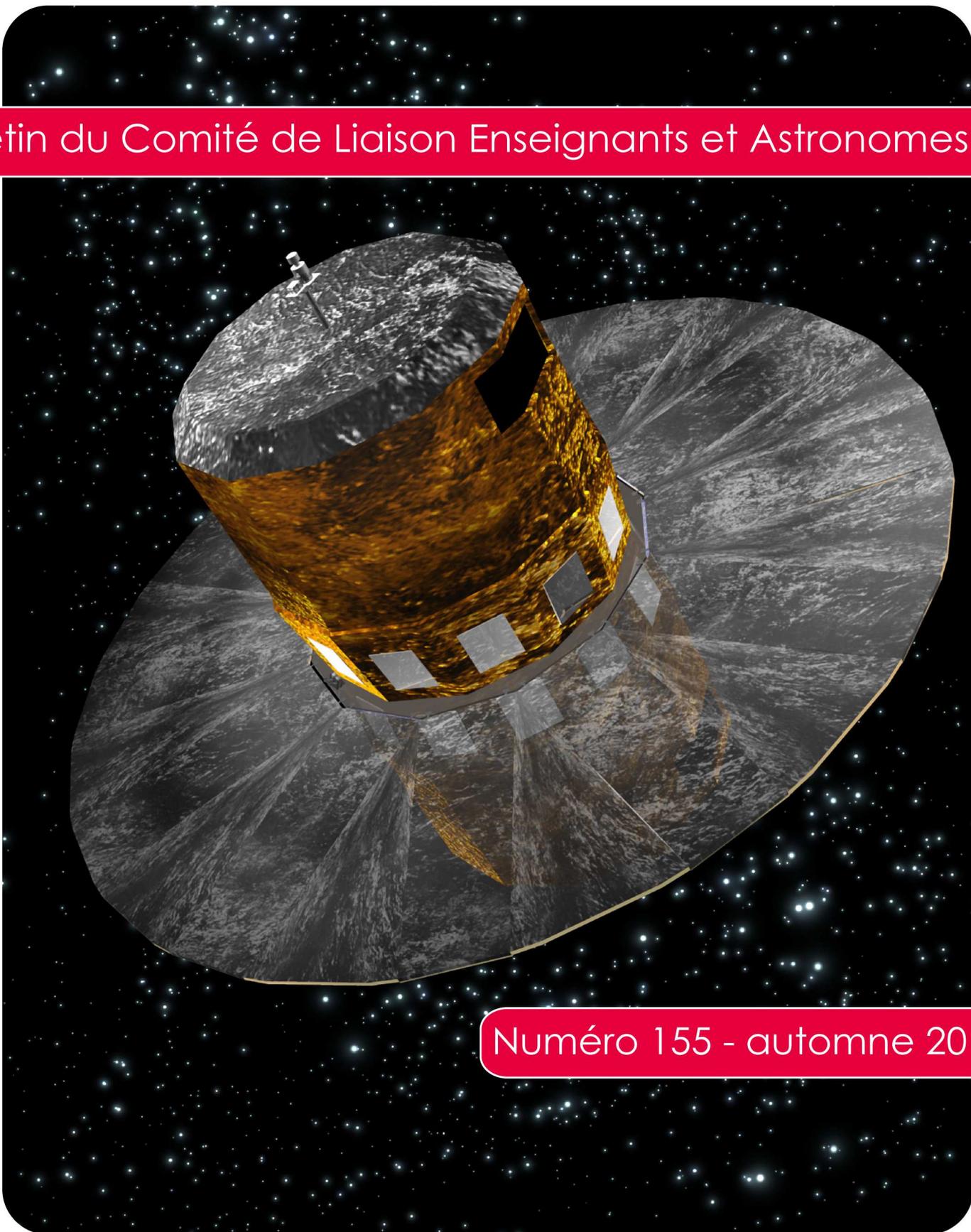


LES CAHIERS CLAIRAUT

N° 155 - Septembre 2016 9 €

Bulletin du Comité de Liaison Enseignants et Astronomes



Numéro 155 - automne 2016



ISSN 0758-234X

Comité de Liaison Enseignants et Astronomes

Le **CLEA**, Comité de Liaison Enseignants et Astronomes, est une association déclarée à but non lucratif (loi de 1901), fondée en 1977. Elle réunit des enseignants et des astronomes professionnels qui veulent ensemble promouvoir l'enseignement de l'astronomie à tous les niveaux de l'enseignement et dans les organismes de culture populaire.

Le **CLEA** organise des stages nationaux (Écoles d'Été) et régionaux. Ces stages sont ouverts aux enseignants de l'école, du collège et du lycée et, de manière générale, à tous les formateurs. On s'efforce d'y conjuguer information théorique et travaux pratiques (observations, travaux sur documents, mise au point de matériels didactiques et recherche du meilleur usage de ces matériels, etc.). Le **CLEA** favorise les échanges directs entre enseignants et astronomes, hors de toute contrainte hiérarchique.

L'organe de liaison du **CLEA**, les **CAHIERS CLAIRAUT**, est une revue trimestrielle. On y trouve des articles de fond (astrophysique, histoire, philosophie, enseignement...), des comptes rendus d'expériences pédagogiques, des notes critiques de livres récents, des innovations en matière d'activités pratiques.

Le **CLEA** a mis en place une liste de diffusion afin de permettre des échanges rapides entre les abonnés.

Présidents d'honneur :

Jean-Claude Pecker
Lucienne Gouguenheim
Georges Paturol

Bureau du CLEA pour 2016

Présidente : Cécile Ferrari
Trésorière : Sylvie Thiault
Trésorière adjointe : Chantal Lecoutre
Secrétaire : Danièle Imbault
Secrétaire adjoint : Jean-Luc Fouquet

Responsables des groupes

Vie associative : Jean-Michel Vienney

Cahiers Clairaut : Christian Larcher

Productions Pédagogiques : Pierre Causeret

Communication : Charles-Henri Eyraud

École d'Été d'Astronomie : Danièle Imbault

Responsables du site :

Francis Berthomieu et Charles-Henri Eyraud



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

Jean-Eudes Arlot, Francis Berthomieu, Nathalie Cartier, Pierre Causeret, Jacques Chatelon, Jean-François Consigli, Sylvie Cuenot, Jean-Luc Fouquet, Christian Larcher, Chantal Lecoutre, Georges Lecoutre, Philippe Merlin, Frédéric Pitout, Stéphanie Ploquin, Roseline Primout, Jean Ripert, Joël Robic, Béatrice Sandré, Véronique Tarazona, Isabelle Vauglin, Jean-Michel Vienney.

Les auteurs recevront plusieurs numéros 155, afin de faire connaître la revue autour d'eux.

Le satellite Gaia (Crédit ESA).

Lancé fin 2013, il doit mesurer les caractéristiques de plus d'un milliard d'objets célestes. Les coordonnées sont obtenues avec une précision extraordinaire : moins de 7 microsecondes d'arc pour les étoiles de magnitude inférieure à 12, c'est mieux que le diamètre d'une pièce d'un centime sur la Lune vue depuis la Terre.

À l'heure où sort ce numéro, un premier catalogue devrait être publié, Gaia Data Release 1, donnant la position et la luminosité d'environ un milliard d'étoiles ainsi que la parallaxe trigonométrique et le mouvement propre de quelques deux millions d'étoiles...

Les Cahiers Clairaut

Automne 2016

Éditorial

En astronomie comme dans la vie de tous les jours nous avons besoin de repères. Le mot repère provient du verbe latin « reperire » qui signifie retrouver. Théoriquement pour déterminer une position à la surface de la Terre il suffit de connaître deux angles, la latitude et la longitude du point considéré.

Depuis très longtemps on sait déterminer la latitude d'un point en observant la hauteur du Soleil à midi vrai. Par exemple en construisant avec nos élèves un « anneau astronomique » (p. 28). Cet appareil permet de mesurer approximativement la « distance zénithale » du Soleil. Mais comment vérifier où et quand le Soleil passe au zénith ? (p. 20). La définition précise de la latitude elle-même prête à confusion, s'agit-il de la latitude géocentrique, géodésique, géographique ou astronomique ? Vous êtes invité à revisiter « une histoire de latitude », sans perdre le nord (p. 15).

La détermination de la longitude fut plus laborieuse. Actuellement l'utilisation du GPS simplifie tout, mais pourquoi le GPS n'indique-t-il pas exactement zéro lorsque l'on est exactement sur le méridien origine à Greenwich ? C'est une question fréquente (p. 18).

Pour le repérage des astres célestes on utilise d'autres coordonnées (p. 13). Mais en déduire leur distance à la Terre est une autre affaire (p. 23). Le récent passage de Mercure devant le Soleil fut non seulement l'occasion d'initier sans danger les écoliers à l'astronomie (p. 33) mais aussi de mesurer au lycée, selon la méthode de Halley, la distance de la Terre au Soleil (p. 35).

Un autre article en page six vous invite à utiliser avec vos élèves la démarche historique de Galilée concernant les satellites de Jupiter.

Enfin un article généraliste fait le point de la recherche française en astrophysique (p. 2)

Bonne rentrée scolaire à tous ceux qui sont concernés.

Christian Larcher, pour l'équipe.

Témoignage

Où va l'astrophysique française ? 2. Des étoiles et des planètes

Frédéric Pitout p 2

Avec nos élèves

Galilée observe les satellites de Jupiter

Roseline Primout p 6

Thème : REPÉRAGE

p 12

Notions de base

Francis Berthomieu, Pierre Causeret p 13

Article de fond

Histoire de latitude, de quoi perdre le nord...

Jacques Chatelon p 15

Reportage

À la recherche du zénith

Joël Robic p 20

Jeux

Mots croisés : les étoiles

Pierre Causeret p 22

Article de fond

La mesure astrométrique du ciel

Jean-Eudes Arlot p 23

Réalisation

L'anneau astronomique

Philippe Merlin p 28

Ciel d'automne

Pierre Causeret p 32

Avec nos élèves

Mercure et l'unité astronomique

Francis Berthomieu p 35

Avec nos élèves

En attendant Mercure

Jean-François Consigli p 33

Vie associative

Stage de Valdrôme

Jean-Luc Fouquet p 37

EEA Gap 2016

Sylvie Cuenot, Stéphanie Ploquin p 39

Solutions mots croisés

p 40

TÉMOIGNAGE

Où va l'astrophysique française ? 2. des étoiles et des planètes

Frédéric Pitout, Observatoire Midi-Pyrénées

Institut de Recherche en Astrophysique et Planétologie, Observatoire Midi-Pyrénées, Toulouse.

Frédéric Pitout fait le point de la recherche dans les programmes nationaux d'astrophysique. Dans ce second article il traite des résultats obtenus, des pistes de recherche et des projets pour les années à venir dans le domaine des étoiles et des planètes.

Nous poursuivons notre tour d'horizon de l'astrophysique française avec la physique stellaire, la planétologie et les relations entre le Soleil et les environnements planétaires.

Programme National de Physique Stellaire (PNPS)

La physique stellaire constitue un des fondements de l'astrophysique moderne. Comment les étoiles naissent, brillent et s'éteignent ont été des questions qui ont, au début du 20^e siècle, taraudé une brillante génération de chercheurs. Aujourd'hui, la communauté concentre ses efforts sur l'origine des étoiles de toutes masses, sur la formation de disques protoplanétaires, sur le magnétisme des étoiles et la détection des planètes extrasolaires.

Des techniques d'observation comme l'astérométrie (étude des modes d'oscillations des étoiles) qui a donné les clés de la structure interne des étoiles ou l'observation à très haute résolution qui permet de résoudre les étoiles, contribuent aux avancées de cette discipline.

Le milieu interstellaire présente des structures filamenteuses denses. Elles sont alimentées par des flots de matière guidés par le champ magnétique et apparaissent perpendiculaires aux filaments (figure 1). On pressentait que ces filaments étaient le siège privilégié de la formation d'étoiles, on a montré que la dynamique des filaments était étroitement liée au taux de formation d'étoiles. De plus, quand plusieurs filaments coalescent, cela peut mener à la formation d'amas d'étoiles ou d'étoiles massives.

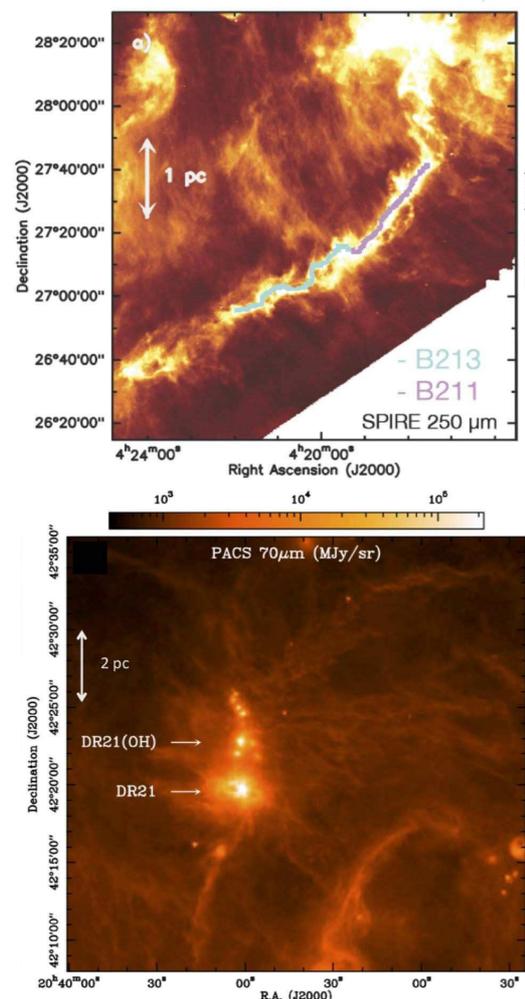


Fig.1. En haut filament de faible masse dans la région du Taureau ($d=140$ pc) vu par Herschel. Des striations (de part et d'autre du filament) indiquent des flots guidés par le champ magnétique local ; en bas, filament de forte masse qui forme des étoiles massives et un amas de plusieurs centaines d'étoiles dans Cygnus X ($d=1400$ pc). Un réseau de filaments alimente la structure centrale massive et très dense.

Les observations récentes de protoétoiles (étoiles en formation) montrent l'accrétion et l'éjection de matière mais aussi la présence de disques protoplanétaires (figure 2). En fait, il semble bien que la formation de planètes commence très tôt dans la formation d'une étoile.

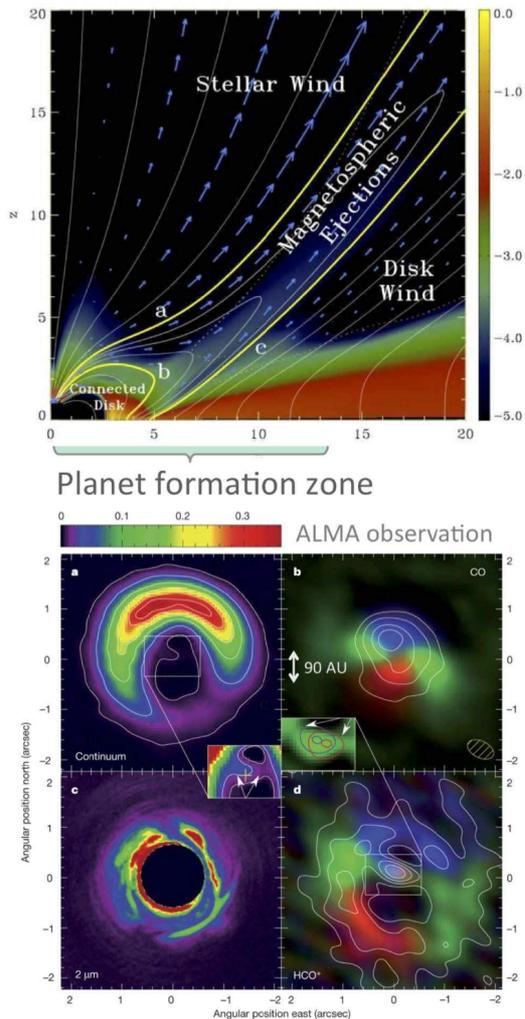


Fig.2. À gauche, la structure MHD des parties internes d'un disque d'accrétion d'une proto-étoile au moment où les planètes se forment ; à droite, un disque un peu plus évolué (observé par ALMA) où des planètes sont déjà formées. Les effets sur le disque, comme les sillons et les perturbations sur le disque externe, sont bien observés.

On peut trouver curieux que la recherche d'exoplanètes se pratique au sein du programme national dédié à la physique stellaire. En fait, avant que les techniques d'imagerie directe, encore difficiles à mettre en œuvre se vulgarisent, les exoplanètes sont encore pour la grande majorité détectées indirectement en observant leur étoile par vélocimétrie Doppler, transit photométrique, lentille gravitationnelle ou autre. Les physicien-ne-s stellaires sont donc très impliqué-e-s dans la recherche de planètes extra-solaires. Après les détectations, l'étape suivante est de caractériser les environne-

ments des exo-planètes. C'est ce à quoi sont dédiés les futurs télescopes spatiaux CHEOPS et PLATO (ESA) ainsi que le futur spectro-polarimètre infra-rouge SPIROU qui sera installé au CFHT (en infra-rouge, le rapport de contraste entre une planète et son étoile est plus à l'avantage de la détection de la planète.)

Programme National de Planétologie (PNP)

La planétologie se trouve à l'interface des sciences de l'Univers et des sciences de la Terre ; d'ailleurs nombre de planétologues ont une formation en géophysique. Les objets du système solaire étant à portée de sonde, il se trouve que la planétologie est une des rares disciplines de l'astrophysique qui bénéficient de mesures *in situ*. On distingue généralement la planétologie « solide » et des environnements planétaires neutres qui sont traités par le PNP, et les environnements planétaires ionisés qui font davantage l'objet du programme national Soleil-Terre (voir ci-après). Les préoccupations du PNP sont l'origine du Système solaire (et des systèmes planétaires plus généralement), la structure et l'évolution des planètes, l'habitabilité et l'exobiologie.

La France s'est fait une spécialité de la modélisation de la formation et de l'évolution du système solaire (modèle de Nice). La prise en compte de la migration vers le Soleil des planètes géantes a permis de comprendre la distribution des masses des planètes telluriques et leur temps de formation, et d'expliquer les différences entre la Terre et Mars. Un modèle de formation des anneaux des planètes géantes a aussi été développé. Ce dernier modèle prédit entre autres la formation d'un satellite au bord externe des anneaux de Saturne, satellite qui a été observé par la sonde Cassini (figure 3).

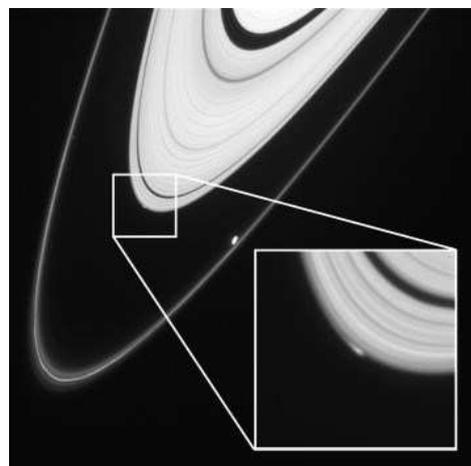


Fig.3. Image de la sonde Cassini montrant dans le zoom la formation d'un satellite.

Dans l'actualité de ces dernières années, il est difficile de ne pas mettre l'accent sur le grand succès du rover Curiosity qui implique de nombreuses équipes françaises.

La récolte de données et de résultats est considérable. Du chlore sous diverses formes a été détecté par l'instrument SAM. L'instrument ChemCam a lui analysé plus de 5 000 échantillons de roche (figure 4), mettant en évidence la présence d'eau de pH neutre et de faible salinité.

L'exploration du système solaire passe par des sondes comme MAVEN qui explore l'environnement de Mars. Mars qui sera encore l'objet d'une attention particulière avec les missions InSIGHT (NASA), ExoMARS (ESA) et Mars 2020 (NASA). C'est vers Mercure que la mission Bepi Colombo (coopération ESA-JAXA) s'envolera pour étudier la planète la plus proche du Soleil et ses interactions avec le vent solaire. Jupiter et ses satellites seront l'objet des missions JUNO (NASA) et JUICE (ESA).

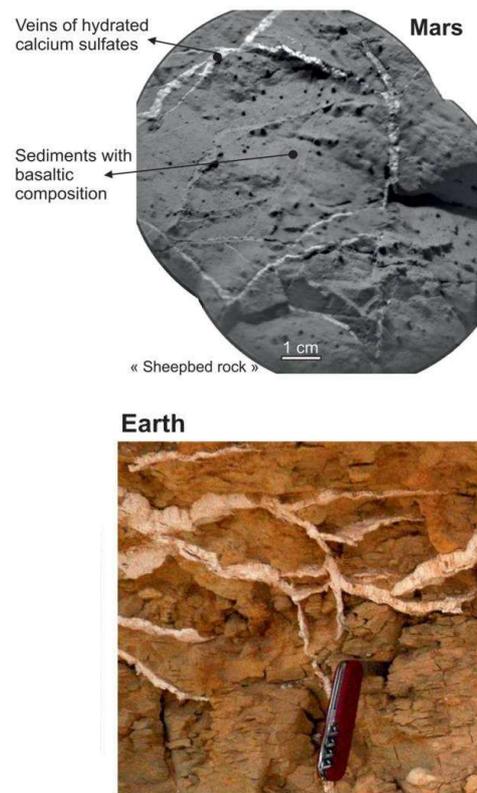


Fig.4. Analyse de la chimie du sol martien par ChemCam en haut montrant différentes compositions de roches et son analogue sur Terre en bas.

Programme National Soleil-Terre (PNST)

Le PNST traite des relations entre le Soleil et l'environnement ionisé de la Terre (et par extension de l'environnement des planètes du système solaire). Il fédère la communauté des physiciens solaires et des physiciens des plasmas naturels planétaires. Pour ce qui est de l'environnement terrestre, qui constitue un laboratoire naturel de physique des plasmas, et des relations Soleil-Terre, ces recherches s'appuient sur des mesures au sol (magnétomètres, instruments optiques pour l'observation des aurores polaires, radars pour le sondage ionosphérique, etc.) et des mesures *in situ* grâce à des missions satellitaires dédiées (figure 5).

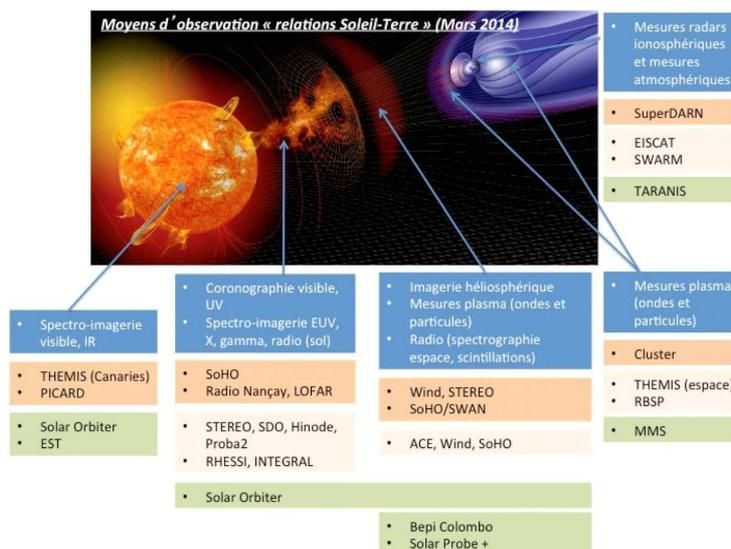


Fig.5. Principaux moyens d'observation utilisés au PNST (en bleu, type d'observation ; en orange foncé et en orange clair, outils disponibles avec responsabilités principale et complémentaire ; en vert, principaux projets futurs).

Les années 2000 ont été marquées par la formidable moisson de résultats des sondes européennes Cluster qui ont étudié la magnétosphère terrestre, sa dynamique interne et ses interactions avec le vent solaire. Elles ont levé le voile sur des phénomènes physiques comme la pénétration du vent solaire dans la magnétosphère par reconnexion magnétique, l'accélération des électrons en zone aurorale et les phénomènes impulsifs dans la queue de la magnétosphère. Cluster a aussi permis de mettre en évidence l'effet de la turbulence par la dissipation d'énergie magnétique des échelles MHD (10^5 km) vers les échelles électroniques (1 km).

Du côté des observations de notre étoile, c'est la mission STEREO d'observation solaire qui a mis son empreinte sur les années 2010. Ces deux satellites ont observé le Soleil sous deux angles différents, donnant ainsi une vision stéréoscopique de l'activité solaire. Les chercheurs ont ainsi eu la possibilité de déterminer la direction et la vitesse de propagation des éjections, chose impossible avec un seul satellite. Les propriétés de ces éjections peuvent ensuite, s'il est avéré qu'elles atteignent la Terre, être corrélées avec l'activité géomagnétique (figure 6). Dans le cadre de la météorologie de l'espace, il s'agit à terme de pouvoir prévoir les perturbations de l'environnement terrestre à partir de l'observation du Soleil.

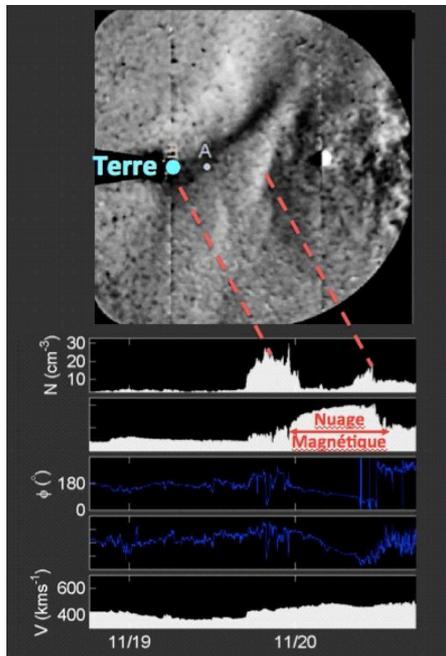


Fig.6. En haut une image du vent solaire obtenue par une sonde STEREO, montrant deux fronts de vent solaire de haute densité électronique percutant l'environnement terrestre (le Soleil est sur la droite, en dehors de l'image. Le cercle noir/blanc à droite dans l'image est Vénus ; en bas des mesures in situ du vent solaire obtenues à proximité de la Terre révèlent

que ces deux fronts sont séparés par un "nuage magnétique", région de champ magnétique torsadé.

Ces dernières années ont été marquées par le lancement des missions multi-satellites Swarm pour l'étude du magnétisme et de l'ionosphère terrestre, et Magnetospheric Multi Scale (MMS) dont le but est de percer les mystères du processus de reconnexion magnétique, processus physique qui intervient dans la pénétration des vents stellaires dans les magnétosphères planétaires, dans l'éjection de matière solaire mais aussi plus universellement dans la formation des jets de plasmas dans les disques d'accrétion des protoétoiles ou de noyaux actifs de galaxies. Côté solaire, les sondes Solar Orbiter (ESA) et Solar Probe Plus (NASA) tenteront de s'approcher au plus près de notre étoile.

Bilan

Malgré une conjoncture économique pas toujours réjouissante et l'épineux problème du recrutement des jeunes chercheurs (si peu de postes pour toujours plus de prétendants) que nous avons volontairement éludés ici, on peut affirmer que l'astrophysique française se porte bien malgré tout. La preuve en est la foison de résultats scientifiques de qualité et l'implication continue des équipes françaises dans les missions et instruments actuels ou futurs.

On aura remarqué des recouvrements thématiques entre tous les programmes nationaux : les résultats concernant le milieu interplanétaire sont utilisés par les planétologues et les physiciens stellaires pour comprendre la formation des planètes et des étoiles ; les avancées dans le domaine des astroparticules sont indispensables à la cosmologie, etc. De fait, des interactions interdisciplinaires que nous n'avons pas pu développer existent et elles font toute la richesse de l'astrophysique.

D'un point de vue plus comptable, les investissements lourds pour développer des instruments toujours plus performants peuvent être utilisés – et « amortis » – par différents programmes et projets, ce qui est souvent un argument le moment venu de sélectionner les projets instrumentaux futurs (précisons que pour ce qui est des télescopes au sol comme des missions spatiales, les coûts des projets instrumentaux sont tels qu'ils passent quasiment tous par des collaborations internationales.) Là encore, on a toutes les raisons de se réjouir : de nombreux et beaux projets sont en cours, ce qui laisse entrevoir des résultats enthousiasmants et, soyons-en certains, des surprises... ■

AVEC NOS ÉLÈVES

Histoire des sciences, actualité et évaluation en classe de 3^e

Roseline Primout, enseignante en physique-chimie au collège.

Lors du stage C.L.E.A. / PAF ayant eu lieu à Pau en décembre 2015, l'équipe du G.E.R.M.E.A. a reçu les stagiaires et a participé à l'animation des ateliers. Cet article est inspiré de leur activité « Galilée observe les satellites de Jupiter ». Elle consiste à utiliser une maquette pour positionner les satellites de Jupiter aux dates d'observation de Galilée pour mieux comprendre ses écrits. Une utilisation du logiciel Stellarium peut venir en complément. Cette séquence permet d'aborder la relativité du mouvement du point de vue de l'observateur avec des collégiens ou des lycéens tout en étudiant l'histoire des sciences. La maquette peut aussi être utilisée pour retrouver la période de chaque satellite.

Présentation de la maquette

La maquette réalisée par le G.E.R.M.E.A. est en bois, (groupe d'entraînement et de recherche pour les méthodes d'éducation active).

Jupiter est au centre. Les satellites sont situés sur des anneaux mobiles qui peuvent être positionnés à une date donnée grâce aux graduations en degré et à une ficelle fixée au centre. La référence 180° est choisie selon la direction Jupiter/Terre.

Seuls les diamètres des orbites des satellites sont à la même échelle. Il n'est pas possible d'en respecter une pour les diamètres des astres à cause de la taille de Jupiter.

Sur la photo ci-dessous, les satellites sont situés à la date du 7 janvier 1610.



Les satellites sont visibles vus au-dessus de Jupiter puis de profil, vus de la Terre en se positionnant vers l'indication 180°.



Séquence

Histoire des sciences

Cette séquence peut commencer par la présentation d'un extrait de *Sidereus Nuncius*, en situant Galilée dans son époque où la vision géocentrique du monde était imposée par l'Église. Le texte est agrémenté du dessin de Galilée, dans le but d'intriguer les élèves : Jupiter possède quatre satellites, astres ayant un mouvement circulaire, or Galilée observe trois astres ayant un mouvement rectiligne et pratiquement parallèle à l'écliptique. N'est-ce pas singulier ?

Galilée écrit : « le 7 janvier de cette année 1610, à une heure de la nuit, alors que j'observais les étoiles à la lunette, Jupiter se présenta, et comme je disposais d'un instrument tout à fait excellent je reconnus que trois petites étoiles, il est vrai toutes petites mais très brillantes, étaient près de lui (...); ces étoiles, bien que je crus d'abord qu'elles faisaient partie des fixes, me causèrent cependant quelque étonnement parce qu'elles semblaient se disposer exactement sur une ligne droite et parallèle à l'écliptique, et qu'elles avaient plus d'éclat que toutes les autres de même grandeur. »

Ori. * * ○ * Occ.

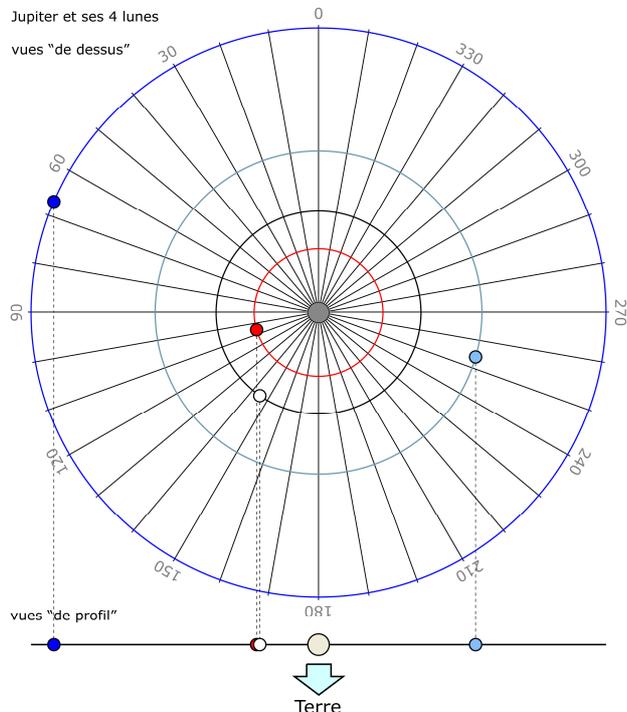
A partir de cet extrait, les élèves peuvent aussi être questionnés sur le fait que seules trois « étoiles » sont plus brillantes que les autres.

Retrouver les observations de Galilée

Les élèves vont utiliser la maquette pour retrouver les observations de Galilée. Deux documents sont distribués aux élèves :

-l'un avec textes et dessins de Galilée et les tableaux de données des positions de chaque satellite (*en annexe*) ;

- l'autre avec des schémas à compléter pour chaque date : une vue de dessus puis une vue de profil. Un exemple corrigé est donné à la date du 7 janvier 1610.



Les élèves doivent comparer leurs observations avec celles de Galilée, les positions des astres et les distances entre eux d'après les écrits du livre *Galilée* (voir bibliographie).

L'utilisation du logiciel *Stellarium* est possible, en vérification ou en complément, en faisant dérouler le temps pour observer les satellites qui se déplacent selon une droite proche de l'écliptique et selon des distances bien définies pour chacun, par rapport à Jupiter.

Galilée précise, aux dates choisies, qu'il observait à une heure de la nuit. En fait il positionnait l'origine une demi-heure après le coucher du Soleil. Ses observations étaient environ à 17 h solaire à Padoue, soit 18 h 30 pour Stellarium.

Comprendre les observations de Galilée

Suite à l'utilisation de la maquette, les élèves comprennent qu'un satellite peut en cacher un autre, qu'un satellite peut se cacher derrière Jupiter ou passer devant, expliquant la raison pour laquelle Galilée n'en a pas observé le bon nombre au début. Le choix des dates d'observations a été judicieusement sélectionné. Le 7, Europe cachait Io. Le 8, Callisto n'était pas dans le champ de la lunette (à illustrer avec Stellarium). Le 10, Europe cachait Ganymède et Io se situait derrière Jupiter.

De plus, les jeunes abordent la caractérisation du mouvement en intégrant que la position de l'observateur est cruciale.

Comprendre le raisonnement de Galilée

Mais comment Galilée a-t-il compris que les « étoiles » qu'il observait tournaient autour de Jupiter ? Le 8 janvier, il écrit :

« je commençai pourtant à me demander avec embarras comment Jupiter pouvait se trouver à l'est de toutes les étoiles fixes mentionnées plus haut alors que la veille il était à l'ouest de deux d'entre elles. Je soupçonnais que peut-être, contrairement aux prévisions astronomiques, ce mouvement était direct et que Jupiter avait pour cette raison dépassé ces étoiles du fait de son mouvement propre. C'est pourquoi j'attendis la nuit suivante »

Les observations des jours suivants vont infirmer cette hypothèse.

À la fin de ses observations, Galilée note en parlant des quatre « étoiles » :

« soit elles suivent, soit elles précèdent Jupiter à des distances analogues, qu'elles ne s'en écartent, tant à l'est, qu'à l'ouest, que d'intervalles très limités, et qu'elles poursuivent leurs révolutions autour de lui, tandis qu'elles effectuent ensemble leur révolution en douze ans autour du centre du monde.

De plus, elles tournent sur des cercles inégaux, ce qui se déduit clairement du fait que dans les plus grandes élongations, loin de Jupiter on ne peut jamais voir deux planètes en conjonction, alors que près de Jupiter elles sont parfois serrées, à deux, à trois et parfois toutes ensemble.

On comprend également que les révolutions des planètes qui décrivent des cercles les plus étroits autour de Jupiter sont les plus rapides. En effet les étoiles les plus rapprochées de Jupiter sont assez souvent observées à l'est quand la veille elles étaient à l'ouest, et vice-versa. »

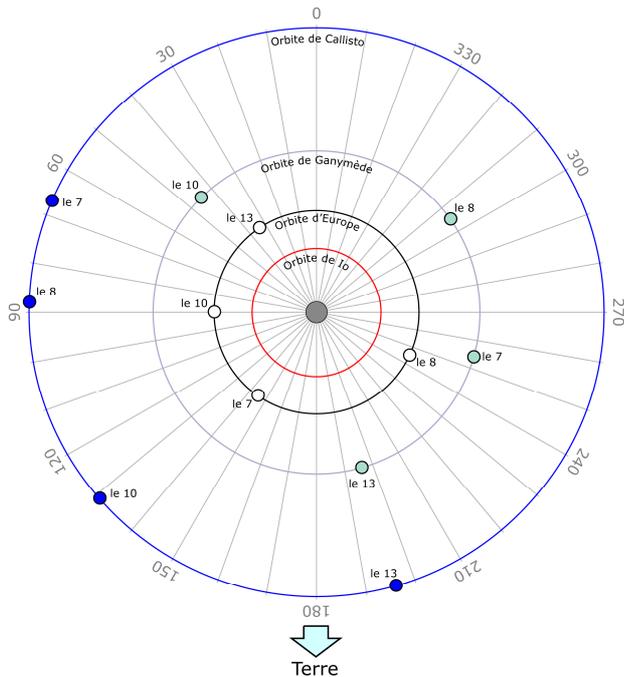
Demander aux élèves de souligner les arguments qui permettent de comprendre que le mouvement rectiligne des satellites vu de la Terre correspond à des mouvements circulaires vus au-dessus de Jupiter. Les élèves peuvent reprendre la maquette et faire tourner en continu chaque satellite en se positionnant de profil, soit en regardant de la Terre, pour mieux observer le mouvement de chaque satellite.

Galilée constate que les « étoiles » restent toujours proches de Jupiter et avancent en même temps. De plus, chacune s'éloigne d'une certaine distance maximale de Jupiter, entraînant des vitesses différentes pour chacune. Ce travail permet à Galilée d'affirmer que tous les astres ne tournent pas autour de la Terre. Ainsi, le modèle héliocentrique envisagé par Copernic est envisageable.

Prolongements

Calculer le nombre moyen de degrés parcourus par chaque satellite en un jour

Sur un schéma à l'échelle, positionner Europe, Ganymède et Callisto pour les quatre jours donnés afin de constater qu'en l'espace de cinq jours, Europe a fait plus d'un tour, Ganymède presque un tour et Callisto le tiers d'un tour. Plus le satellite est éloigné de Jupiter, moins il tourne vite.



À partir des données angulaires de chaque satellite, demander aux élèves de calculer le nombre de degrés parcourus par jour pour chacun.

	du 7 au 8 janv : 1 j	du 8 au 10 janv : 2 j	du 10 au 13 janv : 3 j	moyenne pour 1j
Europe	100°	205°	304°	101,5°
Ganymède	51°	100°	151°	50,3°
Callisto	21°	43°	65°	21,5°

Calculer la période des satellites

Par proportionnalité, les élèves peuvent calculer la période de chaque satellite.

Satellites	Europe	Ganymède	Callisto
angle pour 1 j en moyenne	101,5°	50,3°	21,5°
calcul attendu	$(360^\circ \times 1 \text{ j}) / 101,5^\circ$	$(360^\circ \times 1 \text{ j}) / 50,3^\circ$	$(360^\circ \times 1 \text{ j}) / 21,5^\circ$
période calculée	3,54 j = 3j 13h	7,16j = 7j 5h	16,74 = 16j 18h

Le cas d'Io : un réinvestissement

Le cas d'Io n'a pas encore été traité, car les élèves doivent comprendre que sa période est de courte durée. L'intégrer dans les calculs ci-dessus pourrait perturber certains élèves qui bloqueraient leur réflexion par incompréhension.

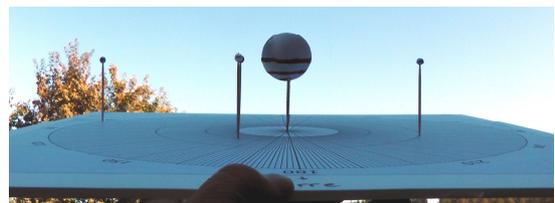
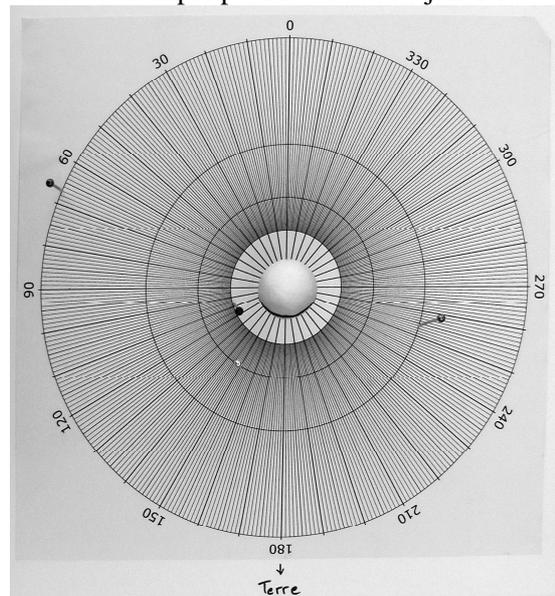
En effet, du 7 au 8 janvier, Io parcourt 204°. Mais entre le 8 et le 10 janvier, Io parcourt 407° et non 47° et entre le 10 et le 13 janvier, Io parcourt 611° et non 251°. Cette étape acquise, les élèves peuvent calculer la période d'Io selon la même méthode que précédemment (203,67° pour un jour soit $T = 1 \text{ j } 18 \text{ h}$).

Une maquette plus simple à construire

Le G.E.R.M.E.A. propose une maquette de belle qualité, pas toujours réalisable pour une question de temps ou de coût ou d'absence d'agent de laboratoire au collège.

Avec du carton plume, des perles de 6 mm de diamètre pour les satellites, une boule en ouate de 4 cm de diamètre peinte et des cure-dents, la maquette est facilement et rapidement réalisable.

En voici un exemple pour la date du 7 janvier.



L'échelle choisie pour les orbites est de 94 150 km pour 1 cm.

satellites	Io	Europe	Ganymède	Callisto
distance Jupiter-satellite	4,5 cm	7,1 cm	11,4 cm	20,0 cm

Conclusion

L'atelier proposé par le G.E.R.M.E.A. est interdisciplinaire car il touche les physiciens pour l'approche de la caractérisation du mouvement, le mathématicien avec un travail sur les angles, la proportionnalité et la conversion des jours en heure et l'historien, en abordant l'évolution de la science selon le contexte socio-politique de l'époque et des pays en question. Dans cet article, la séquence est guidée mais elle pourrait être envisagée sous forme de démarche d'investigation ou pour un thème d'E.P.I. au collège.

Bibliographie

Observations astronomiques, Galilée, décembre 2008, SEPEC.
Galilée observe les satellites de Jupiter, atelier du G.E.R.M.E.A.

Complément

Lors de l'école d'été du CLEA, Véronique Tarazona a réalisé une animation des satellites de Jupiter sur GeoGebra avec affichage des positions aux quatre dates correspondant aux observations de Galilée qui ont été choisies. Le fichier GeoGebra est disponible sur le site du CLEA.

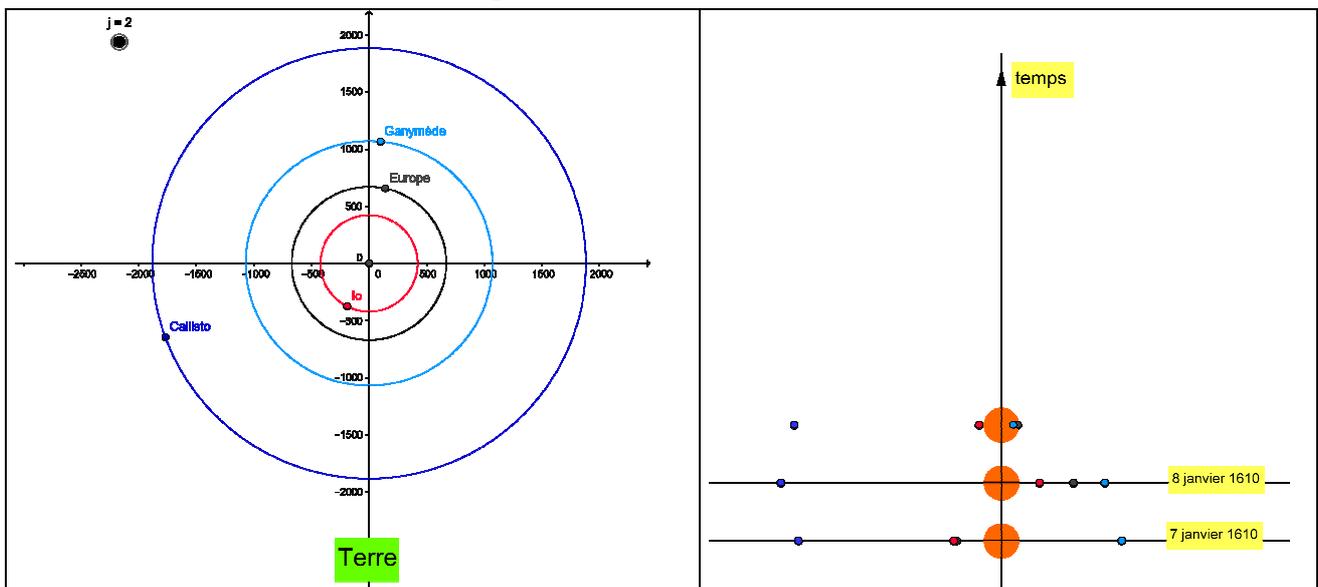


Fig.1. Position des satellites à $j = 2$. La fenêtre de gauche donne la position vue « de dessus » (du nord de l'écliptique), le curseur permettant de modifier le temps.
La fenêtre de droite indique la vue depuis la Terre, le temps se déroulant de bas en haut. Les positions des satellites restent affichées aux dates des observations de Galilée (ici les 7 et 8 janvier).

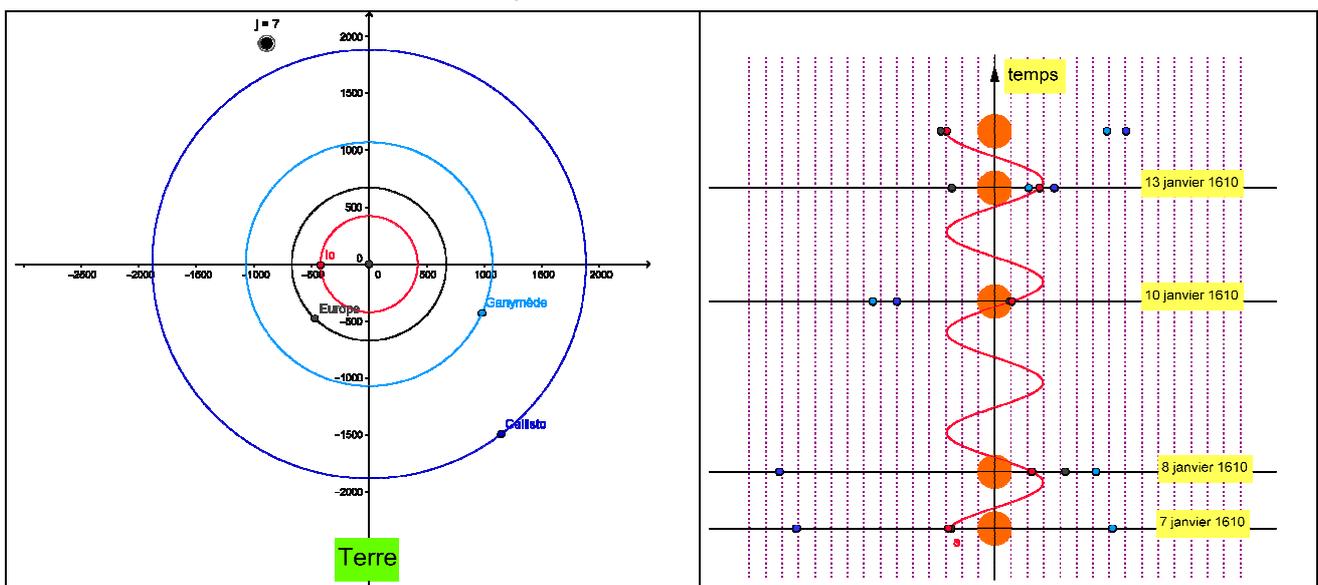


Fig.2. À la fin de l'animation ($j = 7$), on voit s'afficher la sinusoïde représentant les différentes positions de Io au cours du temps.

Annexe : Document élève

Observation du 7 janvier 1610 :

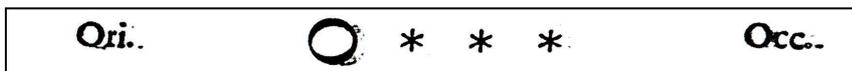
« ... deux étoiles se trouvaient à l'est, et une vers l'ouest. La plus orientale et l'occidentale paraissaient un peu plus grandes que la troisième. Je ne me préoccupais pas d'abord de leurs distances entre elles et Jupiter, car, comme je l'ai dit, je les avais prises pour des fixes. »



Io	Europe	Ganymède	Callisto
106°	145°	254°	67°

Observation du 8 janvier 1610 :

« ... le 8, guidé par je ne sais quel destin, j'étais retourné à la même observation, je trouvais une disposition très différente. Les trois petites étoiles étaient en effet toutes à l'ouest de Jupiter, et elles étaient plus proches entre elles que la nuit précédente et séparées mutuellement par des intervalles égaux »



Io	Europe	Ganymède	Callisto
310°	245°	305°	88°

Observation du 10 janvier 1610 :

« Mais le 10 les étoiles apparurent dans cette position par rapport à Jupiter : deux seulement étaient présentes, l'une et l'autre orientales. Je pensais que la troisième se cachait derrière Jupiter. Elles formaient comme auparavant un alignement avec Jupiter et étaient situées exactement le long du Zodiaque. Avec ces constatations je comprenais que de tels changements ne pouvaient en aucune manière être dus à Jupiter. »



Io	Europe	Ganymède	Callisto
357°	90°	45°	131°

Observation du 13 janvier 1610 :

« Le 13, pour la première fois j'aperçus quatre petites étoiles dans cette situation par rapport à Jupiter ; il y en avait trois à l'ouest et une à l'est ; elles formaient presque un alignement, car l'étoile médiane du groupe des occidentales déviait un peu de la ligne droite vers le nord. »

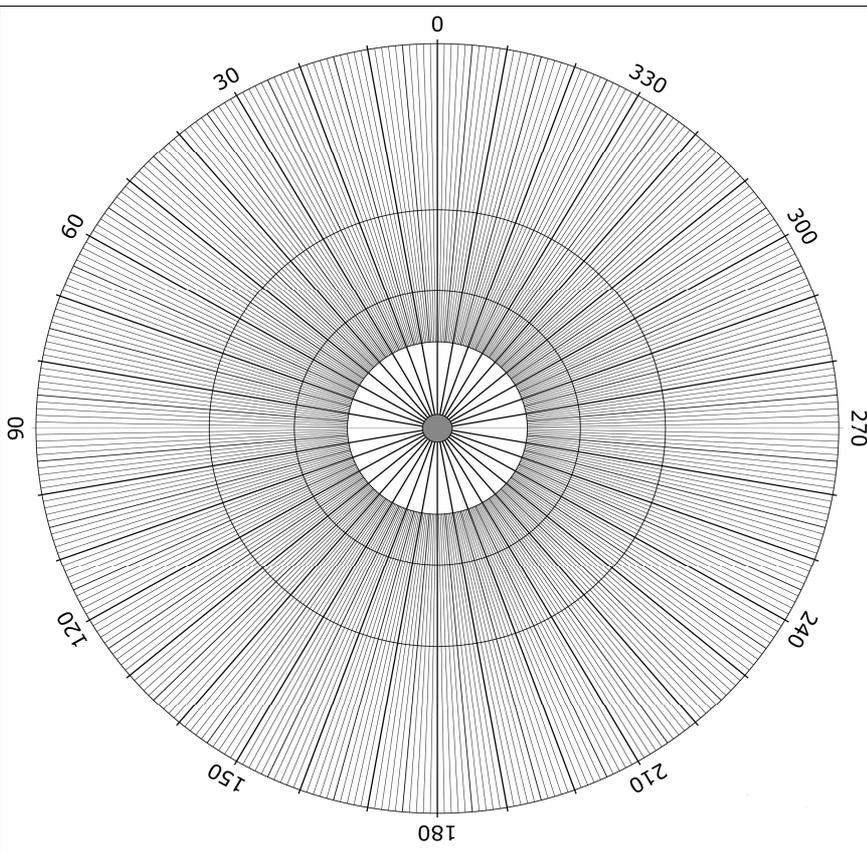


Io	Europe	Ganymède	Callisto
248°	34°	196°	196°

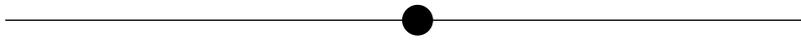
Données :

diamètre de Jupiter : 143 000 km

	Io	Europe	Ganymède	Callisto
Couleur des perles	rouge	blanche	bleu clair	bleu foncé
Diamètre	3 600 km	3 100 km	5 300 km	4 800 km
Distance au centre de Jupiter	422 000 km	671 000 km	1 070 000 km	1 883 000 km



↓
Terre



Fond du ciel,
le 7 janvier 2010 :
vue de profil



Fond du ciel,
le 8 janvier 2010 :
vue de profil



Fond du ciel,
le 10 janvier 2010 :
vue de profil



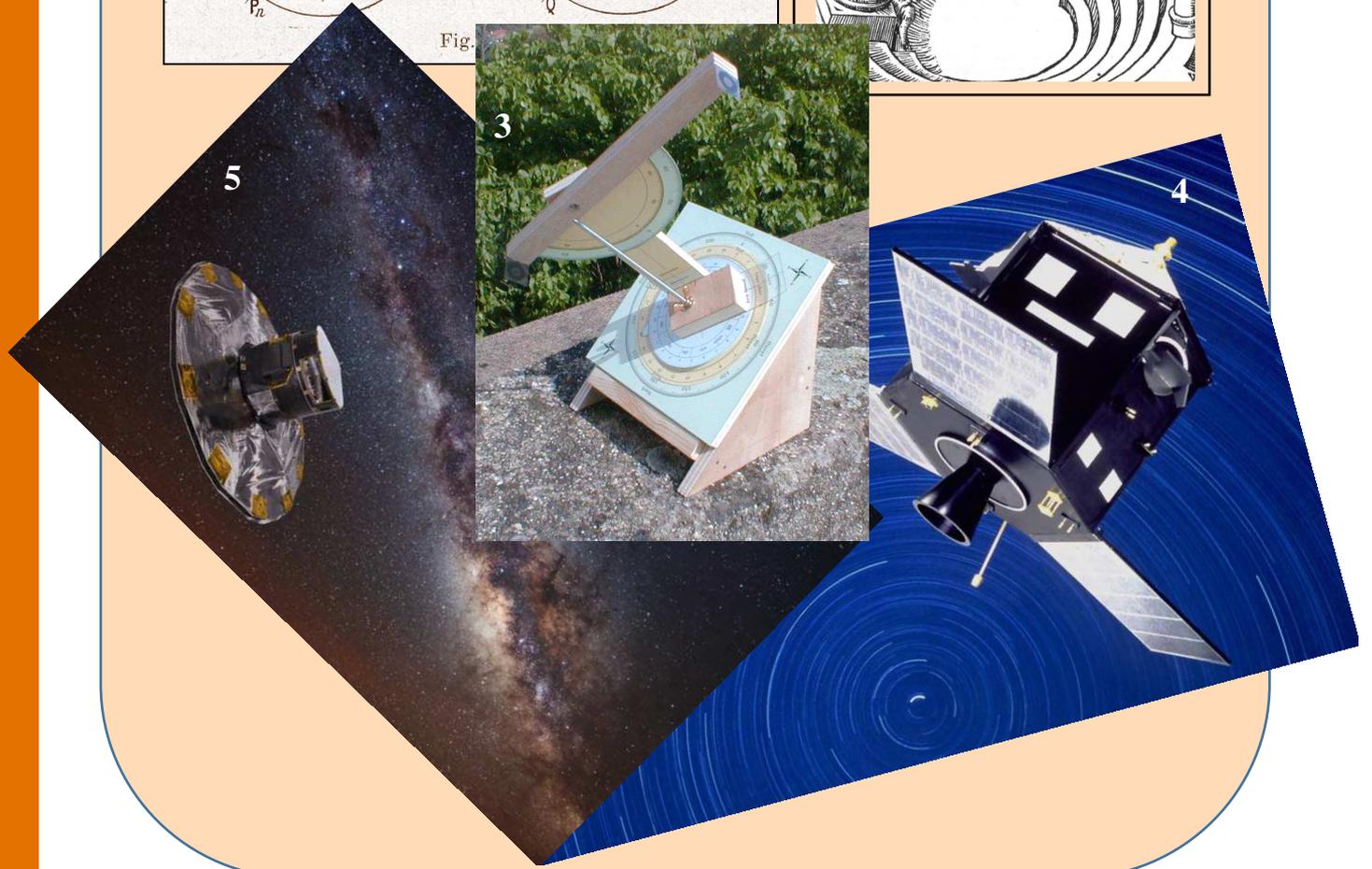
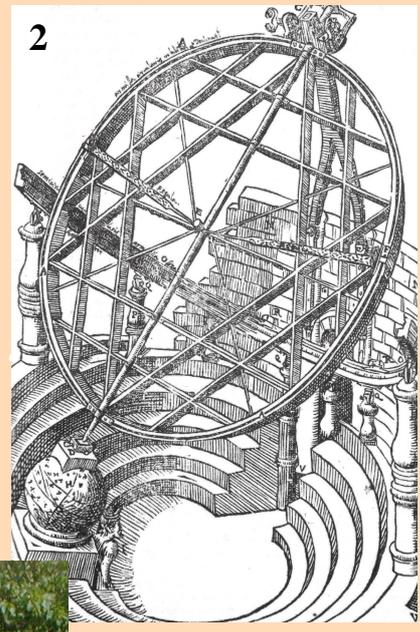
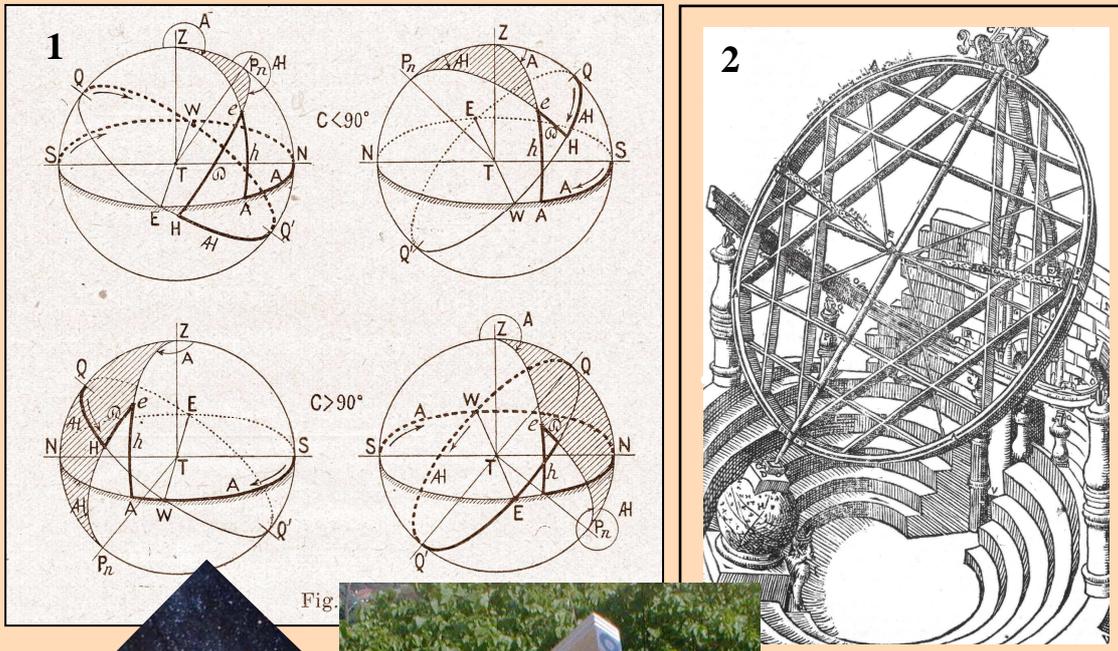
Fond du ciel,
le 13 janvier 2010 :
vue de profil

Consigne :

À chaque date, placer les satellites sur la vue de dessus puis sur la vue de profil.
Comparer les vues de profil avec les observations de Galilée pour une même date.



THÈME : REPÉRAGE



1. Schéma accompagnant des calculs de latitude dans un livre de navigation. On reconnaît le plan de l'horizon, les points cardinaux, le zénith, le plan de l'équateur, l'azimut A de l'étoile e, sa hauteur h, l'angle horaire AH, la déclinaison D. **2.** Grand cercle équatorial de Tycho Brahé. **3.** Théodolite permettant de mesurer directement les coordonnées d'un astre, soit en coordonnées horizontale, soit en coordonnées équatoriales (image), le support pour les coordonnées équatoriales est calculé en fonction de la latitude de l'observateur. **4.** Satellite Hipparcos. **5.** Satellite Gaia.

Les coordonnées célestes, notions de base

Francis Berthomieu, Pierre Causeret

Comment repérer la position d'un astre dans le ciel ?
Le plus simple est d'utiliser les coordonnées dites sphériques :

- deux angles suffisent pour savoir dans quelle direction se trouve l'astre ;
- si on donne en plus sa distance, on connaît alors sa position précise dans l'espace.

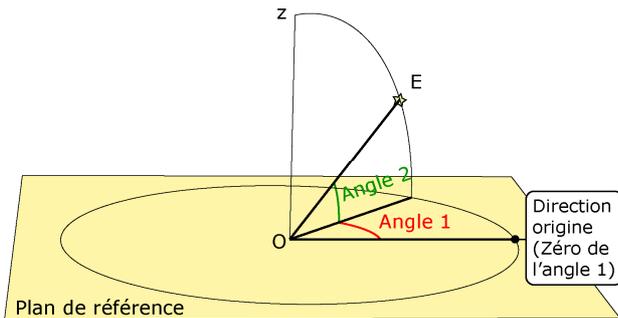


Fig.1. Principe des coordonnées sphériques. L'angle 1 est mesuré dans le plan appelé ici plan de référence. L'angle 2 est l'angle entre (OE) et le plan de référence.

On utilise ce type de système pour repérer un point à la surface de la Terre : dans ce cas, le plan de référence est le plan de l'équateur ; l'angle 1 s'appelle la longitude et est mesuré à partir de l'intersection du méridien de Greenwich et du plan de l'équateur ; l'angle 2 est la latitude¹.

Pour se repérer dans le ciel, différents types de coordonnées existent. En voici trois, utilisant tous le même principe des coordonnées sphériques.

Les coordonnées horizontales

Ce sont les coordonnées les plus naturelles pour un observateur sur Terre puisque le plan de référence est le plan horizontal.

Coordonnées horizontales	
Plan de référence	Le plan horizontal de l'observateur
Oz	Zénith
Zéro de l'angle 1	Deux conventions existent : le sud pour les astronomes, le nord pour les géographes.
Angle 1	Azimut, en degrés, dans le sens indirect, de 0 à 360°.
Angle 2	Hauteur, en degrés, de -90° (nadir) à + 90° (zénith)

¹ Il s'agit ici de latitude géocentrique.

Principal inconvénient de ce système : les coordonnées d'un astre changent continuellement à cause de la rotation de la Terre. Quand le Soleil se couche par exemple, sa hauteur diminue pour devenir négative et son azimut augmente (dans l'hémisphère nord).

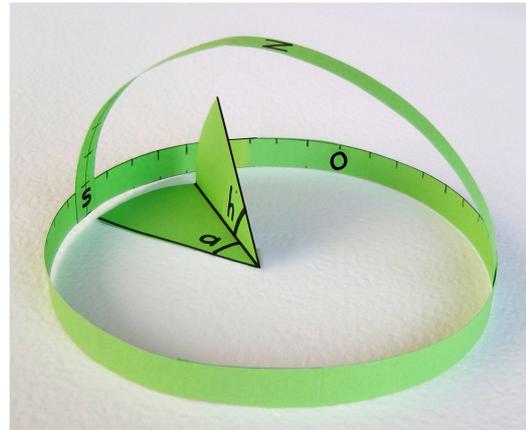


Fig.2a. Découpage simple illustrant les coordonnées horizontales, azimut (a) et hauteur (h).

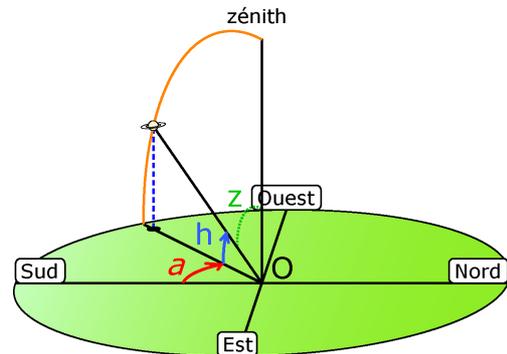


Fig.2b Schéma explicatif. En plus de a et h, on utilise parfois aussi la distance zénithale, angle entre la direction du zénith et la direction de l'astre. Elle varie de 0 à 180°.

Les coordonnées équatoriales

Coordonnées équatoriales	
Plan de référence	Le plan de l'équateur
Oz	Pôle nord céleste
Zéro de l'angle 1	Point vernal (voir figure 4)
Angle 1	Ascension droite α , en h, min et s ² , de 0 à 24 h.
Angle 2	Déclinaison δ , en degrés ; de -90° (pôle sud céleste) à +90° (pôle nord céleste)

² Heures minutes et secondes d'ascension droite sont bien des angles. Comme 24 h correspondent à un tour complet ou 360°, on a : 1 h d'AD = 15° ; 1 min d'AD = 15' ; 1 s d'AD = 15".

Ce repère est fixe par rapport aux étoiles³. Ce qui permet de faire des catalogues d'étoiles avec leurs coordonnées, ascension droite et déclinaison.

Le plan de référence est le plan de l'équateur céleste, prolongement de l'équateur terrestre, et l'angle 1 (l'ascension droite) est mesuré à partir du point vernal, direction du Soleil à l'équinoxe de printemps (figure 4).

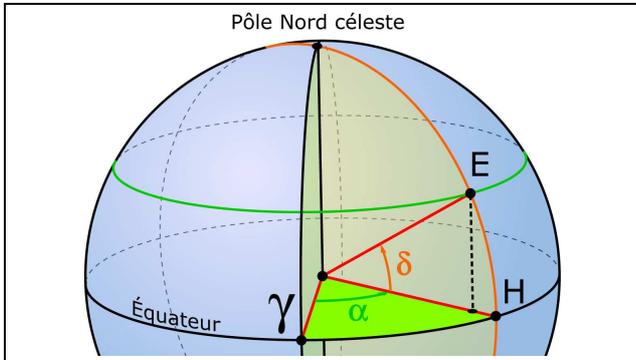


Fig.3. Les coordonnées équatoriales, ascension droite (α) et déclinaison (δ). L'ascension droite (AD) se note aussi souvent RA (right ascension en anglais).

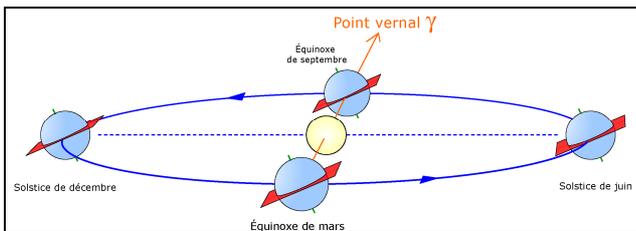


Fig.4. Le point vernal, noté γ est la direction du Soleil à l'équinoxe de printemps. Il sert de direction origine pour les coordonnées équatoriales et écliptiques. Il est situé à la fois dans le plan de l'équateur (représenté en rouge) et dans le plan de l'écliptique (ligne bleue). Il se déplace lentement par rapport aux étoiles avec une période de 26 000 ans (précession des équinoxes). De ce fait, on donne les coordonnées d'étoiles pour une position précise du point vernal, par exemple le 1^{er} janvier 2000 (coordonnées J2000.0).



Fig.5. On a placé sur la France un repère équatorial en rouge (le plan de référence est bien parallèle à l'équateur) et un repère horizontal en vert.

³ Si on ne tient pas compte de la précession des équinoxes.

Les coordonnées écliptiques

Le plan de référence est cette fois le plan de l'orbite terrestre ou plan de l'écliptique. Ces coordonnées sont utilisées dans le Système solaire, en particulier pour les planètes.

Coordonnées écliptiques	
Plan de référence	Le plan de l'écliptique (plan de l'orbite terrestre)
Oz	Pôle nord de l'écliptique
Zéro de l'angle 1	Point vernal.
Angle 1	Longitude écliptique, en degrés, de 0 à 360°, dans le sens direct.
Angle 2	Latitude écliptique ; de -90° à $+90^\circ$.

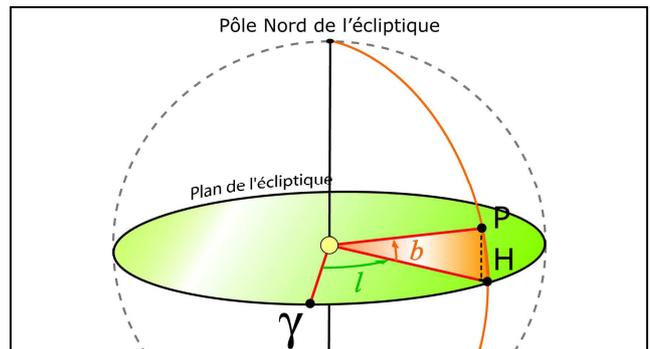


Fig.6. Coordonnées écliptiques.



Fig.7. Coordonnées équatoriales (en rouge) et écliptiques (en bleu). L'angle entre les deux plans de référence est de $23^\circ 26'$. On peut comparer cette maquette avec la figure 4.

Il existe d'autres types de coordonnées comme les coordonnées galactiques (le plan de référence est alors le plan de la Galaxie et la direction origine est son centre) ou les coordonnées horaires (avec le plan de l'équateur comme plan de référence et son intersection avec le méridien du lieu comme direction origine).

Histoire de latitude, de quoi perdre le nord...

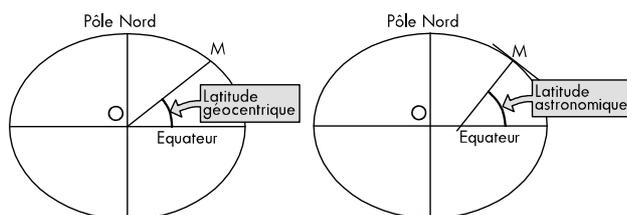
Jacques Chatelon, association marseillaise d'astronomie

Cet article propose de revisiter la définition exacte du mot latitude. Il donne une signification précise aux divers qualificatifs (géocentrique, géodésique, géographique et astronomique) qui la désignent.

La latitude est une notion de base en astronomie, pour les professionnels et les amateurs, et sa connaissance est importante dans toute activité d'observation. Or, à la lecture de livres, articles, pages Internet, on est surpris du peu d'exactitude des définitions disponibles. Il règne une certaine confusion dans ce domaine, comme on peut le voir dans les extraits ci-dessous.

Des définitions imprécises, erronées ou incohérentes¹

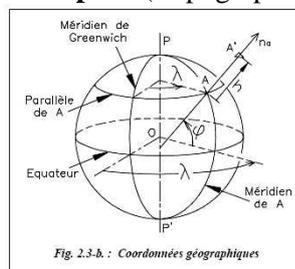
Exemple 1 (Cahiers Clairaut n° 98)



Exemple 2 (sur Internet)

- La latitude géocentrique est l'angle que fait la verticale d'un lieu (fil à plomb) avec le plan équatorial ;
- La latitude astronomique est l'angle que fait la normale² au géoïde en un lieu avec le plan équatorial ;

Exemple 3 (Topographie et topométrie modernes)



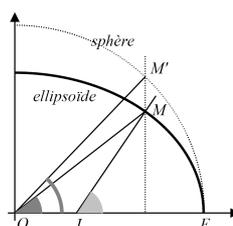
Un point sur l'ellipsoïde est repéré par sa longitude et sa latitude (rapportées à sa normale à l'ellipsoïde en A) (...)

Latitude (φ) : la latitude de A est l'angle que fait la verticale de A avec le plan de l'équateur.

¹ Chacun de ces exemples est repris dans l'encadré en fin d'article pour analyser les erreurs ou imprécisions.

² Pour les non mathématiciens, rappelons que normale signifie ici perpendiculaire à la surface.

Exemple 4 (article de la revue "L'ouvert")



La latitude géographique : l'angle EOM

La latitude astronomique : l'angle EIM (IM est la normale en M).

Exemple 5 (Astronomie générale André Danjon)

La hauteur du pôle au-dessus de l'horizon est la latitude astronomique ou géographique du lieu d'observation. Nous la désignerons par la lettre φ .

Exemple 6 (Astronomie générale André Danjon)

La latitude géographique ou astronomique d'un lieu est l'angle φ que fait la normale à l'ellipsoïde avec le plan de l'équateur.

On pourrait multiplier les exemples et le lecteur aura certainement déjà été confronté à ces multiples définitions. Les problèmes de ces définitions peuvent ainsi venir :

- d'une confusion entre verticale (référence à la pesanteur terrestre) et normale à l'ellipsoïde de référence terrestre ;
- d'une confusion entre géographique et astronomique, ou autre ;
- d'un manque de clarté sur les références (pôle, équateur...).

Les différentes latitudes

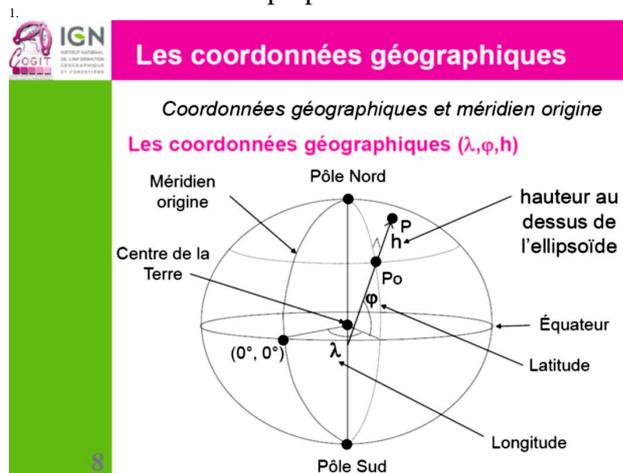
La latitude géocentrique peut être définie simplement comme l'angle que fait une droite menée du centre de la Terre avec le plan équatorial comme sur la première figure de l'exemple 1 (nous reviendrons sur la définition de ce qu'est le plan équatorial). On ne peut pas la mesurer directement puisqu'il n'est pas facile de connaître en un lieu donné la direction du centre de la Terre.

À côté de cette latitude géocentrique, il apparaît trois qualificatifs pour désigner la latitude : géodésique, géographique et astronomique.

Pour éliminer cette confusion, nous avons alors cherché des références officielles comme l'IMCCE, l'IERS, l'IGN, le SHOM, la NASA, United States Naval Observatory... et ces références s'accordent sur les définitions suivantes :

La latitude géographique, ou géodésique, est l'angle formé entre la normale à l'ellipsoïde de référence terrestre et le plan équatorial de l'ellipsoïde.

C'est la latitude de la plupart des cartes.



Sur cette figure de l'IGN, on remarque que la normale à l'ellipsoïde P_0P ne passe pas par le centre de la Terre.

La latitude astronomique est l'angle formé par la verticale du lieu et l'équateur céleste vrai.

C'est la plus facile à mesurer avec des moyens simples.

L'équateur céleste vrai est le plan perpendiculaire à la direction du pôle céleste dénommé Celestial Intermediate Pole CIP, identique au pôle instantané de rotation terrestre (avec une précision suffisante ici).

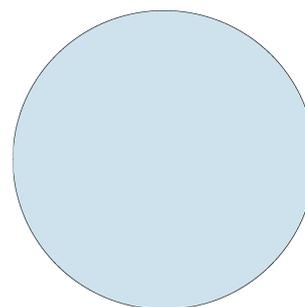
Ces définitions sont aussi celles que l'on peut retrouver dans Wikipédia. Nous verrons dans la suite ce qui différencie ces deux latitudes.

Quelques précisions

À propos de l'ellipsoïde

La latitude géographique nécessite l'introduction d'un ellipsoïde de référence terrestre. Celui-ci est une approximation de la figure de la Terre, sous la forme d'un ellipsoïde de révolution (rotation d'une ellipse autour du petit axe Oz). Différents ellipsoïdes ont été définis au fil du temps et, de nos jours, les deux ellipsoïdes les plus souvent cités sont GRS80 et WGS84 (celui du système GPS). GRS80

et la dernière réalisation de WGS84 sont d'ailleurs très proches et il n'y a souvent pas lieu de les distinguer.



L'ellipsoïde de référence à l'échelle. À l'œil, on ne voit pas de différence avec une sphère. Sur les schémas habituels, l'aplatissement est toujours exagéré. Il vaut en réalité $1/298,257\ 222\ 101$ (GRS80), ce qui correspond à un écart d'environ 21 km entre le rayon équatorial et le rayon polaire, soit 0,3 %.

Les astronomes utilisent aussi pour la réduction des observations un système de référence terrestre dénommé ITRS dont la « réalisation » actuelle est ITRF2014. Bien que n'utilisant pas directement d'ellipsoïde, l'ellipsoïde GRS80 est celui recommandé dans le cadre ITRF. La direction du pôle de l'ellipsoïde, et donc du positionnement de l'équateur terrestre servant de base à la détermination de la latitude géographique/géodésique est fourni par un organisme international l'IERS (International Earth Rotational and Reference Systems Service), successeur du Bureau International de l'Heure (BIH). Ce pôle est dénommé IRP (IERS Reference Pole).

Les ellipsoïdes de référence terrestres sont des créations de l'esprit qui approximent au mieux la forme de la Terre, des figures mathématiques construites à partir d'observations physiques. Les surfaces des ellipsoïdes récents sont aussi des équipotentielles d'un modèle du champ de pesanteur.

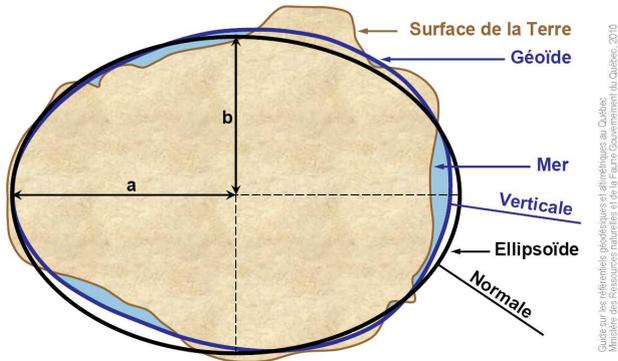
À propos de la verticale

La latitude astronomique nécessite la connaissance de la verticale du lieu concerné, c'est-à-dire la direction du champ de pesanteur (composition du champ de gravitation et de l'accélération centrifuge due à la rotation terrestre). Cette direction est la normale à la surface équipotentielle (surface de niveau) du champ de pesanteur passant par le point considéré.

Et le géoïde ?

On rappelle aussi que la surface appelée géoïde (Listing 1873) est la surface équipotentielle du champ de pesanteur (surface de niveau) correspondant au niveau moyen des mers et océans. Sur le géoïde, une verticale est normale au géoïde.

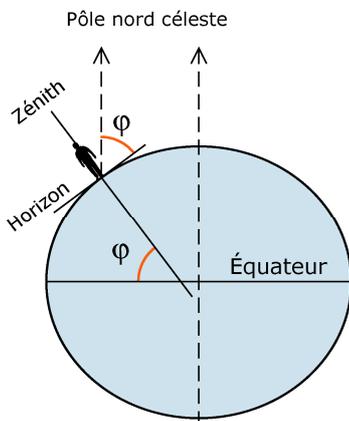
C'est à partir de cette surface que l'on détermine les altitudes, soit de façon globale avec un géoïde mondial, soit de façon locale avec un géoïde local (propre à un pays par exemple). On peut dire en quelque sorte que l'ellipsoïde est plutôt une surface mathématique alors que le géoïde est une surface physico-mathématique.



Les hauteurs déterminées à partir d'un ellipsoïde, comme les hauteurs GPS ne sont pas des altitudes et doivent être corrigées par la différence locale entre ellipsoïde et géoïde (l'ellipsoïde est 50 m en moyenne en dessous du géoïde en France).

Une autre définition

On trouve enfin dans de nombreuses références astronomiques dont les plus anciennes, la définition suivante de la latitude : la latitude d'un lieu est la hauteur du pôle sur l'horizon en ce lieu. Cela se comprend facilement à l'aide du diagramme classique ci-après.

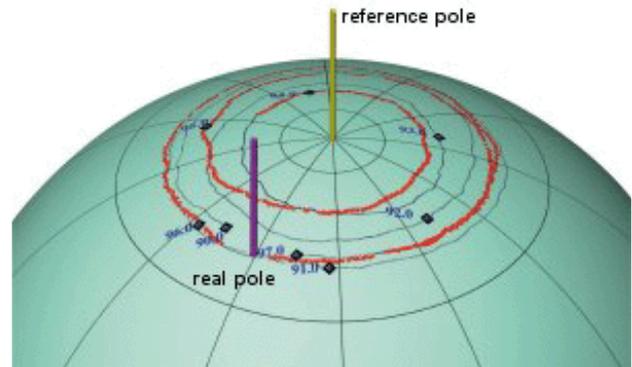


Bien sûr, comme l'horizon est le plan perpendiculaire à la direction de la verticale, cette définition de la latitude astronomique est correcte à condition que l'équateur soit l'équateur céleste, et donc que le pôle soit le CIP.

Variations de la latitude

Il faut noter enfin que les coordonnées astronomiques, donc la latitude, sont aussi variables. En effet, la direction du pôle CIP subit de légères variations que l'on mesure dans le repère terrestre et son

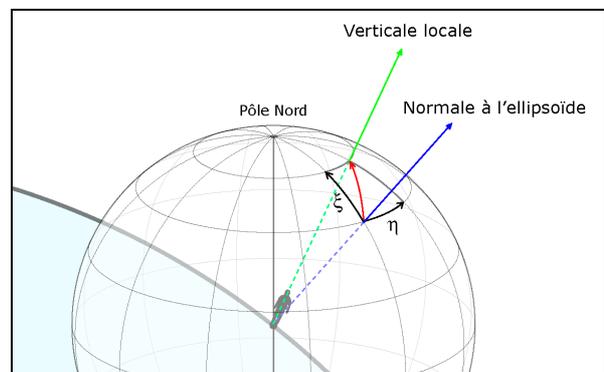
ellipsoïde : le mouvement du pôle ou polhodie. Historiquement, ce sont d'ailleurs les variations mesurées de latitude des observatoires qui ont mis les astronomes sur la piste de ce mouvement du pôle (voir les travaux de Chandler en 1891).



La déviation de la verticale

Nous avons donc maintenant à notre disposition deux types de latitude, l'une définie à partir de la normale à l'ellipsoïde (latitude géographique) et l'autre à partir de la verticale (latitude astronomique). Pour améliorer la compréhension de la relation entre ces deux grandeurs, nous introduisons une nouvelle notion : la déviation de la verticale. En un point terrestre donné, l'écart entre la verticale et la normale à l'ellipsoïde s'appelle la déviation de la verticale.

La présence des continents, de montagnes, les variations de densité sont à l'origine de cette déviation. Schématiquement, nous avons la figure suivante :



Représentation de la déviation de la verticale en un lieu donné, sur une sphère unité centrée sur ce lieu.

L'écart angulaire entre les deux directions est décomposé selon deux directions :

- est-ouest ou longitude, η
- sud-nord ou latitude, ξ .

On peut établir les relations approchées :

- latitude astronomique – latitude géographique = ξ
- longitude astronomique – longitude géographique = $\eta / \cos \varphi$.

La connaissance de la déviation de la verticale permet donc de passer d'une latitude à l'autre et vice-versa.

Numériquement, la déviation de la verticale n'est pas très importante et varie de quelques secondes d'arc à la minute. En France, on trouve des valeurs extrêmes à La Réunion, environ 100 secondes d'arc. Intuitivement, on peut comprendre que la valeur de la déviation de la verticale permette de situer l'une par rapport à l'autre les deux figures de la Terre, l'ellipsoïde et le géoïde. Ceci est d'ailleurs encore un des domaines de l'astrogéodésie qui consiste à utiliser les observations astronomiques pour des applications géodésiques (coordonnées de positions terrestres, positionnement relatif du géoïde et de l'ellipsoïde, nivellement pour détermination d'altitudes...).

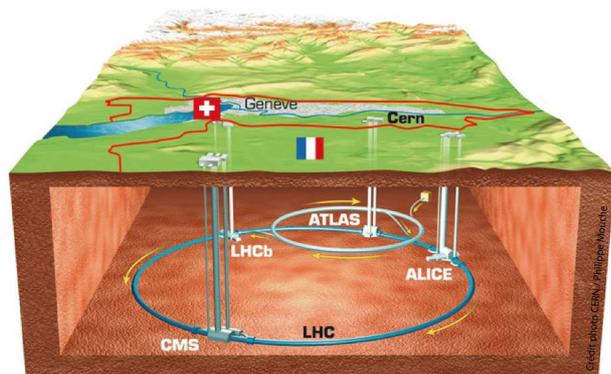
Quelques cas où la déviation de la verticale est pertinente

Géodésie et contrôle géométrique des ouvrages souterrains

Nous connaissons tous des réalisations d'ouvrages souterrains où les exigences de précision sont importantes : tunnel sous la Manche, tunnel ferroviaire du Saint Gothard en Suisse ou tunnels souterrains des accélérateurs du CERN.



Le tunnel de base du St Gothard.



Le LHC du CERN.

Pratiquement, ces travaux ont besoin de relier des mesures géodésiques faites en surface à des mesures souterraines. Or les mesures en surface ont pour référence l'ellipsoïde, en particulier lorsqu'on utilise des techniques à base de GPS. Sous terre, ces techniques sont bien sûr inutilisables et on utilise des gyro-théodolites : par principe (gyroscope), ces gyro-théodolites dont l'axe s'oriente selon l'axe de rotation terrestre fournissent des mesures astronomiques. Pour relier les deux types de mesures, on introduit donc la déviation de la verticale, qui doit être connue dans la zone de travaux.

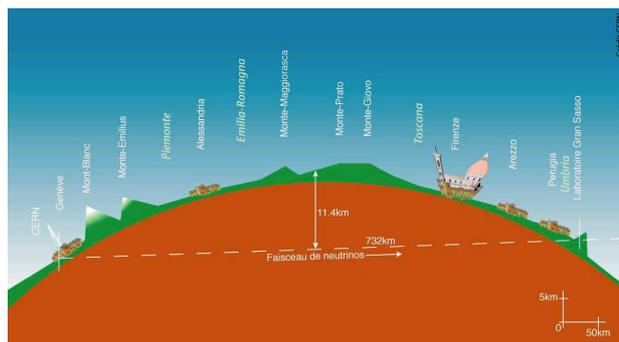
Les azimuts sont reliés selon la formule dite de Laplace :

Azimut géodésique

$$= \text{Azimut astronomique} - \eta \tan \varphi$$

où l'on retrouve η la composante est-ouest de la déviation de la verticale et φ la longitude géodésique/astronomique.

Il y a les mêmes exigences de précision pour l'expérience OPERA du CERN (phénomène d'oscillation des neutrinos) dans laquelle il faut positionner des équipements de façon à viser très précisément une cible sous le Gran Sasso en Italie.



Où est passé le méridien zéro ?

Les visiteurs et touristes de l'Observatoire Royal de Greenwich sont généralement surpris de constater que la longitude du cercle méridien d'Airy donnée par un GPS n'est pas zéro mais $0^{\circ} 0' 5,31''$ ouest (une centaine de mètres à cette latitude) alors qu'ils s'attendent à lire $0^{\circ} 0' 0''$ puisqu'ils sont positionnés sur le méridien origine !

Un article récent du Journal of Geodesy en juillet 2015 a expliqué cette différence par la déviation de la verticale (un article de la revue XYZ de l'association française de topographie de R. Vincent en 2009 avait déjà proposé cette explication).

L'ellipsoïde WGS84 qui sert de référence aux mesures GPS attribue une longitude (et une latitude) géographique/géodésique différente de la longitude astronomique, la différence provenant de la dévia-

tion de la verticale. Cette différence s'exprime selon la formule :

$$\text{longitude astronomique} - \text{longitude géographique} = \Lambda - \lambda = \eta / \cos \varphi.$$



À Greenwich où $\Lambda - \lambda = 5,31''$ cela donne une déviation de la verticale de $3,3''$ ce qui correspond aux observations et aux modèles de pesanteur. Heureusement pour nos amis anglais, la tectonique des plaques qui déplace la plaque eurasiatique vers l'ouest devrait remettre les choses en ordre dans quelques dizaines d'années !

En guise de conclusion

Tout en sachant que les différences entre les deux latitudes sont minimales, il serait bon, dans un but pédagogique de communiquer plus régulièrement sur les deux définitions.

Ainsi, dans la détermination de latitude d'un lieu à partir d'une observation astronomique telle qu'elle peut être faite par des élèves avec un sextant ou un gnomon, on compare souvent le résultat final obtenu à la latitude donnée par la carte. Pourquoi ne pas expliquer, quand le niveau des élèves le permet, que ceci n'est pas tout à fait correct et qu'on néglige alors deux corrections :

- la correction de mouvement polaire, vraiment négligeable (inférieure à $0,5''$) ;
- la correction de déviation de la verticale, petite en général comme on l'a vu (inférieure à $1'$).

Et nous n'avons pas parlé d'une troisième correction, infinitésimale, due à une dérive séculaire de l'équateur.



Avez-vous tout compris ?

Vous pouvez maintenant reprendre les six exemples du début de l'article et chercher les erreurs et imprécisions. Voici les solutions :

Exemple 1

1^{ère} définition : correcte. Il faudrait cependant définir le plan équatorial.

2^e définition : on ne sait pas ce qui est représenté. Si ce sont la verticale et l'horizon, c'est bien une latitude astronomique. S'il s'agit de la perpendiculaire à l'ellipsoïde et un plan tangent comme peut le faire croire la figure, c'est alors la latitude géographique.

Exemple 2

1^{ère} définition : il s'agit de la latitude astronomique et non géocentrique. Une verticale ne passe pas par le centre de la Terre, ceci pour deux raisons, d'une part parce que la Terre n'est pas sphérique et d'autre part à cause de l'accélération centrifuge.

2^e définition : toute normale au géoïde étant une verticale, la définition est correcte.

Exemple 3

Quand on passe d'une définition à l'autre, la normale à l'ellipsoïde devient la verticale. La première définition correspond à la latitude géographique, la seconde est la latitude astronomique.

Exemple 4

1^{ère} définition : il s'agit de la latitude géocentrique.

2^e définition : c'est la latitude géographique.

Exemples 5 et 6

On assimile ici latitudes astronomique et géographique.

Pour la première définition, la hauteur du pôle est la latitude astronomique si on considère que l'horizon est perpendiculaire à la verticale.

La deuxième correspond à la latitude géographique.

REPORTAGE

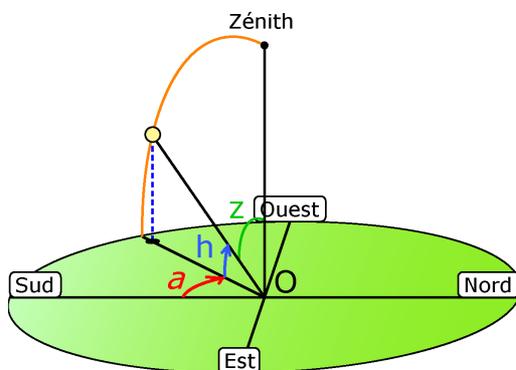
À la recherche du zénith

Joël Robic, amateur de cadrans solaires (www.cadrans-solaires.fr),
membre de la commission des cadrans solaires de la SAF

Joël Robic, nous propose ici un voyage à la recherche du Soleil au zénith. Nous y avons ajouté quelques encadrés explicatifs.

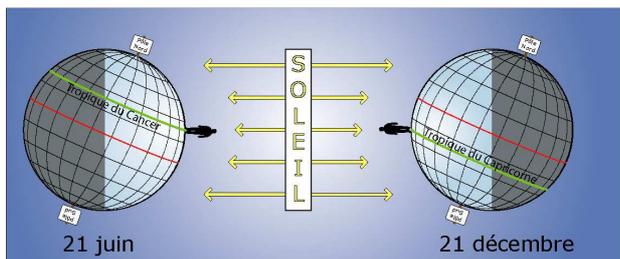
Quelques rappels sur le zénith¹

Il y a beaucoup de confusions autour de ce terme : le zénith est le point de la sphère céleste situé à la verticale au-dessus de la tête d'un observateur.



En Europe, le Soleil ne passe jamais au zénith. Il culmine à midi solaire, mais sans atteindre le zénith. En France métropolitaine, il passe au maximum à 63° de hauteur à Lille et 70° à Marseille, le jour du solstice de juin à midi.

Où peut-on observer le Soleil au zénith ?



Au solstice de juin (à gauche), un observateur situé sur le tropique du Cancer voit le Soleil passer au zénith à midi solaire. Au solstice de décembre (à droite), même chose depuis le tropique du Capricorne. À l'équateur, on voit passer le Soleil au zénith les jours d'équinoxe.

¹ Ce mot viendrait d'une déformation de l'arabe samt ar-ra's, chemin au-dessus de la tête.



Fig.1. L'ombre d'un palmier avec le Soleil au zénith.

Entre les tropiques, le Soleil passe au zénith deux fois par an à midi solaire. C'est le cas à l'équateur en particulier lors des équinoxes. Celui de mars a eu lieu le 20 mars 2016 à 04 h 30 min 11 s UTC.

À l'occasion d'un séjour en Indonésie dans les jours qui précèdent l'équinoxe, nous avons réalisé que le Soleil devait être proche du zénith à midi. C'est ce que nous avons voulu vérifier.

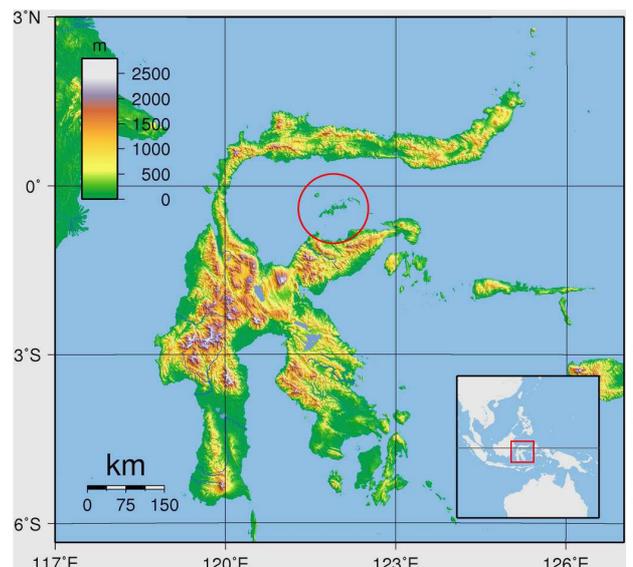


Fig.2. Les îles Togian. Latitude : 0,41°S.

17 mars

Premiers essais. On vérifie avec les moyens du bord que l'ombre d'un fil à plomb est bien à la verticale du support.



Fig.3. Pas d'erreur le Soleil est bien au zénith.

Mais avec quelle précision ?

Il est temps d'utiliser l'application « TpSol » de Yvon Massé qui repère notre position avec le GPS et nous indique l'heure solaire ainsi que sa position, azimut et hauteur.

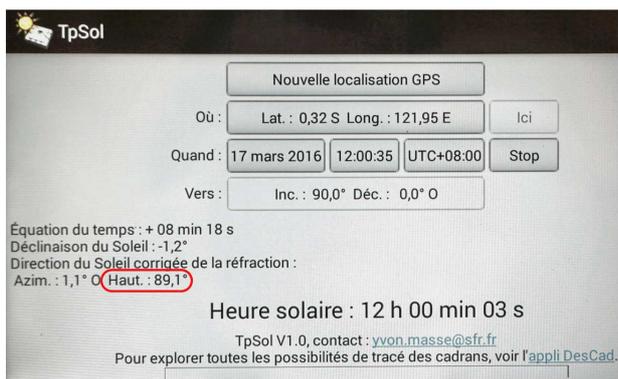


Fig.4. TpSol donne la hauteur du Soleil (89,1°) ainsi que l'heure solaire 12 h 00 min 03 s.

On n'est pas loin de la verticale : 89,1°. Et la déclinaison du Soleil est encore un peu trop faible : -1,2°. Ce n'est encore pas tout à fait l'équinoxe mais on s'en approche.

TpSol, comment ça marche ?

Le calcul de l'heure solaire

- La 3^e ligne indique qu'il est 12 h 00 min 35 s en heure légale.
- On lit aussi UTC +08 : on a 8 h d'avance sur Greenwich donc, à raison de 15° par fuseau, on est réglé sur le méridien 120° E ($8 \times 15 = 120$).
- La 2^e ligne donne la longitude, 121,95° E. On est donc décalé de 1,95° par rapport au méridien 120°E donnant l'heure donc de 7,8 min ou 7 min 48 s ($4 \times 1,95 = 7,8$). Chaque degré de longitude décale l'heure solaire de 4 min ($24 \text{ h} / 360^\circ = 4 \text{ min}/^\circ$).
- L'équation du temps est donnée à la 5^e ligne : 8 min 18 s. Ce décalage entre l'heure vraie et l'heure moyenne dépend de la date mais c'est le même partout dans le monde.
- Il ne reste plus qu'à calculer l'heure solaire sachant que :

Heure légale (ici 12 h 00 min 35 s) =
 heure solaire vraie (ce que l'on cherche)
 + décalage en longitude (-7 min 48 s)
 + équation du temps (+8 min 18 s).

On trouve : heure solaire vraie = 12 h 00 min 5 s.
 TpSol affiche 12 h 00 min 03 s. Ces deux secondes d'écart viennent sans doute d'un arrondi de la longitude affichée.

Le calcul de la hauteur du Soleil

Connaissant la latitude, la déclinaison du Soleil et l'heure solaire, on peut calculer la hauteur du Soleil.

À midi solaire, la formule est simple :
 Hauteur du Soleil = $90^\circ - \text{latitude} + \text{déclinaison}$.
 Donc ici : $90^\circ + 0,32^\circ - 1,2^\circ = 89,12^\circ$.
 TpSol affiche Haut. : 89,1°.

18 mars

Nouvel essai le lendemain, pas de Soleil mais TpSol fonctionne quand même.



Fig.5. Affichage de TpSol le 18 mars.

La déclinaison n'est plus que de -0,8°.
 Le Soleil est encore plus près de la verticale : 89,5°.
 Encore un jour et la déclinaison du Soleil devrait passer à -0,4° comme notre latitude.

Hauteur du Soleil à midi solaire = $90^\circ - \text{latitude} + \text{déclinaison}$.
 Pour avoir le Soleil au zénith, il suffit que la latitude soit égale à la déclinaison du Soleil.

19 mars

Cette fois on est prêt, il ne reste plus qu'à attendre midi. Malheureusement, notre bateau part plein sud à 11 h, notre latitude va passer à $-0,5^\circ$. Va-t-on rater notre rendez-vous ? Ouf, heureusement, il y a du retard.

Comme nous l'indique TpSol, le Soleil est bien au rendez-vous à $90,0^\circ$ de hauteur, à moins de $0,05^\circ$ de la verticale.

Malheureusement les nuages nous ont empêchés de faire une photo...

Compléments

Prière de l'Asr

Comme nous sommes dans un village musulman, on peut calculer facilement l'heure du début de la prière de l'Asr : l'ombre d'une personne est égale à la longueur de son ombre à midi plus sa propre hauteur.

donc $LB2 < LV2$, mais $B2 > V2$ et $B2 - V2 > 0$.

Comme à midi, la longueur est nulle, l'Asr commence donc quand l'ombre égale la taille de la personne soit quand le Soleil est à 45° de hauteur. C'était à 15 h solaire en ce jour.

La semaine des 4 saisons

Quand nous sommes arrivés, c'était la fin de l'hiver en hémisphère nord avant de passer l'équateur et de nous retrouver l'été en hémisphère sud. Arrive l'équinoxe qui nous fait passer en automne avant de rentrer de nouveau en hémisphère nord pour le printemps. Quatre saisons en une seule semaine...



Mots croisés repérage

Horizontalement

1. Une coordonnée.
2. Constellation abrégée proche de Pégase. On s'en sert dans les magnitudes. Plus qu'amateur.
3. Retenu. Il n'a pas d'azimut.
4. Grand chien ou petit chien. C'est la mode outre-manche.
5. Soleil d'Égypte. Équipe d'imagerie radar et optique.
6. La base de toutes coordonnées.
7. Pronom. Tel un astronaute en manque de dioxygène.
8. Temps. Hydrogène atomique neutre. Without clothes.
9. Sa latitude écliptique héliocentrique est nulle. Maladie de la vache folle.

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

Verticalement

1. À l'origine de certaines coordonnées.
2. Il a une latitude nulle.
3. Entre Ni et Zn. Pas très motivant. Vient d'une autre planète.
4. Habitables si l'eau peut y être liquide.
5. Ce pourrait être une mini galaxie pour Kant. Bassin industriel.
6. Opposition. Boisson fermentée.
7. Opère. Elle est délivrée par l'AFNOR.
8. Satellite découvert en 1846.
9. Comme le type de coordonnées le plus utilisé en astronomie.
10. Blanc en montagne, noir dans le désert. Deux pour une planète sauf pour la Terre.
11. Azimut 180° pour les astronomes. Acteur.

Réponses p. 40

La mesure astrométrique du ciel

Jean-Eudes Arlot, astronome, ancien directeur de l'IMCCE
(Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Éphémérides IMCCE)

L'article permet de montrer comment on parvint historiquement à déduire de la position et du mouvement angulaire des astres leur distance à la Terre.

L'observation du ciel pose tout de suite un problème fondamental : comment déduire de la position et du mouvement angulaires des astres célestes leur distance à notre Terre ? L'astronome ne peut mesurer que des angles sur le ciel et donc des variations d'angles et déterminer ainsi les mouvements des astres. À partir de là, les conclusions que l'on peut en déduire sont limitées. Mais c'est bien grâce à de telles mesures que Kepler a pu déterminer la nature des orbites de planètes ou que Bessel a mesuré la première distance d'une étoile. L'astrométrie trouve ainsi sa place : effectuer des mesures d'angle sur le ciel avec la meilleure précision possible pour valider les modèles d'univers.

Les mesures des anciens

Dans l'Antiquité, la technologie ne permet pas des mesures précises. Mais, en a-t-on besoin ? On a repéré les astres mobiles (« astres errants ») et on en a déduit que les plus rapides sont proches et les plus lents sont lointains : raisonnement et modèle simples mais logiques et pas si faux ! Seul Hipparque va faire de vraies mesures angulaires et va décrire le mouvement de la Lune et du Soleil lui permettant de prédire les éclipses.

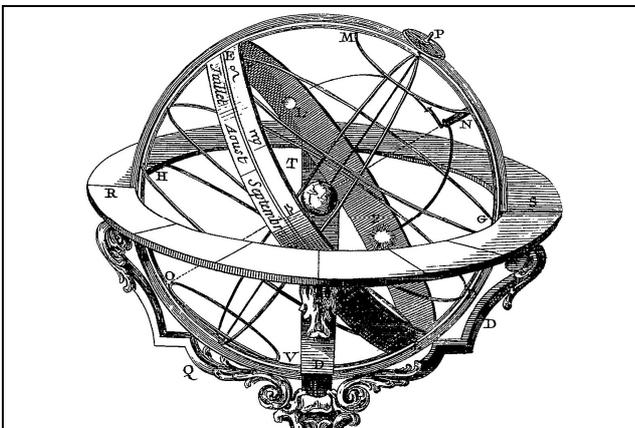


Fig.1. Sphère armillaire. Des instruments de ce type ont été utilisés dès l'Antiquité pour mesurer des positions d'étoiles, en coordonnées équatoriales ou écliptiques. La précision est un peu inférieure au demi-degré.

Il va aussi détecter la précession des équinoxes grâce à son catalogue d'étoiles qu'il peut comparer à ce qui a été fait avant lui. Ses mesures vont rester fondamentales pendant des siècles, confortant le modèle de Ptolémée. Il est clair que la précision des observations d'Hipparque était compatible avec le modèle géocentrique. Si la distance Terre-Lune avait été mesurée facilement grâce aux éclipses sans avoir besoin de connaître autre chose que le diamètre de la Terre, la distance Terre-Soleil va rester longtemps inconnue. Le Soleil est loin, c'est tout ce que l'on peut dire.

La parallaxe

Pour mesurer la distance d'un corps céleste, puisqu'il est impossible d'y aller, il faut appliquer la méthode de triangulation avec une base qui ne peut pas être plus grande que la Terre elle-même. Il faut mesurer une variation d'angle dont le maximum est en fait l'angle apparent sous lequel est vu le rayon de la Terre depuis l'objet visé – c'est ce qu'on nomme « parallaxe horizontale » – pour faire ce calcul de triangulation (figure 2).

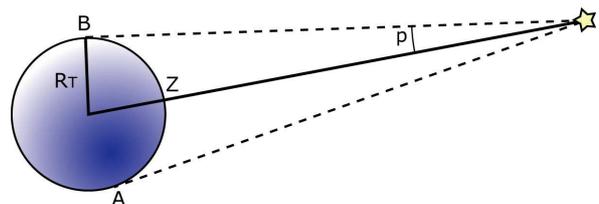


Fig.2. Parallaxe diurne et parallaxe horizontale. La Terre est vue du nord et le mouvement diurne entraîne l'observateur de A en B faisant varier l'angle de visée d'une planète par rapport à l'angle de visée depuis le centre de la Terre. La variation maximale correspond à l'angle sous lequel on voit le rayon terrestre depuis la planète visée. On l'appelle la parallaxe horizontale (elle est dite horizontale parce qu'on l'observe lorsque la planète est vue à l'horizon du lieu d'observation).

La parallaxe de la Lune est de 57 minutes d'arc, celle du Soleil est de 8 secondes d'arc et celle de Mars au plus près de la Terre est de 16 secondes d'arc. La figure 1 illustre la parallaxe. On verra que pour les étoiles, la base doit être considérablement élargie. La figure 3, qui donne l'évolution de la

précision de mesure au cours du temps, montre bien que ces calculs étaient impossibles jusqu'au XVII^e siècle.

Unités d'angle
 1°, c'est une pièce de 1 € vue à 1,3 m
 1' (minute d'arc) = 1/60 ° = une pièce de 1 € vue à 80 m
 1" (seconde d'arc) = 1/60' = 1 pièce de 1 € vue à 4,8 km

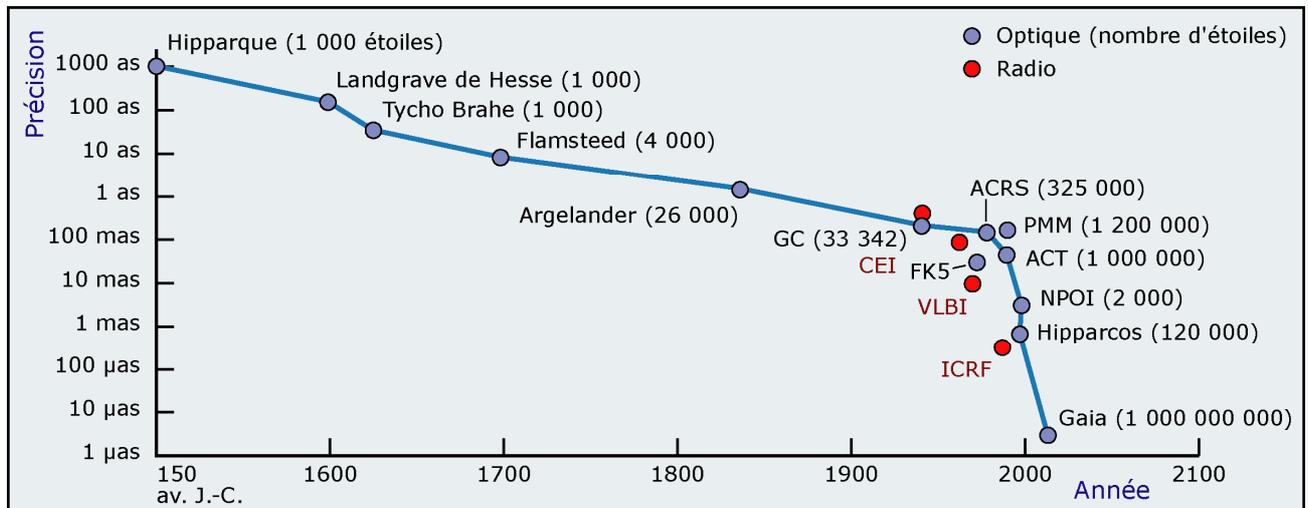


Fig.3. Évolution de la précision astrométrique au cours des siècles. La précision (en ordonnée) est indiquée en seconde d'arc (as) milliseconde d'arc (mas) et microseconde d'arc (µas). C'est seulement à partir du XVIII^e s. que la précision de mesure va permettre d'avancer considérablement dans notre connaissance de la dynamique du Système solaire.

Les temps modernes

On a vu que la parallaxe du Soleil est de 8 secondes d'arc. Avec une précision de mesure de l'ordre de la minute d'arc, mesurer quelques secondes est impossible, d'autant que le Soleil ne présente aucun point fixe que l'on pourrait viser aisément. Ainsi, la distance au Soleil devait rester inconnue pendant des siècles. Au XVII^e, Kepler va donner un modèle héliocentrique permettant ce calcul. Utilisant les observations de Tycho-Brahe, il va constater que les planètes n'ont pas une vitesse uniforme et que leurs mouvements sont liés.

Ce seront les lois de Kepler dont la troisième nous dit que si l'on connaît une distance et les périodes de révolution des planètes dans le Système solaire, alors on connaît toutes les distances (encadré). Il ne reste plus qu'à mesurer les positions de la planète la plus proche de la Terre (Mars ou Vénus) pour connaître enfin la distance Terre-Soleil. Ce sera le défi relevé par les astronomes du XVIII^e siècle.

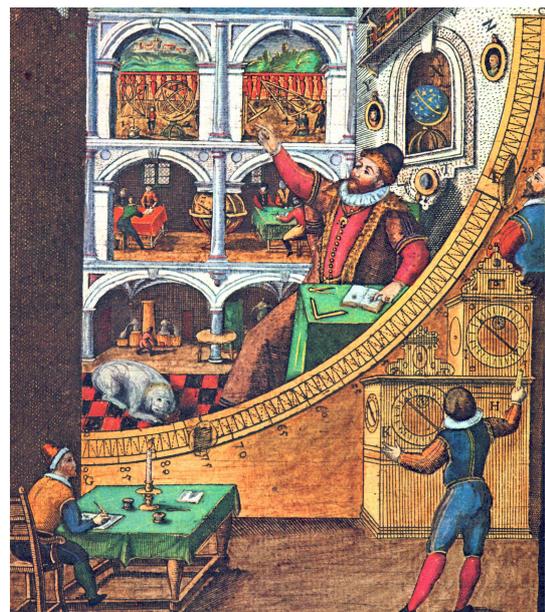
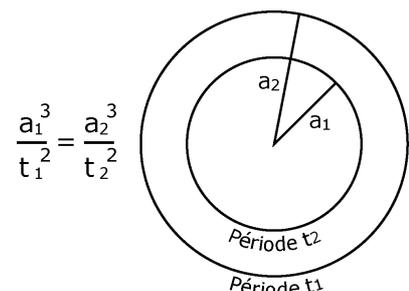


Fig.4. Cadran mural de Tycho Brahe. Avec ces grands instruments sans optique, la précision est de l'ordre de la minute d'arc.

La troisième loi de Kepler

Le cube du demi-grand axe de l'orbite d'une planète divisé par le carré de la période de révolution est une constante pour toutes les planètes du Système solaire (égale à 1 si le demi-grand axe est mesuré en « unité astronomique » et la période de révolution en années).

Avec cette formule on voit qu'il suffit de connaître une seule distance dans le Système solaire (la distance à la planète la plus proche par exemple) et de connaître les périodes de révolution, pour connaître toutes les distances et donc la distance Terre-Soleil ou « unité astronomique ».



La mesure des angles

Revenons un instant sur le principe de la mesure des angles sur la sphère céleste. Comme la sphère terrestre, la sphère céleste peut être décrite par des coordonnées sphériques (longitude et latitude que les astronomes désigneront par « ascension droite » et « déclinaison ») dont le pôle sera la projection du pôle terrestre sur le ciel (proche de l'Étoile polaire) et l'équateur la projection de l'équateur terrestre sur le ciel. L'origine sur l'équateur sera fixée au point vernal, lieu où se trouve le Soleil à l'équinoxe quand il passe de l'hémisphère sud à l'hémisphère nord. Le problème, c'est que ces références ne sont pas écrites sur le ciel et qu'il n'est pas facile de s'y rattacher. En un lieu donné, on n'observe facilement que le zénith et l'horizon et on mesure donc des azimuts et des hauteurs : azimut par rapport à la direction du sud facilement montrée par la culmination des astres et hauteur mesurée au-dessus de l'horizon. Comment relier cet azimut et cette hauteur (qui sont locales) aux coordonnées sphériques « équatoriales » (universelles) ascension droite et déclinaison ?

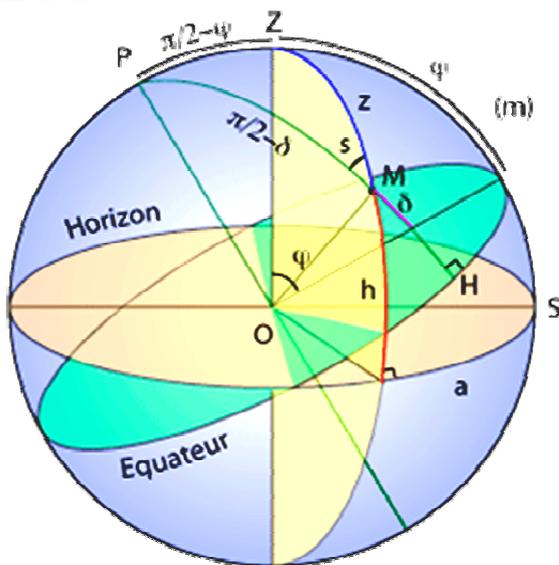


Fig.5. Les systèmes sphériques local et équatorial. Le passage de l'un à l'autre nécessite de résoudre le triangle sphérique PZM pour passer de la hauteur h à la déclinaison δ .

La figure 5 montre les deux systèmes imbriqués qui rendent nécessaire la résolution d'un triangle sphérique, calcul compliqué sans ordinateur. Dès le XVII^e siècle, on comprit que le plus simple était de mesurer la hauteur d'un astre lors de son passage au sud (culmination au méridien du lieu) alors simplement reliée à la déclinaison (figures 6a et 6b). Les mesures furent nombreuses et peu à peu les étoiles furent cataloguées et le mouvement des planètes mieux compris.

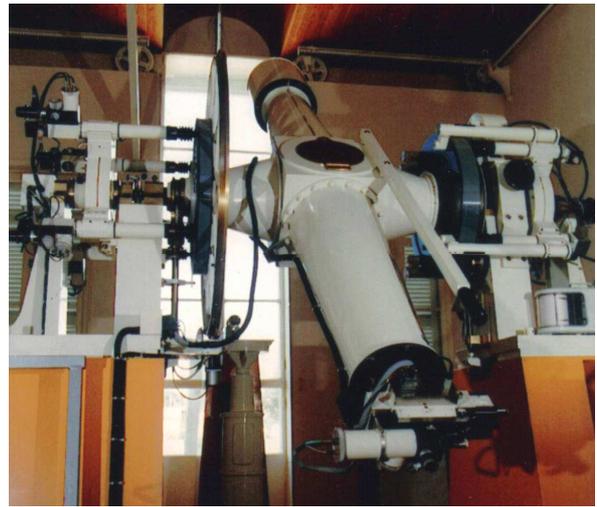


Fig.6a. Lunette méridienne de l'observatoire de Bordeaux. On peut mesurer la hauteur de l'astre et l'instant précis du passage dans le plan méridien. La précision obtenue sur la position de l'objet est inférieure à 0,1".

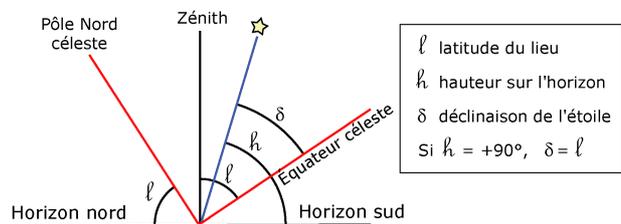


Fig.6b. Dans le plan méridien, le triangle sphérique de la figure 5 devient une ligne dans ce cas particulier et la transformation des coordonnées locales (azimut et hauteur) en coordonnées équatoriales (ascension droite et déclinaison) est très simple :

hauteur = déclinaison - (90° - latitude) donc déclinaison = hauteur - 90° + latitude

azimut = 0 donc l'ascension droite est égale au temps sidéral local ou angle horaire de l'origine des ascensions droites (point vernal). Le temps sidéral local est une fonction du temps connue donnant la position de la Terre autour de son axe.

La mesure du Système solaire et de l'Univers

Les mesures astrométriques avaient donc pour but premier de mesurer des parallaxes dans le Système solaire afin que la mesure de distance d'une des planètes Mars ou Vénus puisse donner la fameuse distance Terre-Soleil, unité fondamentale de la mesure de l'Univers. Les premières mesures positives de la parallaxe de Mars eurent lieu depuis Paris et Cayenne dès le XVII^e siècle. Pour Vénus, les mesures angulaires étaient plus difficiles du fait de la phase de la planète (qui apparaît régulièrement sous forme de croissant comme la Lune).

Par contre, la planète Vénus passe régulièrement devant le disque solaire : Halley et Delisle proposèrent des méthodes de détermination de la parallaxe de Vénus sans mesure angulaire. Il suffisait de

mesurer la durée d'un passage de Vénus devant le disque solaire depuis deux lieux éloignés sur Terre. Ce phénomène est rare (deux par siècle) mais les deux passages qui se produisirent au XVIII^e siècle donnèrent lieu à quantité d'expéditions lointaines et d'observations. Les bons résultats obtenus permirent d'avoir enfin une bonne estimation de la taille du Système solaire et de la fameuse distance Terre-Soleil, si longtemps cherchée¹.

Cette distance ouvrait aussi la porte sur l'Univers. Si la parallaxe horizontale diurne a pour base la Terre, on pouvait utiliser l'orbite terrestre à six mois d'intervalle pour mesurer la parallaxe des étoiles, dite « parallaxe annuelle » avec une base très importante. Ainsi, les étoiles, qui « étaient très loin de la Terre » purent avoir une distance connue. Une fois encore, ce fut la précision des instruments qui limita le nombre de détermination possible : la plus proche étoile n'avait une parallaxe ne dépassant pas la seconde d'arc. Le progrès des mesures astrométriques associé à d'autres méthodes reposant sur les caractéristiques physiques des étoiles permit d'estimer la taille de notre galaxie et aussi de l'univers visible.

L'astrométrie par rattachement

Le besoin en précision toujours accrue a nécessité l'utilisation de méthodes plus performantes que l'observation d'un passage au méridien qui limitait les observations d'un astre à une par jour. La technique photographique ou l'imagerie électronique se pratique au foyer d'un télescope où l'on récupère l'image d'une partie du ciel, un « champ » dont la dimension est mesurée en angle sur le ciel. La largeur angulaire de ce « champ » dépend bien entendu des caractéristiques de l'instrument utilisé, en particulier de sa focale.

Une longue focale fournira un « petit champ » (effet de zoom) avec peu d'étoiles tandis qu'une courte focale donnera un « grand champ » de plusieurs degrés-carrés avec beaucoup d'étoiles. Sur l'image ainsi obtenue par le télescope, on mesure des distances en millimètres qu'il va falloir transformer en angle sur le ciel. Un millimètre correspondra à un angle d'autant plus petit que la distance focale du télescope utilisé est grande. Sur ces images, on aura l'objet observé entouré des étoiles du champ. Le nombre d'étoiles visibles sera d'autant plus grand que le diamètre de l'optique du télescope est grand ou que le récepteur est sensible. Pour étalonner notre champ et trouver la position angulaire d'un

astre inconnu, nous allons le rattacher aux étoiles du champ dont nous connaissons la position grâce à des catalogues d'étoiles. Ce processus, appelé "réduction astrométrique du champ", va permettre de calculer l'échelle de l'image qui transformera des millimètres en unités d'angle, de déterminer l'orientation qui indiquera les directions *nord* et *est* par rapport à l'équateur céleste et aussi de corriger les distorsions dues aux imperfections de l'optique du télescope et à la projection de la sphère céleste sur le plan focal (figure 7). Cela nous conduira aux positions en ascension droite et déclinaison cherchées dans le même repère que celui des étoiles du catalogue utilisé (figures 8a et 8b).

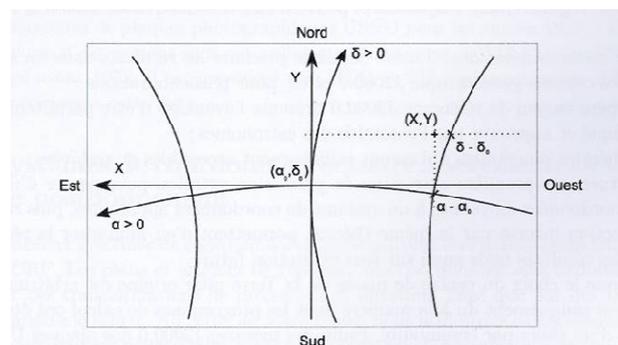


Figure 2.1 – Représentation tangentielle (plane) d'un champ sphérique.

$$X = \frac{\cos \delta \cdot \sin(\alpha - \alpha_0)}{\sin \delta \cdot \sin \delta_0 + \cos \delta \cdot \cos \delta_0 \cdot \cos(\alpha - \alpha_0)}$$

$$Y = \frac{\sin \delta \cdot \cos \delta_0 - \cos \delta \cdot \sin \delta_0 \cdot \cos(\alpha - \alpha_0)}{\sin \delta \cdot \sin \delta_0 + \cos \delta \cdot \cos \delta_0 \cdot \cos(\alpha - \alpha_0)}$$

Fig.7a et 7b. La projection gnomonique

L'image de la sphère céleste est une sphère alors que notre récepteur est plan (à gauche) : la projection déforme l'image et une transformation (à droite) permet de passer du système plan au système sphérique (et vice-versa).

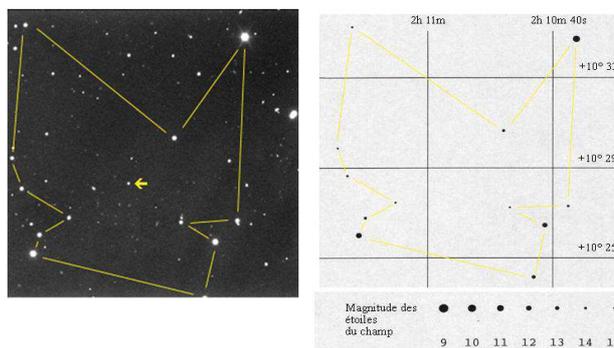


Fig.8a et 8b. Une image d'une portion de ciel contenant un astre dont on veut mesurer la position astrométrique (ascension droite et déclinaison) et la même zone du ciel extraite d'un catalogue d'étoiles. L'objet inconnu va être « rattaché » aux étoiles du catalogue observées en même temps que lui et on obtiendra ainsi son ascension droite et sa déclinaison D.

¹ Voir par exemple les Cahiers Clairaut de 2004.

La précision de ce type d'observation va dépendre de la qualité de l'optique du télescope, du nombre d'étoiles cataloguées du champ et bien entendu de la précision du catalogue utilisé. Les catalogues modernes contiennent beaucoup plus d'étoiles que les premiers catalogues avec une précision de position des étoiles et un rattachement à un système de référence bien meilleurs. La construction des catalogues est le résultat d'un long et lent travail de compilation de mesures de plaques photographiques et d'observations méridiennes. Le catalogue Gaia qui sera publié dans les années à venir sera le résultat des observations d'un satellite astrométrique qui baliera le ciel durant 5 ans sans référence aux anciens catalogues. Sa précision attendue est de l'ordre de quelques millièmes de secondes d'arc alors que les meilleurs catalogues actuels n'ont une précision que de 50 à 60 millièmes de seconde d'arc (cf table 1). Avec une telle précision, combien d'astres apparemment immobiles se découvriront un mouvement qui remettra en cause la dynamique de bien des systèmes, particulièrement le système galactique ? De même combien d'astres distants dont la parallaxe n'est pas mesurable actuellement auront leur distance à la Terre enfin déterminée ?

Les catalogues astrométriques d'étoiles de référence actuels					
Année	Nom	Nb d'étoiles	Mag. limite	Précision en mas	Commentaires
1997	Hipparcos	120 000	12.4	< 0.78	Télescope spatial
2000	Tycho 2	2 500 000	16	< 60	À partir des observations Hipparcos
2001	6SC II	19 000 000		360	À partir de plaques de Schmidt pour le guidage du télescope spatial HST
2003	USNO B1	1 milliard	21	200	Plaques de Schmidt
2004	UCAC 2	48 000 000	7.5 → 16	20 → 70	scans
2004	Bright stars	430 000	< 7.5		Étoiles brillantes à partir des observations du satellite Hipparcos
2005	Nomad	1 milliard			compilation
2003	2MASS	470 000 000	16	60 → 100	Catalogue infrarouge
2015	GAIA	1 milliard	20	< 0.01 mas	À venir

Table 1. Les principaux catalogues astrométriques d'étoiles de référence.

Le nombre d'étoiles disponibles dans un catalogue est certes très important puisqu'on va pouvoir se rattacher plus facilement à ces étoiles mais la précision est tout aussi importante. Un grand champ va permettre d'obtenir plus d'étoiles de catalogue sur son observation mais va contenir plus de distortions. Une observation astrométrique est un compromis entre le besoin de précision et la nature du télescope utilisé. Le catalogue UCAC est actuellement le meilleur choix en attendant Gaia.

L'ère spatiale

L'arrivée de l'ère spatiale au XX^e siècle a bouleversé nos moyens d'observation : les télescopes purent être mis en orbite (comme Gaia dont nous avons vu la précision à la fin du paragraphe précédent) et les sondes spatiales orbitant autour des planètes purent elles-mêmes observer les positions astrométriques de ces planètes avec une très forte précision (figure 9).

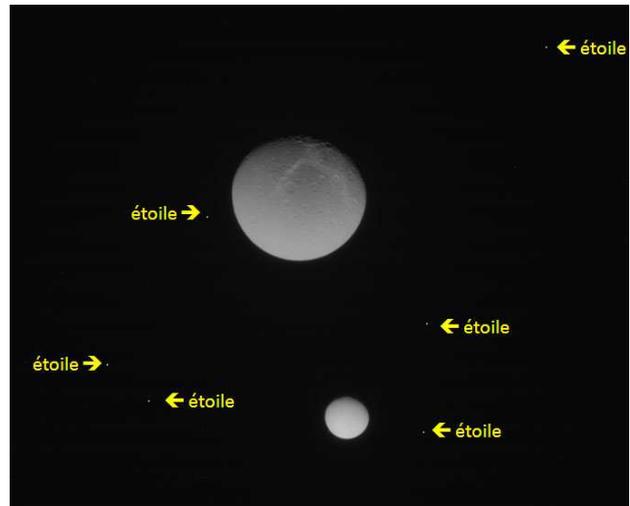


Fig.9. Les satellites de Saturne Encelade et Dione vus par la sonde Cassini : pour obtenir des positions astrométriques de ces corps, on utilise les étoiles présentes sur l'image dont la position est donnée par les catalogues d'étoiles. C'est le même principe qu'avec des observations réalisées depuis le sol terrestre.

La radio-science permet des avancées considérables : toutes les observations décrites ci-dessus utilisent la lumière visible et des télescopes optiques qui focalisent la lumière sous forme d'une image mesurable. Les sondes font de même mais il est cependant possible d'observer différemment dans d'autres gammes de longueurs d'onde. La position des sondes est très bien déterminée à partir de puissants radiotélescopes qui les suivent en permanence. Lorsque ces sondes sont en orbite autour d'un corps du système solaire, il suffit d'appliquer les lois de Kepler et en déduire la position du centre de masse sonde-planète qui se confond avec le centre de masse de la planète. Aucun autre système d'observation de la planète ne peut avoir une telle précision. Depuis la Terre, il est aussi possible d'effectuer des tirs radar sur les astres proches (astéroïdes ou Mars). La mesure de la distance Terre-Soleil se fait, depuis la fin du XX^e siècle, grâce à la mesure de la distance Terre-Mars, d'abord par radar et aujourd'hui par radio avec les sondes posées sur la surface de la planète Mars.

L'anneau astronomique

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

L'instrumentation astronomique de marine des XVII^e et XVIII^e siècle est riche d'appareils simples et faciles à utiliser. Il est proposé de construire un petit instrument pour mesurer la hauteur du Soleil. Dans cet article on abordera son principe, son utilisation, sa géométrie, son tracé et sa construction. Cet instrument est facilement réalisable avec crayon, règle, compas et un peu d'habileté manuelle. En parallèle, c'est l'occasion de traiter quelques exercices de géométrie.

Pour les voyageurs des XVII^e et XVIII^e siècles, l'astronomie était devenue une science très utile pour se situer sur le globe terrestre, globe que de nombreux voyageurs commençaient à arpenter de long en large. La mesure élémentaire était celle de la hauteur du Soleil qui donnait sans trop de calculs et connaissances, la latitude du lieu.

L'anneau astronomique, qui ne servait qu'à cette mesure, est un appareil très simple : un anneau de bronze que l'on tient suspendu verticalement, percé d'un trou pour laisser passer la lumière du Soleil, une graduation. Au XVIII^e siècle, il était encore décrit parmi les instruments de mesure des hauteurs du Soleil et utilisé par les marins et les géomètres. À la fin de ce siècle, il était considéré comme obsolète.

Pour mieux comprendre l'instrument nous allons voir ce qu'écrivaient les fabricants et utilisateurs de l'époque. L'anneau astronomique est décrit avec minutie dans le *Traité de la construction et des principaux usages des instrumens de mathématique* de Nicolas Bion⁸. La meilleure numérisation de cet ouvrage extrêmement intéressant (506 pages pour l'édition de 1752), se trouve au *Service Commun de la Documentation de l'Université de Strasbourg*⁹.

Pour les marins, on trouve sa description dans le *Traité complet de la navigation* de Pierre Bouguer¹⁰ (1706, p. 98) et dans *De la méthode d'observer exactement sur mer la hauteur des astres*. Ce mémoire a remporté le prix proposé par l'Académie Royale des Sciences pour l'année 1729.

Ce texte est intéressant, car Bouguer analyse les instruments avec ses connaissances de marin. Il se fait expérimentateur et de façon très moderne, modélise mathématiquement la réfraction atmo-

sphérique dont il faut faire la correction. Déjà, en 1729, il utilise le calcul intégral et différentiel avec les notation actuelles, d pour les dérivées et le signe \int pour l'intégrale.



Fig.1. Nicolas Bion (1652-1733).



Fig.2. Pierre Bouguer (1698-1758).

P. Bouguer par Jean-Baptiste Perronneau

Le principe et l'utilisation de l'anneau sont aussi décrits dans le livre de Jean Baptiste Denonville (1732-1783), *Traité de Navigation* (1760), livre manuscrit de La Bibliothèque Municipale de Rouen et édité par l'ASSP Rouen¹¹.

Le terme d'anneau astronomique est souvent employé pour désigner un instrument plus complexe, l'anneau équatorial qui est un cadran solaire portatif avec un cercle équatorial.

Description et utilisation

Le texte de Bion explicite une construction géométrique adaptée à la gravure sur un anneau en cuivre (laiton). Le constructeur s'en servait pour tracer les graduations (nous utiliserons une autre méthode géométrique adaptée à notre support, carton type bristol). La construction de l'anneau ne permettait pas de faire un cercle parfait. Pour que les graduations ne soient pas affectées par sa non circularité, les traits étaient gravés à l'aide d'une

⁸ Éditions de 1709 p. 250, de 1716 p. 280, de 1723 p. 280, de 1752 p. 272 et aussi édition anglaise.

⁹ <http://docnum.u-strasbg.fr/cdm/compoundobject/collection/coll7/id/29892/rec/3>

¹⁰ L'astronome créateur de la droite de Bouguer pour les corrections d'absorption atmosphérique.

¹¹ Ed. Point De Vues. <http://assprouen.free.fr/denonville/>.

grande feuille où était posé l'anneau et sur laquelle on avait tracé un quart de cercle auxiliaire (arc DE sur la figure 3) divisé en 90 parties, les directions de chaque degré étant reportées sur l'anneau.

Voici le texte de N. Bion (figure 3) :

C'est un cercle de cuivre, qui se fait de 8 à 10 pouces de diamètre. Il est nécessaire qu'il soit de bonne épaisseur, afin qu'étant plus pesant il conserve mieux la situation perpendiculaire ; la division se marque sur la surface concave. Il y a un petit trou en C, qui traverse l'Anneau parallèlement à son plan. Ce trou est éloigné de 45 degrés du point de suspension B, & il est le centre d'un Quart-de-cercle DE, divisé en 90 degrés. Un de ses rayons CE est parallèle au diamètre vertical BH, point de suspension ; & l'autre rayon horizontal est perpendiculaire au même diamètre.

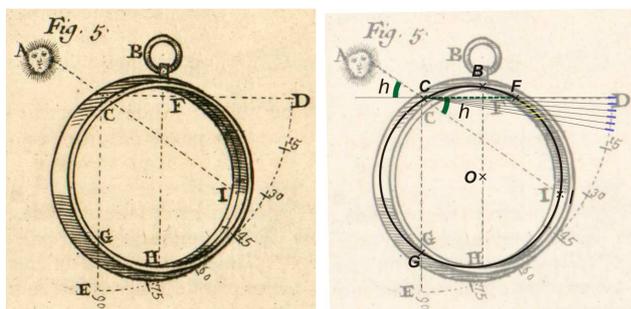


Fig.3. Anneau astronomique (N. Bion) et construction.

Cette construction géométrique servait à repérer et à tracer les graduations sur la surface interne de l'anneau. Suivent quelques remarques sur l'habileté du constructeur pour réaliser un bon instrument, puis son utilisation :

Pour se servir de cet anneau, il faut le suspendre par la boucle B, & le tourner vers le Soleil A, en sorte que son rayon passe par le trou C. Il marquera au fond de l'Anneau de F en I, les degrés de la hauteur du Soleil entre le rayon horizontal CF, & le rayon de l'Astre CI : la partie IHG, marquera sa distance au Zénith, entre le rayon CI & le rayon vertical CG.

On voit ici que l'instrument peut donner directement la hauteur et son complément, la distance zénithale.

Denoville, lieutenant de marine, prisonnier en Angleterre a occupé une partie de son temps à écrire et dessiner un livre du savoir appris à l'école de navigation. Il a manifestement reproduit le dessin du livre de N. Bion en le symétrisant (figure 4), car il utilise les mêmes lettres et son texte est pratiquement celui de Bion :

Observer la hauteur du Soleil avec l'anneau astronomique.

Il faut d'abord suspendre l'anneau par la boucle B & se tourner vers le Soleil A de sorte que son rayon passe par le trou e. Il marquera au fond de l'anneau de F en I les degrés de la hauteur du Soleil entre le rayon horizontal CF & le rayon le rayon vertical CG. Les observations faites par l'anneau astronomique sont plus exactes qu'avec l'astrolabe parce que proportion de leur grandeur les degrés de l'anneau sont plus grands que ceux de l'astrolabe.

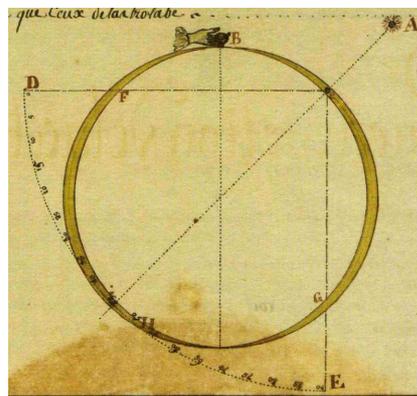


Fig.4. L'anneau astronomique (Denoville).

Tracé et construction

Avant de se lancer dans la réalisation de l'anneau, il faut se pencher sur plusieurs détails de tracé et de construction.

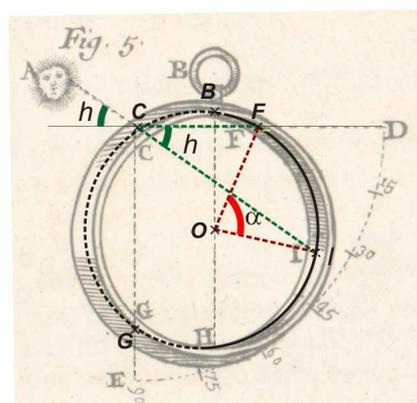


Fig.5. L'anneau astronomique, géométrie.

Dans la géométrie de l'anneau (figure 5), on constate que l'angle \widehat{FCI} est égal à la hauteur du Soleil. Sur le cercle de l'anneau, c'est un angle inscrit qui intercepte l'arc \widehat{FI} . Si O est le centre de l'anneau, l'angle au centre \widehat{FOI} vaut le double de l'angle inscrit (théorème bien connu¹²).

Le point F est à l'origine des graduations des hauteurs car il correspond à l'horizon et le point G au zénith. Le triangle $FCCG$ est rectangle donc FG est un diamètre et l'arc \widehat{FIG} vaut 180° . Donc chaque degré de la

¹² Ce théorème a disparu du nouveau programme de maths de 3^e mais il est facilement démontrable.

graduation des hauteurs de l'arc \widehat{FIG} correspond à deux degrés sur le cercle de l'anneau. Il suffit de graduer le cercle de l'anneau tous les deux degrés pour avoir une graduation en degrés de la hauteur. S'il y a la place, une graduation de tous les degrés de l'anneau donnera une graduation plus fine à 0,5 degré pour les hauteurs (ou les distances zénithales). Comme la hauteur s'étend de 0 à 90°, la graduation sur l'anneau occupera 180°, soit une moitié de la circonférence interne de l'anneau. On trouvera en fin de document la géométrie de l'anneau avec GeoGebra.

Si l'on se donne un rayon R pour l'anneau, on va pouvoir calculer sa circonférence ($2\pi R$) et connaître la longueur de la bande nécessaire où l'on tracera les traits des graduations. R étant fixé, la demi circonférence connue, la longueur entre deux graduations d'un degré sera la 90° partie de cette longueur. Le nombre π étant ce qu'il est, la valeur de cette graduation ne sera pas une valeur simple (entière ou demi entière). Pour simplifier le tracé, on prend le problème à l'envers, on se donne une largeur de graduation, 180 fois cette valeur donne la circonférence de l'anneau soit la longueur de la bande de l'anneau développé (avec un rajout de collage pour en faire un cercle).

Le point C a été choisi à 45° de B (cette position est arbitraire, tout point dans ce quadrant est valable, mais il est plus judicieux pour le passage du rayon du Soleil). On peut tracer sur la bande les différents repères : B le point de suspension, de F à G les graduations, C le trou.

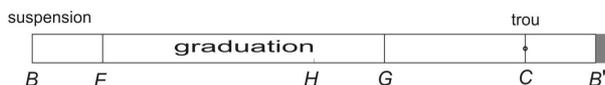


Fig. 6. La bande de l'anneau et ses différentes parties.

L'anneau développé en une bande BB' est composé de : BF , 1/8 de la longueur ;

FG , 1/2 de la longueur, avec les graduations ;

GC , 1/4 de la longueur ;

CB' , 1/8 de la longueur.

Les traits de la graduation tracés avec l'espacement choisi, il restera à écrire les nombres repères 0, 10, 20... ou 0, 5, 10, 15... suivant la grandeur de l'instrument. On peut aussi, pour la lisibilité, faire des traits plus ou moins grands pour les degrés, pour les 5 degrés, les dix degrés comme sur un double décimètre.

Il reste à découper la bande, l'arrondir pour lui donner une forme annulaire et coller les deux extrémités.

Remarques sur la construction

Le cuivre ou le laiton sont des matériaux plus nobles que le carton bristol. Tenir l'anneau en laiton par sa suspension ne le déforme pas ; mais si on tient un anneau de carton bristol de la même façon, il va s'ovaliser, ce qui n'est pas bon pour une mesure précise.

Pour rigidifier l'anneau, il suffit de le cercler par une couronne circulaire (voir figure 7) de diamètre interne égal à celui de l'anneau et qui sera placée au milieu de la bande. En conséquence, le petit trou devra être un peu décalé. On peut aussi faire deux trous à la même position, un de chaque côté de la couronne qui donneront deux taches lumineuses sur la même graduation. Il peut être intéressant de diviser la graduation en deux parties identiques mais d'un côté, graduée en hauteur et de l'autre graduée en distances zénithales (voir figure 7).



Fig.7. L'anneau, ses graduations et sa couronne circulaire de mise en forme.

La couronne circulaire peut être découpée dans un carton plus fort que du carton bristol. En fixant la couronne, il faut que la suspension de l'anneau soit en face du repère (B) sur l'anneau astronomique.

On peut, dans la couronne, faire un petit trou à l'opposé de la suspension pour y attacher un léger poids lestant l'instrument, facilitant ainsi sa tenue verticale.

Pour optimiser la construction de l'anneau en utilisant au mieux les feuilles bristol A4, il faut calculer quelle dimension simple de la graduation donne la plus grande longueur de bande traçable sur une ou deux feuilles. Pour avoir dans une feuille un anneau le plus grand possible, on peut optimiser la longueur de la bande en prenant sa diagonale. Mais il faudra tenir compte de la largeur de la bande et ne pas oublier la petite longueur à superposer pour le collage.

On peut aussi, pour agrandir l'anneau le faire en deux parties que l'on ajoutera bout à bout.
 Pour ceux qui ne veulent pas faire de calculs, voici quelques exemples de dimensions à partir de trois espacements du degré de la graduation (dimensions en mm).

Largeur du degré	Longueur de la bande	Rayon de l'anneau
1	180	28,6
1,5	270	43
2	360	57,3

Tableau I. Dimensions : rayon, graduations.

Utilisation de GeoGebra

Comment éviter le travail un peu long du tracé des traits de la graduation, surtout si l'on veut essayer plusieurs dimensions ?

Il faut se servir d'un programme de tracé dans lequel la dimension de l'espacement entre deux graduations sera paramétrable. On s'affranchit alors d'une largeur de graduation fixée. Il suffira de se donner la largeur de la bande, la largeur de la couronne circulaire, les longueurs des traits de graduation, tout le reste du tracé en découle.

Le logiciel pédagogique GeoGebra, gratuit et bien connu des professeurs de mathématiques est assez bien adapté pour ce travail. Avec un peu de programmation, il permet avec souplesse de tracer avec des dimensions évolutives, la bande de l'anneau, les traits et nombres des graduations avec quelques curseurs et séquences.

Le graphique obtenu peut être transformé en dessin vectoriel ou image et imprimé à l'échelle désirée. En changeant le grandissement, il peut aussi s'adapter à toute dimension de feuille.

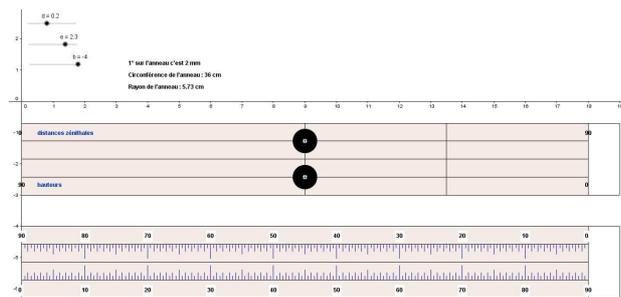


Fig.8. Tracé de la bande en deux parties sous GeoGebra.

Un fichier exemple de tracé GeoGebra se trouve sur le site du CRAL-Observatoire de Lyon¹³.

La couronne circulaire peut aussi être construite avec GeoGebra, mais sa construction à la règle et au compas est élémentaire connaissant le diamètre de l'anneau.

¹³ Fichier anneau-trace.ggb à l'adresse <http://cral.univ-lyon1.fr/labo/fc/navigation/astronavig.htm>

Un autre exercice de construction sous Geogebra, est de tracer la géométrie de l'anneau (figure 5) permettant de voir la relation entre le quart de cercle *DE* de construction de la graduation par N. Bion et les graduations de l'arc *FIG* de l'anneau à partir de l'angle au centre¹⁴.

Précision de lecture

La précision de lecture est assujettie à la grandeur du trou qui doit être fait avec une aiguille fine ou pointe de compas et être juste assez grand pour donner une tache lumineuse visible. La deuxième limite est la grandeur angulaire du Soleil (0,5°) qui donne une tache non négligeable. Cette tache (largeur *dI*) est variable avec la grandeur de l'anneau (rayon *R*) et avec la hauteur du Soleil (*h*).

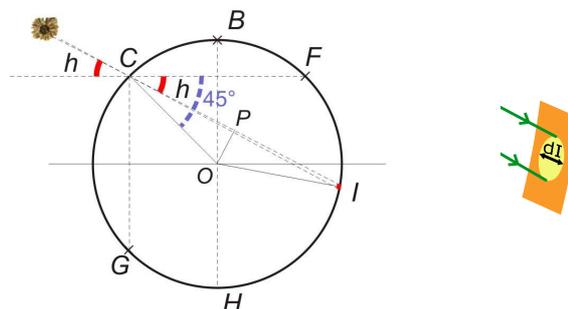


Fig.9. La largeur *dI* de la tache du Soleil est donnée par la relation : $\tan(0,5^\circ) = dI / (2 CP) = dI / (2 R \cos(45^\circ - h))$

R (mm)	Largeur de la tache (mm)	
	pour $h = 0^\circ$	pour $h = 45^\circ$
40	0,49	0,70
50	0,62	0,87
60	0,74	1,05

Tableau II. Dimension de la tache du Soleil.

Conclusion

Ce petit instrument à construire soi-même peut être une source de plaisir : réfléchir pour comprendre son principe, remonter les siècles en s'intéressant à l'histoire pour son utilisation, se faire aussi plaisir par une construction manuelle concrète par une réalisation et, si l'on aime toucher à la programmation, faciliter son tracé, sa construction et son esthétique.

Bibliographie

Le texte de P. Bouguer *De la méthode d'observer exactement sur mer la hauteur des astres* se trouve dans le *Recueil des pièces qui ont remporté les prix de l'Académie royale des sciences, depuis leur fondation jusqu'à présent* Tome second 1732

<http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k6415366/> et autres.

La Revue d'histoire des sciences a publié une étude sur P. Bouguer 2010/1 (Tome 63) accessible sur Internet

(<http://www.cairn.info/revue-d-histoire-des-sciences-2010-1.htm>) et ses méthodes mathématiques. Voir à cette page l'article spécial sur mémoire de P. Bouguer par Arnaud Mayrargue.

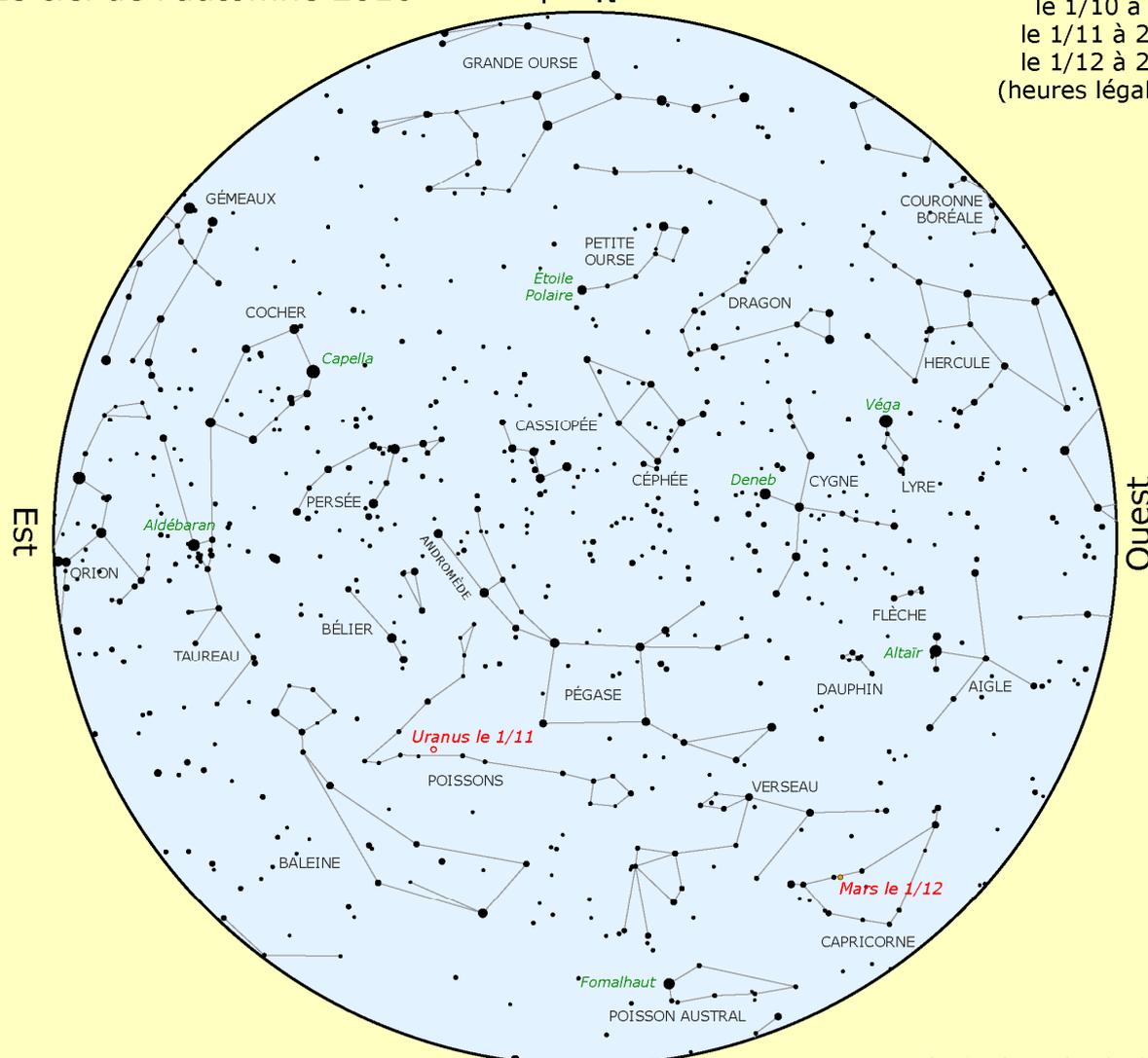
¹⁴ Fichier *anneau-geometrie.ggb* à la même page Internet.

LE CIEL DE L'AUTOMNE 2016

Le ciel de l'automne 2016

Nord

Ciel valable
le 1/10 à 1 h
le 1/11 à 22 h
le 1/12 à 20 h
(heures légales)



Mars est placée pour le 1/12/16

Sud

Carte du ciel calculée
pour la latitude de 47°

Visibilité des planètes

Mercure est à observer le matin fin septembre et début octobre (élongation maximale le 28/09).

Vénus se voit de mieux en mieux au cours de l'automne, le soir au sud-ouest.

Mars est toujours visible le soir mais elle continue à s'éloigner de la Terre et est de moins en moins lumineuse.

Jupiter passe derrière le Soleil le 26 septembre et on commence à pouvoir l'observer le matin à la fin de l'automne.

On peut encore voir **Saturne** le soir à l'ouest au début de l'automne. Elle passe derrière le Soleil le 10 décembre.

Uranus peut être recherchée dans les Poissons.

Quelques événements (heures légales)

22/09 : équinoxe d'automne à 16 h 21.

29/09 (matin) : rapprochement Lune Mercure.

11/10 (matin) : rapprochement Mercure Jupiter (0,8°).

15/10 : opposition de la planète Uranus.

30/10 : passage à l'heure d'hiver.

Deux beaux essais d'étoiles filantes cet automne :

17/11 : maximum des Léonides.

13-14/12 : maximum des Géminides.

21/12 : solstice d'hiver à 11 h 44.

Lune

Nouvelle Lune : les 1/10, 30/10, 29/11.

Pleine Lune : les 16/10, 14/11, 14/12.

AVEC NOS ÉLÈVES

Mercuré et l'unité astronomique

Francis Berthomieu, Montfort sur Argens

Lors du dernier passage de Mercure devant le Soleil, le 9 mai 2016, nous avons proposé un protocole expérimental permettant de tenter une détermination de la distance Terre Soleil. Vous trouverez ici une exploitation assez simple d'images professionnelles qui permet de trouver une bonne approximation de la valeur de l'unité astronomique.

C'est en 1761 et 1769 que les passages de Vénus devant le Soleil furent utilisés pour calculer précisément la valeur de l'unité astronomique. Suivant la proposition faite par Edmond Halley, hélas disparu en 1742, de nombreuses expéditions furent organisées vers divers endroits du monde pour effectuer les observations.

En 2004 et 2012, nous vous avons largement informés dans ces colonnes sur le phénomène et les mesures qui peuvent être faites.¹

Un passage de Mercure peut aussi être utilisé dans le même but.

La méthode est assez simple : vue depuis deux observatoires terrestres suffisamment distants, la position de la petite planète sur le disque solaire n'est pas la même, suite à un effet de parallaxe.

Les difficultés sont les suivantes :

- il faut avoir deux images prises simultanément ;
- il faut pouvoir les superposer rigoureusement pour y distinguer les deux positions et mesurer leur écart angulaire.

Nous avons trouvé sur Internet deux images du Soleil prises à la même heure (14 h 16 TU) par deux des observatoires du réseau GONG (Global Oscillations Network Group). Le premier est aux États-Unis, le Big Bear Sun Observatory (BBSO), le deuxième dans l'île de Tenerife, aux îles Canaries, à proximité du volcan el Teide. Il est commode de déterminer la distance entre les droites (quasi) parallèles qui vont de ces deux observatoires au Soleil en cherchant sur le site Fourmilab² l'image

de la Terre vue du Soleil à la date et à l'heure du passage de Mercure.

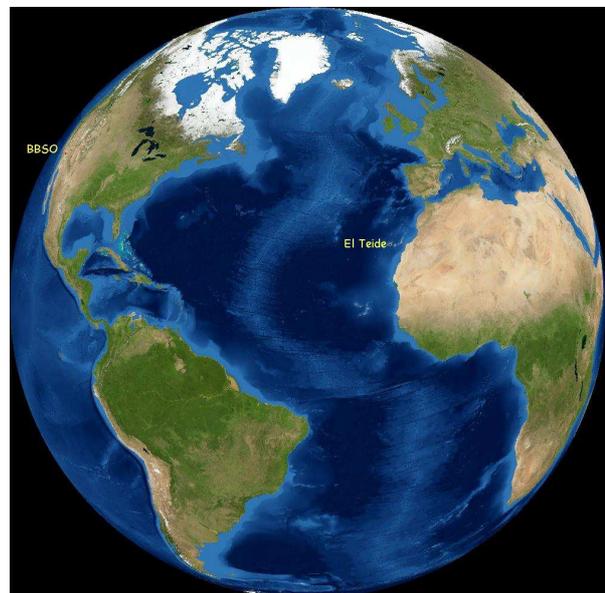


Fig.1.

Sur cette image de 1000 pixels de côté, correspondant au diamètre de la Terre, soit 12 800 km, on relève les coordonnées (en pixels) des deux observatoires. Un rapide calcul permet de déterminer la distance cherchée. Nous avons trouvé 565 pixels, ce qui correspond à une distance de 7 240 km.

La superposition des deux images GONG, où le diamètre du disque solaire est de 1 800 pixels, (soit fort commodément 1 seconde d'arc par pixel !), donne l'image de la figure 2. Elle est hélas trop peu lisible à l'échelle de l'impression.

¹ Voir les articles publiés en 2004 dans les CC n°105-106-107-108

² <http://www.fourmilab.ch/cgi-bin/uncgi/earth/>

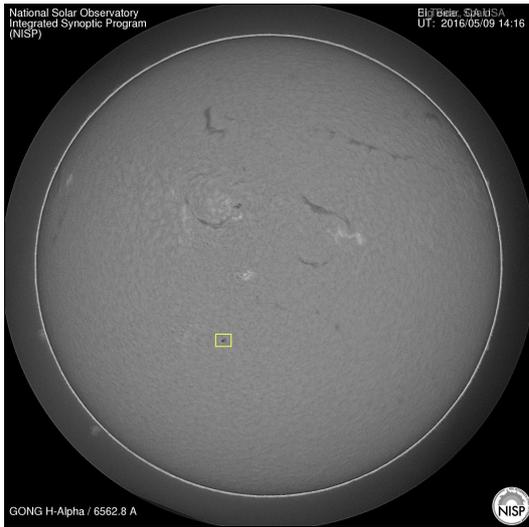


Fig.2.

Nous donnons donc un agrandissement de la zone où apparaissent superposées les deux images de Mercure sur fond de disque solaire avec les cercles qui ont permis d'en déterminer les centres le plus précisément possible (figure 3)

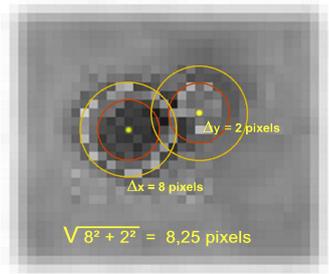


Fig.3.

La distance angulaire α entre les positions des deux centres de Mercure est ainsi facile à calculer : on trouve 8,25 pixels et donc 8,25 secondes d'arc.

Pour la suite des calculs, nous avons besoin de connaître la distance Soleil-Mercure en unités astronomiques. On est alors confronté à une nouvelle difficulté : Il faut tenir compte du fait que l'orbite de Mercure a une excentricité non négligeable. Néanmoins cette orbite peut être assimilée à un cercle mais le Soleil y serait légèrement excentré.

Le schéma de la figure 4 va nous aider : nous admettons que l'observation permet de connaître un certain nombre de paramètres de l'orbite de Mercure.

- Demi grand axe : $a = 0,387$ UA
- Argument du périhélie (c'est l'angle entre le nœud ascendant de l'orbite et le périhélie) $\beta = 29^\circ$
- Excentricité $e = 0,206$

D'où l'on tire la distance au périhélie

$$q = a \times (1 - e) = 0,307 \text{ UA}$$

On trace donc un cercle de rayon 0,387 UA (sur un schéma numérique, un rayon de 387 pixels).

Un diamètre (ici un segment horizontal) contiendra Soleil et périhélie. Le Soleil est à 0,307 UA du périhélie sur cette droite. Le nœud ascendant est placé

à $29,2^\circ$ du périhélie, le nœud descendant lui est diamétralement opposé. Il est alors facile de mesurer (à la règle) la distance Soleil – nœud ascendant (c'est au passage de Mercure par ce nœud qu'a eu lieu le phénomène) : on trouve 0,456 UA.

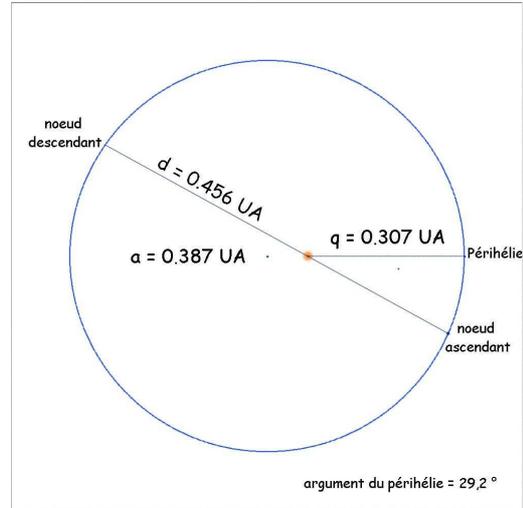


Fig.4.

Il nous reste à calculer la distance, à la surface du Soleil, entre les deux projections S_1 et S_2 de la planète Mercure vue de la Terre (figure 5).

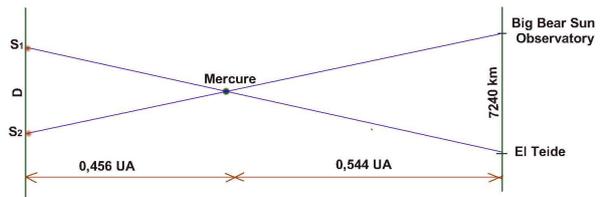


Fig.5.

Le théorème de Thalès sera invoqué...

$$\text{Et l'on trouve : } S_1S_2 = 7240 \times 0,456 / 0,544$$

$$\text{C'est-à-dire } S_1S_2 \approx 6\,070 \text{ km}$$

La distance Terre-Soleil lors du passage de Mercure (notée ici L) est donc la distance à laquelle il faut se placer pour voir un objet de 6 070 km sous un angle de 8,25 secondes d'arc.

Le calcul devient simple :

$$\alpha = 8,25''$$

$$\text{En radians : } \alpha = (8,25 \times \pi) / (3600 \times 180)$$

$$\text{c'est à dire : } \alpha \approx 4 \cdot 10^{-5} \text{ rad}$$

Et donc :

$$L = 6070 / 4 \cdot 10^{-5} \approx 152\,000\,000 \text{ km}$$

Ce qui est une estimation plutôt satisfaisante de l'unité astronomique ... à comparer avec la distance que donnent les éphémérides.

Nota : Si l'on veut tenir compte simplement des inévitables incertitudes sur les diverses mesures, on peut effectuer des encadrements :

$$8'' < \alpha < 9''$$

$$6\,000 \text{ km} < S_1S_2 < 6\,100 \text{ km}$$

Ce qui donne :

$$137 \cdot 10^6 \text{ km} < L < 157 \cdot 10^6 \text{ km}$$

AVEC NOS ÉLÈVES

En attendant Mercure

Jean-François Consigli, école J.P. Papon, circonscription Nice 1

Le passage récent de la planète Mercure devant le Soleil constituait une belle opportunité pour décrire, avec toutes les précautions indispensables, le système solaire et le mouvement des planètes.

Parmi les planètes visibles à l'œil nu, Mercure est la plus difficile à observer. Mais le 9 mai 2016 après-midi, la planète est passée devant le Soleil, facilitant ainsi son observation. Ce phénomène, appelé passage ou transit, est assez rare et n'a lieu qu'une dizaine de fois par siècle. Le précédent passage visible depuis la France remonte à 2003 et le prochain, totalement visible depuis l'Europe, n'aura lieu qu'en 2032 !

Moins spectaculaire qu'une éclipse de Soleil, le passage de Mercure n'en demeure pas moins une belle opportunité pour décrire le Système solaire et le mouvement des planètes. C'est aussi l'occasion d'observer Mercure et le Soleil, et d'insister sur les précautions indispensables pour observer l'astre du jour. C'est également ce même type de phénomène qui permet aujourd'hui aux astronomes de détecter de nombreuses planètes autour d'étoiles situées au-delà de notre Système solaire.

Une journée particulière

L'école JP Papon a consacré la journée du 9 mai au passage de Mercure. De la matinée jusqu'en fin d'après-midi, différentes activités ont été proposées aux élèves de chaque classe : diaporamas commentés, rencontre avec un chercheur, ateliers de manipulation, découverte d'instruments optiques spécialisés pour l'astronomie et enfin observations astronomiques.

Un astronome professionnel de l'Observatoire de la Côte d'Azur, spécialiste de l'étude des petits corps du Système solaire, était présent le 9 mai pour accompagner et faire participer les élèves aux différentes activités.

En attendant Mercure...

Durant la matinée, chaque classe a assisté à deux diaporamas commentés et déclinés par niveau (CP-CE et CM). Ces présentations ont permis de faire découvrir ce qui se cachait derrière le passage de Mercure mais aussi de partir à la découverte et

d'approfondir les connaissances sur le Système solaire. Le diaporama sur le Système solaire a été réalisé et présenté par Benoît Carry, astronome professionnel à l'Observatoire de la Côte d'Azur.



Le passage vu d'ailleurs...

Un lieu de projection a été aménagé dans le hall de l'école afin d'être prêt dans l'éventualité de conditions météorologiques défavorables. Le passage de Mercure était diffusé en direct sur Internet depuis différents lieux, notamment les îles Canaries, en Espagne.

On voit devant l'écran les montures (trépieds) destinées à supporter la lunette astronomique et le télescope.



C'est quoi un télescope ?

Le passage de Mercure était également l'occasion de faire découvrir aux élèves de vrais instruments d'astronomie (télescope et lunette) et de leur faire remarquer l'effet de grandissement des images.

Quand le temps était couvert, les enfants se sont essayés à l'observation en tentant de reconnaître grâce au télescope le dessin affiché sur l'une des vitres de la façade de l'école (encadré rouge sur l'image).



Plus petite ou plus loin ?

Le but de cette activité était de comparer le passage de Mercure et l'éclipse de Soleil de 2015 observée par les élèves à l'école. Lors de l'éclipse, la Lune avait occulté presque entièrement le Soleil. Mercure, en revanche, n'a occulté qu'une infime partie du disque solaire.

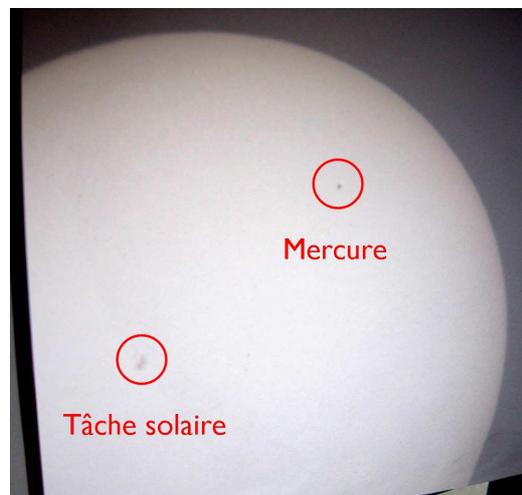
Par groupe, les élèves ont constaté que la Lune, bien que plus petite que Mercure, cachait davantage le Soleil car elle se situe plus près de la Terre. En déplaçant le premier plot, les élèves cherchaient la distance où placer la Lune afin qu'elle puisse cacher entièrement le Soleil. En comparaison, Mercure, plus grande que la Lune, mais plus éloignée de la Terre, ne cache qu'une très petite partie du Soleil.



Voilà Mercure !

Dès les premières éclaircies, les instruments (lunette, télescope et solarscope) sont installés. Les dangers liés à une observation non protégée du Soleil ont été plusieurs fois répétés lors des diaporamas mais aussi devant les instruments.

Les observations ont été réalisées par projection, évitant ainsi tout risque pour les yeux des enfants. Comme attendu, Mercure était visible sous la forme d'un petit disque noir passant devant le Soleil. Ce jour-là, une tâche solaire de forme irrégulière était également observable à la surface du Soleil.



LA VIE ASSOCIATIVE

Stage de Valdrôme Une initiation à l'astronomie pour les jeunes

Tous les ans au mois d'août, la Société Astronomique de France (SAF) organise pendant une quinzaine de jours les rencontres « Astrociel ». Bon nombre de membres de l'association, astronomes amateurs avertis, animateurs de clubs se retrouvent ainsi sur le site de Valdrôme, une petite station de sports d'hiver située à plus de 1 300 mètres d'altitude et qui propose l'été des activités de plein air. Sur un grand parking proche du restaurant de la station et d'une installation sanitaire collective, des dizaines de télescopes sont installés, les propriétaires pouvant dormir (un peu) près de leur instrument.



Cette installation sur un site en altitude loin de toute lumière parasite permet une visite étonnante du ciel profond et favorise les échanges de conseils et de pratiques entre amateurs très aguerris et visiteurs du ciel dans leurs premières découvertes.

C'est dans ce cadre très favorable que la SAF a imaginé l'organisation d'une initiation à l'astronomie pour les jeunes, intitulée « Astrojeunes », du lundi 8 au jeudi 11 août, avec des ateliers pratiques dans la journée, et une confrontation avec la voûte étoilée en soirée profitant des nombreux instruments installés.

Ce projet a été mis en place, avec d'autres organisateurs de la SAF, par Christian Larcher, qui est aussi un membre éminent du CLEA m'a proposé d'imaginer et de réaliser une partie des activités pédagogiques de ces journées.



J'ai trouvé vraiment intéressante l'idée d'expérimenter avec des jeunes adolescents de niveau collège les pratiques pédagogiques que je pouvais proposer pendant l'école d'été 2016 du CLEA une semaine plus tard, ou effectuées au cours des ateliers d'écoles d'été antérieures.



Finalement six jeunes seulement, cinq garçons et une jeune fille de 13 ans, se sont inscrits auprès de la SAF pour cette aventure, le projet étant nouveau avec des difficultés pour le faire connaître. Pour le CLEA, Marie-Agnès Lahellec s'est proposée pour m'aider à construire les ateliers, à assurer leur bon déroulement

ainsi que l'encadrement de ces astronomes en herbe le soir.

Les jeunes ont suivi de façon assez spontanée et avec une réelle participation les activités proposées par le CLEA résumées dans l'encadré ci-joint, et celles préparées par Pierre Durand et ses collègues de la SAF (expériences avec des lentilles et des miroirs, mise en station d'un instrument, observation du Soleil, ...). Certains avaient déjà un petit instrument et connaissaient le ciel, initiés par leurs parents, d'autres étaient complètement néophytes.

Il me paraît évident que cette idée de proposer une initiation à l'astronomie pour les jeunes, avec cette partie observationnelle le soir dans d'excellentes conditions, doit être reprise dans les années à venir, avec la publicité la plus large possible. Par ailleurs, ce sentiment s'est renforcé encore davantage la semaine suivante et à quelques kilomètres de Valdrôme, pendant l'école d'été du CLEA à laquelle je participais à Gap-Bayard, du 18 au 25 août. Pendant ce stage de formation pour les enseignants, un même groupe de 5

à 6 jeunes participants, enfants ou petits-enfants de stagiaires ou de formateurs, ont pleinement participé à quelques conférences, à des ateliers et à des observations nocturnes, et ont semblé en tirer le plus grand profit.



<http://saf-astronomie.fr/>

Programme pour le stage Astrojeunes, proposé par le CLEA

Thème 1 : la Lune

1. Définition et description des phases avec une maquette

Maquette 1 : boules Terre et Lune bicolores se déplaçant sur la trajectoire de la Lune.

2. Ronde pour expliquer les phases et la face cachée.

Acteurs jouant Terre, Lune et Soleil : phases, heure de levers et couchers, face cachée...

3. Maquette permettant de viser la Lune pour en déterminer l'âge.

Le lunoscope : âge de la Lune en fonction de la détermination de l'angle entre Soleil et Lune.

4. Maquette permettant de matérialiser le plan contenant la trajectoire de la Lune.

L'orbilune : maquette 3D de la trajectoire de la Lune par rapport à l'écliptique.

5. Simulation des éclipses (par beau temps)

Au Soleil, avec un globe terrestre correctement orienté et une boule Lune.

6. Ronde pour expliquer les marées

Avec 5 acteurs : Terre, Lune, Soleil et 2 bateaux

7. Synthèse : jeux à partir de fausses représentations sur les phases et les éclipses

Jeux de plusieurs cartes postales : phases impossibles, différence phases-éclipses...

Thème 2 : la Terre et le Soleil

La révolution de la Terre autour du Soleil

1. Petite maquette 2D du zodiaque.

2. Maquette 3D du zodiaque évoluant en planétaire.

3. Grande maquette de précession des équinoxes.

4. L'écliptique sur une carte céleste tournante.

La rotation de la Terre sur elle-même

1. Maquette permettant de relever la trajectoire apparente du Soleil suivant les saisons

Le saladier transparent

2. Construction d'un cadran solaire équatorial

Cadran solaire construit avec un boîtier CD et une pique en bois

3. Maquette montrant le principe d'un cadran analemattique

4. Simulation du mouvement de la Terre avec un globe terrestre

Ateliers complémentaires à l'intérieur ou en cas de mauvais temps

1. Utilisation du logiciel Stellarium

Pour retrouver ou prévoir les résultats observés sur les maquettes.

2. Travail sur les conceptions initiales des participants

Dessins sur les phases de Lune ou les saisons

3. Discussion sur le pourquoi des saisons

Mesures dimensions images du Soleil, travail sur calendriers...

4. Maquette à l'échelle du système solaire

Matériel emporté par chaque participant

- Lunoscope

- Petite maquette de simulation de la trajectoire de la Lune

- Une photo synthèse sur les erreurs

- Cadran zodiaque 2D

- Cadran solaire CD-ROM

- Maquette cadran analemattique

- Carte céleste tournante

L'EEA GAP-2016

Sylvie Cuenot et Stéphanie Ploquin

Comme chaque année depuis maintenant plusieurs décennies, l'école d'été du CLEA s'est déroulée dans le cadre idyllique et reposant du col Bayard du 18 août au 25 août 2016 dans la bonne humeur et le plaisir d'apprendre. Le thème choisi cette année « Image d'astronomie... pour quoi faire ? » a réuni 54 personnes venues des quatre coins de France, d'Europe ainsi que de Tunisie, parmi lesquelles 39 stagiaires et formateurs et 15 accompagnants et enfants.

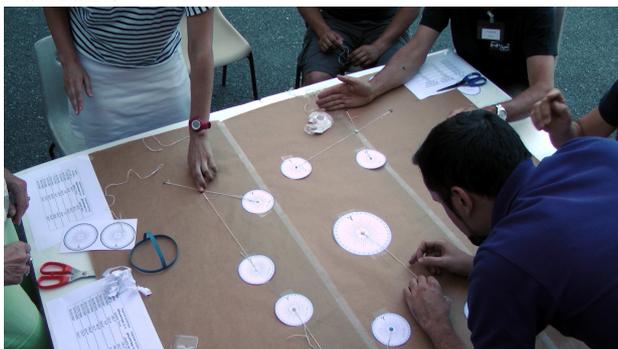
Les stagiaires ont pu bénéficier de 9 cours, 49 ateliers divers et variés ainsi que d'une conférence ouverte à tous de François Mignard sur « L'énigme du ciel noir » qui a réuni un large public et permis de clôturer cette semaine en beauté.

Comment se passe une journée à l'école d'été ?

La journée commence vers 7 h, pour les volontaires uniquement, avec une marche rapide autour du golf : oxygénation des neurones garantie !

La matinée est ensuite consacrée aux cours avec cette année des sujets tels que l'émission lumineuse dans les atmosphères planétaires, la dynamique des paysages dans le Système solaire ou encore les distances en astronomie.

Des explications claires et rigoureuses associées à une pédagogie adaptée à la diversité de l'auditoire sont données par des enseignants et chercheurs de haute renommée sur des sujets à la pointe de l'actualité.



La pause déjeuner, toujours appréciée, fait bonne place aux spécialités locales tout en permettant des échanges fructueux sur les dernières connaissances acquises.

La journée continue avec les ateliers, de nature et de contenus divers (construction de maquettes pédagogiques, découverte et initiation à l'usage de logiciels, réflexion autour de pratiques pédagogiques, initiation ou perfectionnement à l'utilisation du matériel d'astronomie). Seul le choix

est difficile et engendre nécessairement quelques frustrations passagères...

Vers 19 h un apéritif est parfois fourni par des mystérieux et néanmoins généreux donateurs....

Le dîner permet ensuite de reprendre quelques forces avant d'aborder la soirée d'observation.

Dès 21 h les télescopes, lunettes, jumelles, appareils photo s'installent dans un ballet bien organisé prêts à capter toutes les lumières du ciel.

Le moment fort de la semaine fut la sortie tant attendue au Pic de Bure pour la visite de l'observatoire NOEMA. Elle a rassemblé une trentaine de personnes et fut riche en émotions !

Montée spectaculaire dans un décor de rêve en téléphérique par petits groupes de 10 personnes jusqu'au sommet à 2 250m puis visite guidée du site, des antennes, de l'atelier de fabrication et de la salle de contrôle. »

Un grand merci donc à Bertrand Gautier et son équipe pour cette visite privilégiée.

Une vidéo présentant cette visite est disponible sur le site du CLEA.

Il ne faudrait pas oublier non plus tous les autres petits bonheurs et moments partagés au cours de cette semaine, comme cette initiation au golf gentiment proposée par les gérants de l'établissement hôtelier, sans oublier la traditionnelle soirée de clôture qui a permis d'apprécier les talents de journaliste, cameraman, chanteur ou animateur de jeu de nombreux stagiaires. Soirée particulièrement émouvante cette année pour le départ d'Anne-Marie et George Paturel vers d'autres horizons.

Rendez-vous est donc pris pour l'année prochaine du 12 au 19 juillet pour de nouvelles aventures !





Photo Christophe Boulanger 240 poses de 30 s



École d'été 2017 en juillet

La prochaine école d'été d'astronomie du CLEA aura lieu entre le 12 et le 19 juillet 2017, de nombreuses personnes encadrant l'école étant absentes en août (en particulier pour cause d'éclipse totale de Soleil").

Solutions des mots croisés de la page 22

Horizontalement

1. Déclinaison. 2. Equ (Equuleus ou Petit Cheval). Log. Pro. 3. Su. Zénith. 4. Cabot. Trend. 5. Aton. IRO (laboratoire de Limoges). 6. Référentiel. 7. Tu. Suffoqué. 8. Ère. HI. Nude. 9. Terre (ce serait tout à fait vrai si la Terre était toujours dans le plan de l'écliptique mais c'est en réalité le centre de masse Terre Lune qui définit ce plan). ESB.

Verticalement

1. Descartes. 2. Équateur. 3. Cu. Bof. ET. 4. Zones. 5. Îlet (Kant parle de ce qu'on appelait nébuleuses à son époque comme des Univers îles). Ruhr. 6. Non. Kéfir. 7. Agit. NF. 8. Triton (satellite de Neptune découvert par William Lassell). 9. Sphérique. 10. Or. Nœuds (l'orbite d'une planète coupe deux fois l'écliptique aux nœuds – l'un descendant, l'autre ascendant – sauf la Terre qui se trouve dans le plan de l'écliptique). 11. Nord. Leeb.

École d'Été d'Astronomie



Vous souhaitez débiter ou vous perfectionner en astronomie ?

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

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



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

Renseignements et vidéo sur :
acces.ens-lyon.fr/clea/aLaUne/EEA-clea

Les productions du CLEA

En plus du bulletin de liaison entre les abonnés que sont les Cahiers Clairaut, le CLEA a réalisé diverses productions.

Fruit d'expérimentations, d'échanges, de mises au point et de réflexions pédagogiques d'astronomes et d'enseignants d'écoles, de collèges, de lycées, ces productions se présentent sous différentes formes :

Fiches pédagogiques

Ce sont des hors série des Cahiers Clairaut conçus par le Groupe de Recherche Pédagogique du CLEA : astronomie à l'école, la Lune, gravitation et lumière, mathématique et astronomie, ...

Fascicules thématiques de la formation des maîtres, en astronomie

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

Matériel

Filtres colorés et réseaux de diffraction.

DVD

Les archives du CLEA de 1978 à 2006 (Cahiers Clairaut et Ecoles d'Été d'Astronomie).

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

Le formulaire de commande est sur le site.

Le site internet

Une information toujours actualisée

www.clea-astro.eu



LES CAHIERS CLAIRAUT

LES CAHIERS CLAIRAUT

N° 141 - Mars 2013 7 €



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

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

COMMENT NOUS JOINDRE ?

Informations générales :

www.clea-astro.eu

OU

www.ac-nice.fr/clea

Siège social :

CLEA, c/o CAPE
case courrier 7078
Université Paris Diderot
5, rue Thomas Mann
75205 PARIS Cedex

École d'Été d'Astronomie :

daniele.imbault@cea.fr

Cahiers Clairaut :

christianlarcher3@gmail.com

Ventes des productions :

[http://ventes.clea-astro.eu/](http://ventes.clea-astro.eu)

Site internet :

berthomi@ac-nice.fr
charles-henri.eyraud@ens-lyon.fr

Adhésion / Abonnement :

Adhésion CLEA pour 2015 :	10 €
Abonnement CC pour 2015 :	25 €
Adhésion + abonnement CC :	35 €
Adhésion + abonnement CC + abonnement numérique :	40 €

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

Directrice de la Publication : Cécile Ferrari
Rédacteur de publication : Christian Larcher
Imprimerie France Quercy 46090 MERCUËS

Premier dépôt légal : 1er trimestre 1979
Numéro CPPAP : 0315 G 89368

Prix au numéro : 9 €

Revue trimestrielle : numéro 155 automne 2016