu intéressé par l'argent. Il ne semble pas avoir été non plus intéressé par la religion, et est un représentant typique du siècle des Lumières.

Après la fin de ses études, La Caille attire l'attention de Jacques Cassini (1677-1756), le second des quatre Cassini qui dirigent l'Observatoire de Paris de 1669 à la Révolution. « Demeurez avec moi, lui dit ce Sçavant respectable, nous calculerons tant & plus, je vous offre ma maison & toute mon amitié ». Le jeune homme entre donc en 1732 à l'Observatoire, où il observe avec passion ; mais l'astronomie proprement dite n'est pas l'activité principale de l'institution, qui se consacre surtout à la mesure de la Terre. La Caille va bientôt se trouver embarqué dans une expédition géodésique, et en même temps dans une controverse entre partisans de Descartes et partisans de Newton.

¹ La date de naissance du 15 mars 1713 souvent donnée pour La Caille est une erreur de Carlier qui s'est propagée par la suite. Son acte de baptême est du 29 décembre 1713, et on ne traînait pas à l'époque entre naissance et baptême. De plus, une soeur de La Caille est née le 15 janvier 1713 !

En effet, Jacques Cassini avait terminé la mesure de la longueur du méridien de Paris de Dunkerque à Collioure, et mesuré la latitude de plusieurs points de cet arc. De la longueur de l'arc et de l'angle qu'il sous-tend, on peut déduire le rayon local de la Terre en différents endroits, et obtenir ainsi une idée de la forme de la Terre. Jacques Cassini trouve qu'elle doit être allongée (comme un ballon de rugby). Or Newton avait prédit que la force centrifuge issue de la rotation de la Terre sur elle-même devait lui donner une forme aplatie. La théorie de la gravitation universelle de Newton n'est guère populaire en France, car on ne comprend pas qu'une force d'attraction entre deux masses puisse s'exercer à distance sans support matériel ; la théorie concurrente des tourbillons de Descartes, bien que bancal, fait intervenir un tel support sous la forme de ce qu'on appellera plus tard l'éther. Certains savants influents comme Alexis-Claude Clairaut (1713-1765), Charles-Marie de la Condamine (1701-1774) et Pierre-Louis Moreau de Maupertuis (1698-1759), bientôt rejoints par le jeune La Caille, sont cependant délibérément newtoniens. Les controverses sur la théorie de Newton se cristallisent sur la forme de la Terre : c'est pour en finir que l'Académie des sciences organise les fameuses expéditions de 1735-1745 au Pérou (aujourd'hui Équateur) et 1736-1737 en Laponie (nord de la Suède) pour mesurer un degré de méridien à des latitudes très différentes. Le résultat est que la Terre est aplatie. La contradiction avec ce que trouve Jacques Cassini incite l'Académie des sciences à ordonner une nouvelle mesure du méridien de Paris à travers la France. Elle en charge César-François Cassini, dit Cassini de Thury (1714-1784), le propre fils de Jacques Cassini dont elle espère qu'il sera cependant objectif, accompagné de La Caille et de Jean-Dominique Maraldi (1709-1788).

Les trois hommes ont déjà triangulé et cartographié de grandes parties des côtes de la France et sont devenus des géodésiens experts. La nouvelle mesure du méridien de Paris commence en juillet 1739 et prendra trois ans. Elle s'accompagne de la mesure d'un arc de parallèle entre Sète et la Montagne Sainte-Victoire près d'Aix-en-Provence. On détermine la différence de latitude entre les extrémités de la triangulation du méridien, et la différence de longitude entre celles du parallèle : les résultats confirment l'aplatissement de la Terre (d'ailleurs, on aurait pu se dispenser des deux expéditions lointaines puisqu'on pouvait obtenir le même résultat sur le seul territoire national !). Il en résulte une grosse publication intitulée *La*

méridienne de l'Observatoire Royal de Paris vérifiée sur toute son étendue, signée par le seul Cassini de Thury. La Caille, qui avait participé à toutes les mesures et qui avait fait seul toutes les réductions, comme en témoignent ses manuscrits conservés à la Bibliothèque de l'Observatoire, est ulcéré : ses relations avec Cassini de Thury vont s'en trouver considérablement refroidies.

D'ailleurs, La Caille est devenu indépendant : il est nommé en 1739 professeur de mathématiques au Collège Mazarin ou Collège des Quatre-Nations, un établissement prestigieux, le meilleur en France pour les mathématiques, dont le bâtiment abrite aujourd'hui les différentes Académies. Il occupe effectivement ce poste en 1742, à la fin de son expédition, et y enseignera jusqu'à sa mort : il est le premier en France à enseigner le calcul différentiel, et ses élèves comme Lavoisier ou Bailly se souviendront de ses leçons avec émotion et reconnaissance. La Caille publie au cours de sa vie plusieurs traités de mathématiques, d'optique et d'astronomie (le premier traité newtonien en France !) qui connaissent un succès considérable, avec de nombreuses éditions et traductions jusqu'au début du XIX^e siècle.

Le Collège lui construit sur le toit un observatoire équipé des meilleurs instruments, qui sera le plus important observatoire purement astronomique en France. Il y commence des mesures de position des étoiles et des planètes les plus précises de son époque. Il correspond avec l'astronome anglais James Bradley (1693-1762), qui vient de découvrir l'aberration de la lumière puis la nutation de l'axe de la Terre, dont La Caille peut corriger pour la première fois les observations astronomiques. Par ailleurs, il est élu à l'Académie des sciences en 1741, participe aux réunions des physiciens et des astronomes de son époque, et se lie d'amitié avec plusieurs d'entre eux, dont Clairaut qui a exactement son âge.

La Caille est de plus en plus obsédé par la mauvaise connaissance que l'on a du ciel austral. Les navigateurs portugais et hollandais ont certes déterminé plus ou moins bien la position de certaines étoiles de l'hémisphère Sud, et Edmond Halley (1656-1742), l'homme de la comète, a mesuré en 1677-1676 à l'Île de Sainte-Hélène la position approximative de 341 étoiles australes. C'est insuffisant à la fois pour l'astronomie et la navigation, et il y a de grandes régions du ciel où aucune constellation n'a été définie. La Caille persuade l'Académie et le Roi de l'envoyer dresser

une carte complète du ciel austral et d'y faire des mesures précises.

Le Cap de Bonne-Espérance est l'endroit idéal pour réaliser ce programme : on y trouve une importante colonie hollandaise, c'est le relais des navires de la Compagnie néerlandaise des Indes orientales, et le climat, de type méditerranéen, y est excellent. La Caille réussit à obtenir les fonds et les autorisations nécessaires pour son voyage, et s'embarque à Lorient le 21 novembre 1750, avec trois magnifiques instruments qu'il a partiellement payés de sa poche. Il est accompagné d'un technicien, M. Poitevin, et de son petit chien Grisgris. Il a le mal de mer et va mettre six mois à parvenir à destination ! Il a le temps de réfléchir à un des problèmes majeurs de la navigation à l'époque, dont il est lui-même victime : la très mauvaise connaissance des longitudes.

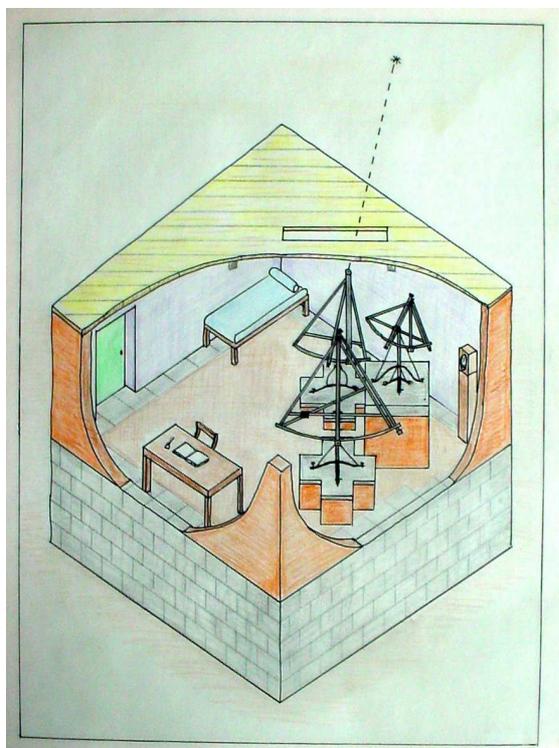


Fig.2. L'observatoire de La Caille au Cap, reconstruction en coupe par I.S. Glass. Le coin de droite est orienté vers le nord. Il contient trois instruments : au premier plan le sextant pour l'observation précise des étoiles fondamentales, au deuxième le quart de cercle pour l'observation systématique du ciel austral, qui peut aussi servir à la triangulation en position horizontale, et au fond le grand secteur zénithal destiné à la détermination de la latitude. © I.S. Glass.

Au Cap, La Caille est très bien reçu par le gouverneur de la Compagnie, qui lui fait construire un petit observatoire (figure 2). La Caille va y compléter son catalogue de 400 étoiles fondamentales réparties sur tout le Ciel, qui servent de base à ses autres mesures : avec son sextant (figure 3), il obtient une précision alors inégalée de

4 secondes de degré. Puis il entreprend ce qui n'avait jamais été fait, même dans l'hémisphère nord : une exploration systématique du ciel.



Fig.3. Le sextant de La Caille. Ce terme signifie simplement que le secteur gradué couvre 60° , comme celui du sextant de marine qui est un instrument très différent. Il est placé dans le plan du méridien, la lunette à droite vise l'étoile, dont on lit la distance angulaire au zénith sur la graduation derrière un fil à plomb. L'instant du passage de l'étoile au méridien fournit l'autre coordonnée qui détermine sa position. Cet instrument, conservé à l'Observatoire de Paris, est dû au constructeur Claude Langlois (ca. 1700 – ca. 1756). © j-M. Kollar, Observatoire de Paris.

Pour cela, il laisse fixe pendant toute la nuit une petite lunette à grand champ fixée sur son quart-de-cercle, lequel est orienté selon le méridien, et note le passage et la hauteur de toutes les étoiles qui traversent le champ. Puis il dirige la lunette vers une autre hauteur et recommence. En 117 nuits épuisantes, il couvre ainsi tout le ciel austral. Son catalogue comporte 9766 étoiles, au lieu des 341 étoiles de Halley. La Caille comble aussi les trous dans les explorations précédentes du ciel austral par 14 nouvelles constellations² auxquelles il donne, contrairement à l'usage ancien où elles sont

² Les constellations ne correspondent à rien de physique, les étoiles qui les composent ayant des distances très différentes les unes des autres : ce sont simplement des moyens mnémotechniques employés depuis l'Antiquité pour se représenter la position des étoiles.

généralement désignées par des êtres mythologiques, des noms d'instruments scientifiques : Fornax, Horologium, Reticulum, Pyxis = Boussole, Antlia = Machine pneumatique, Octans, Circinus = Compas du géomètre, Norma = Règle, Telescopium, Microscopium. Trois autres portent le nom d'artistes ou de leurs instruments : Sculptor, Caelum = Burin, Pictor. Enfin, il appelle l'une d'elles Mensa = Table, en l'honneur de la Montagne de la Table qui surplombe de façon si caractéristique la ville du Cap. Ces constellations sont représentées dans le planisphère qu'il fait graver à son retour, et dans une belle peinture due à son amie Anne-Louise Le Jeuneux (figure 4).



Fig.4. Le planisphère de La Caille, peinture d'Anne-Louise Le Jeuneux, ca. 1755. On y voit les principales étoiles de l'hémisphère austral, superposées aux figures des constellations. L'encadrement date des années 1880.

© J-M Kollar Observatoire de Paris.

Ses observations terminées, La Caille doit attendre trois mois son retour en France. Il va en profiter pour faire la triangulation d'un degré de méridien, la première mesure de ce genre dans l'hémisphère austral (figure 5). Il mettra deux mois à la réaliser, se déplaçant en char à bœufs dans la campagne du Cap. Cependant, il obtient un résultat étrange : lorsqu'il combine la longueur de l'arc avec la différence de latitude qu'il observe entre les extrémités nord et sud de sa triangulation, il trouve un rayon local plus grand que celui que l'on obtient à la même latitude dans l'hémisphère nord. La Terre serait-elle plus aplatie au sud qu'au nord ? La Caille est peu satisfait de ce résultat, refait en partie ses mesures, mais doit se rendre à l'évidence, concluant : « Un observateur n'est tenu que de répondre de l'exactitude de ses mesures, & non de

leur résultat ». En réalité, il n'a pas vu que les mesures de latitude étaient faussées par l'attraction des montagnes qui se trouvent près des extrémités, un phénomène qu'avait soupçonné Pierre Bouguer (1698-1758) aux abords du volcan Chimborazo, lors de son expédition au Pérou. Au XIX^e siècle, les astronomes du Cap referont entièrement les mesures de La Caille avec des moyens plus performants, pour constater que sa longueur était excellente mais que la verticale était faussée de quelques secondes de degré aux extrémités de l'arc, par l'attraction des montagnes voisines.

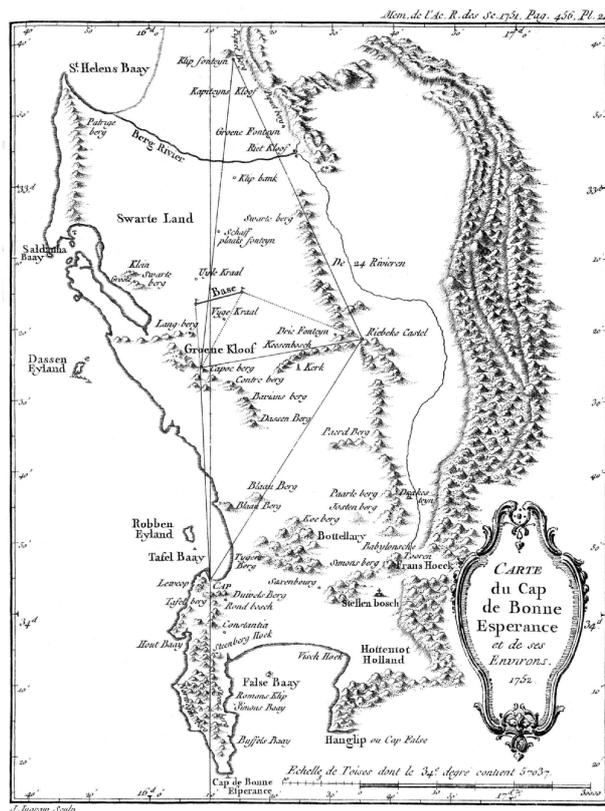


Fig.5. Carte de La Caille, montrant sa triangulation dans la province du Cap. Beaucoup des fermes qu'il a visitées sont indiquées. © Bibliothèque de l'Observatoire de Paris.

Au cours de ses voyages, La Caille note tout ce qu'il voit dans son *Journal historique du voyage fait au Cap de Bonne-Espérance*, paru après sa mort et qui connaîtra un vif succès de librairie : c'est le premier témoignage objectif de la nature et de la vie des colons du Cap.

Lorsqu'enfin La Caille pense s'embarquer pour la France, il reçoit un ordre du Roi qui l'enjoint de se rendre à l'Île de France (aujourd'hui Île Maurice) et à l'Île Bourbon (La Réunion) pour en mesurer la longitude et la latitude. Or il sait que ce travail a déjà été fait par son ami navigateur et hydrographe Jean-Baptiste d'Après de Manneville (1707-1780), celui-là même qui l'avait amené au Cap, et en qui il avait toute confiance. Que faire ? La

communication avec Paris prend au minimum trois mois dans chaque sens. Il se résout à se rendre dans ces îles, et comme il s'y «ennuie extraordinairement» il fait la carte de l'Île de France ! Mais voilà une année de perdue. La Caille arrive à Paris le 28 juin 1754 après une absence de 3 ans et 8 mois, dont 9 mois en mer. Il y reprend son enseignement et ses observations, notamment celles de la comète périodique qui réapparaît en 1759 et qu'il baptise Comète de Halley. Il meurt le 21 mars 1762, probablement de la rechute d'une maladie tropicale dont il avait précédemment réchappé sans aucun traitement, mais qui est cette fois traitée par des saignées qui l'ont littéralement vidé de son sang. C'était un siècle après Molière !

Nous avons dit que lors de ses interminables traversées La Caille s'était préoccupé de la possibilité de déterminer la longitude en mer. Jusqu'à lui, on ne pouvait l'estimer qu'à partir de la vitesse du navire et du temps écoulé, en tentant de corriger sa trajectoire apparente de l'effet du vent et des courants. Autant dire que l'on ne savait pas où l'on était, les erreurs pouvant être de plusieurs milliers de kilomètres au milieu de l'océan Indien, par exemple. Pour faire mieux, il aurait fallu emporter à bord une horloge précise conservant l'heure de Paris, et comparer cette heure avec l'heure locale déterminée par l'observation du Soleil à bord : la différence est la longitude par rapport au méridien de Paris. La Caille met au point une méthode qu'il n'a pas imaginée, mais qu'il est le premier à mettre en pratique : celle des distances lunaires. Supposons que l'on dispose d'une bonne éphéméride de la Lune, qui donne sa position dans le ciel en fonction de l'heure à Paris. Si on mesure en mer sa distance angulaire à des étoiles de position connue, ce qui est possible avec l'octant, ancêtre du sextant, inventé en 1731 par John Hadley (1682-1744), on connaît sa position, donc l'heure à Paris grâce à l'éphéméride : en la comparant à l'heure locale, on obtient la longitude. Cependant, il

y a des complications car la Lune n'est pas très loin, d'où un problème de parallaxe, et son diamètre apparent varie car son orbite n'est pas circulaire. La Caille fait calculer par Tobias Mayer (1723-1762) et son ami Clairaut des éphémérides précises à une minute de degré près, et propose aux navigateurs une méthode graphique qui leur permet de corriger leurs observations de ces complications. Tout cela est publié pour la première fois dans la *Connaissance des Temps* pour 1761 et va connaître un vif succès dans le monde entier. Certes John Harrison (1693-1778) et ses émules horlogers construisent à cette époque des chronomètres capables de conserver l'heure en mer avec une grande fiabilité, mais ils sont si chers que peu de marins peuvent se les offrir. La méthode de La Caille a un grand avenir devant elle, et sera utilisée par beaucoup jusqu'aux années 1830 !

Ainsi l'abbé La Caille est encore un modèle pour le chercheur d'aujourd'hui : rigueur scientifique, ouverture d'esprit, échanges suivis avec ses collègues nationaux et étrangers, tentatives réussies d'être utile à la société. Il est très satisfaisant que sa mémoire soit conservée, non seulement par un cratère lunaire qui porte son nom, mais par les quatorze constellations qu'il a créées dans l'hémisphère austral.

Pour en savoir plus :

- Visitez l'exposition à l'Observatoire de Paris : *L'abbé La Caille, découvreur du Ciel austral* ; jusqu'au 28 mars 2014. Visite incluant celle de l'Observatoire, par groupes ou individuels : inscription à visite.paris@obspm.fr ; voir <http://www.obspm.fr/parcours-science-et-histoire-du-site-de-paris.html>.

- Lisez le livre qui vient de paraître : Glass, I.S. (2013) *Nicolas-Louis de La Caille, astronome et géodésien*, traduit par J. Lequeux, EDP Sciences et Observatoire de Paris, 25 €.

NDLR : Retrouvez une conférence de J. Lequeux sur *Nicolas Louis de La Caille* sur : <http://acces.ens-lyon.fr/clea/conferences>



Dernière minute ...

Nos envoyés spéciaux nous annoncent qu'après avoir rétrogradé devant le bélier (2005), les gémeaux (2007), le Cancer (2009) et le Lion (2011), Mars va bientôt rétrograder dans la constellation de la Vierge.

L'événement va bien sûr être suivi de près par tous les paparazzi, et vous pouvez vous aussi y participer et y faire participer vos élèves en envoyant vos photos au CLEA. Elles seront publiées au fur et à mesure.

Vous trouverez toutes les précisions nécessaires : planétaire héliocentrique pour retracer la trajectoire de Mars et le suivre en temps réel dans le référentiel géocentrique, feuille de calcul sous Géogebra pour retracer les trajectoires, cartes, animations et diaporamas, scripts pour Stellarium, conseils pour la prise de vues ... sur le site du CLEA.

À vos appareils photos."

<http://acces.ens-lyon.fr/clea/aLaUne/retrogradation-de-mars-en-2014/>

Jean-Michel Vienney



AVEC NOS ÉLÈVES

ISON et la gravité en classe de troisième

Roseline Primout – Jamet, Bordeaux

La comète ISON était annoncée comme la comète de l'année. Roseline Primout-Jamet nous présente comment elle a utilisé le sujet pour traiter notions de physique avec ses élèves de classe de troisième.

En sciences physiques, le programme de mécanique en classe de 3^{ème} commence par la gravitation avec la question : « Pourquoi les planètes gravitent-elles autour du Soleil et les satellites autour de la Terre ? » Et pourquoi ne pas profiter du passage de la comète ISON pour démarrer cette partie ?

En utilisant les données du site du CLEA, j'ai présenté la photo de la comète ISON, prise par Jean Charles Fare le 4 novembre 2013, à mes élèves.



En utilisant le logiciel Stellarium*, nous avons vu la comète se rapprocher du Soleil jusqu'au 28 novembre, puis s'en éloigner. Et alors, les questions ont surgi : C'est quoi une comète ? Elle vient d'où ? Et pourquoi elle s'approche du Soleil ? On peut la voir ? C'est dangereux ? Elle va exploser ? Elle peut tomber sur la Terre ?... Les peurs ancestrales sont toujours d'actualité...

J'ai ainsi pu reparler du système solaire et de ses astres, et expliquer la raison pour laquelle la communauté scientifique s'intéresse tant aux comètes. À partir d'un extrait d'une vidéo de l'émission « C'est pas sorcier », j'ai abordé la gravité et justifié la trajectoire de la comète ISON vue dans Stellarium. Puis en comparant la carte des orbites de PANSTARRS et d'ISON parue dans le CC n°141 (p.15), j'ai soulevé deux questions : celle de la visibilité d'une comète à l'oeil nu et la possible désintégration de la comète ISON vers le 28 novembre.

Pour clôturer, cette séance, j'ai présenté plusieurs « œuvres » anciennes représentant des comètes, œuvres qui ont permis, en plus des écrits, de dater le passage des comètes et de calculer leur périodicité. Les élèves ont préparé cette partie chez eux (voir l'annexe¹). Traiter l'histoire de l'art fut l'occasion de revenir sur les craintes anciennes qui se perpétuent sans un minimum de connaissances scientifiques.

Le passage de la comète ISON m'a permis de traiter l'actualité dans l'esprit du socle commun de compétences qui demande que les élèves sachent utiliser des connaissances dans divers domaines scientifiques comme dans celui de la compréhension de l'organisation de l'univers.

Références :

L'adoration des mages : www.savoirs.essonne.fr

La tapisserie de Bayeux :

www.univers-astronomie.fr/

La caricature de Desrais : gallica.bnf.fr/

La comète de 1857 : pgj.pagesperso-orange.fr/

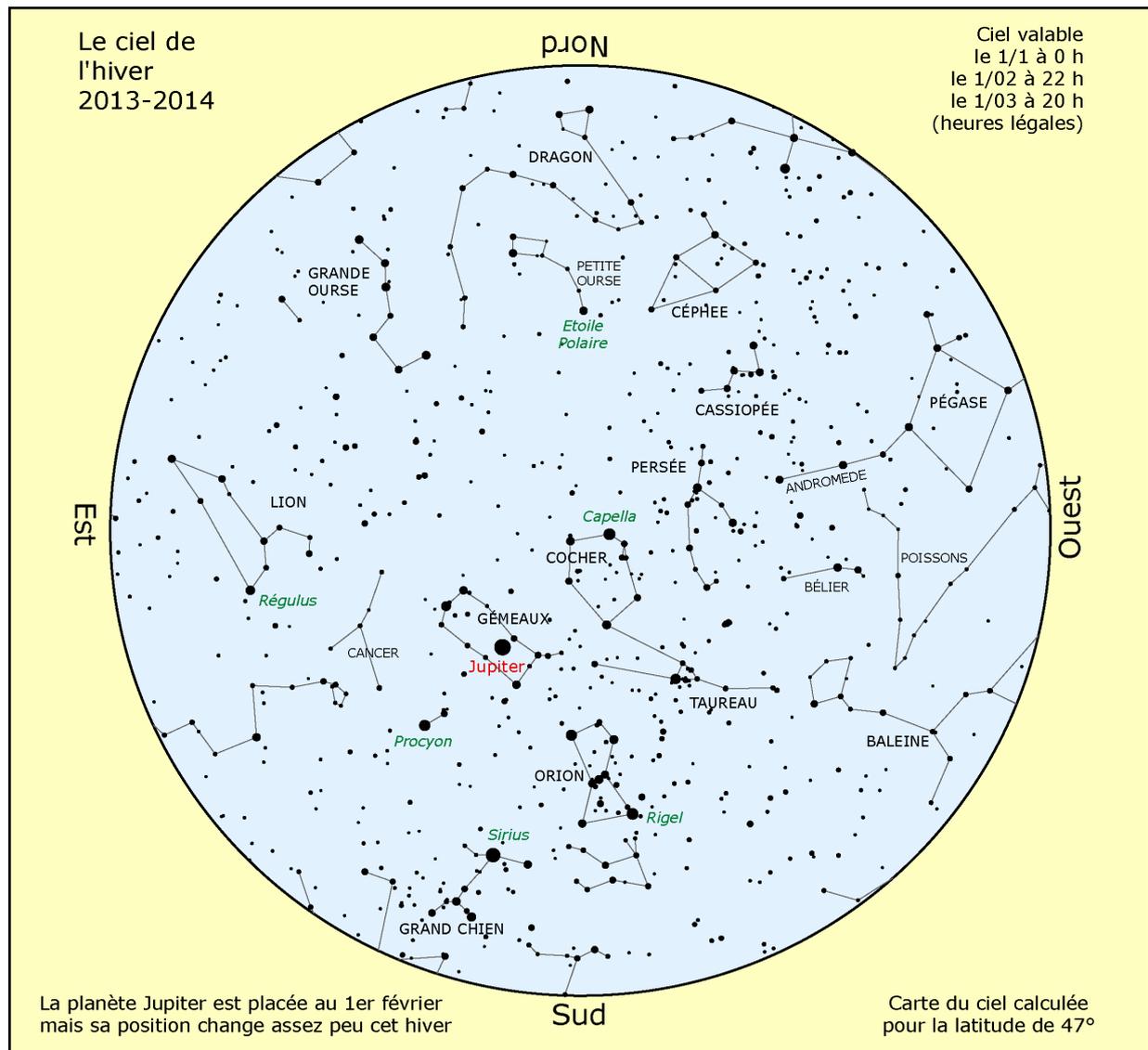


*La comète ISON le 19 novembre 2013
Crédit: NASA/MSFC/Aaron Kingery.*

**Dans le logiciel Stellarium, il suffit de chercher la comète sous son nom scientifique (C/2012 S1) à partir du 20/11/13 par exemple et pendant la journée car elle est proche du Soleil. Faire défiler les jours en appuyant sur la touche « = ». Il ne faut pas aller trop loin en décembre, sinon la comète, vue de la Terre, réalise une rétrogradation !*

¹ Les abonnés « numériques » trouveront l'annexe à <http://accs.ens-lyon.fr/clea/vieclea/nouvelles-productions/cc/cc144/>

Le ciel de l'hiver 2013 - 2014



Visibilité des planètes

Mercure est observable le soir fin janvier et début février. C'est une bonne période pour la trouver.

Vénus est encore visible le soir fin décembre. À partir de la mi janvier, elle devient planète du matin (éclat maximal le 11 février, élongation maximale le 22 mars). Étant donné l'inclinaison du plan de son orbite, il se trouve qu'elle passe le 11 janvier à 5° au nord du Soleil. Les bons observateurs pourront alors l'observer à la fois le soir et le matin, ce qui est assez rare.

Mars est visible le matin dans la constellation de la Vierge. Elle passe à l'opposition le 8 avril (rétrogradation du 1^{er} mars au 21 mai).

Jupiter est au plus près de la Terre le 4 janvier. Vous avez donc tout l'hiver pour l'observer tranquillement le soir.

Saturne est visible le matin mais encore lointaine. Elle sera plus proche au printemps (opposition le 10 mai).

Quelques événements (heures légales)

21/12 : solstice de décembre à 18 h 11.

3/01 : maximum de l'essaim d'étoiles filantes des Quadrantides.

4/01 : la Terre passe au périhélie, au plus près du Soleil, à 147 105 000 km.

5/01 : Opposition de Jupiter (Soleil Terre Jupiter alignés)

11/01 : conjonction inférieure de Vénus.

1/02 (soir) : rapprochement Lune Mercure.

19/02 (fin de nuit) : rapprochement Mars Lune Spica.

26/02 (matin) : Vénus à 0,3° de la Lune, au sud-est.

20/03 : équinoxe de printemps à 17 h 57.

Lune

Nouvelle Lune : les 1/01, 30/01, 1/03.

Pleine Lune : les 16/01, 14/02, 16/03

LE COIN DES PETITS CURIEUX

Qu'est-ce qu'une comète ?

ALEXIS – Avec mes copains nous avons parlé d'ISON. Certains voulaient savoir ce que c'était. J'ai bien dit que c'était une comète, mais ils ont ajouté « et c'est quoi une comète ? ». Alors je leur ai dit que je te demanderai.

ÉMILIE – C'est un gros bloc de poussières et de glace de quelques kilomètres de long. Le plus gros connu faisait 180 km, mais en général ils ne font que quelques kilomètres de long.

ALEXIS – Alors c'est tout petit ! Pourtant Nicolas m'a dit qu'elle faisait 2 millions de kilomètres.

ÉMILIE – En fait ce que je t'ai décrit ce n'est que le noyau de la comète. En général ce noyau est très loin du Soleil, dans des zones où la température est très basse, comme dans un super congélateur.

ALEXIS – Est-ce que les comètes sont dans le Système solaire ?

ÉMILIE – Ça dépend. Certaines tournent autour du Soleil, on dit qu'elles sont périodiques, d'autres se rapprochent du Soleil, tournent autour et s'éloignent définitivement, d'autres en s'approchant du Soleil sont détruites ou tombent sur lui.

ALEXIS – Mais d'où elles viennent ?

ÉMILIE – On pense qu'il y a un très grand réservoir de comètes, appelé nuage de Oort qui serait tout autour du Soleil, mais très loin.

ALEXIS – À la distance des planètes ?

ÉMILIE – Non, beaucoup plus loin. Tu vois ce pamplemousse sur la table ? Imagine que c'est le Soleil. Dans ce cas quelle serait la taille de la Terre ?

ALEXIS – Celle d'une noisette

ÉMILIE – Non, plus petite qu'une tête d'épingle et elle serait située à 10 mètres du pamplemousse. Neptune, la planète la plus éloignée du Soleil serait à 300 m du pamplemousse, pratiquement au niveau de l'école.

ALEXIS – Ouah !

ÉMILIE – Et bien, les comètes du nuage de Oort seraient tout autour du pamplemousse à près de 500 kilomètres, comme la distance qui nous sépare de Paris.

ALEXIS – C'est pour cela qu'on ne les voit pas.

ÉMILIE – Et oui, car les noyaux sont très petits.

ALEXIS – Je vais aller dire ça aux copains.

ÉMILIE – Attends, ce n'est pas fini. Quand ce gros bloc de glace et de poussières se rapproche du Soleil, il chauffe et dégage des gaz, surtout de la vapeur d'eau, et des poussières qui entourent le noyau sur plusieurs milliers de km.

ALEXIS – À peu près la taille de la Terre ?

ÉMILIE – Oui. Parfois plus grand, jusqu'à 200 000 kilomètres ou plus. C'est ce que l'on appelle la chevelure de la comète. Et quand la comète se rapproche encore du Soleil, à la distance des planètes, arrivant de Paris, on pourrait dire qu'elle arrive dans le village, il se produit autre chose de merveilleux. Les radiations du Soleil et les particules qui le quittent, ce que l'on appelle vent solaire, entraînent les poussières et les gaz de la comète pour former les queues de la comète. Ce sont ces queues qui ont plusieurs millions de km de long.

ALEXIS – Ah ! Oui, c'est ce que l'on voit sur les photos à l'arrière de la comète.

ÉMILIE – Non, les queues ne suivent pas la comète, elles sont toujours à l'opposé du Soleil puisque ce sont les radiations ou les particules venant du Soleil qui les créent.



ALEXIS – Oui ça fait comme une étoile filante.

ÉMILIE – Attention, le phénomène que l'on appelle étoile filante ne dure au mieux que quelques secondes. La comète ne va pas traverser le ciel ni en une minute, ni en une heure. Elle se déplace très lentement parmi les étoiles. C'est en l'observant d'un jour à l'autre que l'on constate son déplacement.

ALEXIS – Est-ce que je vais tout retenir ?

ÉMILIE – Bien sûr ! Allez, va raconter cela à tes copains.

Jean Ripert ■

LECTURE POUR LA MARQUISE

Que faisiez-vous avant le Big Bang ?

Edgard Gunzig, Odile Jacob 2008



Le contenu de ce livre étonne le lecteur à plus d'un titre ; il l'enrichit sur les liens entre les modèles cosmologiques et la réalité, ou ce que nous croyons qu'elle est de nos jours.

Beaucoup d'idées intéressantes sont brassées au long de ces 323 pages. L'ouvrage se fractionne en cinq gros chapitres.

1- Cyrano, le baron et le Big Bang

Quel lien peut-il exister entre Cyrano de Bergerac, le baron de Münchhausen et le Big Bang ? Tout le monde ne connaît pas les aventures guignolesques du baron en question. Disons que, parmi ses nombreuses aventures burlesques, le pauvre baron, alors qu'il était tombé dans un lac et qu'il s'envasait inexorablement, eut l'idée folklorique de remonter vers la surface en tirant...sur ses propres bottes ! « bootstrap » disent les Anglais. Cette idée extravagante et fantaisiste va à l'encontre de toutes théories physiques : la mise en œuvre d'une action intérieure à un système ne peut être d'aucun recours sans un point d'appui extérieur. Et pourtant l'auteur de l'ouvrage va montrer que tout se passe dans l'Univers comme s'il se créait à partir de... rien.

Le premier chapitre reprend brièvement les grands classiques de l'histoire de la physique : la tour de Pise, le bateau de Galilée, l'invention du concept de champ, l'éther aux propriétés contradictoires, les relations de Lorentz, l'espace-temps, enfin Einstein et son rêve d'unification ...

2 - Ascenseur pour l'Univers

L'auteur explique comment les expressions mathématiques d'Einstein *encapsulent les caractéristiques du milieu matériel d'une part et celles de la géométrie qu'il conditionne d'autre part*. Sans recours à aucune relation mathématique, il montre que symboliquement les équations d'Einstein se traduisent par une relation dans laquelle le membre de gauche concerne l'aspect géométrique tandis que celui de droite englobe matière-énergie. Il reprend clairement les principales bases de la relativité : les événements ne se déroulent pas **DANS** l'espace-temps mais **AVEC** l'espace-temps. L'univers de s'étend pas **DANS** quelque chose, mais **EN** soi. C'est l'espace-temps lui-même qui s'étend. Au sujet du Big Bang, il estime que cette théorie concentre en définitive tous les espoirs déçus. Dans toutes les histoires cosmologiques, dit-il, il s'agit d'un *événement dramatique, une catastrophe*

primordiale singulière qui s'est produite dans un passé fini, une singularité mathématique. Tous les paramètres physiques et géométriques, au cœur des équations d'Einstein, y deviennent *simultanément infinis* dans un *passé fini*. Pour l'auteur c'est le vide quantique qui devient l'acteur essentiel, au point que l'on peut parler de *l'histoire cosmologique du vide*.

3 - Quand la matière rayonne

Sont présentés différents problèmes :

- *le truc mathématique de Planck* pour expliquer le rayonnement du « corps noir » et l'origine de la physique quantique ;

- les ondes de matière et l'étrange comportement du photon qui ne se comporte pas de la même manière *lorsque nous le regardons ou lorsque nous ne le regardons pas* ;

- les relations d'indétermination de Heisenberg qui expriment quantitativement *l'écart minimal, irréductible par principe, entre la connaissance quantique maximale et la certitude classique* ; ce qui est l'occasion de rappeler, avec Niels Bohr, qu'il est faux *de penser que le but de la physique est de découvrir ce que la nature EST*. *La physique concerne uniquement ce que nous pouvons DIRE de la nature* ;

- l'état quantique et le vide quantique qui, loin d'être vide, est un réservoir potentiel de matière. Avec la *théorie quantique des champs*, on arrive à la conception moderne qui délaisse une idée solidement inscrite dans la pensée contemporaine, celle de particule. Dorénavant les particules apparaissent comme des excitations de champs. Page 174, on peut lire : *La permanence de la matière a disparu (1)*. *La hiérarchie entre champs et particules s'est ainsi complètement inversée au cours du passage de la théorie quantique à la théorie quantique des champs : les particules deviennent des êtres subalternes...*. Le vide devient créateur !

4 - Les aventures cosmologiques du vide quantique

À l'évidence, une quarantaine de pages étant consacrées au vide, il ne doit pas s'agir du vide tel qu'on l'imagine habituellement. Celui de Parménide dans son affirmation : *l'être est, le non-être n'est pas* (2). Nous arrivons à un paradoxe de plus : le vide serait un *réservoir potentiel de matière* ! *Les particules des états excités du vide* !

C'est dans ce chapitre qu'est développée l'idée d'un « bootstrap » *géométrico-matériel*. Le vide quantique renfermerait en lui-même son propre réservoir d'énergie. L'espace-temps en se dilatant pourrait engendrer son propre contenu, *se faire naître lui-même*.

5 - Une histoire de l'univers

Tout ce qui précède permet, dans ce chapitre, de nourrir une histoire du cosmos qui repose sur les concepts propres à la relativité générale et à la théorie quantique des champs. Cette histoire fait l'économie de la singularité du Big Bang imposée par le modèle cosmologique standard. Comme d'autres théories contemporaines, elle ne possède ni début ni aboutissement.

En conclusion

Toutes les parties de cet ouvrage se lisent facilement et clairement. Ce qui constitue une sorte d'exploit car il est particulièrement difficile d'avoir accès à des notions aussi complexes sans utiliser le guidage mathématique qui sous-tend leur émergence. L'auteur nous entraîne méthodiquement en suivant un fil rouge qui lui permet d'explorer de nombreuses pistes.

Pour se faire comprendre il n'hésite pas à utiliser des analogies qu'il expose avec élégance et soin.

Par exemple pour traduire l'apparition progressive des quatre interactions fondamentales dans l'univers, il s'intéresse aux températures critiques de l'eau, qui correspondent à des changements de phase. Il fait observer que, dans l'eau liquide, la vitesse des ondes électromagnétiques, celle de la lumière par exemple, est la même dans toutes les directions. Quand l'eau passe à l'état solide, des cristaux de glace apparaissent ; les cristaux privilégient trois directions particulières de l'espace selon lesquelles la vitesse de

la lumière est différente. Le changement de phase a modifié certaines propriétés physiques. L'isotropie de la vitesse de la lumière dans l'eau liquide a disparu mais les molécules, dans le cristal, gardent le souvenir de leur état liquide (car le processus est réversible). L'auteur imagine un habitant du cristal, un être dont l'univers serait constitué par le réseau cristallin en voie de formation (3). Il montre comment dans notre univers on peut observer un processus analogue concernant les symétries associées aux interactions fondamentales, ces symétries se manifestant dans l'espace mathématique abstrait des formalismes de ces interactions. L'histoire du refroidissement de l'eau apparaît comme un exemple générique d'une histoire thermique.

- (1) Pour Parménide (début du V^e siècle avant JC), on ne peut penser que l'être, ce qui existe, on ne peut pas connaître le non-être, ce qui n'existe pas. L'être est sans naissance et sans destruction, l'être ne peut pas venir du non-être.
- (2) Remarquons que ce livre est paru avant qu'on établisse l'existence du boson scalaire de BEH.
- (3) La démarche est analogue à celle utilisée par G. Gamow pour décrire le monde de Monsieur Tompkins explorant l'atome ; George Gamow ; M. Tompkins ; Dunod Paris 1992 ; introduction de JC Pecker.

Christian Larcher ■

Mots croisés solaires instruments anciens

Horizontalement

1. Ligne d'astrolabe.
2. Thomas Mann pour le CLEA. Comme les pièces du nocturlabe.
3. Matière qui a aussi servi à faire des astrolabes. Pour ranger ses astrolabes.
4. Partie d'un anneau plus mathématique qu'astronomique. Avant le DVD. Abréviation à viser avec le nocturlabe.
5. Article. On en trouve toujours au moins une étoile sur l'astrolabe.
6. Instrument astronomique.
7. Causa. À faire quand on construit un astrolabe ou un nocturlabe.
8. On pourrait y construire des instruments. Son bâton sert à mesurer des angles. Démonstratif.
9. Rectifiées.
10. Comme le Soleil ou presque dans 10 milliards d'années. Comme des astrolabes anciens.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1												
2				■						■		■
3							■					
4						■				■		
5			■		■						■	
6		■										
7						■		■				
8				■						■		
9											■	
10							■					■

Verticalement

1. Type de sphère céleste.
2. Adulé mais tout remué. Comme Spirit sur Mars.
3. Partie d'un astrolabe. Comme une image de bon instrument.
4. Celui de Jacob sert à mesurer les angles. Cœur d'une étoile.
5. Une bonne touche. Vieux français ?
6. Unité pas SI. Est aussi SI. Télescope cosmologique d'Atacama.
7. À moitié noir. Ça croustille.
8. Modérer. Tête d'œuf.
9. Instruments astronomiques.
10. Village suisse. Direction du lever d'Antarès.
11. On y a aussi fabriqué des astrolabes. Point de chute. Le copain de Kirchhoff avait le sien.
12. Elles peuvent être armillaires.



Photo prise par Thomas Desion, le 12/11/13 à l'aube depuis le plateau de Lorgues (83). Résultat de 10 poses de 1 min, 5 darks, 5 offsets, 5 flats traitement Deep-skystacker et pixinsight. Le seeing était de 5/10. La comète se trouvait dans la constellation de la Vierge à 0,9 UA de la Terre.

Vous trouverez d'autres images d'ISON, entre autres celles prises par Michel Vignand depuis La Réunion à : <http://aces.ens-lyon.fr/clea/aLaUne/comete-ison/>

Assemblée Générale du CLEA dimanche 23 mars 2014 de 9 h à 17 h

FIAP, 30 rue Cabanis - 75014 PARIS

(possibilité de loger sur place dans la limite des places disponibles, à voir directement sur leur site <http://www.fiap.asso.fr/>)

L'après-midi
conférence d'André Brahic
« À la recherche de nos origines et de la vie dans l'Univers »

L'École d'Été d'Astronomie du CLEA

aura lieu du 19 au 26 août 2014 au Col Bayard - Gap.

Vous trouverez tous les renseignements sur notre site prochainement.

Solutions des mots croisés page 39

Horizontalement : 1. Almuzantarat ; 2. Rue. Trois ; 3. Marbre. Étuis ; 4. Idéal (en maths, un idéal est une partie d'un anneau). CDR (pour CDROM). EP (Étoile Polaire) ; 5. Le. Orion ; 6. Nocturlabe ; 7. Amena. Axer ; 8. IUT. Jacob. Ce ; 9. Retouchées ; 10. Éteint. Usés.

Verticalement : 1. Armillaire ; 2. Luade (lettres du mot adulé mélangées). Muet ; 3. Mère. Nette ; 4. Bâton. Oi ; 5. Ctrl. Cajun.

6. Are. OT (OT = Office de Tourisme ou SI = Syndicat d'Initiative). ACT (Atacama Cosmology Telescope) ; 7. No. Crunch ; 8. Tiédir. Oeu ; 9. Astrolabes ; 10. Nax. SE (sud-est) ; 11. Asie. Bec (Kirchhoff et Bunsen sont les fondateurs de la spectroscopie) ; 12. Sphères.