LES CAHIERS CLAIRAUT

N° 131 - Septembre 2010 8 €

Bulletin du Comité de Liaison Enseignants et Astronomes

Numéro 131 - automne 2010

ISSN 0758-234X

Comité de Liaison Enseignants 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.

Membres d'honneur : Jean-Claude Pecker

Présidents d'honneur :
Lucienne Gouguenheim,
Georges Paturel

Bureau du CLEA pour 2010

Présidente : Cécile Ferrari
Trésorier : Jean Ripert
Trésorière Adjointe : Danièle Maurel
Secrétaire : Christian Larcher
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: Cécile Ferrari

Responsables du site :
Francis Berthomieu et Charles-Henri Eyraud

Merci à tous celles et ceux qui ont permis la réalisation de ce Cahiers Clairaut, nous citerons : Francis Berthomieu, Pierre Causeret, Filomena Coscarella, Jean-Luc Fouquet, Christian Larcher, Pierre Le Fur, Philippe Merlin, Patrick Pelletier, Jean Ripert, Noël Robichon, Delphine Russeil, Béatrice Sandré, Michel Vignand.

Les auteurs recevront plusieurs numéros 131, afin de faire connaître la revue autour d'eux.

Nous nous excusons auprès de ceux qui nous ont envoyé des articles que nous n'avons pas encore publiés.

Éclipse de Soleil du 11 juillet 2010 Photos prises par Patrick Pelletier à l'île de Pâques. À gauche la couronne À droite, l'image montre un grain de Baily, un point lumineux formé par la lumière solaire passant par un point plus bas du limbe lunaire. Avec la basse couronne solaire visible autour de la Lune, l'image ressemble à une bague sertie d'un diamant.
Photo de gauche : Canon 5D MarkII, lunette Apochromatique diamètre 80 mm Longueur focale 500 mm ; Traitement des Images : superposition de 8 images temps de pose 1/4000-1/2000-1/500-1/250-1/125-1/30-1/15-1/4 seconde à 400 ISO. Finalisation de l'image avec une "dureté de 50%, 80% et 100%. Traitement de ces 3 dernières images en HDR (High Dynamic Resolution)

Les Cahiers Clairaut

Automne 2010 n° 131

Éditorial

Avec ce numéro d'automne nous abordons dans la partie thématique l'étude des éclipses de Soleil et de Lune. Dans l'histoire humaine, ces phénomènes frappaient fortement l'imagination populaire, ils étaient perçus comme terrifiants. Il ne s'agissait pas moins que d'un combat vital, un combat entre la lumière et l'obscurité facilement assimilé au combat du bien contre le mal. Ces combats mettaient en jeux des animaux fabuleux (dragon, serpent, licorne, chat noir, démons). De nombreuses civilisations restent profondément marquées par ces phénomènes spectaculaires. Les activités proposées dans ce numéro devraient contribuer à lever le mystère et à rendre presque familiers ces rendez-vous célestes.

Dès cette rentrée scolaire un nouveau programme de physique-chimie s'applique en classe de seconde générale. Ce programme comprend trois thèmes dont l'un concerne l'Univers.
Le CLEA vous propose de nouveaux documents qui seront complétés tout au long de l'année, en attendant nous vous invitons à retrouver dans le dossier LUNAP, sur le site du CLEA, les documents déjà existants.
Bonne rentrée scolaire à tous.

Christian Larcher
Pour la rédaction

Larcher2@wanadoo.fr

L'**Assemblée Générale**
de notre association

aura lieu à **Bordeaux**

le dimanche **21 octobre 2010**

de 9 h à 17 h

Histoire
Histoires sélènes
Pierre Le Fur p 2

Thème : LES ÉCLIPSES p 7

Éclipses : notions de base
Pierre Causeret p 8

Avec nos élèves
Le Lunoscope
Béatrice Sandré p 11

Observation
Éclipse de Lune du 21 décembre 2010
Pierre Causeret p 15

Observation
Éclipse de Soleil du 4 janvier 2011
Pierre Causeret p 17

Réalisation
L'OrbiLune
Philippe Merlin p 19

Histoire
Interaction lumière-matière
Christian Larcher p 23

Avec nos élèves
Activités autour des éclipses
Jean-Luc. Fouquet, Pierre Causeret p 26

Avec nos élèves
Ecclisi di Sole
Filomena Coscarella, Noël Robichon p 28

Article de fond
Structure de notre Galaxie
Delphine Russeil p 31

Ciel de l'automne
Pierre Causeret p 36

Lecture pour la Marquise
Christian Larcher p 37

Remue-méninges
Pierre Causeret p 38

Vie de l'association

EEA Gap 2010 p 39
Mots croisés p 39

Nouveau programme de seconde
"L'Univers" p 40

Solutions p 40

Nouveaux programmes de seconde voir page 40

HISTOIRE

Histoires sélènes

Pierre Le Fur, MPSI/ISEN Toulon
Formateur en astronomie, académie de Nice

Des souvenirs d'observations lunaires évoquent un passage de l'histoire de l'astronomie. D'Hévélius à Riccioli puis Schröter, les gravures sélènes précisent la "géo"graphie lunaire. Elles témoignent de l'évolution des instruments optiques et démontrent l'éternelle envie de découverte de l'Homme.

La promenade quotidienne et vespérale avec mon fidèle bichon s'achève. Nous quittons la rue illuminée jaune sodium. Nous pénétrons dans le jardin parfumé de fleurs printanières, dans une ambiance sombre. Isolés de la ville par d'épaisses frondaisons protectrices, mes yeux s'adaptent ; maintenant, les étoiles se détachent clairement du fond du ciel toulonnais, se multiplient et viennent accompagner Régulus, Saturne et Mars, seuls visibles depuis la rue. Mais, au dessus des tuiles provençales, de fines traînées de nuages laissent leurs traces blafardes et délicates sur un fond de ciel anormalement clair, dans la direction sud-est : la Lune prépare son lever. Sélène, timide, nous prévient de son arrivée. Dans quelques minutes elle sera le luminaire céleste le plus imposant. Son éclat tapissera les cieux d'un inimitable dégradé rayonnant d'un jaune-gris à un bleu pastel.

Mais j'ai l'impression de revivre cette scène, les souvenirs de mes premières observations astronomiques, à l'âge de raison, me reviennent. Ce lever lunaire me relie au passé et je repense à ces heures occupées à dessiner les cratères ou admirer les montagnes lunaires, avec ma première lunette astronomique.

Les premiers dessins lunaires

Dès le lendemain, je fouille dans les dossiers de mes archives d'observations et j'en extrais quelques spécimens de croquis lunaires accompagnant de nombreux dessins des satellites de Jupiter. Je remarque alors un parallèle flagrant entre la démarche tâtonnante de l'observateur débutant et celle des savants du XVII^{e} siècle, équipés des premières lunettes.

Quatre siècles se sont écoulés entre le regard de Galilée ou d'Hévélius qui savaient être les premiers découvreurs du monde lunaire et le premier contact visuel de l'enfant avec la réalité de la Lune, qu'il croyait connaître au travers des voyages "Apollo". La Lune, notre matière observationnelle n'a pas changé, les lunettes d'autrefois ou d'aujourd'hui donnent des résultats finalement assez proches et l'étonnement comme la curiosité sont peut-être identiques.

Sans doute, ma première lunette de diamètre 38 mm possédait un objectif achromatique, doublet optique inventé au XVIII^{e} siècle (Hall et Dollond vers 1758), ouvert à un rapport focale sur diamètre F/D = 10 environ. Forte de grossissements 30 à 60 fois et montée sur un trépied de table, elle disposait d'une monture azimutale.

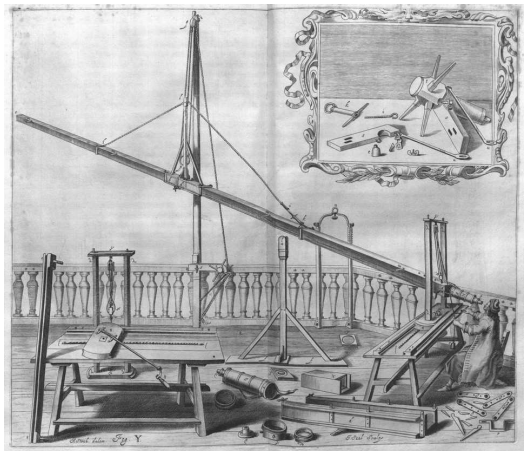


Fig.1. *Hévélius et une de ses "petites" lunettes de 10 cm de diamètre, environ, et de focale 10 m. Observez l'extraordinaire monture dont la stabilité devait être très relative (?). La distance entre l'œil de l'observateur et l'oculaire semble valoir environ 10 à 20 cm, ce qui conduit à un grossissement de 50 à 100 pour un oculaire convergent. (Image BNF).*

Ce petit instrument commun, du commerce, n'a plus rien à voir avec les folles ingéniosités optiques et mécaniques développées au milieu du XVI^{e} siècle, dont les incroyables "machines célestes" [1] de l'astronome polonais Hévélius sont un exemple. Pour contourner les problèmes d'aberrations chromatiques, il fallait alors construire des lunettes de rapport F/D supérieur à 100 (figure 1) ! L'on vit à Gdansk des instruments de 50 m de long, ou des objectifs placés sur des tours avec les observateurs au sol comme les lunettes sans tube d'Huygens (utilisées plus tard à

l'observatoire de Paris). Ainsi Hévélius réalisa la première carte sélène complète (figure 2), avec une toponymie précise, publiée dans "Selenographia" en 1645 [2].

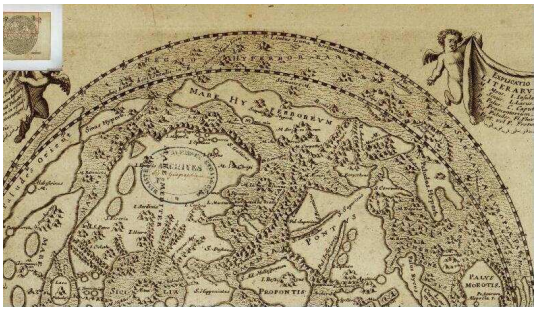


Fig.2. *Extrait de la carte de la lune d'Hévélius (1645). La dénomination des régions lunaires se révèle très différente de la toponymie lunaire moderne. En bas à gauche, sous le tampon "archives", on reconnaît le cratère –Copernic- avec ses traînées rayonnantes (cratère dénommé ici Aetna et Sicilia, dans la mer Méditerranée !…). (Image BNF).*

On y distingue les limites du limbe lunaire en pointillés, suivant la libration en latitude, qu'il découvrit. La nomenclature reste directement inspirée de la géographie terrestre européenne.
Avant lui, Gassendi et Peiresc s'étaient attelés à la cartographie lunaire durant l'automne 1636 comme l'attestent les gravures de Mellan (figure 3) qui avait participé à ces travaux. Sur la montagne Sainte Victoire, ils utilisèrent une première lunette, don de Galilée à Peiresc ; l'autre instrument optique, amené par Gassendi, venait déjà de l'atelier d'Hévélius [3].

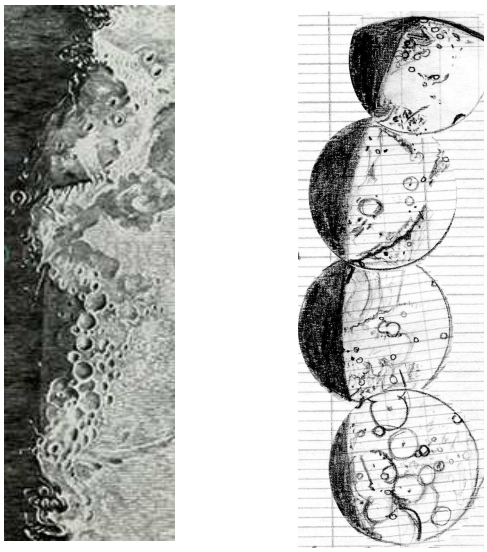


Fig.3*. Peu après le premier quartier …*
À gauche : gravure de Mellan observations faites avec Peiresc et Gassendi (1636). [4].
À droite : croquis d'observations lunaires à la lunette de 38 mm, 17 novembre 1969. Auteur.

Peiresc mourut peu après, en 1637, et le travail de cartographie lunaire ne fut pas achevé. Cependant le réalisme des gravures obtenues (figure 3) dépasse largement celui des travaux d'Hévélius.

En comparant avec les observations d'amateur débutant, on prend la mesure des progrès considérables de l'optique instrumentale entre le XVII^{e} siècle et nos jours.

S'approprier la Lune…

Je me rappelle cette lumière quasi-éblouissante sortant de l'oculaire qui vient frapper l'œil et qui impose une image claire et stable d'une Lune cratérisée, fourmillant de détails. Pour ces petits diamètres instrumentaux, la turbulence atmosphérique n'intervient presque pas, quelle chance ! Je cherchais à m'approprier la Lune en donnant des noms aux formations visibles (figure 4). Je voulais rendre familier ce paysage, m'y reconnaître. Il me fallait une carte lunaire.

Fig.4. *Un extrait de la carte de Riccioli et Grimaldi où apparaissent de haut en bas les noms de Pythéas, Ératosthène, Copernic et Reinhold (l'auteur des tables prunétiques en 1550 et copernicien convaincu). (Image BNF).*

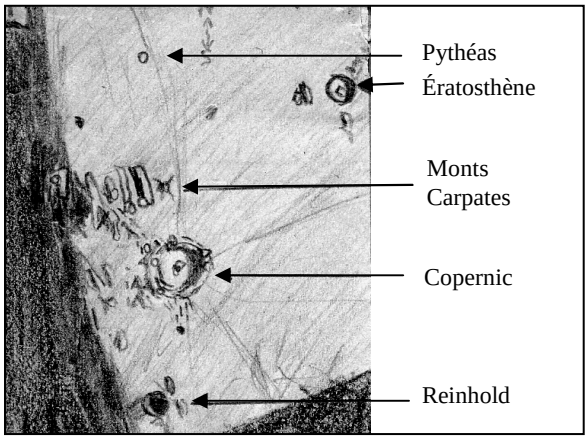


Fig.4 bis*. Dessin de la même région lunaire, avec la lunette de 38 mm et désignations toponymiques (février 1970 par l'auteur). Les cratères Kepler et Galilée sont encore dans la nuit au-delà du terminateur et attendent pour rejoindre le groupe des coperniciens.*

Je pense à Hévélius qui y retrouva la Sicile, et son volcan l'Etna (figure 2). Mais l'astronome qui a vraiment établi la dénomination des principales formations lunaires est à lui seul un paradoxe de

l'histoire : c'est le Père Jésuite Riccioli qui a travaillé sur les observations du Père Grimaldi (connu également pour son étude de la diffraction). Il publia sa cartographie lunaire dans "l'Almagestum Novum" en 1651 [4]. Dix huit années seulement se sont écoulées entre la condamnation de Galilée par Urbain VIII et son tribunal de cardinaux et voilà un Jésuite qui ose dénommer "Copernic" un des plus beaux cratères lunaires. Quel paradoxe pour un ouvrage dont le frontispice présente la supériorité du système de Tycho Brahé (modifié) sur celui de Copernic ! N'oublions pas que Riccioli fait figure d'astronome officiel du Saint-Siège, chargé de défendre la thèse d'une Terre immobile. "Heureusement", l'autre cratère majestueux d'où émane des éjectas radiaux s'appelle Tycho.

Paradoxalement, il y a peu de traces de religion dans le choix des noms, mis à part quelques saints (Théophile, Catherine, Cyrille…). Les mers se voient dénommées en fonction des influences supposées de la Lune (crises, humeurs…), la Lune est découpée en octants occupés par les cratères portant les noms des philosophes grecs (Platon) ou des savants anciens et contemporains de Riccioli (Pythéas ou Langrenus, astronome du roi d'Espagne). On a même un cratère Kepler ou "pire" un Galilée, certes discret mais il est là, non loin d'Hévélius ou d'Aristarque, héliocentristes présents ou passés ! On voit que le jésuite Riccioli ne balaye pas d'un revers de plume ces savants et leur théorie pourtant mise à l'index par l'inquisition.

Mais Riccioli ne manque pas, lui aussi, de s'approprier le monde lunaire avec plus de 30 cratères aux noms de Pères Jésuites : Scheiner, Clavius ou Riccius … Mais à sa décharge n'étaient-ils pas aussi de grands noms de la science ? Par exemple, Scheiner (rival de Galilée) avait observé la rotation des taches solaires en 1611 (Galilée en 1613) et inventé une lunette à oculaire convergent, un redresseur, une monture équatoriale... Clavius, quant à lui ne fut-il pas surnommé "l'Euclide du XVI^{e} siècle" ? Riccioli pense aussi au Père Ricci (cratère Riccius), parti en Chine porter les connaissances astronomiques de l'Occident. Son successeur Schall a même réalisé des observations de la Lune [5] pour l'empereur de Chine avec une reproduction de la lunette de Galilée, l'hérétique ! De plus, au début du XVI^{e} siècle, ils enseigneront aux astronomes de la cour impériale de Pékin la théorie condamnée de Copernic et non celle de Tycho, alors adoubée par le Vatican…

Enfin notre cartographe lunaire n'oublia sur le globe lunaire ni Grimaldi ni lui-même ; "charité bien ordonnée commence par soi-même" ? Mais rendons lui hommage, sa nomenclature a perduré (figure 5), pas celle d'Hévélius ni celle de Langrenus. Sans doute, faut-il y voir une reconnaissance de la qualité scientifique de son travail et peut-être un effet de son choix visionnaire et généreux des noms topo sélénographiques basés sur ceux de savants que les siècles suivants ont rendus incontournables et universels.

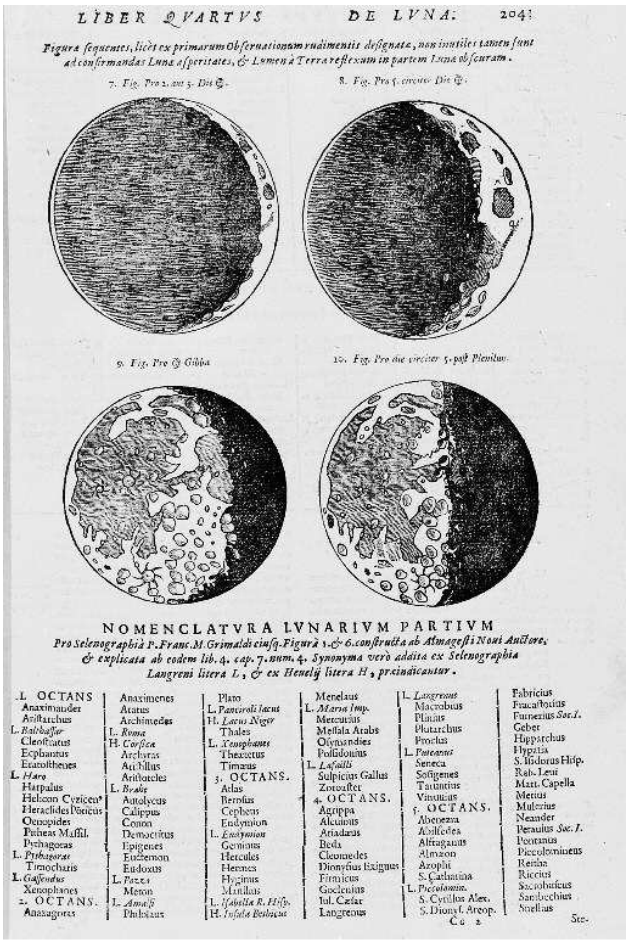

LIBER QVARTVS DE LVNA. 2043

Figura sequentes, licèt ex primarum Observationum rudimentis designatæ, non inutiles tamen sunt ad confirmandas Lunæ asperitates, & Lumen à Terra reflexum in partem Lunæ obscuram.

7. Fig. Pro 2. aut 3. Die ♐. 8. Fig. Pro 5. circiter Die ♐.

9. Fig. Pro ♐ Gibba 10. Fig. Pro die circiter 5. post Plenilun.

NOMENCLATVRA LVNARIVM PARTIVM

Pro Selenographia P. Franc. M. Grimaldi cinsq. Figurâ 1. & 6. construëta ab Almagesti Novi Auctore, & explicata ab eodem lib. 4. cap. 7. num. 4. Synonyma verò addita ex Selenographia Langreni litera L, & ex Heuelij litera H, præindicantur.

L OCTANS	Anaximenes	Plato	Menelaus	L. *Langrenus*	Fabricius
Anaximander	Atatus	L. *Pancroli lacus*	L. *Maria Imp.*	Macrobius	Fracastorius
Aristarchus	Archimedes	H. *Lacus Niger*	Mercurius	Plinius	Funerius *Soc. I.*
L. *Balthasar*	L. *Roma*	Thales	Mesala Arabs	Plutarchus	Geber
Cleostratus	H. *Corsica*	L. *Xenophanes*	Olympiodus	Proclus	Hipparchus
Ecphantus	Archytas	Thexetus	Follidonius	L. *Petavius*	Hypatia
Eratosthenes	Archilas	Timæus	L. *Lusatia*	Seneca	S. Isidorus Hisp.
L. *Maro*	Aristoteles	3. OCTANS.	Sulpicius Gallus	Sofigenes	Rab. Leui
Hæpalus	L. *Bruke*	Atlas	Zoroaster	Taurinius	Mart. Capella
Helicon Cyzicen.	Autolycus	Berrelus	4. OCTANS.	Vitruuius	Merius
Heraclides Ponticus	Calippus	Cepheus	Agrippa	5. OCTANS.	Mullerius
Oenopides	Conon	Endymion	Alcainus	Abenezra	Neander
Patheas Maffil.	Democritus	L. *Encelynion*	Ariadæus	Abilfedes	Peraltus *Soc. I.*
Pythagoras	Epigenes	Gemmus	Beda	Alfraganus	Peruanus
L. *Pythagoras*	Eudemon	Hercules	Cleomedes	Almazon	Piccolomineus
Timocharis	Eudoxus	Hermes	Dionysius Exiguus	Azophi	Remus
L. *Gassendus*	L. *Petit*	Hyginus	Firmicus	S. Carlantina	Riccius
Xenophanes	Meton	Mutilus	Gocleuius	L. *Piccolomin.*	Sacrobuscus
2. OCTANS.	L. *Ameiss*	L. *Isabella R. Hisp.*	Iul. Cæsar	S. Cyrillus Alex.	Santbechius
Anaxagoras	Philolaus	H. *Insula Bohemiæ*	Langrenus	S. Dionys. Areop.	Snellius

Cc 2 Sic.

Source gallica.bnf.fr / Bibliothèque nationale de France

Fig. 5*. Une page de "l'Almagestum novum" présentant les phases lunaires d'après Grimaldi. On peut y lire la nomenclature lunaire, présentée par octants (secteurs pointés sur le centre lunaire découpant le disque en parts égales). (Image BNF). La lettre L majuscule devant un nom, signifie qu'il est tiré des travaux de Langrenus et H de ceux d'Hévélius. Il cite ses sources et ne s'attribue pas les travaux d'autres savants*

À la recherche des plus fins détails du sol lunaire

Je me souviens qu'après le temps des premiers dessins, l'envie d'admirer les détails des montagnes et cratères s'est amplifiée et que mes rêves éveillés d'adolescent portaient souvent sur l'amélioration de la petite lunette de 38 mm voire

l'achat d'un télescope plus performant. Quelques années plus tard je pus m'offrir mon premier télescope de 100 mm de diamètre. Là l'exploration reprit de plus belle.

Cette envie de découvrir a donc traversé les siècles, puisque déjà en 1672, J.-D. Cassini, grand astronome de Louis XIV, put faire l'acquisition d'un nouvel objectif de 137 mm de diamètre et de focale 11 m, taillé par Campani à Rome (figure 6). Il réalisa ainsi une série d'observations lunaires dont le graveur Patigny fit 60 planches et une carte de 53 cm de diamètre [6].

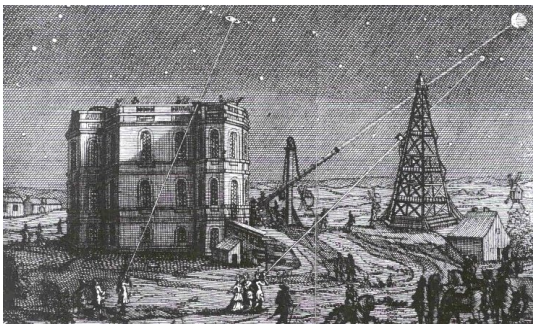


Fig. 6. *Observations à la tour Marly en 1680, on y distingue une grande lunette à tube, braquée vers la Lune. On imagine Cassini à l'oculaire. Les lunettes sans tube semblent réservées aux planètes Saturne (avec son anneau !) et Jupiter. (Image BNF).*

Mais la véritable exploration détaillée commencera au XVIII[e] siècle avec les travaux de Mayer (carte de 1755) à l'observatoire de Göttingen ; puis elle culminera avec Schröter dans ses "fragments de topographie lunaire" datant de 1791, réalisés à son observatoire de Lilienthal, près de Brème, équipé, entre autre, d'un télescope d'Herschel (2,3 m de focale et environ 15 cm de diamètre) [7].

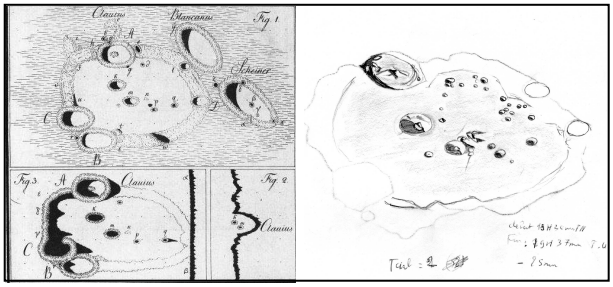


Fig. 7. *Le grand cratère Clavius, à gauche par Schröter, vu à deux jours d'écart (publié en 1791). (Image BNF).*
Ce cirque fait 225 km de diamètre
Fig. 7 bis. *À droite, au télescope d'amateur de 100 mm au grossissement de 150 (décembre 1972-auteur).*

En 1788, il fut le premier à observer des rainures ou failles lunaires comme celle d'Hyginus [8]. Au travers de ses observations et dessins il apparaît une recherche des éventuelles modifications des apparences du sol lunaire au cours de la lunaison. Il s'intéressait ainsi à la détermination des altitudes du relief lunaire. En particulier il utilisa une montagne dominant la mer des pluies, près du cirque Platon comme base pour comparer les hauteurs des montagnes lunaires (figure 8) [9]. Il le nomma "Pico". Notons qu'il apporta près de 60 noms nouveaux à la nomenclature lunaire (par exemple Silberschlag [10] (figure 9). Admirons la finesse des magnifiques gravures de Schröter.

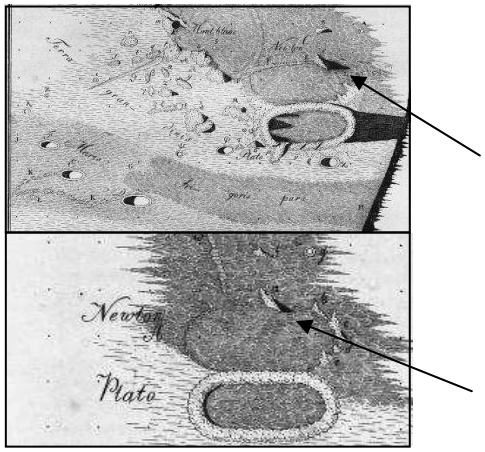


Fig. 8*. La région du cratère Platon par Schröter, vue à quelques jours d'écart. On note l'ombre du mont Pico qui se détache sur la Mer des Pluies. Pico a une base de 15 km×25 km et 2400 m d'altitude [9]. (Image BNF). Publié en 1791*

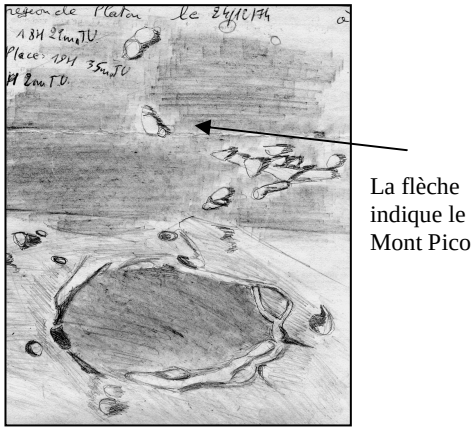


Fig. 8 bis. *Platon (diamètre : 100 km), les monts surplombant la mer des Pluies au télescope de 100 mm au grossissement de 150 (décembre 1974-auteur).*

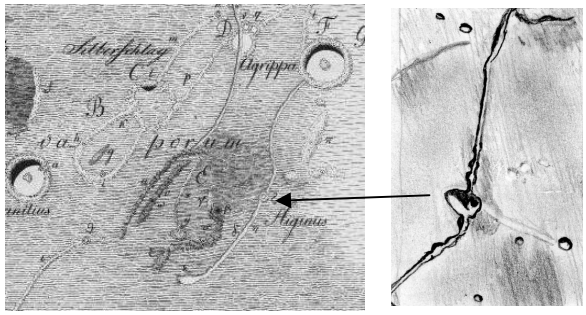


Fig. 9. *La région des rainures d'Hyginus (en bas à droite) et d'Ariadeaus (en haut au centre).*
À gauche par Schröter (image BNF). (publié en 1791).
Fig. 9 bis. *À droite, détail de la rainure d'Hyginus, autour du cratère éponyme (11 km de diamètre). Télescope de 100 mm au grossissement de 150 (juin 1973-auteur).*

Plus étonnant, il étudiait ce qu'il pensait être l'atmosphère lunaire…Tous les détails qu'il a repérés restent absolument accessibles à un observateur amateur équipé d'un instrument de 100 mm (figures 7 bis à 8 bis). De nombreuses illustrations sont accessibles sur le site de la Bibliothèque Nationale de France, la comparaison avec des observations à l'oculaire du télescope est particulièrement instructive.

Épilogue

Suivre les traces de ces grands observateurs se révèle passionnant : dessiner les formations et leurs fins détails aiguise le sens de l'observation et entraîne le regard de l'astronome amateur qui s'améliore croquis après croquis. Je me souviens de ces minutes où mon souffle givrait l'oculaire alors que Clavius se laissait explorer par une nuit de décembre, glacée, mais sans turbulences. Le va-et-vient de l'œil entre le papier et la lentille de l'oculaire permettait de comprendre, presque physiquement, ce monde étrange qu'est notre voisine céleste.

Mais s'il ne fallait pas oublier que seuls les cratères de plus de 2 km était vraiment observables, j'oubliais le froid…

Bien sûr on pourrait continuer ces histoires d'explorations lunaires et mettre en parallèle les premiers clichés de Loewy et Puiseux avec les photographies argentiques d'amateurs. L'on verrait là encore ce désir commun aux hommes de toute génération de saisir la beauté de Sélène, en amateur comme en professionnel.

Mais mon chien aboie, m'appelle et m'arrache à mes rêveries scientifiques. Cette fois c'est sûr, cette histoire est terminée.

En souvenir de Riccioli, je vous laisse ce cliché du bien nommé cratère Théophile.

***Fig. 10**. Cratère Théophile (diamètre 100 km) avec son piton central multiple. Télescope altazimutal Meade LX90 300 mm avec webcam. Cliché auteur. 2009.*

Bibliographie :

[1] Images Gallica : Machina Coelestis/ Johannes Hevelius 1673

[2] Carte et plan Gallica : Tabula selenographica seu vera ... in visibili lunae hemispherio existentium / autore Johanne Hevelio 1645

[3] Yvon Georgelin , "Peiresc et Gassendi, astronomes et érudits", journal "La Provence", http://www.peiresc.org/P.-Gassendi.htm

[4] Images Gallica: Gassendi (1636)/ Riccioli, almagestum Novum astronomiam veterem…

[5] Daniel Boorstin, Les découvreurs, collection "Bouquins", Robert Laffont, 1983, p319.

[6] T. Weimer, carte de la Lune de J. D. Cassini (May, 1978.), the **M**oon and the Planets, Volume 20, Issue 2, pp.163-167

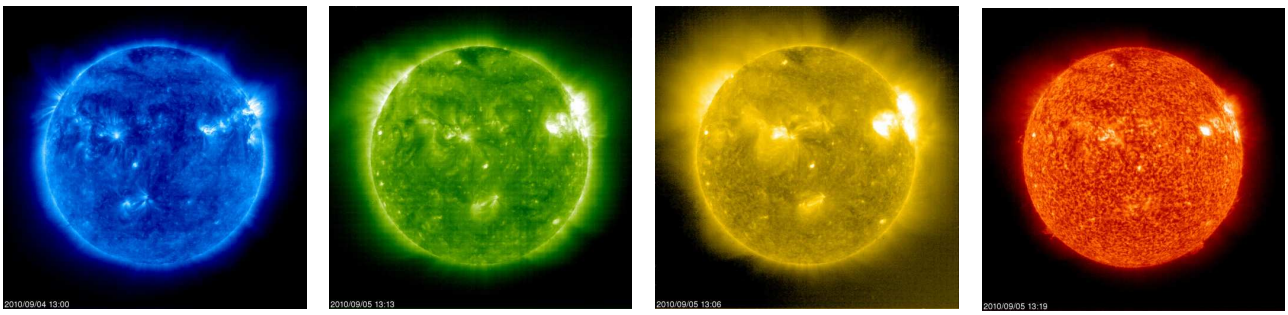
[7] "Observatoire de Lilienthal" **Journal:** Ciel et Terre, 1910, Vol. 31, p. 262.

[8] Stéphane Lecomte, une figure oubliée de l'astronomie, Schröter, "observations et travaux de la S.A.F." 3ème trimestre 1992, p21.

[9] Antonin Rükl, atlas de la lune, chez Gründ, 1993, p 48,49.

[10] Legrand et Chevalley, atlas virtuel de la lune. http://www.ap-i.net/avl/fr/download .

■

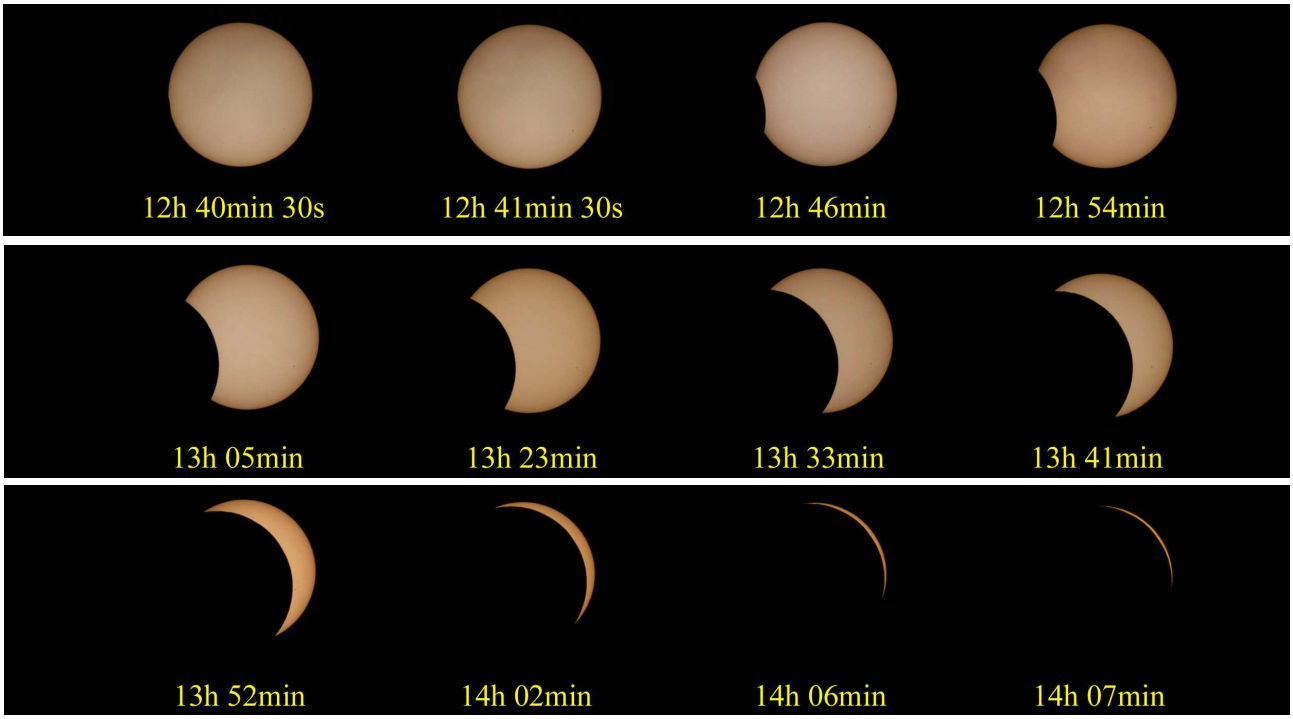


Images du Soleil prise par l'EIT (Extreme ultraviolet Imaging Telescope). Photos NASA
Bien que dans l'ordre des longueurs d'onde croissante, elles sont en fausses couleurs car toutes prises dans l'ultraviolet. De gauche à droite aux longueurs d'onde suivantes : 171 Å, 195 Å, 284 Å et 304 Å.

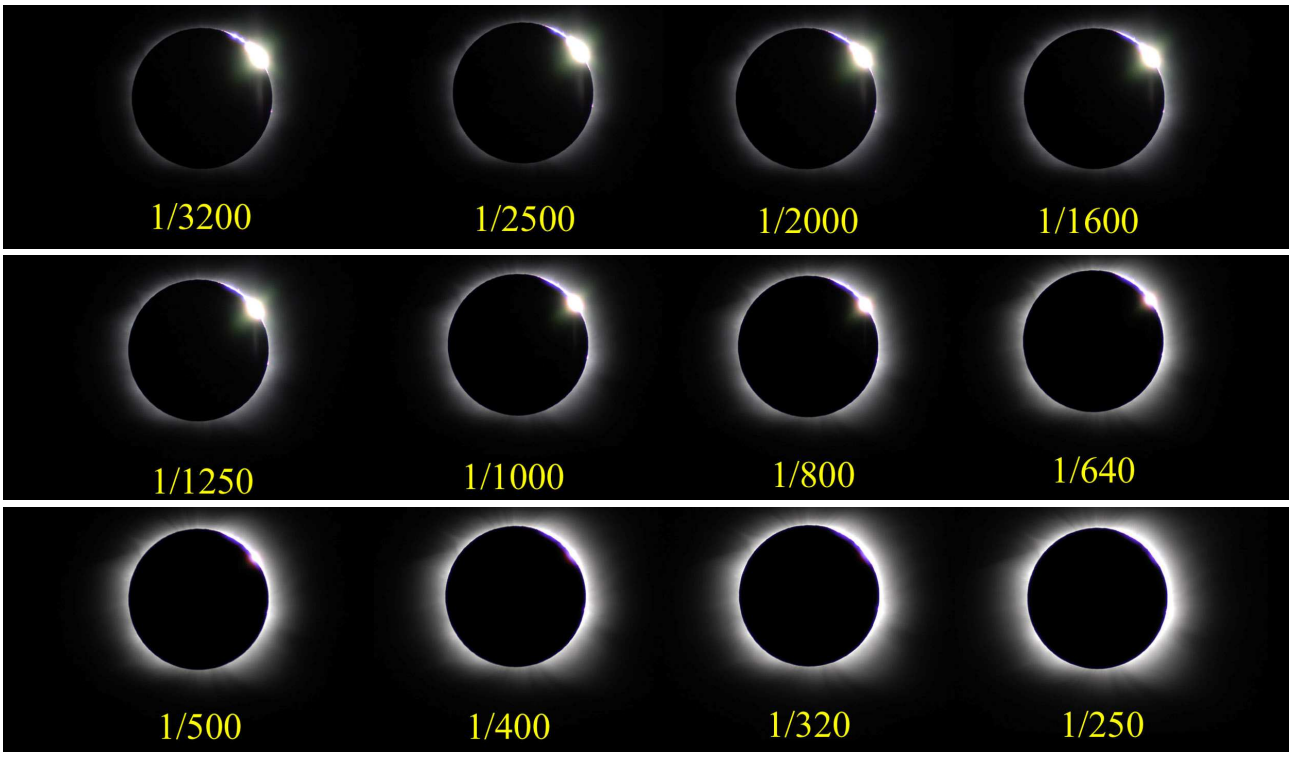
THÈME : ÉCLIPSES

L'éclipse du 11 juillet 2010 photographiée depuis l'île de Pâques.

Arrivée de la Lune devant le Soleil, photos Michel Vignand



Les premières secondes de la totalité photographiée à des vitesses différentes. Photos Michel Vignand.



Dominique Proust nous a envoyé un article sur l'éclipse du 11 juillet 2010 et l'astronomie des Pascuans que nous n'avons pu passer par manque de place. Vous le trouverez dans le prochain numéro.

Éclipses, notions de base

Pierre Causeret, pierre.causeret@wanadoo.fr

Deux éclipses sont annoncées prochainement, la première de Lune, le 21 décembre et l'autre de Soleil, le 4 janvier. C'est l'occasion de faire le point sur les éclipses. Hasards de la mécanique céleste, la première a lieu le jour du solstice d'hiver et la deuxième 15 heures après le passage de la Terre au périhélie.

Éclipse et occultation

Une éclipse se produit quand un astre passe dans l'ombre d'un autre. C'est bien le cas lors d'une éclipse de Lune (figure 1). Par contre, quand un astre en cache un autre, on parle d'occultation. Ainsi, ce qu'on appelle couramment une éclipse de Soleil est en réalité une occultation de Soleil par la Lune (figure 2). Ces deux types d'évènements, éclipse de Lune et éclipse de Soleil, sont donc de natures différentes bien qu'ils fassent appel aux mêmes trois acteurs, Soleil, Terre et Lune.

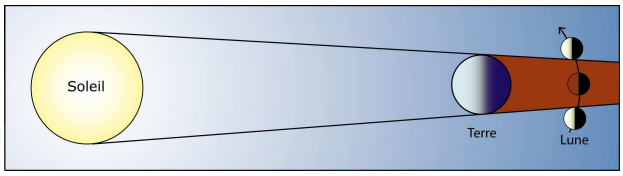


***Fig.1**.. Éclipse totale de Lune. Rappelons qu'une éclipse de Lune ne peut avoir lieu qu'à la pleine Lune et qu'elle est visible depuis toute la moitié de la Terre qui peut voir la Lune.*

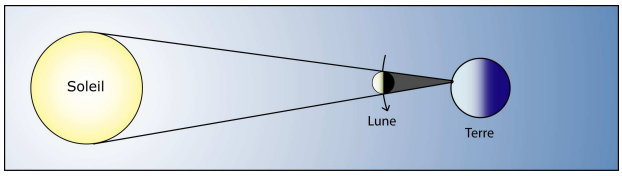


***Fig.2.**. Éclipse totale de Soleil. Elle ne peut avoir lieu qu'à la nouvelle Lune et n'est visible que pour une personne située dans l'ombre de la Lune.*

Ombre et pénombre

À l'opposé du Soleil, on trouve une zone d'ombre ainsi qu'une zone de pénombre derrière la Terre comme derrière la Lune (figure 3).

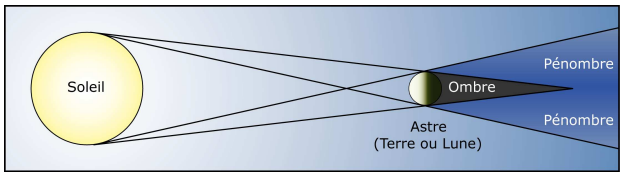


***Fig.3**.. Ombre et pénombre*

L'ombre a la forme d'un cône de longueur moyenne 375 000 km pour la Lune et 1 386 000 km pour la Terre. Cette zone d'ombre est entourée d'une zone de pénombre. Un observateur situé dans la pénombre verrait le Soleil partiellement occulté par l'astre. La pénombre n'est pas homogène. Elle est beaucoup plus sombre à proximité de l'ombre que sur les bords (figure 4).

***Fig.4.** Ombre et pénombre de la Lune se projetant sur la Terre le 11 août 1999, photographiées depuis la station MIR par JP Haigneré. On ne distingue ici que la partie la plus sombre de la pénombre qui s'étend sur environ 7 000 km (crédit CNES).*

Éclipse de Soleil : l'éclipse est partielle pour les personnes situées dans la pénombre et totale pour celles qui sont dans l'ombre.
Éclipse de Lune : lorsque la Lune entre dans la pénombre, elle s'assombrit légèrement mais le phénomène est sans intérêt et invisible à l'œil. Lorsque la Lune est dans le cône d'ombre de la Terre, elle ne devient pas invisible mais prend une couleur rouge sombre, éclairée par quelques rayons du Soleil déviés (par réfraction) et rougis (par diffusion du bleu) par l'atmosphère terrestre (figure 5).

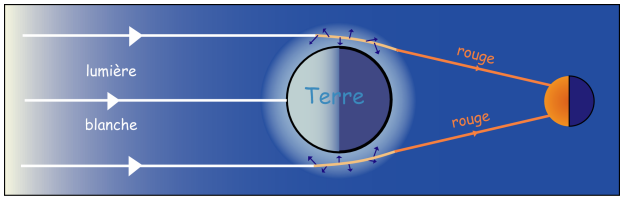


***Fig.5.** Pendant une éclipse totale de Lune, quelques rayons lumineux viennent éclairer la Lune bien qu'elle soit située dans le cône d'ombre de la Terre.*

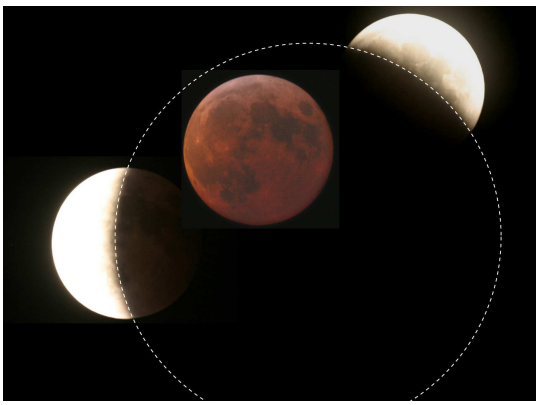
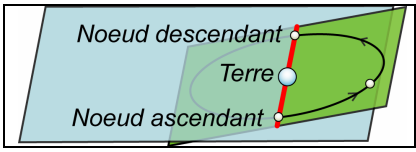


***Fig.6**. Montage photo montrant la Lune traversant l'ombre de la Terre lors de l'éclipse de mars 2007. Pendant la totalité, la Lune est toujours visible.*

La ligne des nœuds

La Lune tourne autour de la Terre dans un plan incliné de 5° par rapport au plan de l'écliptique (le plan de l'orbite terrestre). L'intersection de ces deux plans s'appelle la ligne des nœuds. L'orbite de la Lune croise cette ligne en deux points, le nœud ascendant (quand elle passe du sud au nord du plan de l'écliptique) et le nœud descendant (figure 7).



En vert, le plan de l'orbite lunaire et en bleu, le plan de l'écliptique.

***Fig.7**. La ligne des nœuds (en rouge).*

C'est l'inclinaison du plan de l'orbite lunaire qui fait qu'il n'y a pas d'éclipse de Soleil à chaque nouvelle Lune ou d'éclipse de Lune à chaque pleine Lune (figure 8). Il y a éclipse si la pleine Lune ou la nouvelle Lune a lieu à un des nœuds donc dans le plan de l'écliptique (le mot écliptique vient d'éclipse)

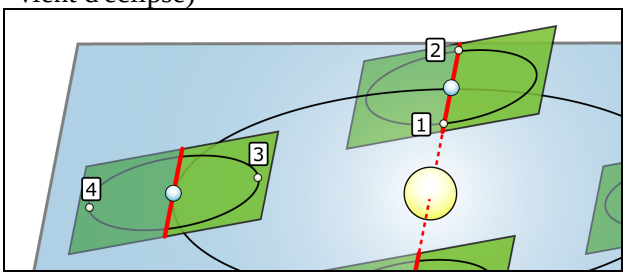


***Fig.8.** Ligne des nœuds et éclipse*
En 1, la ligne des nœuds passe par le Soleil à la nouvelle Lune, il y a une éclipse de Soleil.
En 2, la ligne des nœuds passe par le Soleil à la pleine Lune, il y a une éclipse de Lune.
En 3, l'ombre de la Lune passe au-dessus de la Terre, il n'y a pas d'éclipse de Soleil.
En 4, l'ombre de la Terre passe au-dessus de la Lune, il n'y a pas d'éclipse de Lune.

En réalité, pour qu'il y ait éclipse, il n'est pas obligatoire que la ligne des nœuds passe par le Soleil exactement à la pleine Lune ou à la nouvelle Lune. Il y a un délai d'une quinzaine de jours de part et d'autre, ce qui fait plus d'une lunaison. On est donc certain d'avoir une éclipse de Lune et une éclipse de Soleil dans le mois entourant le passage de la ligne des nœuds par le Soleil. Il peut même exceptionnellement y avoir deux éclipses de Soleil (elles sont alors partielles) ou deux éclipses de Lune (par la pénombre).
La ligne des nœuds n'est pas fixe dans l'espace contrairement à ce qui est montré sur la figure 8. Elle se déplace en tournant dans le sens rétrograde (le sens des aiguilles d'une montre vue du nord) avec une période de 18,6 ans. Ainsi, entre deux passages de la ligne des noeuds par le Soleil, il s'écoule un peu moins de 6 mois, plus précisément 173,3 jours, période appelée saison d'éclipse (figure 9). On parle aussi d'année draconitique de 346,6 jours, qui est l'intervalle de temps entre deux passages du nœud ascendant entre la Terre et le Soleil (le dragon est le symbole des éclipses dans de nombreuses civilisations d'Asie).

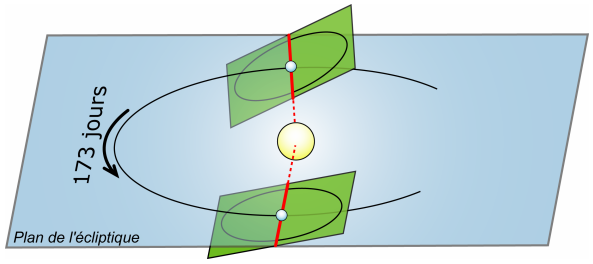


***Fig.9.** Saison d'éclipse.*

Les différents types d'éclipses

Une éclipse de Lune peut être totale, partielle ou par la pénombre suivant le nombre de jours écoulés entre la pleine Lune et le passage de la ligne des nœuds par le Soleil (figure 10).

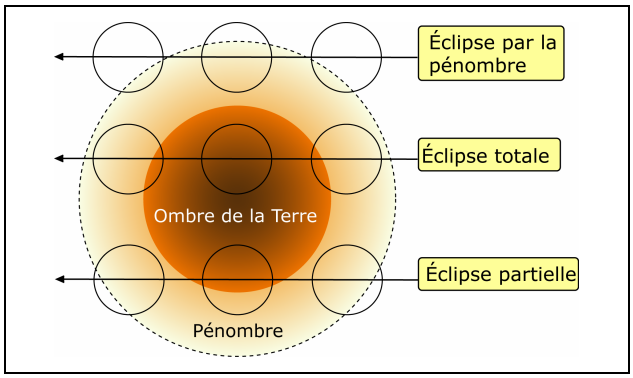
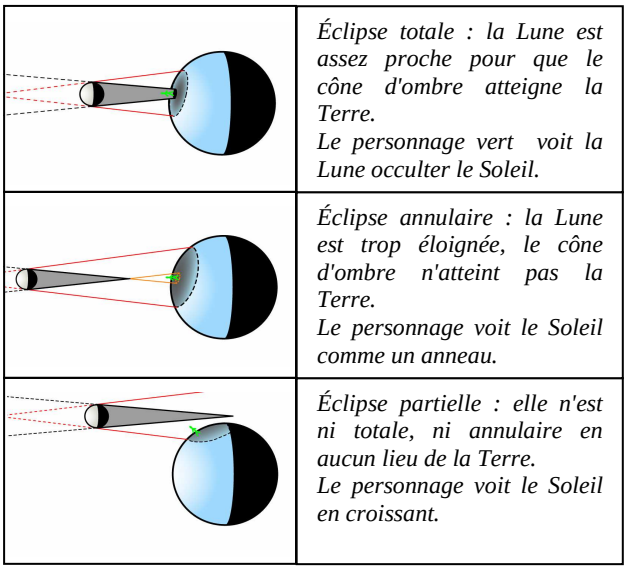


***Fig.10.** Les différents types d'éclipses de Lune (totale, partielle ou par la pénombre).*

Une éclipse de Soleil peut être totale, annulaire ou partielle (figures 11 et 12). On parle aussi d'éclipse mixte si, au cours du déplacement de la Lune, elle passe d'annulaire à totale (ou l'inverse).

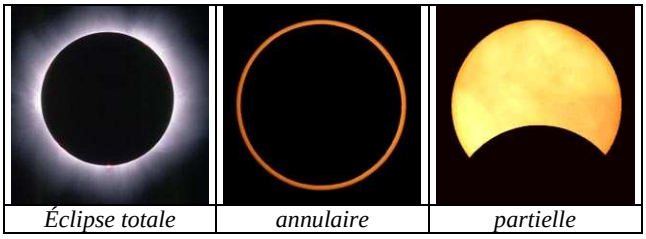


Éclipse totale : la Lune est assez proche pour que le cône d'ombre atteigne la Terre.
Le personnage vert voit la Lune occulter le Soleil.

Éclipse annulaire : la Lune est trop éloignée, le cône d'ombre n'atteint pas la Terre.
Le personnage voit le Soleil comme un anneau.

Éclipse partielle : elle n'est ni totale, ni annulaire en aucun lieu de la Terre.
Le personnage voit le Soleil en croissant.

Fig.11. *Les différents types d'éclipses de Soleil.*



Éclipse totale | *annulaire* | *partielle*

Fig.12. *Les mêmes vues par un observateur terrestre.*

La distance de la Lune (qui varie de 356 000 à 407 000 km) joue donc un rôle important pour la nature de l'éclipse, totale ou annulaire. On peut aussi raisonner en s'intéressant au diamètre apparent des deux astres, en moyenne 32' pour le Soleil et de 29 à 34' pour la Lune.

L'observation

Une éclipse de Lune s'observe à l'œil nu ou avec un instrument astronomique sans aucun danger.
Par contre, pour une éclipse de Soleil, il faut rappeler que l'**on n'observe jamais le Soleil directement**. Plusieurs méthodes sont possibles :
- Observer à l'œil à travers un filtre de bonne qualité (lunettes spéciales éclipse, verre de soudeur n°14, mylar). On en trouve chez les vendeurs spécialisés.
- Fabriquer un sténopé en perçant une feuille d'un trou de 1 mm environ. La lumière du Soleil passant par ce trou ira former une image sur une feuille blanche que l'on aura placée en dessous.
- Observer par projection : l'instrument, paire de jumelles ou lunette, est dirigé vers le Soleil sans jamais regarder à l'oculaire. L'image du Soleil se forme sur un écran (une simple feuille blanche par exemple) que l'on aura placé derrière l'oculaire. Ce type de dispositif est à surveiller en permanence pour que personne n'essaie de regarder à travers l'instrument.
- Placer un filtre solaire pleine ouverture à l'entrée de l'instrument (éviter les filtres "sun" qui se vissent sur l'oculaire).

La photographie

Pour la photo d'éclipse (de Lune ou de Soleil), trois méthodes sont possibles :
- Utiliser un zoom ou un téléobjectif.
- Utiliser un appareil numérique compact fixé derrière l'oculaire d'une lunette ou d'un télescope (ou éventuellement tenu à la main).
- Utiliser un appareil reflex sans objectif fixé au foyer de l'instrument.
Bien évidemment, s'il s'agit d'une éclipse de Soleil, il faut avoir placé un filtre devant le téléobjectif ou l'instrument.
Dans tous les cas, il faut utiliser différents temps de pose pour arriver à un bon résultat.

Nombre d'éclipses et période

La ligne des nœuds passant par le Soleil deux fois par an, on observe au moins deux éclipses de Soleil et deux éclipses de Lune par an. Il peut s'agir d'éclipses partielles de Soleil, d'éclipses de Lune par la pénombre… Le maximum est de 7 éclipses dans une année comme cela se produira en 2038.
La période la plus connue est le Saros de 18 ans et 11 jours qui contient précisément 223 lunaisons, 38 saisons d'éclipse (de 173,3 jours) et 239 périodes anomalistiques (intervalle de temps entre deux périgées). Ainsi, les éclipses se reproduisent presque de la même manière tous les 18 ans et 11 jours.

Les prochaines éclipses

Vous trouverez des détails sur l'éclipse de Lune du 21/12/2010 et l'éclipse de Soleil du 04/01/2011 dans les pages qui suivent. Pour les autres, la visibilité est indiquée pour la France métropolitaine :
01/06/2011 : Éclipse partielle de Soleil (invisible)
15/06/2011 : Éclipse totale de Lune (visible le soir)
01/07/2011 : Éclipse partielle de Soleil (invisible)
25/11/2011 : Éclipse partielle de Soleil (invisible)
10/12/2011 : Éclipse totale de Lune (fin le matin).
20/05/2012 : Éclipse annulaire de Soleil (en Asie)
04/06/2012 : Éclipse partielle de Lune (invisible)
13/11/2012 : Éclipse totale de Soleil (Pacifique)
Dans les éclipses de Soleil à venir, on peut signaler celle du 20/03/2015, totale au-dessus de l'Europe et donc importante en France. Pour la prochaine totale en France, attendez le 3 septembre 2081… ■

AVEC NOS ÉLÈVES

Le lunoscope

Béatrice Sandré,

Béatrice Sandré a déjà fait réaliser cette maquette lors de précédentes écoles d'été mais elle ne l'avait jamais présentée dans les Cahiers Clairaut ; ce numéro sur les éclipses lui donne l'occasion de le faire. Cette maquette permet de prévoir non seulement les dates des pleines Lunes et nouvelles Lunes de l'année mais aussi celles des éclipses de Lune ou de Soleil.

Si le plan de l'orbite lunaire était confondu avec l'écliptique (le plan de l'orbite de la Terre), il y aurait éclipse de Soleil à chaque nouvelle Lune et éclipse de Lune à chaque pleine Lune. Ces deux plans font en réalité un angle de 5° environ et leur droite d'intersection est appelée ligne des nœuds. Il n'y a donc pas éclipse de Soleil à chaque nouvelle Lune ni éclipse de Lune à chaque pleine Lune mais seulement si ces événements se produisent lorsque le Soleil et la Lune sont au voisinage de la ligne des nœuds (voir page 9).
La maquette présentée ici permet de prévoir avec une "assez" bonne précision les dates des éclipses de Lune et de Soleil. Elle doit pour cela nous donner la position du Soleil et de la Lune en fonction de la date ainsi que la direction de la ligne des nœuds.

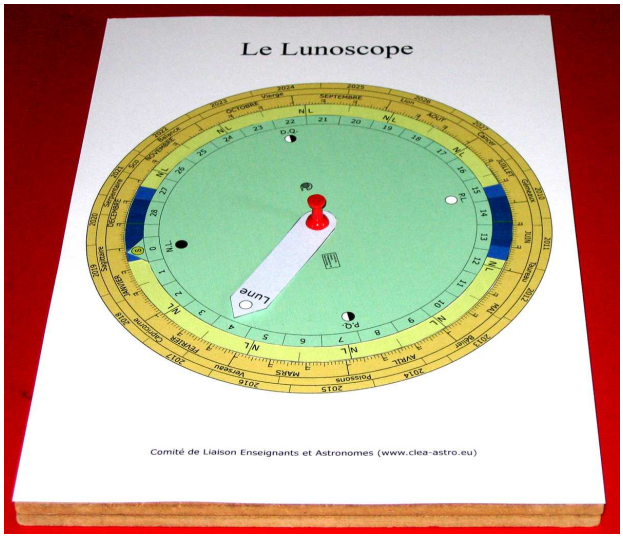


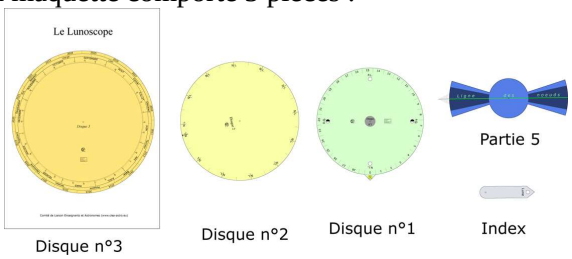
***Fig.1**. La maquette terminée punaisée sur une planchette.*

Vous pouvez réaliser la maquette avant de poursuivre votre lecture mais ce n'est pas obligatoire, l'article est compréhensible sans la maquette en main.

Construction de la maquette

Matériel nécessaire :
Trois fiches imprimées sur papier épais ou bristol disponibles sur le site du CLEA.
Une punaise (ou une attache parisienne).
Éventuellement, un morceau de rhodoïd (votre maquette sera plus précise) et une planchette format A4 pour punaiser les différents disques.

La maquette comporte 5 pièces :



Vous trouverez les fiches et le détail de la construction sur le site du CLEA à l'adresse www.clea-astro.eu / (Cahiers Clairaut - sommaire)

Position du Soleil

Le disque orange représente le plan de l'écliptique. On y a indiqué les constellations du zodiaque. La graduation intérieure permet de mettre le Soleil à sa place en fonction de la date. Le premier janvier par exemple, il est dans la constellation du Sagittaire et passera dans celle du Capricorne aux environs du 21 janvier (figure 2).

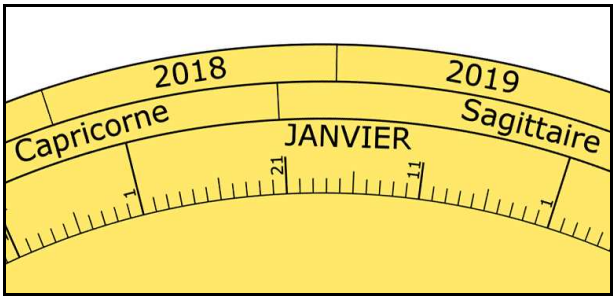


***Fig.2.** Partie du disque orange. La graduation en date (mois et jour) indique la position du Soleil.*

Dates des nouvelles Lunes

Deux nouvelles Lunes consécutives sont séparées en moyenne de 29 jours 12 heures et 44 minutes. Cet intervalle de temps est appelé mois lunaire ou lunaison. Connaissant la date de la première, il est possible de déterminer les dates approximatives de toutes les nouvelles Lunes de l'année. C'est ce que permet de faire le disque jaune. En 2011 par exemple, la première nouvelle Lune aura lieu le 4 janvier. Si on place la flèche située en bordure du disque jaune en face de cette date, on peut lire les dates approximatives des autres nouvelles Lunes de 2011 : 3 février, 4 mars… Les dates des pleines Lunes sont séparées des nouvelles Lunes d'une demi lunaison : 19 janvier, 18 février…

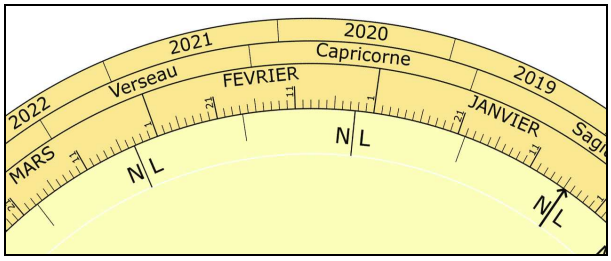


Fig.3. *Le deuxième disque est réglé pour 2010 (première nouvelle Lune le 4 janvier). On peut lire les dates de toutes les nouvelles Lunes (3 février, 4 mars…) et pleines Lunes (19 janvier, 18 février…) de l'année.*

Position de la Lune

Au cours d'une lunaison, la direction Terre-Lune tourne de 360° par rapport à la direction Terre-Soleil et ce en 29,53 jours. Le disque vert nous permet de repérer la position de la Lune connaissant la position du Soleil et le jour du mois lunaire. Par exemple, en février 2011, la nouvelle Lune aura lieu le 3 Février.

Le 20 février sera donc le 17^{e} jour du mois lunaire. On place le Soleil au 20 Février et la Lune sur la graduation 17 du mois lunaire. On lit qu'elle entre dans la constellation de la Vierge (figure 4).

Direction de la ligne des nœuds

La ligne des nœuds n'est pas fixe. Elle tourne dans le sens rétrograde (sens des aiguilles d'une montre) de 360° en 18,6 ans. Le 1er janvier 2010, le nœud descendant avait une longitude écliptique de 111 ° 4,5 '. Il avait donc la direction qu'occupe le Soleil le 13 Juillet. La graduation extérieure du disque orange indique la direction du nœud descendant en fonction de l'année depuis le 1er janvier 2010 et jusqu'en 2022 (après cette date, il faudra refaire le lunoscope). Le nœud ascendant est dans la direction opposée.

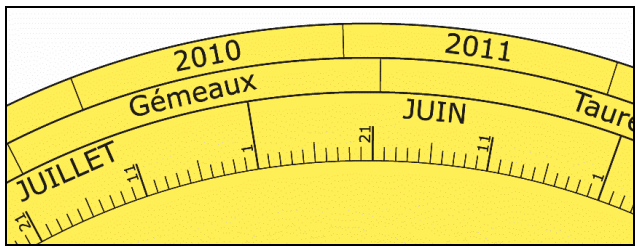


Fig.5. *Position du nœud descendant en 2010 et 2011.*

Conditions d'éclipses

Sur la sphère céleste centrée sur la Terre T, les orbites de la Lune L et du Soleil S font un angle de 5°. Elles se coupent au nœud ascendant N et descendant N' (figure 6).

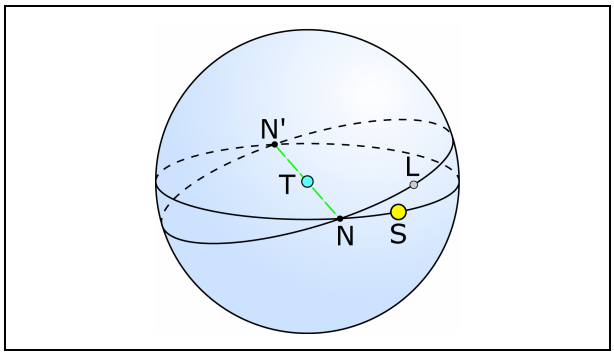


Fig.6. *Nœud ascendant (N) et nœud descendant (N')*

Les éclipses auront lieu quand le Soleil et la Lune seront au voisinage d'un nœud, mais pas uniquement au nœud à cause du rayon apparent de la Lune $\theta_L = 0,25°$, de celui du Soleil $\theta_S = 0,25°$, et de la parallaxe de la Lune $p_L = 1°$ (angle sous lequel, de la Lune, on voit le rayon de la Terre).

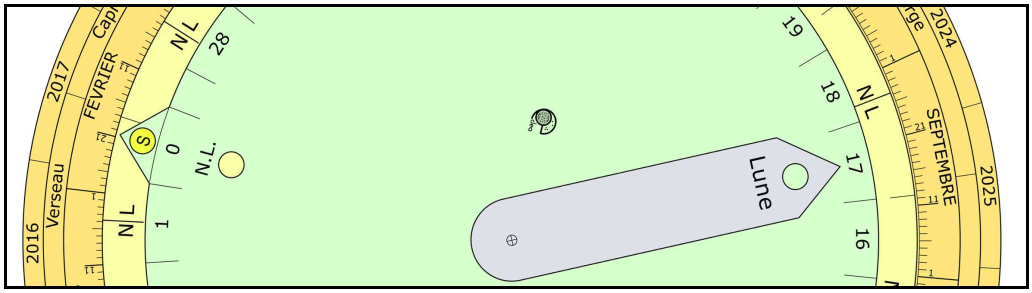


Fig.4. *Le Soleil est positionné à gauche pour le 20 février, la Lune est au 17^{e} jour à droite à la limite du Lion et de la Vierge.*

On démontre que la condition d'éclipse de Soleil (partielle ou non) peut s'écrire :
$\widehat{\text{STL}} < \theta_L + \theta_S + p_L$ soit $\widehat{\text{STL}} < 1{,}5°$.
Les relations de trigonométrie sphérique permettent d'en déduire que $\widehat{\text{NTS}} < 17{,}5°$.
Il y aura donc éclipse de Soleil si la Lune est nouvelle et que le Soleil est à moins de 17,5° de la ligne des nœuds.
On montre aussi que l'éclipse sera totale (ou annulaire) si $\widehat{\text{STL}} < \theta_L - \theta_S + p_L$ soit $\widehat{\text{STL}} < 1°$ et $\widehat{\text{NTS}} < 11{,}5°$.
Une éclipse de Lune se produit lorsque, vues de la Terre, les directions de la Lune et du Soleil sont opposées (ou presque), c'est-à-dire à la pleine Lune. Une éclipse de Lune par la pénombre serait, vue de la Lune, une éclipse partielle du Soleil par la Terre. Le problème peut donc se traiter comme celui d'une éclipse de Soleil et la condition d'éclipse de Lune par la pénombre s'écrit :
$\widehat{\text{SLT}} < \theta_T + \theta_S + p_T$.
$\theta_S = 0{,}25°$; c'est toujours le rayon apparent du Soleil (vu de la Terre ou de la Lune, c'est pareil).
θ_T est le rayon apparent de la Terre vue depuis la Lune ; c'est donc la parallaxe $p_L = 1°$ de la Lune.
p_T est la parallaxe de la Terre c'est-à-dire l'angle sous lequel on voit depuis la Terre le rayon de la Lune : $p_T = \theta_L = 0{,}25°$. Pour une éclipse de Lune totale, partielle ou par la pénombre, la distance angulaire du Soleil à la ligne des nœuds doit donc être, comme pour l'éclipse partielle de Soleil, inférieure à 17,5°.
On montre de la même façon, que l'éclipse de Lune sera totale ou partielle si $\widehat{\text{SLT}} < \theta_T - \theta_S + p_T$ et donc le Soleil à moins de 11,5° de la ligne des nœuds.
La pièce bleue a une largeur angulaire de 2 fois 17,5° de part et d'autre de la ligne des nœuds et la zone plus foncée de 2 fois 11,5°.

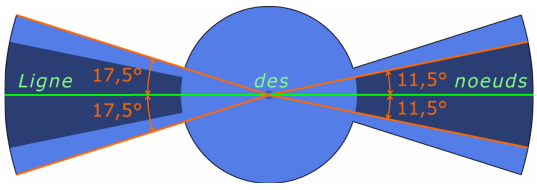


Fig.7. *La pièce n° 5 en forme de papillon. La limite de 11,5° correspond à l'angle maximal entre la direction du Soleil et la ligne des nœuds pour une éclipse totale de Soleil (totale ou partielle pour la Lune) et celle de 17,5° à une éclipse partielle de Soleil (par la pénombre pour la Lune).*

Lecture des dates d'éclipses

Nous allons utiliser la maquette pour déterminer les dates et natures des éclipses pour l'année 2011.
Il faut tout d'abord mettre en place le disque jaune pour qu'il nous indique effectivement les dates des pleines Lunes et des nouvelles Lunes de l'année 2011 sachant que la première nouvelle Lune aura lieu le 4 janvier (figure 8a). Il faut ensuite placer le secteur des nœuds pour l'année 2011 (figure 8b). On constate que le Soleil traversera la ligne des nœuds au courant des mois de janvier, juin et décembre.
Pour la nouvelle Lune du 4 janvier, on place le secteur des nœuds au début de 2011, le Soleil au 4 janvier et la Lune en position de nouvelle Lune. Dans la direction du Soleil, on voit le secteur bleu clair de la ligne des nœuds (figure 8c). Il y aura donc une éclipse partielle de Soleil à cette date. À la pleine Lune suivante, le 19 janvier, le Soleil n'est plus dans le secteur des nœuds ; il n'y aura pas d'éclipse de Lune. Il faudra attendre le mois de juin.
À cette période, la ligne des nœuds est à peu près à la moitié de l'année 2011.
On lit que le 1er juin sera jour de nouvelle Lune. On met le Soleil et la Lune à leur place et on constate que, comme au 4 janvier, l'éclipse de Soleil sera partielle.
Le 15 juin sera jour de pleine Lune. On met le Soleil dans la direction du 15 juin ; la Lune est dans la direction opposée (P.L. sur le disque vert). La zone bleu foncé du secteur des nœuds est dans la direction du Soleil. L'éclipse de Lune sera totale et la Lune sera dans la constellation du Serpentaire…
On pourra trouver ainsi qu'il y aura une éclipse partielle de Soleil les 1er juillet et 25 novembre 2011, une éclipse totale de Lune le 10 décembre 2011.

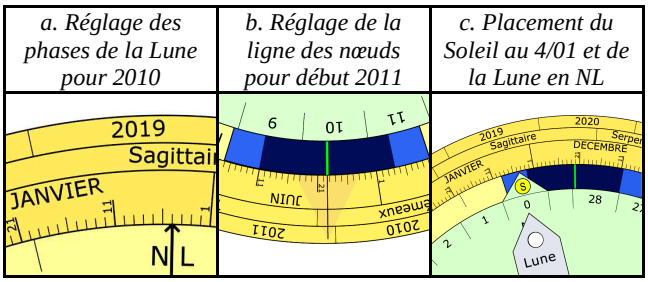
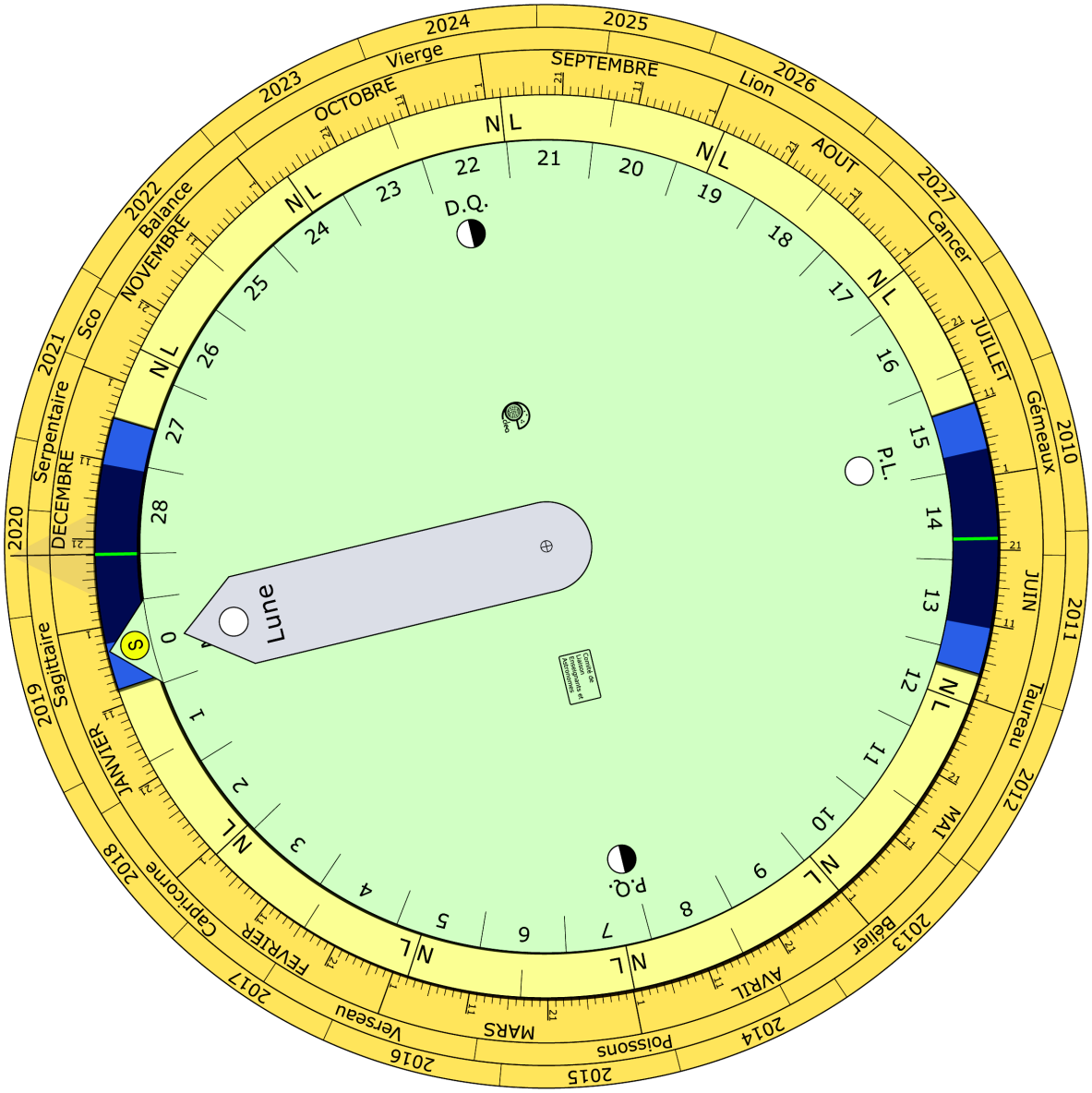


Fig.8. *Réglages pour déterminer les éclipses de 2010. On trouve une éclipse partielle de Soleil le 4 janvier.*

Les indications données par cette maquette ne sont qu'approximatives car elle suppose que tous les mouvements sont uniformes : celui de la Terre autour du Soleil, celui de la Lune autour de la Terre et celui de la ligne des nœuds. Elles sont aussi incomplètes car les régions de visibilité des éclipses ne sont pas fournies.

Le Lunoscope



Comité de Liaison Enseignants et Astronomes (www.clea-astro.eu)

Fig.9. *Le lunoscope réglé pour la nouvelle Lune du 4 janvier 2011.*
On vérifie qu'il y aura bien une éclipse partielle de Soleil. ■

Document à photocopier

L'éclipse totale de Lune du 21 décembre 2010

Pierre Causeret, pierre.causeret@wanadoo.fr

Le matin du 21 décembre 2010, la Lune va traverser l'ombre de la Terre. Depuis la France, on pourra observer le début de cette éclipse juste avant le lever du Soleil.

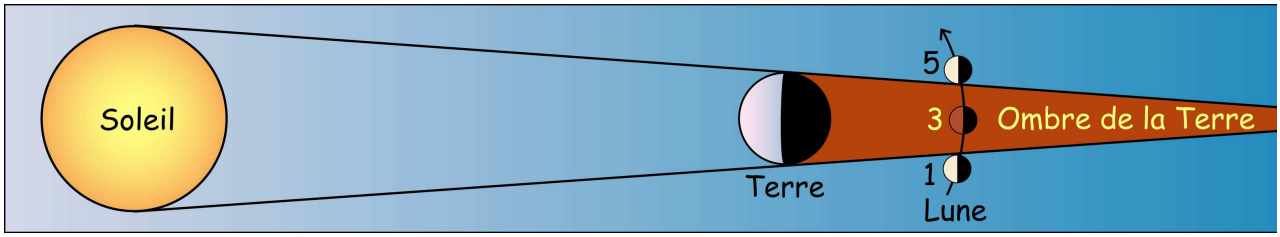


***Fig.1**. Principe d'une éclipse de Lune (le schéma n'est pas à l'échelle).*

Les horaires de l'éclipse (heures légales)

1. 7 h 33 : Entrée dans l'ombre.
2. 8 h 41 : Début de la totalité.
3. 9 h 18 : Maximum de l'éclipse.
4. 9 h 53 : Fin de la totalité.
5. 11 h 01 : Fin de l'éclipse.

Seul, le début de l'éclipse sera visible en France métropolitaine car la Lune s'y couchera entre 9 h et 10 h, suivant votre lieu d'habitation.

Aux Antilles ou en Guyane, on pourra observer l'ensemble de l'éclipse le matin à partir de 6 h 33 T.U.

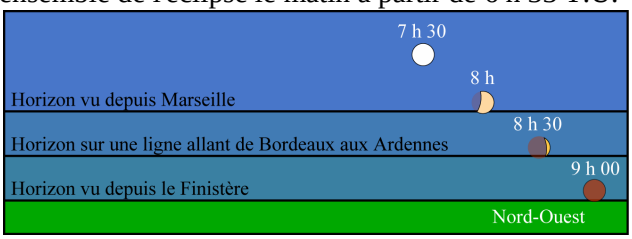


***Fig.3.** Coucher de la Lune éclipsée le 21 décembre. Alors que la Lune traverse l'ombre de la Terre de droite à gauche (d'ouest en est comme sur la fig.2), on voit la Lune se déplacer de gauche à droite (d'est en ouest) à cause de la rotation de la Terre sur elle-même.*

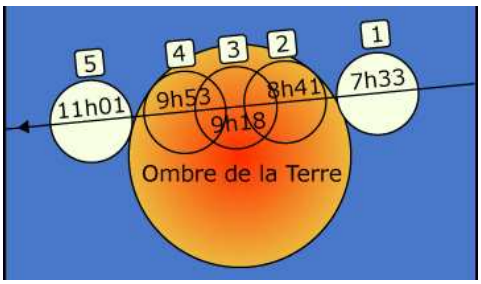


***Fig.2.** La Lune traversant l'ombre de la Terre entre 7 h 33 et 11 h 01 (heure légale). En réalité, cette ombre n'est pas visible dans le ciel. Pour la voir comme sur le schéma, il faudrait installer un immense écran dans l'espace.*

Comment observer l'éclipse ?

Il faudra choisir un site d'observation avec un horizon bien dégagé de l'ouest au nord-ouest.

L'éclipse peut s'observer à l'œil nu, mais c'est encore mieux avec une paire de jumelles.

Les habitants du Sud-Est de la France verront la Lune se coucher au début de la totalité alors que, du côté de Brest, on pourra voir l'éclipse jusqu'à la fin de la totalité.

À voir au moment de l'éclipse

1. Observez la pleine Lune avant l'éclipse à l'œil nu ou avec des jumelles. On peut y distinguer des taches sombres qu'on appelle des mers, bien qu'il n'y ait pas d'eau. On peut rappeler qu'une éclipse de Lune se passe forcément à la pleine Lune.
2. Comme la Lune est à ce moment-là à l'opposé du Soleil, vous pourrez vérifier qu'elle se couche au moment où le Soleil se lève.
3. Entre 7 h 45 et 8 h 30, pendant que la Lune entre dans l'ombre de la Terre, on distingue bien la forme de cette ombre (fig.4). On peut en déduire que la Terre est ronde.

***Fig. 4**. La forme de l'ombre de la Terre sur la Lune indique que notre planète est bien ronde et plus grosse que la Lune.*

4. Au moment où l'éclipse est totale, la Lune n'est pas totalement invisible comme on pourrait le croire ; elle apparaît rouge plus ou moins sombre. Elle est faiblement éclairée par des rayons lumineux en provenance du Soleil qui ont été déviés et rougis en frôlant la Terre et en traversant la haute atmosphère. Comme en plus, la Lune qui se couche apparaît jaune, orange ou rouge, sa couleur sera particulièrement sombre.

Carte de visibilité de l'éclipse de Lune du 21 décembre 2010

Une éclipse de Lune est visible depuis une moitié de la Terre, celle qui peut voir la Lune. Puisque Lune et Soleil sont à l'opposé, c'est donc depuis l'hémisphère plongé dans la nuit au moment de l'éclipse. Mais le phénomène dure 3 heures et demi et, pendant ce temps-là, la Terre tourne sur elle-même. Finalement, c'est plus de la moitié du globe qui pourra observer l'éclipse, du moins en partie. Certains n'en verront que le début si la Lune se couche avant la fin, c'est ce qui se passera en France. D'autres, comme au Japon, rateront le début et ne verront que la fin au lever de la Lune. Pour savoir ce que chaque habitant de la Terre pourra observer, l'Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Éphémérides (www.imcce.fr) édite pour chaque éclipse une carte de visibilité (figure 2).

Pour la comprendre, on peut représenter la Terre au début de l'éclipse totale (figure 1). Les personnes situées sur la ligne AB sont celles qui voient la Lune à l'horizon. Cette ligne correspond approximativement à la limite jour-nuit. Étant donné le sens de rotation de la Terre, les personnes situées sur la partie rouge voient la Lune se coucher au début de la totalité alors que sur la partie verte, la Lune se lève.

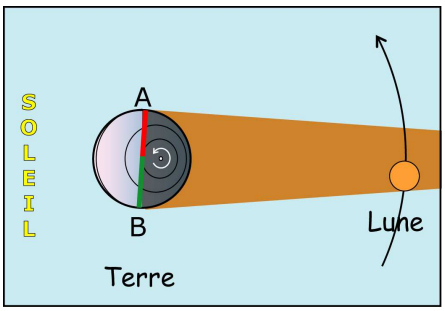


Fig.1. *Limites de visibilité de la Lune sur Terre.*

La ligne AB est un grand cercle sur la Terre. Sur la carte de l'IMCCE, pour des raisons de projection, ce grand cercle devient la ligne T1 qui ressemble à une partie de sinusoïde. On peut refaire le même schéma pour la fin de la totalité un peu plus d'une heure plus tard et on obtiendra une autre partie de sinusoïde, la ligne T2.

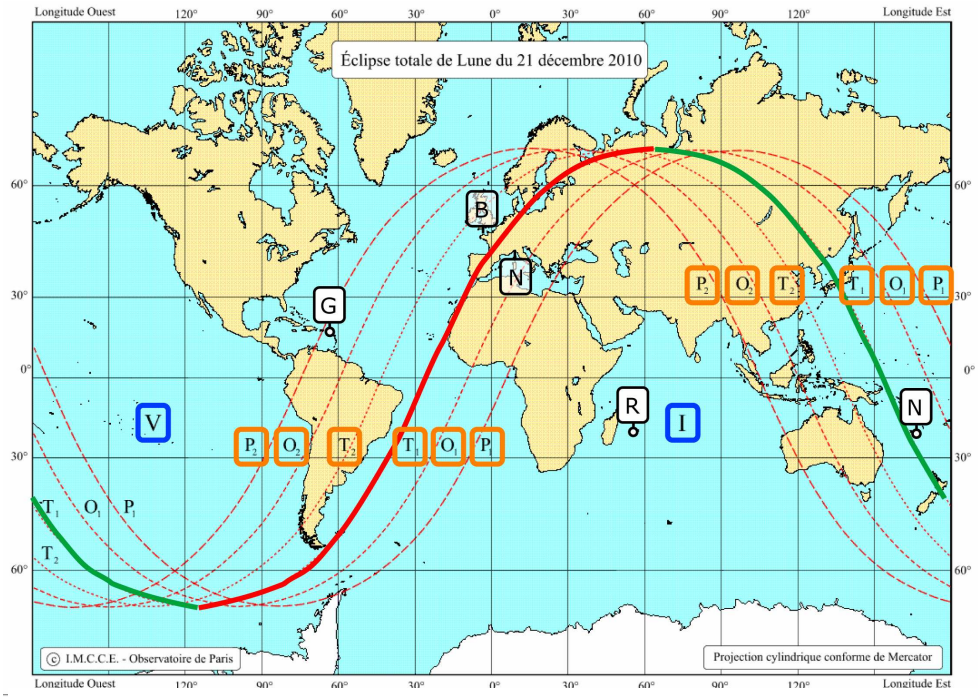


Fig.2. *Schéma de visibilité de l'éclipse du 21 décembre 2010 (IMCCE). La partie notée V indique la région de la Terre où l'éclipse est visible en entier alors qu'elle est invisible dans la partie I.*

Les différentes lignes indiquent :
P_1 *: limite de la région où l'on observe l'entrée dans la pénombre*
O_1 *: limite de la région où l'on observe l'entrée dans l'ombre*
T_1 *: limite de la région où l'on observe le début de la totalité*
T_2 *: limite de la région où l'on observe la fin de la totalité*
O_2 *: limite de la région où l'on observe la sortie de l'ombre*
P_2 *: limite de la région où l'on observe la sortie de la pénombre.*

En Guadeloupe (G), l'éclipse est visible en entier.
À Brest (B), le début de la totalité est visible mais non la fin.
À Nice (N), on verra l'entrée dans l'ombre mais pas le début de la totalité.
À l'île de la Réunion (R), il n'y a rien à voir.
À Nouméa (N), la Lune se lève au début de la totalité et toute la suite de l'éclipse est visible. ■

Document à photocopier

L'éclipse partielle de Soleil du 4 janvier 2011

Le 4 janvier, en milieu de matinée, la Lune va s'interposer entre le Soleil et la Terre. Depuis l'Europe, on verra la Lune cacher plus de la moitié du disque solaire.

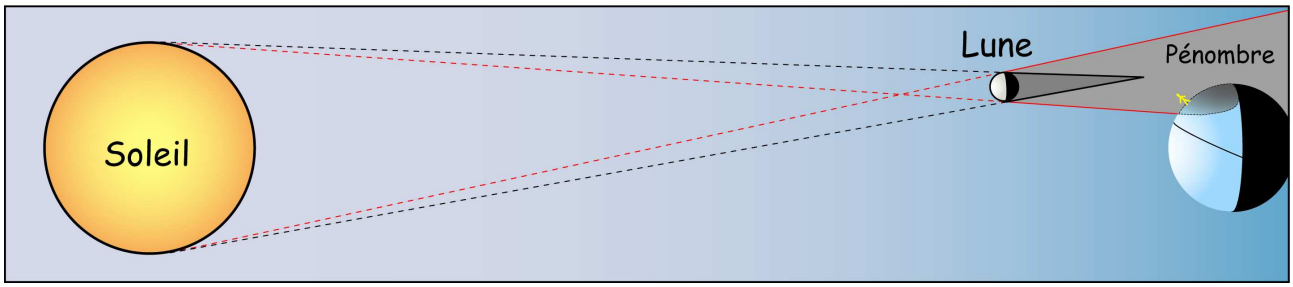


Fig.1. *Principe d'une éclipse partielle de Soleil (le schéma n'est pas à l'échelle). Le cône d'ombre de la Lune n'atteint pas la Terre. Les personnes situées dans la pénombre verront la Lune cacher une partie du Soleil seulement.*

Horaires et degré d'obscuration de l'éclipse

Ce sont les personnes situées le plus au Nord-Est qui verront la plus grande partie du Soleil éclipsé (près de 70 % à Dunkerque contre 55 % à Pau). Les heures de début et fin dépendent aussi du lieu d'observation.

Voici, pour un certain nombre de villes, les horaires de l'éclipse avec la hauteur du Soleil au-dessus de l'horizon ainsi que le pourcentage du disque solaire éclipsé au moment du maximum (appelé obscuration).

	Lever	Maximum	Fin
Bordeaux	8h42	9h00 2° (57%)	10h19 12°
Marseille	8h12	9h04 7° (59%)	10h27 17°
Rennes	8h58	9h04 0° (61%)	10h23 10°
Lyon	8h23	9h07 5° (62%)	10h30 15°
Paris	8h45	9h10 3° (65%)	10h30 12°
Strasbourg	8h23	9h14 6° (68%)	10h40 14°
Dunkerque	8h55	9h13 2° (68%)	10h34 10°

Fig.2. *Heures de l'éclipse pour quelques villes de France.*
1ère colonne : Au tout début de l'éclipse le Soleil est encore couché, on indique donc uniquement l'heure de son lever.
2e colonne : heure du maximum, hauteur du Soleil au-dessus de l'horizon et obscuration (pourcentage du disque éclipsé).
3e colonne : heure de la fin de l'éclipse et hauteur du Soleil.

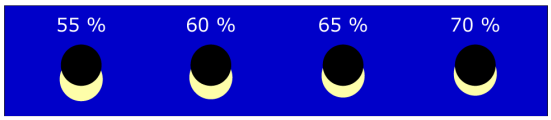


Fig.3*. Degré d'obscuration pour le 04/01/11*

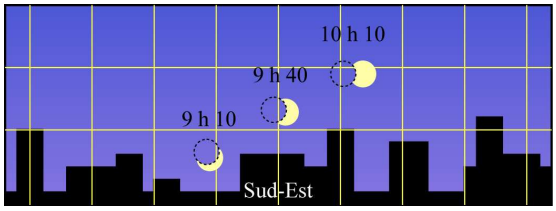


Fig.4. *L'éclipse observée depuis Paris.*

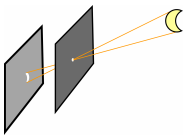
Alors que la Lune passe devant le Soleil de droite à gauche (d'ouest en est), on voit la Lune se déplacer de gauche à droite (d'est en ouest) à cause de la rotation de la Terre sur elle-même. Le schéma est gradué tous les 5°. La Lune et le Soleil sont grossis ici 4 fois.

Comment observer l'éclipse

Attention, il ne faut JAMAIS observer le Soleil à l'œil nu, on risque de s'abîmer les yeux de manière irrémédiable. Voici quelques solutions possibles pour observer l'éclipse sans danger :

1. Observer à travers un filtre certifié comme des lunettes pour éclipses ou du mylar que l'on trouve chez les vendeurs spécialisés.

2. Observer avec un sténopé : on perce une feuille de papier (noir par exemple) d'un trou d'environ 1 mm de diamètre. La lumière du Soleil partiellement éclipsé traversant ce trou va former sur une autre feuille placée derrière une image du Soleil. La méthode est très simple mais l'image est assez petite.



3. Observer par projection avec des jumelles. Sans **JAMAIS** regarder à travers les jumelles, on projette l'image du Soleil sur une feuille. Seul danger : que les jumelles s'échauffent si on les laisse longtemps dirigées vers le Soleil.

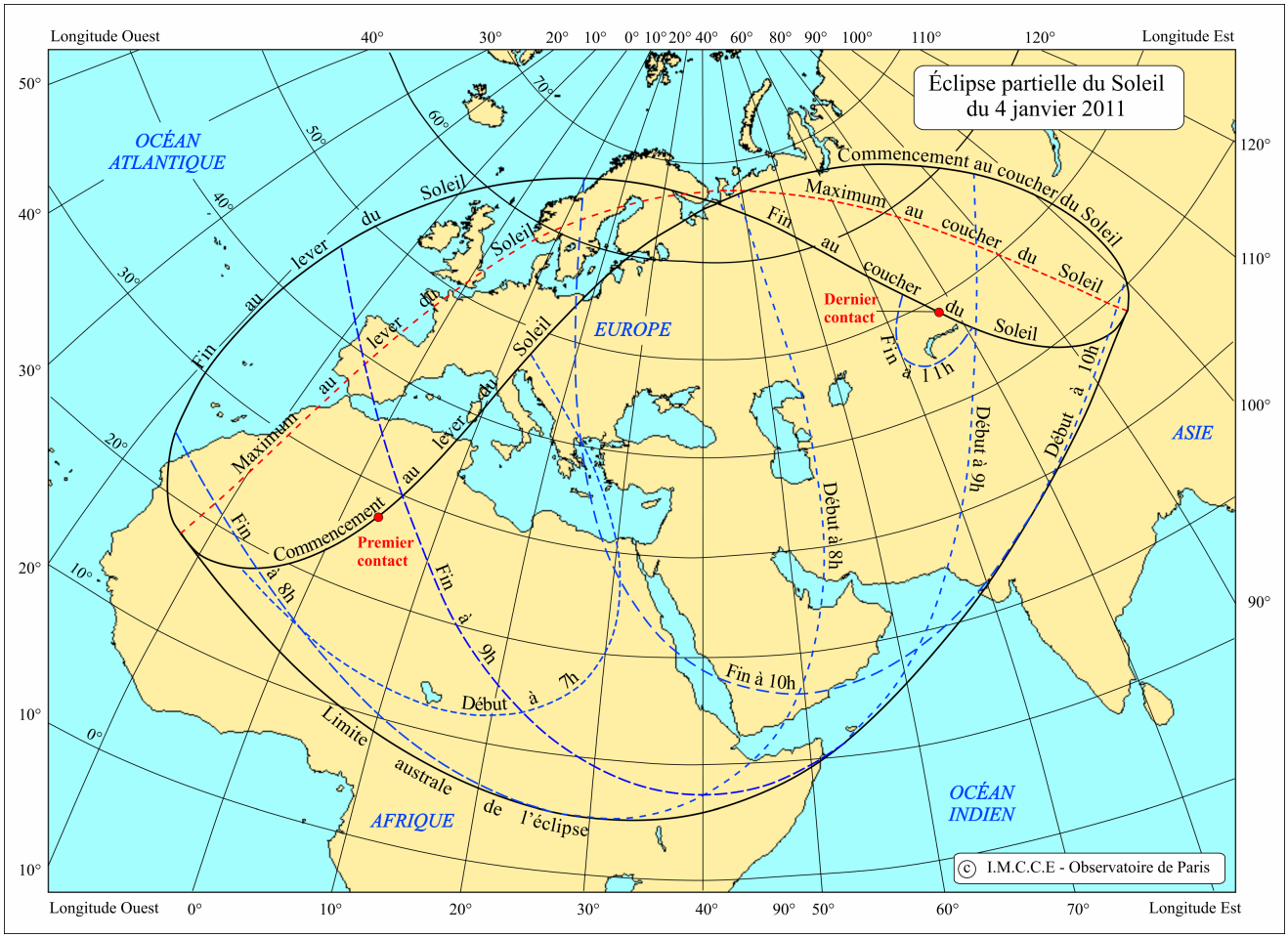
4. La meilleure méthode mais à condition d'avoir le matériel : observer avec une lunette ou un télescope muni d'un filtre pleine ouverture à l'entrée de l'instrument (il ne faut pas utiliser les filtres "sun" à visser sur l'oculaire qui peuvent chauffer et se fendre).

Carte de visibilité de l'éclipse partielle de Soleil du 4 janvier 2011

Une éclipse de Soleil est visible seulement depuis une petite partie de la Terre, là où va se projeter l'ombre de la Lune. Ici, l'éclipse étant partielle, il s'agit en réalité de la pénombre. Mais comme la Lune tourne autour de la Terre et la Terre tourne sur elle-même, cette pénombre se déplace ce qui rend plus difficile la réalisation de cartes. Sur la figure de l'IMCCE ci-dessous, on peut voir que la France est située entre les limites "Commencement au lever du Soleil" et "Fin au lever du Soleil". Si vous habitez en France métropolitaine, vous verrez donc le Soleil se lever partiellement éclipsé et la fin de l'éclipse sera visible (sauf nuages évidemment…). Seule une partie de la Bretagne ne pourra pas voir le maximum (à l'ouest des pointillés rouges).

La ligne bleue "Fin à 9 h" et "Début à 9 h" indique la position de la pénombre à 9 h (en Temps Universel). Comme elle se déplace d'ouest en est, le côté gauche de la ligne correspond à la fin de l'éclipse et le côté droit au début. La vitesse de la pénombre au sol provient principalement du déplacement de la Lune sur son orbite (à la vitesse d'environ 1 km/s). Cette pénombre se projette sur un sol en mouvement à cause de la rotation de la Terre, qui se déplace aussi d'ouest en est mais à une vitesse moindre (inférieure à 0,5 km/s).

L'axe du cône d'ombre de la Lune passe au-dessus de la Terre. Il faudrait donc aller au-dessus du pôle Nord pour voir une éclipse centrale qui serait d'ailleurs annulaire, la Lune étant trop éloignée pour cacher totalement le Soleil.



L'IMCCE donne sur son site de très nombreux renseignements sur l'éclipse, et en particulier les circonstances locales (horaires, obscuration, hauteur du Soleil…). ■

RÉALISATION

L'Orbilune

une maquette pour comprendre les mouvements de la Lune

Philippe Merlin, Observatoire de Lyon

L'Orbilune est une maquette tridimensionnelle, à construire soi-même, pour expliquer tous les mouvements de la Lune, ses phases et surtout les éclipses et leurs prédictions. Il allie donc un travail manuel à une connaissance approfondie de notre satellite en relation au calendrier et aux saisons.

La maquette construite et présentée ci-après est issue d'un travail commun entre l'Observatoire de Lyon et une classe de CM2. Elle pourra également répondre à la demande d'enseignants de tous niveaux confrontés au problème d'expliquer les mouvements de la Lune et les éclipses de façon non superficielle.

La Lune, notre plus proche voisine, sous un faux aspect de régularité (mois lunaire), cache une complexité étonnante dans tous ses aspects et mouvements.
À cause de l'inclinaison de son orbite sur le plan de celle de la Terre (écliptique) et des perturbations dues principalement au Soleil, les phénomènes ne se répètent pas systématiquement d'une lunaison à l'autre et d'une année à l'autre.

Pour simuler de façon réaliste la Lune sur son orbite, une maquette permet de mieux visualiser dans l'espace les positions respectives des trois corps Terre, Lune et Soleil. Les repères temporels (calendriers et années) permettent aussi de faire évoluer le système sur une plage de vingt ans.

Descriptif de la maquette

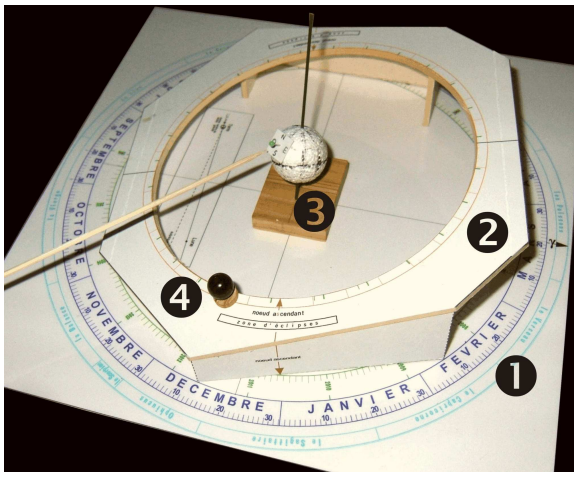


Fig.1. *Vue d'ensemble de l'Orbilune*

Elle comprend (figure 1) :
1. Un **plateau écliptique**, parallèle au *plan de l'écliptique*, plan de l'orbite de la Terre autour du Soleil (figure 2). Sur ce plateau, sont tracés un calendrier circulaire permettant au cours de l'année de visualiser les directions du Soleil et de ses rayons (en bleu nuit) ainsi qu'une graduation circulaire en année donnant la direction du nœud ascendant de l'orbite de la Lune (en vert). Une couronne extérieure (bleu clair) donne la position des constellations du Zodiaque.

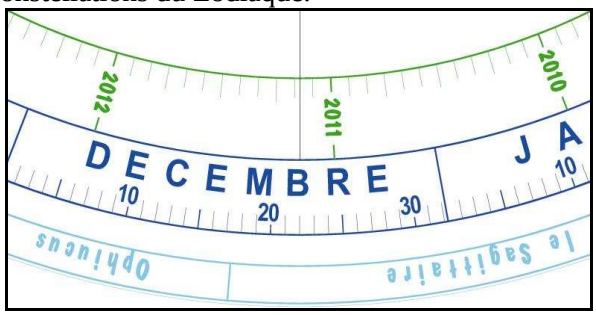


Fig.2*. Le plateau écliptique*

2. Un **plan incliné** mobile (figure 3), sur lequel est tracée l'orbite de la Lune (cercle de diamètre de 8,5 cm). Il est placé et orienté sur le plateau-écliptique en fonction de l'année et du mois de simulation. Le plan est évidé à l'intérieur de l'orbite pour y placer la Terre et faciliter l'observation.

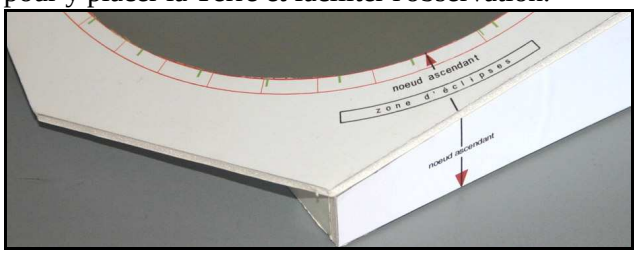


Fig.3. *L'orbite de la Lune*

3. Une petite **maquette Terre** et son support placés au centre du plateau-écliptique, avec son axe de rotation incliné de 23° 26'. Sur cette Terre on y place un petit carré de carton tenu par une épingle (figure 4). Le carton simule le plan horizon avec les quatre points cardinaux et l'épingle sert de verticale pour le lieu de latitude choisie.

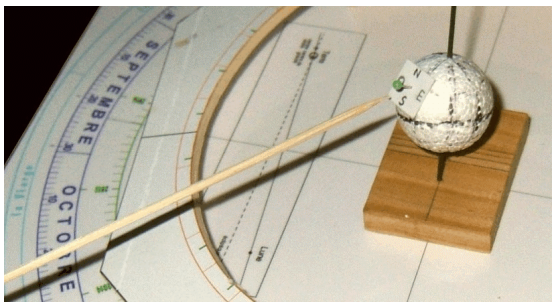


***Fig.4**. La Terre avec plan horizon et verticale d'un observateur. La baguette représente un rayon solaire.*

4. Une petite **maquette Lune** de taille approximativement en rapport avec la petite Terre.
Les rayons solaires peuvent être matérialisés par la lumière d'une lampe qui permet de simuler les variations d'éclairement sur la Lune au cours des lunaisons et sur la Terre au cours de la journée (rotation sur elle-même et ombre de l'épingle sur le plan horizon) et au cours de l'année (orientation suivant le calendrier). On peut aussi utiliser une baguette telle que montrée sur la figure 2. Celle-ci parallèle au plan de l'écliptique est orientée suivant le jour du calendrier pour montrer les variations de cette direction au cours de l'année. De plus son inclinaison par rapport au petit plan horizon et à sa verticale donne l'inclinaison des rayons du Soleil sur le lieu choisi par l'épingle et sa variation au cours de la journée en faisant tourner la Terre sur elle-même.

Remarque 1 : pour visualiser sans trop de difficulté les phénomènes des éclipses, l'inclinaison du plan de l'orbite de la Lune sur l'écliptique, qui est en réalité de 5,15°, a été doublée.
Remarque 2 : la maquette ne permet pas de simuler l'avance rapide du périgée (période 8,85 ans) qui influence la nature des éclipses de Soleil (annulaires ou totales). À l'échelle de la maquette, on peut juste vérifier que l'orbite de la Lune est excentrée, en regard des positions notablement différentes du centre de l'orbite, du centre de la Terre et du centre de gravité du système Terre-Lune (figure 5).

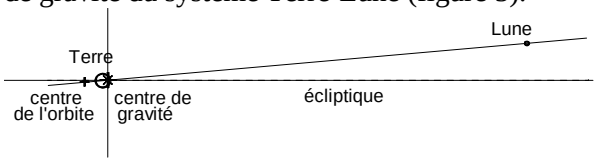


Fig.5. La Terre, la Lune avec le centre de l'orbite de la Lune et le centre de gravité (centre de masse) du système Terre-Lune. La Lune est représentée ici au périgée.

Un modèle plus complexe existe avec une orbite elliptique mobile sur le plan de l'orbite qui permet la rotation du périgée. La construction et la manipulation s'en trouvent compliquées. Pour une utilisation simple, le modèle de base est préférable.

Construction

Le dossier complet est en ligne sur le site de l'Observatoire de Lyon, aux pages de la formation continue des enseignants : *http://www-obs.univ-lyon1.fr /labo/fc/orbilune/orbilune.htm* On y trouve tous les fichiers (PDF) à imprimer : plan de l'écliptique, plan de l'orbite de la Lune, dossier complet d'explications de chaque partie et des renseignements sous forme de tableaux pour l'utilisation de l'an 2000 à 2020 (phases de la Lune, éclipses…).
Deux modèles sont proposés, l'un à imprimer sur bristol l'autre à coller sur carton plume (plus rigide et résistant).
Les principaux outils à utiliser sont une paire de ciseaux ou un cutter (indispensable pour le carton plume), une règle, de la colle et du soin.
Vous trouverez aussi sur le site différents conseils en particulier pour fabriquer la Terre et la Lune.

Utilisation

La maquette se propose de simuler un certain nombre de phénomènes astronomiques liés à la Lune, à la Terre et au couple Terre-Lune sous l'éclairage du Soleil.

Positionnement de la Terre

En premier lieu, il faut placer la Terre correctement pour que son inclinaison donne bien les saisons en fonction de l'orientation du Soleil. C'est un premier travail de réflexion. Ceci se fait à l'aide des positions remarquables équinoxes et solstices : aux équinoxes, pour avoir les durées du jour et de la nuit égales, la limite jour nuit doit passer par les pôles ; au solstice d'été, les rayons doivent éclairer le pôle nord alors que le pôle Sud est dans la nuit. Au solstice d'hiver, l'éclairement des pôles est inversé.
On peut se demander à quelle distance doit se trouver le Soleil à l'échelle de l'orbite de la Lune de la maquette ? Et, question un peu plus approfondie, quelles sont les distances au périhélie et à l'aphélie ?

Positionnement de l'orbite de la Lune

Pour une date donnée, la partie orbite de la Lune se place sur le plan écliptique, en alignant le repère brun latéral *nœud ascendant* sur la graduation circulaire verte des années et des mois (figure 6). Les bases des deux supports verticaux latéraux doivent être inscrites dans le cercle intérieur bleu foncé du calendrier (figure 1).

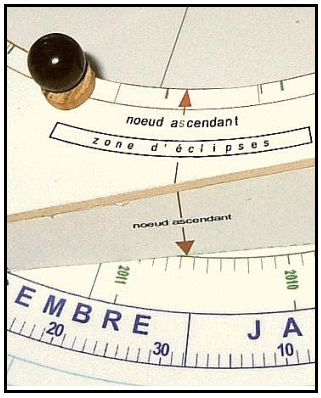


***Fig.6.** Réglage de l'orbite de la Lune*

Mouvements de la Lune

La maquette permet de définir les principales périodes de la Lune en faisant apparaître que lors de sa révolution autour de la Terre, simultanément, la direction du Soleil tourne en suivant le calendrier et le plan de l'orbite tourne, changeant la position du nœud. On pourra ainsi illustrer les différentes périodes et les définir :

1. Révolution autour de la Terre

Période de révolution **sidérale** (retour dans une même direction du ciel), période **synodique** (même configuration avec la Terre et le Soleil) et période **draconitique** (retour au nœud ascendant). On trouvera les définitions de ces périodes dans la documentation fournie sur la page web ou dans tout bon livre d'astronomie.

On pourra se demander, en cherchant les différents sens de rotation pourquoi la période draconitique est plus courte que la période sidérale, qui elle-même est plus courte que la lunaison.

Pour bien montrer les différences entre toutes ces périodes, on insistera sur le fait qu'au cours d'une lunaison, la direction du Soleil a changé (révolution de la Terre sur son orbite dans le sens inverse des aiguilles d'une montre vue du nord ou sens direct) et aussi que le plan de l'orbite de la Lune a tourné (pratiquement une petite graduation du repère des nœuds dans le sens rétrograde ou sens des aiguilles d'une montre).

Le sens de rotation est important : sens direct pour la Terre et la Lune sur elles-mêmes et sur leurs orbites (toujours vues du nord), sens rétrograde pour la rotation du plan de l'orbite de la Lune.

2. Rotation sur elle-même

On fera apparaître, pour expliquer la synchronisation de la rotation de la Lune sur elle-même avec sa rotation autour de la Terre, que la Lune doit aussi tourner sur elle-même par rapport aux étoiles lointaines, avec la même période que la période sidérale, pour toujours montrer la même face à la Terre, en mettant un petit repère sur la Lune. Ce repère changera de direction par rapport à l'environnement lointain au cours de la lunaison.

Phases de la Lune

En jouant sur les positions respectives de la Lune et du Soleil, on fait apparaître que la partie éclairée de la Lune visible de la Terre présente un aspect de phase. On peut définir les différentes positions : nouvelle Lune, premier quartier, pleine Lune, dernier quartier. En se référant à la zone zodiacale, on verra que d'une lunaison à l'autre, la Lune n'est pas dans la même partie du ciel.

Variation des heures de lever et coucher de la Lune au cours de la lunaison

Avec l'aide de la rotation diurne de la Terre, du petit plan horizon et de la direction du Soleil, on pourra montrer que les heures de lever et coucher de la Lune varient tout au long de la lunaison et des saisons.

Position de la Lune au-dessus de l'horizon suivant l'époque de l'année

En se plaçant à différentes époques de l'année, on montrera que lors de son passage au méridien, aux différentes phases, la Lune peut être très haute ou très basse sur l'horizon. Cette hauteur de passage est à associer à la durée de visibilité de la Lune variant de 7 h 35 min à presque 17 h sous nos latitudes pour un horizon sans relief. Ceci est à relier aussi à la position du Soleil sur l'écliptique suivant les saisons.

Les éclipses

La maquette permet de simuler les positions respectives de la Lune et de la Terre lors des éclipses aux pleines lunes (éclipses de Lune) et nouvelles lunes (éclipses de Soleil). On fera apparaître qu'à chaque lunaison, il n'y a pas systématiquement éclipse à cause de l'inclinaison du plan de l'orbite de la Lune.

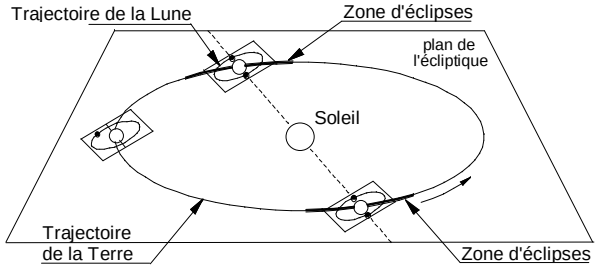


Fig.7. *Plan de l'orbite de la Lune et plan de l'écliptique*

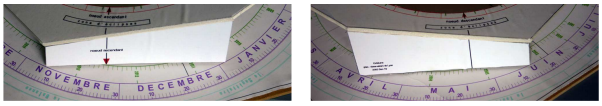
1. Il n'y a éclipse que si, à la pleine Lune ou à la nouvelle Lune, la Lune est proche du plan de l'orbite de la Terre, le plan écliptique (d'où l'origine du mot), donc près des nœuds de l'orbite (intersections de l'orbite de la Lune et du plan de l'écliptique).
2. On fait alors apparaître que si, un jour donné, il y a une éclipse de Lune ou de Soleil, quinze jours avant ou après, la Lune est encore proche du plan de l'écliptique et qu'il y a toujours une autre éclipse, mais de l'autre type (de Soleil ou de Lune). Le tableau des éclipses fourni dans la documentation permet d'analyser ce phénomène.
3. En suivant les lunaisons successives sur un an, on fait apparaître qu'en général, il y a au moins deux éclipses de Soleil et deux éclipses de Lune par an.

Dates des éclipses

Puisqu'une éclipse ne peut se produire que si la Lune est près d'un des nœuds de son orbite, l'alignement

de la Terre, de la Lune et du Soleil entraîne que le Soleil doit aussi être proche de la direction d'un nœud de la Lune.
Pour un millésime donné, on positionne le repère du nœud ascendant au milieu de l'année indiquée en utilisant la graduation interne du plan de l'écliptique.
Les deux repères des nœuds ascendant et descendant vont indiquer grâce au calendrier, à six mois d'intervalle, les dates approximatives (mois et jours) où peuvent se produire les éclipses.
Pour finaliser les dates, on positionne le repère du nœud ascendant qui était au milieu de l'année, pour l'une des époques approximatives.
Si l'on possède les prévisions des lunaisons, il suffit de trouver la date de la nouvelle Lune ou la pleine Lune la plus proche de la date indiquée sur la maquette. Une pleine Lune donne une éclipse de Lune et une nouvelle Lune donne une éclipse de Soleil.
Une éclipse additionnelle peut être prévue, si le Soleil et la Lune à la prochaine pleine Lune ou nouvelle Lune sont encore dans la zone de possibilité d'éclipse (+/- 17° de part et d'autre des nœuds). On les appelle *éclipses associées.*
Plus rarement si une éclipse se produit avec un alignement très près de la ligne des nœuds, il y aura deux éclipses partielles associées de même type (mais type opposé à la première), l'une à la demi lunaison précédente, l'autre à la demi-lunaison suivante. Par exemple, une éclipse totale de Lune très proche de la ligne des nœuds pourra être entourée de deux éclipses partielles de Soleil une quinzaine de jour avant et après. Une éclipse qui se produit très près des nœuds est une éclipse totale (ou éventuellement annulaire pour le Soleil), sinon elle sera partielle.

Un exemple : Les éclipses de l'année 2012.
On positionne le plan de l'orbite de la Lune pour le 1er juillet 2012. La ligne des noeuds donne les dates :
1. 27 novembre Soleil au noeud ascendant (fig.8a)
2. 27 mai Soleil au noeud descendant (fig. 8b)



8a. Nœud ascendant *8b. Nœud descendant*

Fig.8. *Réglage de la ligne des nœuds pour 2012*

Éclipse au nœud ascendant :
On positionne le plan de l'orbite pour la fin novembre (figure 9). On lit sur le calendrier, que le Soleil est alors à ce nœud le 21 novembre. De la table des lunaisons, on déduit éclipse de Lune à la pleine Lune le 28 novembre et éclipse de Soleil à la nouvelle Lune le 13 novembre.

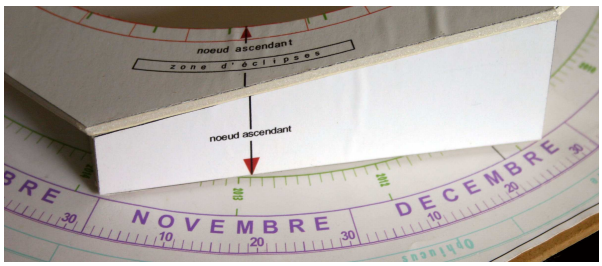


Fig.9. *La ligne des nœuds pour fin novembre 2012*

Éclipse au nœud descendant : on fait de même, le Soleil est au nœud le 30 mai, d'où l'on déduit une éclipse de Soleil le 20 mai à la nouvelle Lune et une éclipse de Lune le 4 juin à la pleine Lune.

Périodicité des éclipses

Le plan de l'orbite de la Lune tourne sur lui-même en 18,61 ans. Pendant ce temps, la Lune est passée 242 fois au nœud ascendant. Il s'est écoulée 242 périodes draconitiques.
Les positions des nœuds se déplaçant régulièrement, les dates d'éclipses se décalent d'une année sur l'autre.
La répétition des éclipses est donc conditionnée par deux périodes principales, la période synodique ou lunaison (pleine Lune, nouvelle Lune) et la période draconitique. La recherche d'un nombre proche d'un multiple de ces périodes par la méthode de décomposition des réels en fraction continue permet de retrouver la période dite du **SAROS** de reproduction presque à l'identique des éclipses. En effet :
223 mois synodiques de 29,5305882 j = 6585,321 j
242 mois draconitiques de 27,212 2208 j = 6585,304 j
Cette période de 6585,3 jours (18 ans, 11 jours et 7 heures) est appelée *Saros* et permet de prévoir le retour des éclipses.

Autres utilisations de la maquette

La petite maquette Terre seule, sans la partie de l'orbite de la Lune, peut servir à expliquer de nombreuses notions bien qu'une Terre plus grande permette mieux de visualiser les phénomènes (voir la grande maquette à *http://www-obs.univ-lyon1.fr/labo/ fc/maquette.htm*).
Voici quelques exemples de notions abordables :
Les saisons, la durée du jour et de la nuit, le soleil de minuit, le jour solaire et le jour sidéral, la position du Soleil dans le zodiaque, la précession des équinoxes…

Ce document ne pouvant être exhaustif, commentaires, suggestions, critiques ou demandes de renseignement sont à faire à merlin@obs.univ-lyon1.fr.

Les calculs faits pour construire la maquette sont basés sur les éphémérides fournies par l'IMCCE (www.imcce.fr). Ses pages Grand public apportent des documents de premier ordre sur tous les phénomènes du système solaire. ■

Interaction lumière matière
(L'éclipse du 29 mai 1919)

Christian Larcher

Entre la conception d'Einstein et celle de Newton le langage est le même, la matière agit sur les rayons lumineux mais le cadre conceptuel est complètement différent.

Avant Einstein, la théorie de l'émission

Au XVIII[e] siècle, après le succès des Principia (1687), Newton cherchera à étendre le cadre unitaire et le caractère universel des théories de la mécanique à la lumière. Pour lui, la lumière est composée de particules ponctuelles, sortes de globules lumineux analogues à des corpuscules matériels. La lumière est assimilée **à une émission de particules** qui suivent les mêmes lois balistiques que celles qui concernent la trajectoire d'un boulet de canon. Ces corpuscules soumis à des forces peuvent être déviés, accélérés ou freinés. Le principe de la relativité galiléenne d'addition des vitesses s'applique également.

À l'époque on sait, depuis les travaux de Römer, que la vitesse de la lumière est très grande mais finie. Dans ce cadre conceptuel, la vitesse de la lumière peut varier et dépend à la fois de la vitesse de la source lumineuse et de celle de l'observateur.

La théorie corpusculaire de la lumière implique curieusement, que pour un parcours de même longueur, ces corpuscules traverseraient plus rapidement un milieu transparent dense comme l'eau qu'un milieu comme l'air ou le vide.[1]

En définitive il existe pour Newton deux types de forces, la force de gravitation et la "force réfringente" responsable des phénomènes d'émission, de réfraction et de réflexion de la lumière. Il écrit dans en 1704 dans Optique : "*Est-ce que les corps n'agissent pas à distance sur la lumière et, par leur action, ne courbent-t-ils pas ses rayons ? Et cette action n'est-elle pas d'autant plus intense que sa distance est moindre*".

Un siècle après la parution des Principia, la théorie de la lumière sera nommée "théorie de l'émission". En 1801 un astronome prussien, Johan von Soldner (1776 – 1833), s'appuyant sur le cadre de l'optique newtonienne calcule qu'un rayon lumineux rasant le Soleil devrait subir une déviation de 0,84 seconde d'arc. Albert Einstein arrivera au même résultat en 1911 mais en utilisant un cadre conceptuel très différent (celui de la Relativité Restreinte). Plus tard en 1921 Lenard, un scientifique allemand profondément antisémite, accusa Einstein d'avoir plagié von Soldner.

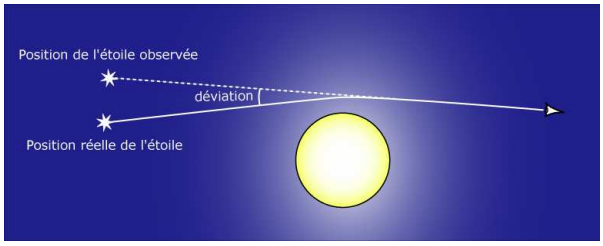


***Fig.1**. Déviation d'un rayon lumineux passant à proximité du Soleil*

Gravitation et lumière dans le cadre de la Relativité Générale

La théorie de Newton postule l'existence d'un espace absolu et d'un temps absolu. Avec la Relativité Générale le temps et l'espace ne sont plus postulés a priori. C'est la distribution de la matière contenue dans l'Univers qui détermine la structure de l'espace-temps. La gravitation devient une propriété de l'espace lui-même. Pour Albert Einstein, l'espace, en tant que concept détaché de tout contenu physique, n'existe pas. Là où il n'y a pas de corps, il n'y pas de champ de gravitation, donc pas d'espace. Il sera toujours question de déviation de la lumière par les corps massifs mais cette déviation ne résulte plus de l'action d'une force.

Par ailleurs Albert Einstein arrive à la conclusion que, quel que soit le mouvement de la source ou de

[1] *Cette théorie va perdurer jusqu'à l'expérience cruciale imaginée par Arago et réalisée par Foucault en 1850 dans la grande salle Cassini de l'Observatoire de Paris. Cette expérience montre que la vitesse de la lumière dans l'eau est en réalité plus faible que la vitesse de la lumière dans l'air. Elle est dite cruciale car elle marque le triomphe de la conception ondulatoire de la lumière aux dépens de la conception corpusculaire mais ce triomphe ne dura qu'environ 50 ans.*

l'observateur, la vitesse de la lumière reste constante. Par conséquent le principe d'addition des vitesses de la relativité galiléenne ne s'applique pas à la lumière.
Il est courant de représenter, de façon imagée, l'espace-temps par une surface plane dans notre univers en 3D. Dans cet espace-temps, la Terre suit la courbure de l'espace selon des trajectoires privilégiées que l'on appelle géodésiques. Les géodésiques d'un espace courbe constituent une généralisation de ce qui constitue une ligne droite dans un plan.
Henri Poincaré dans son livre "*La Science et l'Hypothèse*" écrit qu'une ligne droite est "*simplement la trajectoire d'un rayon lumineux*". [2]
Dans le cadre complexe de la Relativité Générale il est nécessaire de bien distinguer : la réalité physique, le concept physique et le modèle mathématique qui en rend compte. Mais nous reviendrons sur cette question délicate dans un article futur.
Albert Einstein considérait que sa théorie avait une telle cohérence qu'il pouvait affirmer, au sujet de la validation expérimentale :
"On peut dire une chose avec certitude : si une telle déflexion n'existe pas, alors les hypothèses de ma théorie ne sont pas correctes" (lettre à Freundlich du 1er septembre 1911).
Et dans une autre lettre adressée à son ami Besso en mars 1914 :
"Maintenant, je suis entièrement satisfait, et je ne doute plus de la validité de tout le système, que l'observation de l'éclipse solaire réussisse ou non. La logique de la chose est par trop évidente".

L'éclipse et les conditions de validation expérimentale de la théorie d'Einstein

En novembre 1917 une commission décide de tester la théorie d'Einstein lors de l'éclipse totale du 29 mai 1919. Cette éclipse remplit des conditions particulièrement favorables. En particulier elle se produit devant un champ céleste riche en étoiles brillantes et bien réparties (les Hyades dans la constellation du Taureau).

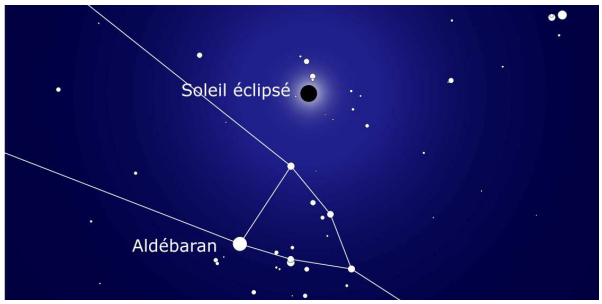


***Fig.2**. Position du Soleil éclipsé dans la constellation du Taureau le 29 mai 1919.*

Deux sites situés sur la bande de totalité sont choisis. L'un se trouve au nord-est du Brésil à Sobral près de Fortaleza l'autre sur l'île Principe en Afrique occidentale dans le golfe de Guinée. Eddington sera le responsable des deux expéditions.
Le financement prévu est de 1 100 Livres : 1 000 pour l'expédition et 100 pour le matériel (1 livre de 1919 = 6 000 livres de 2010 soit environ 7 200€).

L'objectif de la mission

Il s'agit de déterminer au moment de l'éclipse si les rayons lumineux issus des étoiles et passant très près du Soleil sont légèrement déviés par rapport à leurs positions habituelles et, si c'est le cas, de mesurer la valeur cette déviation. Pour effectuer cette mesure on prendra une série de photos donnant la position des étoiles visibles dans le fond du ciel et qui se trouvent près du Soleil éclipsé. Avant ou après l'éclipse**,** on prendra d'autres photos de nuit du même champ stellaire. La superposition des plaques photos devrait permettre de mesurer une éventuelle déviation.
Pour Eddington, trois cas sont possibles :
- La déviation est nulle ou l'interaction non mesurable.
- La déviation existe, elle est de l'ordre 0,84'' en accord avec la théorie de Newton.
- La déviation est de l'ordre de 1,75'' comme prévu par la théorie d'Einstein**.**

Cette valeur de 1,75'' est une valeur extrapolée à partir d'écarts progressivement décroissants. En fait il s'agit de vérifier si l'on a 1,75''/Δ avec Δ exprimé en rayon du Soleil. La valeur limite est donnée pour R = 1.

Déroulement de l'expédition

Une équipe constituée d'Eddington et Cottingham ira sur l'île Principe avec la lunette d'Oxford. L'autre équipe constituée de Davidson et Crommelin se rendra à Sobral avec la lunette astrographique de Greenwich, une lunette de 4 inch et un cœlostat.
Les deux équipes embarquent à Liverpool le 8 mars 1919. Elles se séparent à partir de l'île de Madère.

---

[2] On peut donner des images pour aider à la compréhension mais avec les risques que cela comporte. L'espace-temps constitue un système à quatre dimensions (trois d'espace et une de temps). L'exemple qui suit concerne seulement notre monde familier qui n'en comporte que trois.
Pour aller en avion d'un point A à un point B à la surface du globe le pilote peut suivre un cap constant, il va couper tous les méridiens rencontrés sous le même angle. Mais il ne s'agit pas du chemin le plus court. Celui-ci est constitué par une portion de grand cercle dont le rayon est celui de la Terre.
Albert Einstein dans une lettre destinée à son fils Eduard résume sobrement sa recherche :
"*Vois-tu mon fils, quand une punaise se traîne à la surface d'une sphère, elle ne sait plus que son chemin est courbe. J'ai eu la chance de le remarquer*".

L'équipe d'Eddington arrive à Principe un mois avant la date de l'éclipse.

Sur l'île Principe Eddington écrit :

"Le jour de l'éclipse, le temps était défavorable. Quand la phase totale commença, le disque sombre de la Lune, entouré de la couronne, fut visible à travers un nuage ; c'était assez semblable à ces nuits sans étoiles où souvent la Lune n'apparaît que voilée".

Durant l'éclipse l'ambiance est lugubre entre le silence de la nature et le battement du métronome qui compte les 302 secondes de durée l'éclipse totale. Eddington envoie à Londres un télégramme de trois mots "Through Cloud Hopeful".

À Sobral au Brésil, Crommelin écrit :

"Le jour de l'éclipse commença fort mal, la proportion de nuages tôt le matin étant d'environ 9/10 » il ajoute « *un grand trou clair se fit dans les nuages et atteignit les alentours du Soleil juste à temps".* Crommelin envoie un télégramme à Londres : *"Eclipse splendid"***.**

L'annonce des résultats et ses conséquences

Après le retour à Londres une étude approfondie des résultats est entreprise. Il faut déterminer les plaques qui sont utilisables (2 seulement pour Principe) corriger les résultats en prenant en compte de nombreux paramètres (erreurs systématiques, turbulence de l'air, taches de diffraction, phénomènes d'aberration et de réfraction etc.)

Finalement les valeurs retenues sont :

Pour Sobral 1,98'' ± 0,12''

Pour Principe 1,61'' ± 0,30''[3]

Dans l'article final l'Astronome Royal Dyson écrit concernant les résultats de Sobral : *"Après une étude soigneuse des plaques, je suis prêt à déclarer qu'il n'y a aucun doute qu'elles confirment les prédiction d'Einstein. Un résultat tout à fait certain a été obtenu selon lequel la lumière est défléchie en accord avec la loi de gravitation d'Einstein".*

Eddington quant à lui ajoute : *"Ce résultat va dans le sens des chiffres obtenus à Sobral".*

Une réunion commune de la Royal Society et la Royal Astronomical Society sous la Présidence de JJ Thompson (Prix Nobel pour la découverte de l'électron) a lieu le 6 novembre 1919 pour faire le bilan des expéditions. Voici le compte rendu d'un témoin oculaire Sir Whitehead tel qu'il est transmis dans le livre de Philippe Frank "Einstein, sa vie son temps" ; Flammarion 1991 page 215.

"J'eus la bonne fortune d'assister à la réunion de la Société Royale à Londres lorsque l'astronome royal d'Angleterre annonça que les plaques photographiques de la fameuse éclipse, mesurées par ses collègues à Greenwich, vérifiaient les prévisions d'Einstein selon lesquelles les rayons de lumière sont courbés lorsqu'ils passent dans le voisinage du Soleil.

L'atmosphère entière d'intense attention fut exactement celle du drame grec. Nous formions le choeur qui commente les décrets du destin, tels qu'ils sont révélés par le cours de l'évènement suprême. Il y avait une valeur de drame dans le très scénique, très traditionnel cérémonial, avec en arrière plan le portrait de Newton pour nous rappeler que la plus grande des généralisations de la science venait, après plus deux siècles, de recevoir sa première atteinte (…) Les lois de la physique sont les décrets du destin".

Ce résultat eut un profond retentissement dans la société et pour la gloire d'Einstein qui du jour au lendemain fut véritablement « déifié ».

Cette expérience de validation des théories d'Einstein a eu, on le sait maintenant, beaucoup de conséquences. Pour n'en citer qu'une, elle est à l'origine de la découverte des lentilles gravitationnelles qui permet d'obtenir une image agrandie et une luminosité amplifiée de sources lumineuses lointaines. Une des applications actuelles est la découverte de nouvelles exoplanètes.

Bibliographie

- *Avant Einstein ; Relativité, lumière, gravitation ;* Jean Eisenstaedt ; Seuil 2005.
- *Einstein et la relativité générale* ; les chemins de l'espace-temps ; Jean Eisenstaedt ; CNRS éditions 2002.
- *Einstein, sa vie, son temps* ; Ph. Frank ; Flammarion 1991.
- *Einstein aujourd'hui* ; collectif ; Aspect et al. ; EDP sciences et CNRS Éditions.
- *L'univers et la lumière* ; Nottale ; Flammarion 1994.
- *La physique du* XX^{e} *siècle* ; M. Paty ; EDP Sciences.
- *La Science et l'Hypothèse* ; H. Poincaré ; Flammarion 1989.
- *Les dossiers de la Recherche* ; l'héritage Einstein ; N°18 février-avril 2005.

Pour voir la carte de l'éclipse de 1919 cliquer sur : http://xjubier.free.fr/site_pages/solar_eclipses/xSE_GoogleMapFull.php?Ecl=+19190529&Acc=2&Umb=1&Lmt=1&Mag=0

- Article de la revue "Ciel & Espace" mai 2008 p. 54 intitulé "Les preuves étaient fausses" ; Jean Marc Bonnet-Bidaud. ■

[3] La valeur théorique de l'angle de déviation finalement retenue par Einstein est donnée par la relation : $\alpha = 4GM/c^2r$ r = distance de plus courte du rayon lumineux au centre du Soleil. M est la masse du Soleil.

AVEC NOS ÉLÈVES

Quelques idées d'activités autour des éclipses

Jean-Luc Fouquet, Pierre Causeret

Au collège en sciences physiques

Des maquettes

Parmi les nombreuses activités possibles, les maquettes sont toujours plus parlantes que les schémas. Pour une éclipse de Soleil, il faut :
- un globe terrestre ;
- une lune 3 à 4 fois plus petite que le globe ;
- une source de lumière plus grosse que la Lune pour que le cône d'ombre soit dans le bon sens. Le plus simple est de prendre le vrai Soleil quand il n'y a pas de nuage.

Pour être à l'échelle, la Lune doit être placée à 30 fois le diamètre du globe.
Pour les éclipses de Lune, les ingrédients sont les mêmes avec cette fois une source de lumière plus grosse que le globe si possible.

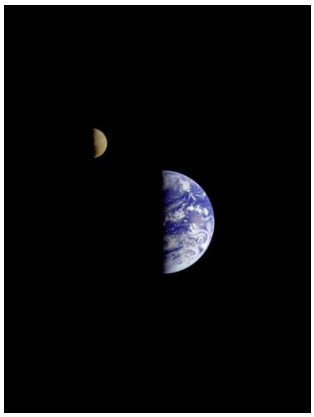
Avec un globe de 10 cm de diamètre et une Lune de 3 cm placée à 3 m, le tout au Soleil, on peut simuler correctement une éclipse de Soleil.

Des photos de la Terre et la Lune vues de l'espace …

Aux six clichés proposés dans ce numéro (p. 38) permettant de différencier phases et éclipses de Lune observées depuis un lieu sur la Terre, il peut être intéressant de changer de point de vue en étudiant quelques photos prises depuis l'espace à partir de sondes visitant notre système solaire depuis plus de vingt ans.

1. Bien que ces clichés soient pris à plusieurs millions de kilomètres de la Terre, les deux astres présentent sur chaque photo la même phase, le Soleil étant très éloigné dans chaque cas.
On observe donc un croissant sur le cliché de 1977, un quartier sur celui de janvier 1992 et une Lune gibbeuse sur la dernière photo (le terminateur sur la Terre n'étant pas visible).

a. *Première photo du duo Terre – Lune prise par Voyager 1 le 18 septembre 1977 à 11,6 millions de km.*

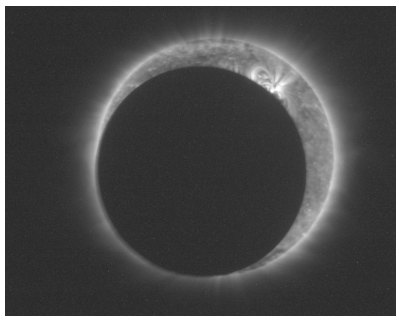


b. *Photo prise par la sonde Galileo en décembre 1992. L'Antarctique est en haut, le pôle Nord est en bas.*

c. *Photo prise par la sonde Galileo en décembre 1992. Le continent sud-américain est nettement perceptible.*

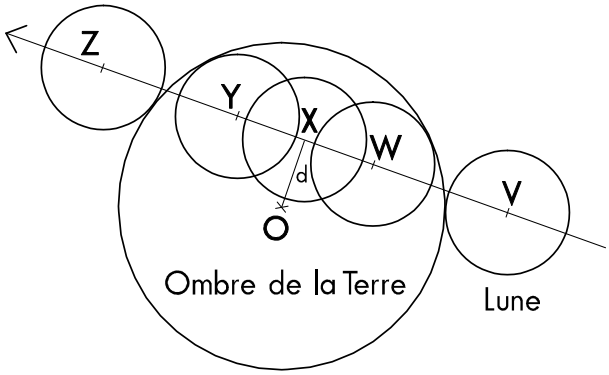
Pourrait-on en déduire dans chaque cas la phase de Lune perçue depuis la Terre? En particulier, sur la photo du milieu les terminateurs sur les deux astres semblent rectilignes, ce qui suggère une position du Soleil peu éloignée d'un plan perpendiculaire à la ligne de visée et passant par la Terre, la Lune ayant été observée les jours suivants avec un déplacement de gauche à droite …

2. Éclipse ou occultation ?
Au moment de la prise de vue, la sonde Mariner 10 est alignée avec la Lune (au premier plan) et le Soleil (beaucoup plus loin). On pourra comparer ce qui est vu depuis la sonde avec une photo d'une éclipse de Soleil prise depuis un point de la Terre. Pourquoi les deux clichés ne pourraient pas être confondus ? Que pourrait-on dire de la distance de la sonde à la Lune et au Soleil ? Mais au fait, du point de vue de la sonde, quel est donc le phénomène observé ?



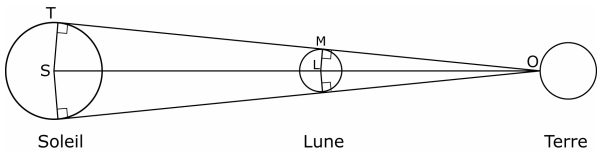
En maths au collège ou au lycée

Horaires de l'éclipse du 21/12/2010 (4e-3e)
Connaissant l'heure du maximum de l'éclipse (passage de la Lune en X), calculer les autres horaires (heures de passage de la Lune en V (entrée dans l'ombre), W (début de la totalité), Y (fin de la totalité) et Z (sortie de l'ombre).
Les données
∗Diamètre de la Lune : 3 500 km
∗Diamètre de l'ombre de la Terre : 9 300 km
∗Vitesse de la Lune : 3 500 km/h
∗Heure du passage de la Lune en X : 9 h 18
∗Distance d ou OX : 2 000 km



Un petit problème sympathique à base de Pythagore et de calcul de vitesse. Principale difficulté pour les élèves : trouver que OV est égal à $r_O + r_L$ (rayon de l'ombre + rayon de la Lune) et que OW mesure $r_O - r_L$. Il vaut mieux rappeler le principe d'une éclipse de Lune avant de donner cet exercice. Rappelons que l'ombre de la Terre n'est pas visible en réalité, le schéma est fait comme si on avait mis un écran dans le ciel au niveau de la Lune.

Conditions d'une éclipse de Soleil (4e - 3e)
a) Calculer à quelle distance il faudrait placer la Lune pour qu'elle cache exactement le Soleil pour l'observateur placé en O.
b) Calculer le coefficient d'agrandissement qui permet de passer du triangle OLM au triangle OST.
c) La distance Terre Lune varie de 356 000 km à 406 000 km. Conclure.



Données :
OS = 150 000 000 km.
Rayon de la Lune: 1 750 km.
Rayon du Soleil : 700 000 km.

Un problème simple faisant appel à Thalès et qui permet de rappeler les propriétés des tangentes à un cercle. Le coefficient de 400 permet d'expliquer que le Soleil est 400 fois plus éloigné de nous que la Lune mais aussi 400 fois plus gros. On peut conclure en disant que certaines éclipses sont totales (si la Lune est assez proche), d'autres annulaires (quand la Lune est trop éloignée pour cacher entièrement le Soleil).

Éclipse de Soleil du 4 janvier 2011 (3e−1ère)
Le 4 janvier 2011, on pourra observer en France une éclipse partielle de Soleil. On se demande si cette éclipse sera centrale quelque part sur Terre. Autrement dit, la droite (SL) coupe-t-elle la surface terrestre ?

Données : TS = 147 100 000 km TL = 390 000 km
STL = 1° ("longitude écliptique géocentrique" de la Lune)

Un énoncé simple mais une résolution peu évidente. Si on veut résoudre ce problème à partir des connaissances de la classe de 3e, il faut utiliser le projeté orthogonal de L sur (TS).

Et aussi De nombreuses autres activités peuvent être menées (maquettes, simulations avec des logiciels gratuits comme Stellarium …) Vous en trouverez quelques-unes dans ce numéro.

Des réponses p. 35

AVEC NOS ÉLÈVES

Ecclisi di Sole

Filomena Coscarella, Université de Calabre &Noël Robichon, Observatoire de Paris

Nous avons reçu ce texte de Filomena Coscarella, une étudiante italienne préparant une thèse sur l'enseignement de l'astronomie et actuellement en France à l'observatoire de Meudon. Elle présente ici une expérience pédagogique menée avec une classe de primaire en Italie sur les éclipses de Soleil, en abordant en particulier le problème des diamètres apparents de la Lune et du Soleil de manière expérimentale.

L'apprentissage des matières scientifiques est difficile. Trop souvent les élèves éprouvent un rejet, un refus a priori qui produit une capitulation inconsciente à l'étude de ces disciplines. Il est naturel de se demander si la désaffection croissante des jeunes dans l'enseignement des matières scientifiques ne vient pas en partie de la manière dont elles sont enseignées dès l'école primaire. Beaucoup pensent que c'est la méthode d'apprentissage qui n'est pas bonne car trop théorique et éloignée de la réalité. Et les enseignants ont du mal à ne pas réutiliser les méthodes d'apprentissage avec lesquelles ils ont eux-mêmes appris. Il est donc nécessaire d'expérimenter de nouvelles approches méthodologiques qui donnent confiance à l'élève et lui permettent de construire ses connaissances dans une démarche active et consciente. De telles méthodes doivent être basées sur la curiosité naturelle des enfants. L'appropriation d'une telle méthode par l'élève doit in fine lui donner des outils pour appréhender le monde qui l'entoure, en dehors du cadre scolaire.

L'expérience en classe

Nous allons décrire une activité effectuée dans une classe de cinquième (niveau équivalent au CM2 français) de l'école primaire "Giacontesi" à Paola en Calabre (Italie). La classe était composée de 15 élèves (7 garçons et 8 filles) d'un milieu social médian avec un assez bon niveau en sciences.

Je suis venue dans cette classe, en tant qu'intervenante scientifique, 24 heures au cours de l'année sous forme de 12 séances de deux heures. Nous avons abordé plusieurs thèmes comme les phases de la Lune, l'utilisation du logiciel de planétarium Stellarium et effectué des observations diurnes et nocturnes.

Cet article se concentre sur une séance consacrée aux éclipses de Soleil. L'activité de deux heures s'est déroulée dans le jardin adjacent à l'école puis dans la salle de classe. Les élèves ont commencé par former un grand cercle qui permet une communication ouverte, et dans lequel chacun est symboliquement à la même place et a la même possibilité de prendre la parole. La proposition faite aux élèves est de construire un modèle Soleil - Terre - Lune à l'échelle pour rendre compte de ce qui se passe dans l'espace pendant une éclipse de Soleil puis de mimer le phénomène astronomique à travers un jeu de rôle.

La séquence commence par une question posée aux élèves : "**Est-ce qu'une petite boule peut en cacher une plus grande ?**". Les réponses des élèves sont partagées, mais aucun ne propose d'explication.

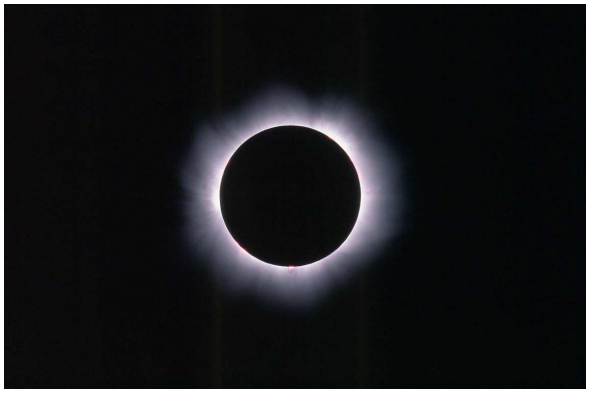


***Fig.1**. Éclipse de Soleil. Est-ce qu'une petite boule peut en cacher une plus grande ?*

Pour trouver une solution à la question, l'enseignant les met sur la piste. Premièrement, il rappelle aux enfants que la silhouette d'une personne peut cacher un arbre placé à bonne distance. Deuxièmement, il leur fait remarquer qu'un objet peut être reproduit en miniature, sous forme de maquette. Troisièmement, il propose une expérience : il distribue aux élèves des boules de différentes tailles. Un élève reste immobile et demande aux autres élèves de se déplacer par rapport à lui de manière à ce que toutes les boules

lui apparaissent de la même taille. Chaque élève prend ensuite la place de cet observateur pour confirmer que les distances sont les bonnes. Une fois que tout le monde est d'accord, la distance de chaque boule est mesurée à l'aide d'un décamètre à ruban. Calculez la distance n'est pas facile, mais les élèves se prennent au jeu ; Giovanni crie : "*C'est bon !*" puis, quelques secondes plus tard, un peu déçu : "*c'est plus bon, je me suis trompé !*". Le groupe éclate de rire et tout recommence. Après quelques tâtonnements dans l'utilisation du décamètre, les élèves arrivent à mesurer correctement les distances. Il apparaît alors que plus la distance d'une boule est grande, plus celle-ci semble petite. Cet exercice a servi de préliminaire à la construction d'une maquette d'éclipse.

Après que l'enseignant a exposé aux élèves que les éclipses de Soleil pouvaient être expliquées par le même mécanisme, les élèves se sont spontanément emparés des boules à leur disposition. Sans intervention de l'enseignant, les élèves se sont mis à discuter par petits groupes et à formuler des hypothèses qu'ils pouvaient tester avec les boules. Chaque groupe a ainsi construit un premier modèle d'éclipse puis les groupes ont comparé leurs différents modèles en se critiquant mutuellement. À la fin de cette étape, les élèves ont su proposer un modèle correct d'éclipses avec le Soleil, la Lune et la Terre alignés correctement avec un Soleil plus gros que la Lune mais plus éloigné pratiquement dans les mêmes proportions.
En étant ainsi guidés sans contrainte, les élèves ont compris le mécanisme qui régit le phénomène naturel : lors d'une éclipse totale de Soleil comme avec les sphères, le diamètre apparent de la Lune est égal ou supérieur à celui du Soleil parce que la Lune, bien que plus petite que le Soleil est beaucoup plus proche de la Terre.

À ce niveau de l'école primaire, les élèves ne maîtrisent pas encore les outils mathématiques (proportion en particulier) qui leur permettraient de calculer eux-mêmes l'échelle d'une maquette. L'enseignant a donc proposé ensuite aux élèves de construire un modèle Soleil-Terre-Lune réellement à l'échelle en leur donnant la taille du Soleil et de la Lune, la distance Terre-Lune et la distance Terre-Soleil en fonction de l'espace disponible dans le jardin de l'école. La distance Terre-Soleil est représentée par une droite de 99 m (mesurée en pas par les élèves). Le Soleil est disposé à une extrémité avec un diamètre de 93 cm de diamètre. Il est peint par les élèves sur une grande toile blanche.

Fig.2. *Le Soleil de 93 cm de diamètre.*

À l'autre extrémité, une marque indique la Terre. La distance Terre-Lune est représentée par des tubes en carton de 30 cm de long qui permettent une vision monoculaire. Ensuite, chaque enfant a préparé une petite Lune en pâte à modeler de 3 mm de diamètre fixée au centre d'une des extrémités du tube à l'aide d'un cure-dent.

Fig.3*. Comptons une centaine de pas...*

Il est important, pendant que l'on compte les pas, de leur rappeler qu'il s'agit d'un modèle et que les distances sont en réalité gigantesques.
Enfin, les élèves mettent l'œil à l'extrémité du tube placé au dessus de la marque de la Terre. Ils s'émerveillent de voir le Soleil d'un mètre de diamètre éclipsé par la petite boule de 3 mm !

Fig.4*. En visant le Soleil*

De retour en classe, l'enseignant a fait une courte conférence, avec l'explication et dessin au tableau d'une éclipse totale de Soleil. Plusieurs vidéos décrivant le phénomène ont également été visionnées. Le cours s'est terminé par une discussion ouverte et la distribution d'une feuille d'exercice dans laquelle était simplement posée la question : "Que peux-tu dire de la Lune et des éclipses ?" à laquelle chaque élève devait répondre de manière libre avec ses phrases et/ou un dessin.

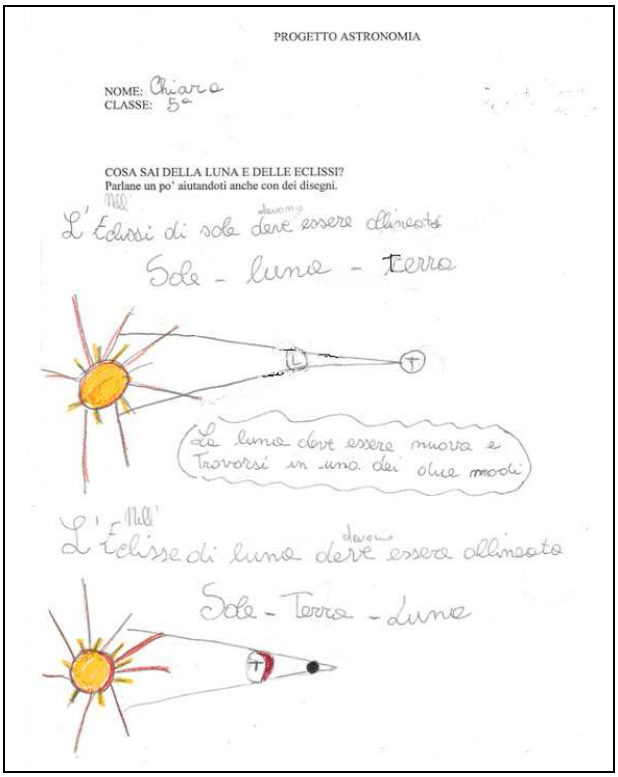


Fig.5. *Dessin de Chiara.*

La grande majorité des élèves s'est montrée intéressée et a obtenu des résultats positifs démontrant leur capacité d'observation et d'abstraction. Ils ont tous su expliquer correctement le phénomène d'éclipse montrant ainsi l'efficacité de la démarche didactique qui leur avait été proposée : tous les élèves sauf un ont su ré expliquer que les éclipses de Soleil ont lieu lorsque le Soleil, la Lune et la Terre sont alignés, que la Lune est alors nouvelle qu'elle passe par l'un de ses nœuds.
70 % d'entre eux ont, en outre, représenté le Soleil et la Lune avec le même diamètre apparent, le reste des élèves proposant une Lune trop petite ou trop grande (figure 5).

Conclusion

[...] L'astronomie est une science qui se prête à une variété d'activités stimulantes, sur le plan culturel, méthodologique, et émotionnel. Encore faut-il qu'elle soit enseignée avec une méthode d'apprentissage basée sur l'observation, la construction de modèles et leur confrontation. L'émotion apportée aux élèves par le fait qu'ils réalisent eux-mêmes leurs propres expériences d'après leurs propres hypothèses, leur permet d'intégrer les concepts d'une manière beaucoup plus profonde et durable. De plus, contrairement à ce que l'on pourrait imaginer, le fait d'avoir commencé la séquence pédagogique sur les éclipses en dehors de la salle de classe, a permis aux élèves d'être plus concentrés. Ils avaient d'une part plus d'espace pour expérimenter et n'étaient pas distraits par leur environnement habituel. Ils étaient donc dans les meilleures conditions pour focaliser leur attention et leur curiosité sur les problèmes qui leur étaient posés et, de fait, ils se sont montrés passionnés dans leur recherche d'explication et de modélisation. Il est douteux que les élèves auraient assimilé aussi facilement le concept d'éclipse avec une pédagogie frontale qui l'aurait présenté de manière trop virtuelle et abstraite.
L'expérimentation et la conception de maquette représentent un environnement d'apprentissage dans lequel l'élève peut penser et découvrir par lui-même, et se trouve donc stimulé pour apprendre car comme le dit Emma Castelnuovo dans son livre L'Officina matematica, « [il ne faut] jamais séparer le cerveau des mains. »
La plupart des enfants sont capables de raisonner et d'apprendre à raisonner très jeunes à condition de les mettre dans une situation favorable, mais il faut aussi leur donner des outils rhétoriques. Pour leur faire aimer le débat et la discussion, il faut leur en faire respecter les règles et les leur enseigner (Orús Báguena, 1992). Après tout, l'apprentissage est une situation didactique et, comme dit Guy Brousseau, « c'est un jeu à deux personnes ».

RÉFÉRENCES

Emma Castelnuovo, L'Officina matematica, La Meridiana editore, 2008;
Margherita Hack , Vi racconto l'astronomia, editore Laterza, 2005;
Pilar Orús Báguena, Le raisonnement des élèves dans la relation didactique, effets d'une initiation à l'analyse classificatoire dans la scolarité obligatoire Thèse 1992 (LADIST)
Guy Brousseau, Recherches en éducation Mathématique, 2005, Dossier : Didactique des mathématiques, APMEP n° 457

■

ARTICLE DE FOND

La structure de notre Galaxie

Delphine Russeil,
Maître de conférence Université de Provence, Laboratoire d'Astrophysique de Marseille.

Comment connaît-on la structure de notre Galaxie alors que nous sommes situés à l'intérieur ? Delphine Russeil, qui travaille sur le milieu interstellaire à Marseille, détaille ici une partie des méthodes utilisées.

Introduction

S'il n'y a plus de doute sur le fait que notre Galaxie, la Voie lactée, est une galaxie spirale, la structure de ses bras (nombre, ouverture, longueur...) est encore un sujet de débat important. Si les observations semblent montrer que notre Galaxie possède 4 bras, cela la rend particulière, mais pas unique, dans le sens que la majorité des galaxies spirales de l'univers local sont des galaxies avec 2 bras.
Pour mieux comprendre cette problématique nous présentons ici la méthodologie utilisée pour établir la structure spirale de notre Galaxie.

Caractéristiques des galaxies spirales

L'observation des galaxies spirales en général nous montre qu'elles peuvent être caractérisées par 4 principaux aspects.

- Une structure aplatie : les galaxies spirales sont des systèmes dits à disque. C'est à dire que les constituants (étoiles, gaz, poussières) de la galaxie (hors des parties centrales où se trouve le bulbe) se distribuent de manière privilégiée dans un disque dont l'épaisseur est très inférieure à son diamètre (figure 1).

- Une composition riche en gaz : contrairement aux galaxies elliptiques les galaxies spirales sont riches en gaz, poussières et étoiles jeunes.

- Des bras spiraux : les galaxies spirales présentent des zones de sur-densité du gaz où se forment en grande partie des étoiles de toutes masses (dont des étoiles massives et chaudes). Ces sur-densités tracent les bras spiraux.

- Un système en rotation : les galaxies spirales sont en rotation. Tous les objets du disque sont en rotation autour du centre de la galaxie. Cette rotation suit une loi de vitesse (courbe vitesse en fonction de la distance au centre nommée courbe de rotation) de forme bien particulière correspondant à une rotation dite différentielle.

Fig.1. *Image de la galaxie du Sombrero (VLT, ESO). Cette galaxie vue par la tranche permet de bien comparer l'épaisseur du disque par rapport à l'extension de la galaxie et au bulbe central.*

Notre Galaxie est une galaxie spirale

Il est très facile de se rendre compte que notre Galaxie est une galaxie spirale. L'observation seule de la Voie lactée permet déjà de voir que celle-ci répond aux deux premiers critères caractérisant les galaxies spirales.

La Voie lactée est une bande lumineuse qui se détache sur le ciel. C'est en fait le disque de notre Galaxie vu depuis l'intérieur. Son épaisseur réduite par rapport à l'ensemble du ciel souligne bien "l'aspect disque" de notre Galaxie.
L'observation visuelle de la Voie lactée montre aussi qu'elle est parsemée de zones sombres plus ou moins étendues. Ces zones correspondent à de

la poussière (qui absorbe la lumière des étoiles qui sont situées derrière). De plus on y observe des nébuleuses brillantes comme la nébuleuse d'Orion qui sont constituées de gaz ionisé par des étoiles jeunes et massives (étoiles O, B). Cela montre que notre Galaxie contient énormément de gaz et de poussières. En plus des étoiles excitatrices des nébuleuses brillantes (dites régions HII), on y observe aussi de nombreux amas ouverts. Ces étoiles sont des étoiles jeunes.
La composition de notre Galaxie est donc caractéristique des galaxies spirales.

De même la courbe de rotation de notre Galaxie a la forme typique des courbes de rotation des galaxies spirales. Il n'y a donc plus aucun doute sur le fait que celle-ci soit une spirale. Le challenge réside maintenant dans la détermination de la structure des bras. Du fait de notre position à l'intérieur de la Voie lactée, il est très difficile de reconstruire la structure spirale car toutes les informations le long de la ligne de visée sont superposées. Par exemple, 2 objets vus proches dans une même direction ne sont, la plupart du temps, pas à la même distance. Tracer la structure des bras de notre Galaxie revient à essayer de tracer le plan d'une ville depuis une position fixe à l'intérieur.

Tracer les bras spiraux de notre Galaxie

Pour déterminer la structure des bras de notre Galaxie, il est nécessaire de reconstruire leur tracé point par point à la façon d'un géographe de l'ancien temps qui dessinait les contours des côtes pour déterminer la morphologie des continents.

Choix du bon traceur

L'étude des galaxies nous montre que les bras spiraux sont le lieu de formation des étoiles (étoiles de toutes masses). Parmi toutes les étoiles formées se trouvent quelques étoiles massives (étoiles O et B). Ces étoiles sont très lumineuses et leur fort rayonnement UV ionise le gaz environnant formant des régions HII. Ce sont ces étoiles et leurs régions HII associées qui rendent les bras très brillants relativement au reste du disque. Il apparaît ainsi que les meilleurs traceurs des bras sont donc les objets jeunes : étoiles OB, régions HII (et nuages moléculaires associés), amas ouverts.
À l'inverse, les nébuleuses planétaires et les amas globulaires (étant des objets âgés) ne sont pas de bons traceurs et ne peuvent donc pas être utilisés pour l'étude des bras spiraux de notre Galaxie.

Méthode pour tracer les bras

La méthode pour reconstruire le tracé des bras est simple :
- on répertorie l'ensemble des objets jeunes
- on calcule leur distance héliocentrique
- on les porte sur un graphique pour visualiser le résultat.

On voit donc que tout repose sur la détermination des distances de ces objets. Il existe deux grandes méthodes pour calculer la distance des objets qui permettent de déterminer soit la distance dite stellaire soit la distance dite cinématique. Notons qu'il existe une troisième méthode pour déterminer la distance d'objet en astronomie : la mesure de la parallaxe (telles les parallaxes mesurées par le satellite Hipparcos). Ces distances parallactiques ne sont, jusqu'à présent déterminables que pour des objets très proches (moins de 1 kpc). Or nous voulons déterminer des distances à l'échelle de la Galaxie pour lesquelles les distances parallactiques ne sont donc pas déterminables.

La distance stellaire

La distance stellaire nécessite l'observation du spectre de l'étoile et de ses magnitudes dans 3 filtres différents (U, B, V). Le spectre permet de déterminer le type spectral de l'étoile (O5V par exemple) qui à partir de données de référence permet d'avoir sa magnitude absolue (M_V). Les magnitudes apparentes mesurées permettent de déterminer le coefficient d'extinction (extinction du milieu interstellaire présent sur la ligne de visée de l'étoile) Av.
La distance d est alors déterminée par la relation:
$m_V - M_V = -5 + 5 \log d + Av$
Le problème de la distance stellaire est qu'il faut pouvoir identifier et mesurer les étoiles ; or l'extinction interstellaire limite à 6 kpc en moyenne la portée de la détermination de la distance stellaire.

La distance cinématique

Quand on ne peut pas déterminer la distance stellaire, la seule alternative est de déterminer la distance cinématique, c'est à dire la distance déterminée à partir de la mesure de la vitesse radiale systémique de l'objet (vitesse générale dans le système de référence corrigé des mouvements internes). Cette méthode de calcul de la distance nécessite de connaître la courbe de rotation de notre Galaxie (figure 2) et de faire l'hypothèse que les objets sont en rotation

circulaire uniforme autour du centre de la Galaxie.

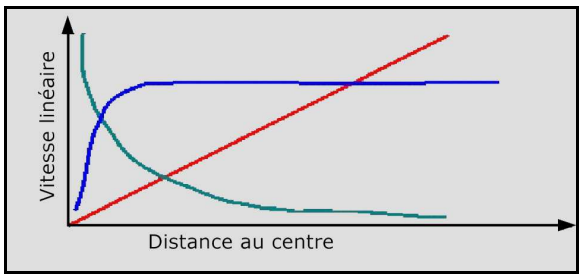


Fig.2 a. *La courbe de rotation d'un corps décrit la variation de vitesse linéaire (ou angulaire) des points (ou constituants) de ce corps en fonction de la distance au centre (ou l'axe) de la rotation. Sur cette figure on montre la courbe de rotation de différents "corps".*
En rouge est représentée la courbe de rotation d'un corps solide (type DVD en rotation dans le lecteur). La courbe est une droite traduisant une croissance de la vitesse des points avec la distance au centre.
En bleu vert est représentée la courbe de rotation du système solaire. On voit une décroissance de la vitesse des planètes quand on s'éloigne du Soleil (centre de rotation du système). Ce type de courbe de rotation est dite "décroissance keplérienne" (car elle provient directement de la 3^{e} loi de Kepler).
Enfin, on trouve la courbe de rotation en bleu foncé des galaxies spirales. Elle se caractérise par une croissance rapide près du centre de la galaxie (de type corps solide) et un long plateau. Ce type de courbe est dite "courbe de rotation différentielle".

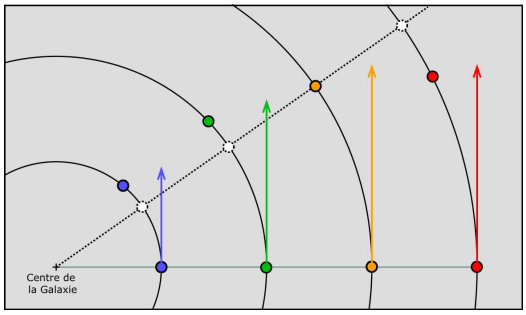


Fig.2 b. *Cette figure illustre la rotation différentielle. Les objets supposés initialement alignés, sont après un temps donné décalés, alors que si la rotation était solide ils seraient alignés (ronds blancs).*

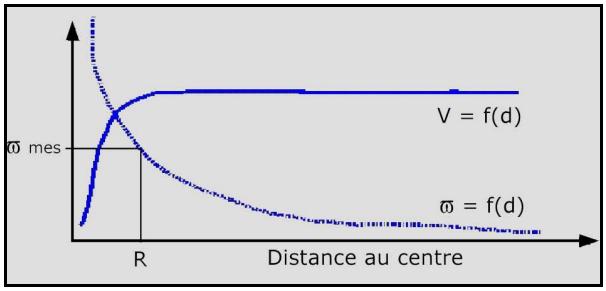


Fig.2 c*. Cette figure montre la forme typique de la courbe de rotation des galaxies spirales, soit exprimée en vitesse linéaire, soit exprimée en vitesse angulaire (noter la différence d'aspect de la courbe) en fonction de la distance au centre de la Galaxie. La formule (a) permet de calculer la vitesse angulaire* ω *à partir de la vitesse radiale mesurée Vmes. Puis, avec la courbe de rotation, on détermine la distance galactocentrique R_1 qui lui correspond.*

À partir de la vitesse radiale mesurée V_{mes} par effet Doppler, on calcule la vitesse angulaire **ω** par la relation (établie dans l'encadré en fin d'article) :

$$\omega = \omega_0 + V_{mes} / R_0 \sin l \qquad (a)$$

où R_0 et ω_0 sont la distance du Soleil au centre galactique et la vitesse angulaire du Soleil (grandeurs connues) et où l est la longitude galactique (voir figure 3).

Par la courbe de rotation on détermine la distance galactocentrique R_1 puis la distance héliocentrique d en résolvant l'équation suivante (elle aussi démontrée en fin d'article) :

$$d^2 - 2 R_0 d \cos l + (R_0^{\,2} - R_1^{\,2}) = 0 \qquad (b)$$

qui donne deux solutions possibles pour les objets situés à l'intérieur de l'orbite solaire, les points O_1 et O_2 de la figure 3. Pour les objets extérieurs, on n'obtient qu'une solution car l'autre est négative. Cette ambiguïté de la distance héliocentrique doit ensuite être résolue par des considérations astrophysiques additionnelles. On utilise en général pour cela les raies en absorption dues au milieu interstellaire présent sur la ligne de visée : si un objet est loin, ces raies en absorption correspondent à des vitesses plus grandes (en valeur absolue) que si l'objet est proche.

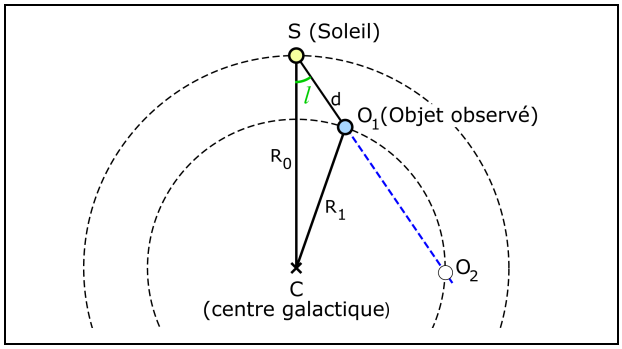


Fig.3*. Rotation autour du centre galactique*

Résultats

Certains travaux sur l'étude des bras de notre Galaxie sont basés uniquement sur les distances stellaires, d'autres uniquement sur les distances cinématiques et enfin d'autres sur un mélange des distances stellaires et cinématiques. Les distances stellaires ont permis de mettre en évidence la structure "locale" de notre Galaxie (de l'ordre de 5 kpc autour du Soleil). On voit apparaître (figure 4a) les deux bras les plus proches : bras du Sagittaire-Carène et de Persée et un éperon local désigné comme le bras d'Orion (attention le nom est confus car ce n'est pas un bras de la structure à grande échelle mais seulement une petite

"excroissance" d'un bras dit éperon). Le Soleil se trouve sur le bord de l'éperon d'Orion : il est donc situé entre deux bras.

Avec les distances cinématiques, on sonde la structure beaucoup plus loin et on peut ainsi suivre et tracer les bras à grande échelle.

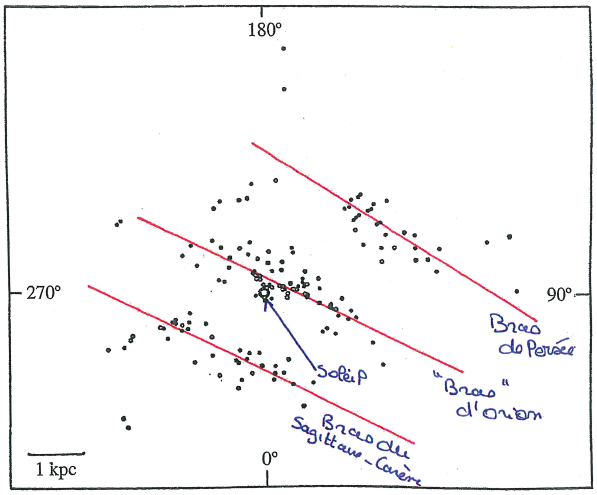


***Fig.4a**. Distribution spatiale des régions HII et amas jeunes positionnés grâce à leur distance stellaire (figure adaptée de Beker et Fenkart, "The Spiral Structure of Our Galaxy," Beker and Contopoulous, eds, D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, 1970).*

On converge actuellement, comme l'illustre la figure 4b vers une structure avec 4 bras spiraux.

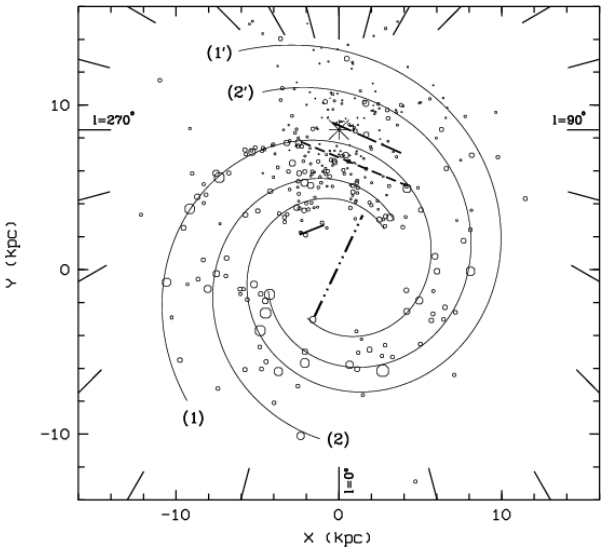


***Fig.4b.** Structure spirale de notre Galaxie (Russeil, 2003, A&A 397, p 133) tracée à partir de la distribution des complexes de formation stellaire et l'utilisation mixte des distances stellaires et cinématiques. Les bras sont : (1) bras du Sagittaire-Carène, (2) bras Ecu-Croix, (1') bras Norma-Cygne et (2') bras de Persée. Le Soleil est représenté par la grosse croix à la position x = 0, y = 8.5. On voit que l'éperon d'Orion (trait le plus proche du Soleil) est une structure locale. Le trait au centre représente la barre centrale avec son orientation.*

De notre Galaxie, on ne peut avoir que des représentations ou des vues d'artiste ; pour avoir une meilleure idée de son aspect, on peut regarder la galaxie NGC 1232 (figure 5) qui est considérée comme la sœur jumelle de notre Voie lactée.

***Fig.5**. NGC 1232, la galaxie jumelle de la nôtre (image VLT, ESO)*

Les autres structures remarquables de notre Galaxie

La détermination de la distance des objets jeunes montre que, en plus de la structure spirale, notre Galaxie est gauchie : le disque est tordu vers le haut dans la partie nord en particulier entre 50° et 180° de longitude et vers le bas dans la partie sud entre 280° et 340°. Le gauchissement des galaxies est relativement commun. Pour notre Galaxie, l'axe du gauchissement est aligné avec la direction des Nuages de Magellan qui sont les deux galaxies les plus proches de la nôtre. On pense donc que ce sont les effets de marée gravitationnelle dus aux Nuages de Magellan qui impliquent ce gauchissement.

Un autre aspect de notre Galaxie, provenant d'observation infrarouge de ses parties centrales est qu'elle présente une barre centrale. Notre Galaxie est donc une galaxie spirale barrée.

Conclusions

Nous pouvons maintenant établir la carte d'identité de notre Galaxie :

- galaxie spirale barrée à 4 bras de type SBbc
- courbe de rotation avec plateau à 220 km/s
- diamètre optique de l'ordre de 30 kpc
- gauchissement dû probablement aux Nuages de Magellan.

Établissement des formules

Pour retrouver les formules (a) et (b) on suppose les orbites circulaires parcourues à vitesse constante. Les grandeurs qui sont supposées connues ou mesurées sont la distance galactique R_0 du Soleil, la vitesse du Soleil V_0, les coordonnées galactiques (l,b) de l'objet observé (noté O_1) et sa vitesse radiale mesurée par effet Doppler V_{mes}.

La figure 6 présente un zoom sur la figure 3 avec tous les angles utiles reportés. On suppose que l'objet est dans le plan de la Galaxie et donc que la latitude galactique b est nulle.

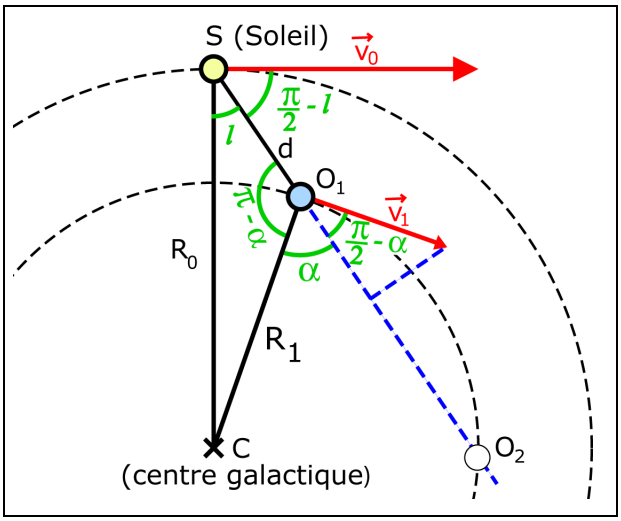


Fig. 6. *Représentation des orbites circulaires. L'objet étudié est noté O_1.*

La loi de composition des vitesses s'écrit pour les vitesses radiales:

$$Vmes = V_{rad}\,(objet) - V_{rad}\,(Soleil)$$

On développe cette relation (voir fig.6) :

$V_{mes} = V_1 \cos(\pi/2 - \alpha) - V_0 \cos(\pi/2 - l)$

$= V_1 \sin\alpha - V_0 \sin l$

où V est la vitesse linéaire de rotation de l'objet.

Or, la relation des sinus dans le triangle CSO_1 nous donne :

$R_0 / \sin(\pi - \alpha) = R_1 / \sin l$ ou $R_0 / \sin\alpha = R_1 / \sin l$

qui se développe en $\sin\alpha = R_0 \sin l / R_1$ et que l'on injecte dans la relation ci-dessus.

On obtient :

$V_{mes} = V_1 \times R_0 \sin l / R_1 - V_0 \sin l$

$V_{mes} = \sin l \times (V_1 R_0 / R_1 - V_0)$

Avec $\omega_1 = V_1 / R_1$ et $\omega_0 = V_0 / R_0$ (vitesses angulaires de O_1 et du Soleil), on obtient :

$V_{mes} = \sin l \times (R_0 \times \omega_1 - R_0 \times \omega_0)$

$= R_0 \times \sin l \times (\omega - \omega_0)$

d'où $\omega 1 = \omega 0 + V_{mes} / (R_0 \sin l)$ (a)

Pour établir la relation (b), on se place dans le triangle CSO_1. On se rappellera la relation vectorielle suivante :

$$\overrightarrow{CO_1} = \overrightarrow{SO_1} - \overrightarrow{SC}$$

d'où $CO_1^2 = SO_1^2 + SC^2 - 2 \times SO_1 \times SC \times \cos l$

ce qui devient $R_1^2 = d^2 + R_0^2 - 2 \times d \times R_0 \times \cos l$

Cette équation se met sous la forme d'une équation du second degré en d :

$$\boxed{d^2 - 2\,R_0 \cos l \times d + (R_0^2 - R_1^2) = 0} \quad (b)$$

Cette équation a deux solutions (calcul du discriminant). Les deux solutions correspondent aux points O_1 et O_2 de la figure 6. Pour des objets situés au-delà de l'orbite solaire, on n'a qu'une solution car la deuxième est négative.

■

Réponses aux questions de la page 22

Des photos de la Terre et de la Lune.

1.a. On ne voit pas si le nord est en haut ou en bas et on ne sait pas non plus si la Lune est en premier plan ou en arrière plan. Si elle est en arrière plan, on observera depuis la Terre un croissant (premier ou dernier suivant que le nord est en haut ou en bas). Si la Lune est en premier plan, on verra depuis la Terre une Lune gibbeuse (croissante ou décroissante). Les éphémérides indiquent que le 18 septembre 1977, on voyait un premier croissant.

1.b. En retournant la photo, on met le nord en haut. L'indication de mouvement indique que la Lune est en arrière plan. Depuis la Terre, on voit donc un dernier quartier.

1.c. Là encore, suivant que la Lune est en avant ou en arrière plan, on verra une Lune gibbeuse ou un croissant.

2. La distance de la sonde à la Lune est supérieure à la distance Terre Lune. Ce type de phénomène peut s'appeler éclipse annulaire de Soleil ou passage de la Lune devant le Soleil.

En maths.

Horaires de l'éclipse :

OV = 6 400 km ; XV = 6 079 km ; à 3 500 km/h : 1 h 44 ; OW = 2 900 km ; XW = 2 100 km ; à 3 500 km/h : 36 min.

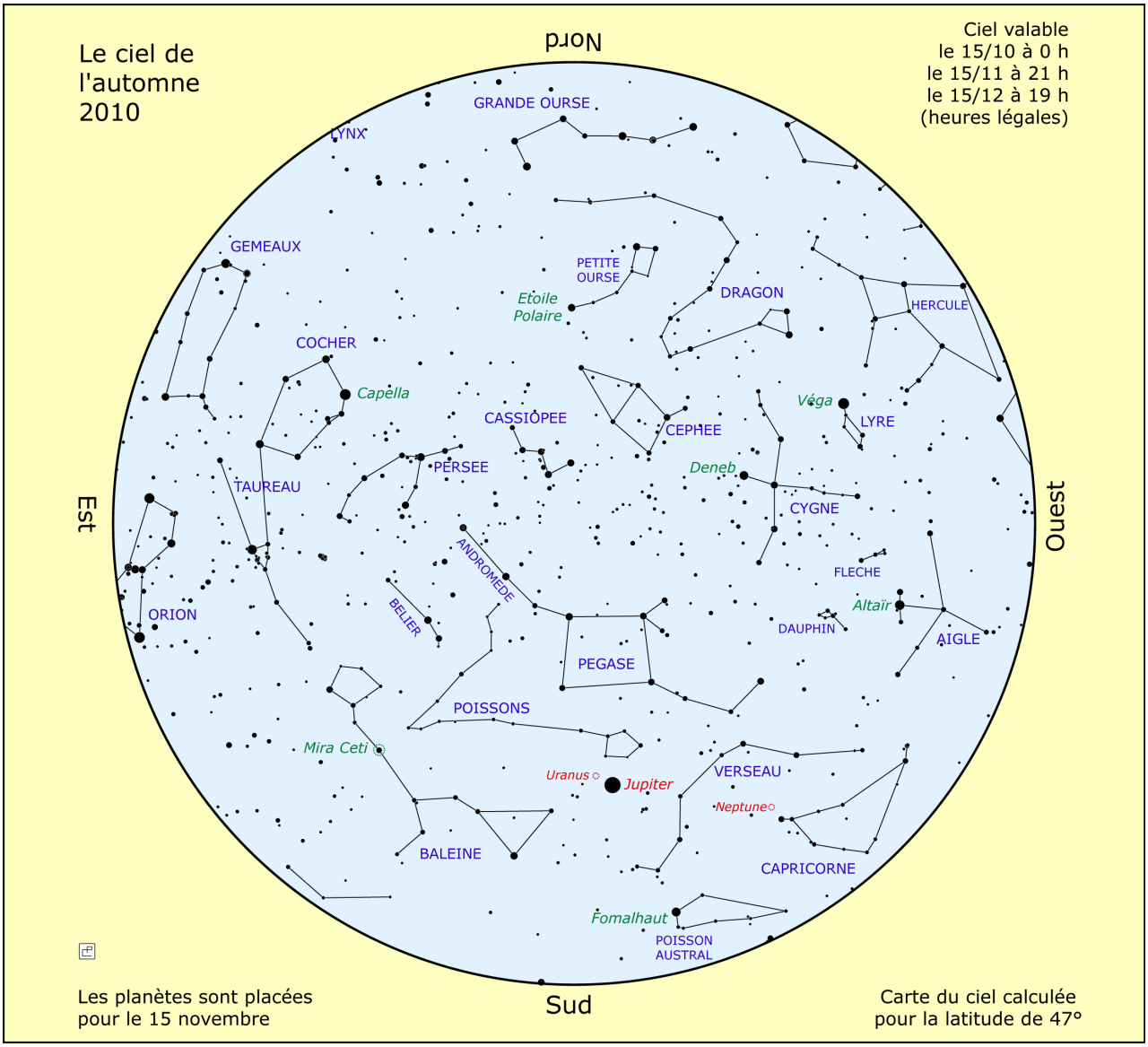
Passage en V : 9h18 - 1h44 = 7h34 ; W : 9h18 - 0h36 = 8h42 ; Y : 9h18 + 0h36 = 9h54 ; Z : 9h18 + 1h44 = 11h02.

Conditions : OL = 375 000 km.

L'éclipse du 4 janvier : Non car on calcule que la droite (SL) passe à 6 824 km au-dessus du centre de la Terre (de rayon 6 370 km).

Le ciel de l'automne 2010

Document à photocopier



Visibilité des planètes

Mercure est observable le matin fin septembre ou le soir début décembre.
Vénus est visible le soir au début de l'automne mais basse sur l'horizon Ouest. Elle passe devant le Soleil le 29/10 et deviendra ensuite planète du matin, très lumineuse pendant tout le mois de décembre à l'Est.
Mars est inobservable.
On pourra voir la planète Jupiter tous les soirs de l'automne, à la limite des Poissons et du Verseau, très lumineuse dans une région du ciel pauvre en étoiles brillantes. À observer aux jumelles ou au télescope ! (voir le n° 130 des Cahiers Clairaut).
Saturne sera visible le matin dans la constellation de la Vierge en novembre et décembre.
Uranus et Neptune peuvent être recherchées tout l'automne mais avec un instrument.

Quelques événements (en heure légale)

23/09 5 h 09 : Équinoxe d'automne.
8/10 : Essaim des Draconides (étoiles filantes)
Fin octobre : Maximum de Mira Ceti, visible à l'œil nu.
En octobre, la comète 103P Hartley 2 passera à proximité de la Terre et devrait être repérable à l'œil nu entre Cassiopée et les Gémeaux.
31/10 : Passage à l'heure d'hiver.
17/11 : Léonides (étoiles filantes), à observer le matin.
7/12 : Rapprochement Mercure Lune.
14/12 : Géminides (étoiles filantes) à observer le matin.
21/12 : Éclipse totale de Lune (détails dans ce numéro).
22/12 : Solstice d'hiver à 0 h 38.

Lune

Pleine Lune : 23/09, 23/10, 21/11, 21/12.
Nouvelle Lune : 7/10, 6/11, 5/12. ■

LECTURES POUR LA MARQUISE

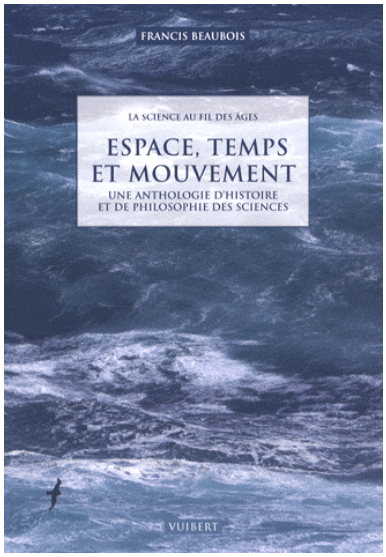
Christian Larcher

Espace, temps et mouvement

La science au fil des âges

Une anthologie d'histoire et de philosophie des sciences

Francis Beaubois ; Vuibert 2008.



Ce livre propose une réflexion sur l'épistémologie des sciences en s'appuyant sur de nombreux extraits de textes scientifiques soigneusement sélectionnés. Dans l'avant-propos l'auteur indique qu'au lieu "d'écrire une histoire chronologique des sciences" (se limitant à la physique chimie) il a délibérément "préféré travailler sur le programme de seconde fixé par l'Éducation Nationale". L'ensemble est de qualité.

L'ouvrage commence par une introduction à caractère philosophique destinée à définir ce que l'on entend par science.

La "déraisonnable efficacité des mathématiques" (E.Wigner)

Les mathématiques sont bien plus qu'un langage ou un simple instrument, elles sont comme une sorte d'extension de notre cerveau. Elles sont efficaces car elles formalisent ce que nous percevons de la nature. La machinerie mathématique "fonctionne miraculeusement bien" au point que Dirac dira : *"Mes équations sont plus intelligentes que moi"*.

Mais l'auteur, formateur en IUFM, met en garde les enseignants en faisant remarquer que *"L'essentiel du travail en classe est souvent occulté par l'arsenal mathématique et ce qui devrait être interrogation sur notre monde réel se transforme en une valse d'équations"*.

Une science achevée ?

La science est questionnement et recherche d'une vérité en continuelle évolution. Périodiquement quelques scientifiques supposent que la science est pratiquement achevée. C'est ainsi qu'à la fin du XIX^{e} siècle le grand Lord Kelvin affirmait : *"La physique a donné une description harmonieuse du monde, elle est pour l'essentiel achevée"*. Il indiquait cependant qu'il restait deux petits nuages noirs :

- Le résultat négatif de l'expérience de Michelson.
- La "catastrophe ultra violette" autrement dit l'interprétation théorique de la théorie du "rayonnement du corps noir".

Le premier nuage donna naissance à la théorie de la Relativité, le second à la physique quantique…

L'auteur met en garde les enseignants contre une image fausse de la science et des scientifiques qui tendrait vers un monopôle des connaissances "vraies". Il les incite également à ce prémunir *"d'un modèle global de développement linéaire des sciences"*.

Le premier chapitre traite des échelles de longueur dans l'Univers. En partant d'exemples simples : *"Calculer la longueur du trait que l'on peut faire avec un stylo plume et une cartouche d'encre*".

Que se passe-t-il quand on change d'échelle ? Par exemple si l'on multiplie par deux toutes les dimensions d'un animal. Il y a un texte célèbre de Galilée qui traite cette question dans les *"discours concernant les deux sciences nouvelles"*.

À notre époque on peut comparer les sauts d'une puce et de Superman (lois d'échelle).

Les chapitres deux et trois concernent respectivement l'arpentage de la Terre et celui de l'Univers. L'auteur rappelle que l'étymologie du mot géométrie signifie mesure de la Terre. Il est donc question non seulement de la forme et de la dimension de la Terre mais aussi de l'importante notion de modèle dans l'interprétation d'observations. Ainsi à partir des mesures faites à Syène et Alexandrie, Ératosthène convaincu de la rotondité de la Terre détermine le rayon de celle-ci. Avec les mêmes observations et mesures, en partant du

modèle d'une Terre plate, Anaxagore aurait déterminé la distance Terre-Soleil (6400 km !!!)
Plus tard avec les scientifiques du XVIIIe siècle et en pleine période révolutionnaire, on découvre l'épopée historique de la mesure du méridien terrestre et de la définition du mètre.
Ensuite on peut arpenter l'Univers et mesurer les distances de la Terre aux autres astres (Lune, Soleil, planètes, étoiles…)

Avec le chapitre quatre on découvre les paradoxes liés au temps :
"La physique d'aujourd'hui demeure écartelée entre deux piliers de la pensée grecque : d'un côté, Parménide, le philosophe de l'immobilité fondamentale ; de l'autre Héraclite le philosophe du devenir et de la mouvance" celui qui disait *"on ne se baigne jamais deux fois dans le même fleuve".*
"*Comment le concept d'histoire, qui suppose que le monde se modifie au cours du temps, est-il lié à celui de loi, qui évoque au contraire l'immuabilité ? Le monde doit-il être vu plutôt comme un système ou plutôt comme une histoire ?"*

Muni des concepts d'espace et de temps on peut aborder la deuxième partie consacrée à "la science du mouvement".
On retrouve les paradoxes de Zénon d'Élée, mais aussi la difficulté d'imaginer une Terre en mouvement. Ce qui nécessite de bien définir le référentiel.
Le chapitre 6 cherche à comprendre ce qui fait *"mouvoir la Lune et tomber les pommes".*
La chute des corps dépend-t-elle de leur poids ? On s'intéresse à la limite de validité de la loi de Newton et aux prémisses de la relativité d'Einstein.
Une citation de JA Wheeler : "*L'espace-temps dit à la matière comment elle doit bouger et la matière dit à l'espace- temps comment il doit se courber*".

Conclusion

En montrant comment les idées scientifiques fondamentales ont émergé on prépare le terrain à la formation de futurs scientifiques mais on donne également à tous une culture qui contribue à former de futurs citoyens lucides.
Cet ouvrage est riche d'informations mais il mériterait un complément sur la manière de prendre en compte ces documents historiques dans un cadre scolaire.

Remue-méninges **Pierre Causeret**

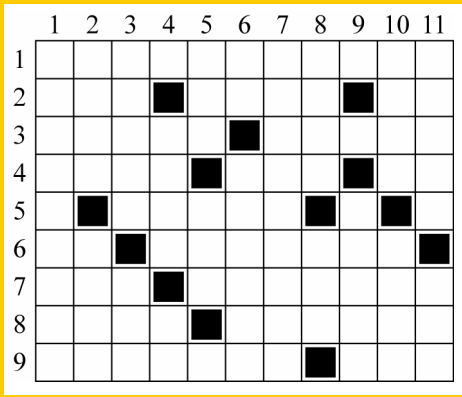
Phase ou éclipse ?

Phase de la Lune, éclipse de Lune, éclipse de Soleil, à vous de choisir entre ces trois légendes.

École d'Été d'Astronomie du CLEA

L'école d'été du CLEA s'est tenue cet été du 17 au 24 août au Col Bayard, à proximité de Gap avec une quarantaine de personnes. Au programme, comme chaque année, des cours le matin, des ateliers l'après midi et des observations le soir (avec principalement la Lune, Jupiter et des spectres d'étoiles), toujours dans une excellente ambiance. Si vous l'avez ratée cette année, réservez votre semaine du 19 au 26 août l'année prochaine !

Mots croisés spécial éclipses



Horizontalement

1. Éclipse de Soleil.
2. Livre de vie. Sorte d'hosto. Axe perpendiculaire au méridien.
3. Retour d'éclipse. Lieu d'éclipse.
4. Celui de la Lune atteint la Terre si l'éclipse de Soleil est totale. Peut être éclipsé à Londres. Sous sol.
5. Massif qui fut frôlé par la bande de totalité le 11 août 1999.
6. Petit cours. Comme une éclipse du 21 décembre.
7. Naturel mais en désordre. 173 jours pour celles des éclipses.
8. Verra l'éclipse annulaire de 2059. Astéroïde sur un point de Lagrange.
9. Sujet de ces mots croisés. Forme du limbe de la Lune devant le Soleil pendant l'éclipse.

Verticalement

1. Pendant une éclipse totale de Soleil.
2. Pour quitter Rome. À l'ombre.
3. Bout de croissant de Lune. Spécialiste du marteau.
4. À protéger pendant une éclipse. Au cœur de la Terre.
5. Planétarium numérique d'origine bressane. D'être.
6. Possessif. Assemblées.
7. Telle une éclipse de Soleil à l'apogée.
8. A touché Io. Norme.
9. Pila.
10. Une légende dit qu'il peut tenir debout pendant une éclipse. Eduig
11. Tel un point de l'orbite lunaire. Météorites martiennes.

Solutions p. 40

Nouveaux programmes de seconde, thème "l'Univers"

Vous cherchez des documents, des activités, des TP...

Venez sur le site : site www.clea-astro.eu

Ce lien renvoie directement à une page reprenant l'énoncé du programme et proposant, pour chaque partie, des liens vers les documents du CLEA (notamment les chapitres correspondants de la base LUNAP).
On peut ainsi accéder rapidement à divers types de documents :

- **en bref** : un rapide aperçu des notions fondamentales
- **approfondissements** : des compléments à l'usage du professeur ou des élèves.
- **activités** : des activités pour la classe, exercices, TP, TD,
- **compléments** : des liens vers les archives du CLEA, mais aussi vers d'autres sites, des fiches techniques pour utiliser les logiciels. "

Mais aussi en ligne :

- des réflexions sur la **méthode d'investigation,**
- des **TP** (comportant une partie historique) sur la vitesse de la lumière, la réfraction, les spectres d'étoiles.

Et bientôt de nouvelles productions :

- des documents (montages vidéo et propositions d'activités) autour de la rétrogradation de Mars à partir des documents recueillis depuis 2005 par Francis Berthomieu et son équipe de photographes,
- un TP avec des expériences sur la pesanteur et des trajectoires,
- des fiches techniques et pédagogiques autour l'utilisation de logiciels de planétarium comme Stellarium, Cartes du Ciel, Atlas virtuel de la Lune.

N'hésitez pas à aller y jeter un oeil critique, et à nous faire part de vos remarques et suggestions.

Solution des mots croisés p. 39

Horizontalement.
1. Occultation (voir page 8).
2. Bio. Sana. EO (Est-Ouest).
3. Saros. Nœud.
4. Cône (d'ombre). Sun. Fa.
5. Eifel (xxx).
6. Ru. Lunaire.
7. Ibo (bio). Saisons.
8. Tarn. Troyen.
9. Éclipse. Arc.

Verticalement
1. Obscurité.
2. Ciao. Ubac.
3. Corne. ORL.
4. Œil. Ni.
5. LSS (Lhoumeau Sky System, un planétarium numérique pour petite coupole inventé par un adhérent du CLEA). Fus.
6. Ta. Sénats.
7. Annulaire.
8. Taon. Iso.
9. Broya.
10. Œuf. Ener (rêne).
11. Nodal. SNC.

Solution du remue-méninges p.

Phase de la Lune : 2 et 5 ; éclipse de Lune : 4 et 6 ; éclipse de Soleil 1 et 3

Écoles d'Été d'Astronomie

Vous souhaitez débuter en astronomie ?

Vous souhaitez vous perfectionner ?

Vous avez le projet d'animer un club ?

Venez participer à une école d'été d'astronomie, au col Bayard, à 1 200 m d'altitude, dans un cadre prestigieux.

Des exposés accessibles à tous

Des ateliers pratiques et des observations

Toutes les activités sont encadrées par des astronomes professionnels et des animateurs chevronnés.

Renseignements sur le site du CLEA

Les productions du CLEA (1)

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 Écoles d'Été d'Astronomie)

Le formulaire de commande est sur le site.

(1) vente aux adhérents uniquement

Planétarium

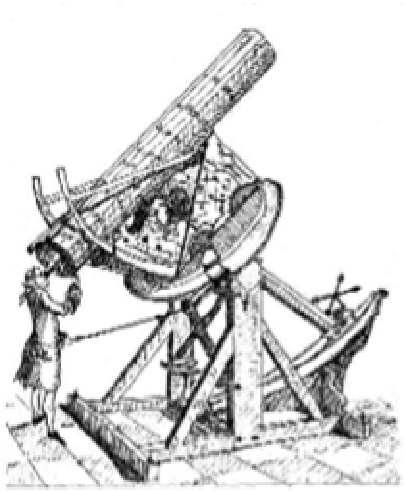
Il est possible également de louer le planétarium gonflable (starlab) du CLEA. (uniquement pour le planétarium contact : jean.a.ripert@wanadoo.fr)

Le site internet

Une information toujours actualisée

www.clea-astro.eu

LES CAHIERS CLAIRAUT



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

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

COMMENT NOUS JOINDRE ?

Informations générales :

www.clea-astro.eu
ou
www.ac-nice.fr/clea

Siège Social :
CLEA,
Observatoire de Lyon
69561 ST-Genis Laval CEDEX

École d'Été d'Astronomie :
cecile.ferrari@cea.fr

Cahiers Clairaut :
larcher2@wanadoo.fr

Vente des productions :
www.clea-astro.eu

Site internet :
berthomi@ac-nice.fr

Adhésion / Abonnement :

Adhésion CLEA pour 2010 : 5 €
Abonnement pour 2010 : 30 €
Tarif réduit, abonnement : 28 €
Abonnement + adhésion : 35 €

Chèque à l'ordre du CLEA, à envoyer à :
Jean Ripert
Impasse de Mouyracs
46090 PRADINES

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

Premier dépôt légal : 1er trimestre 1979
Numéro CPPAP : 0310 G 89368
Prix au numéro : 8 €

Revue trimestrielle : numéro 131, septembre 2010