

LES CAHIERS CLAIRAUT

N° 143 - Septembre 2013 7 €

Bulletin du Comité de Liaison Enseignants et Astronomes



Numéro 143 - automne 2013



ISSN 0758-234X

Comité de Liaison Enseignants et Astronomes

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

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

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

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

Présidents d'honneur :

Jean-Claude Pecker
Lucienne Gouguenheim
Georges Paturel

Bureau du CLEA pour 2011

Présidente : Cécile Ferrari
Trésorière : Roseline Jamet
Trésorière adjointe : Sylvie Thiault
Secrétaire : Jean-Luc Fouquet
Secrétaire adjoint : Christian Larcher

Responsables des groupes

Vie associative : Jean-Michel Vienney

Cahiers Clairaut : Christian Larcher

Productions Pédagogiques : Pierre Causeret

Communication : Charles-Henri Eyraud

École d'Été d'Astronomie : Danièle Imbault

Responsables du site :

Francis Berthomieu et Charles-Henri Eyraud

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

Francis Berthomieu, Francine Billard, Michel Bobin, Michel Cauchois, Pierre Causeret, Frédéric Dahringer, Kamil Fadel, Bernard Grauss, Christian Larcher, Chantal Lecoutre, Georges Lecoutre, Philippe Malburet, Roger Meunier, Philippe Merlin, Lionel Muller, Jean-Claude Pecker, Felix Perosanz, Jean Ripert, Bertrand Stortz, Sylvie Thiault.

Les auteurs recevront plusieurs numéros 143, afin de faire connaître la revue autour d'eux.

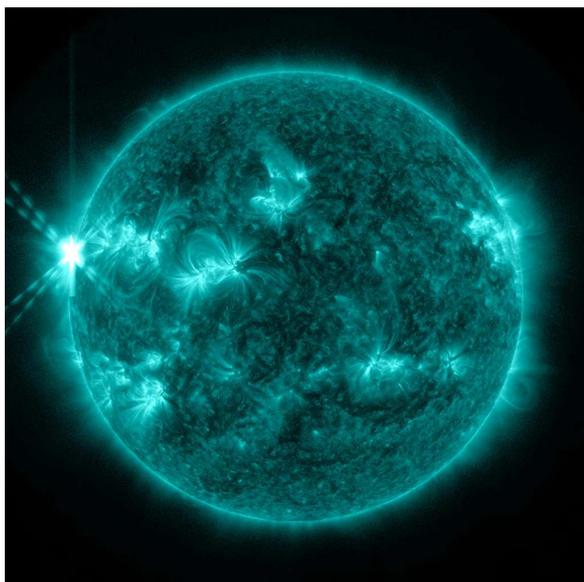


Image de couverture :

En deux jours, du 13 au 15 mai 2013, notre étoile a émis quatre bouffées intenses, Voici l'une d'elles photographiée en ultraviolet extrême par le satellite Solar Dynamics Observatory. Ces éruptions dont aucune n'était dirigée vers la Terre ont produit des éjections de matière à plus de 1 500 km/s. Le Soleil est cette année à son maximum d'activité (Crédit photo Nasa / SDO / AIA).

Les Cahiers Clairaut

Automne 2013 n° 143

Éditorial

En lisant l'article sur la forme de la Terre vous pourrez découvrir et résoudre des paradoxes apparents concernant l'altitude et l'attraction terrestre.

En effet, on dit fréquemment que sur la Terre, les objets « tombent » de haut en bas en se dirigeant vers son centre. C'est aussi du fait de l'attraction gravitationnelle que l'eau d'un fleuve s'écoule **en descendant** de sa source vers la mer. Pourtant aux USA, le Mississippi semble s'écouler « **en montant** » car sa source est située plus près, d'environ 6 km, du centre de la Terre que son embouchure. Autre exemple : on apprend en classe que, sur la Terre, l'Everest est le plus haut des sommets. Pourtant, au Pérou, le sommet du volcan Chimborazo est plus éloigné du centre de la Terre que le sommet de l'Everest.

La partie thématique de ce numéro est consacrée à l'étude du Soleil. Notre étoile est sans cesse mieux connue, contrairement aux prédictions d'Auguste Comte qui prétendait en 1835, dans son cours de philosophie positive (19^e leçon), que concernant les astres comme le Soleil « *nous ne saurions jamais étudier par aucun moyen leur composition chimique ou leur structure minéralogique* ».

Découvrez le long cheminement historique permettant de comprendre l'origine de la fantastique énergie produite par le Soleil. Apprenez à vos élèves à déterminer sans danger sa taille, celle des taches qu'il contient, la hauteur de ses protubérances, sa vitesse de rotation...

Prenez-le en photo pour mieux l'étudier ou utilisez GeoGebra pour le modéliser.

Nous vous proposons enfin un nouvel épisode de la vie d'Alexis Clairaut racontée par Jean-Claude Pecker.

Christian Larcher, pour l'équipe.

La prochaine Assemblée
Générale du CLEA aura lieu
le dimanche 23 mars à Paris.

(La date sera confirmée prochainement sur le site).

Histoire

Clairaut et les dames

Jean-Claude Pecker p 2

Article de fond

L'Everest détrôné ou Pourquoi et comment mesurer la Terre ?

Félix Perosanz p 5

Thème : LE SOLEIL

p 12

Notions de base

Pierre Causeret p 13

Histoire

L'origine de l'énergie du Soleil

Kamil Fadel p 15

Avec nos élèves

Une étude du Soleil au lycée

Bertrand Stortz p 20

Réalisation

La maquette Tournesol

Philippe Merlin p 23

Avec nos élèves

Poursuite de l'exploration du Soleil à l'aide de geogebra

Sylvie Thiault p 27

Observation

Images du Soleil

Roger Meunier p 30

Le coin des petits curieux

Dis-moi, le Soleil qu'est-ce que c'est ?

Bernard Grauss, Francine Billard p 33

Mots croisés

Pierre Causeret p 34

Ciel d'automne

Pierre Causeret p 35

Lecture pour la marquise

Quelle est notre place dans l'Univers ?

Christian Larcher p 36

Variations sur un même ciel

Christian Larcher p 37

Jeux

Navette de l'espace lettres

Michel Bobin p 38

Vie de l'association

EEA 2013

Lionel Muller p 39

Réponses des mots croisés et de la navette p 40

CLAIRAUT ET LES DAMES

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

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

On a dit (voir Cahiers Clairaut, n° 141, page 4) que notre homme, célibataire endurci, était aimé des dames. On en trouve la preuve (au moins partielle) dans ce qu'écrivit Jean-Paul Grandjean de Fouchy (1707-1788), Secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences, dans son éloge posthume de Clairaut, dans les correspondances de Françoise de Graffigny (1695-1788) et d'Émilie du Châtelet (1706-1749), et dans une notice de l'abbé encyclopédiste Charles Bossut (1730-1814).

La marquise Émilie du Châtelet, - la "belle Émilie", l'amie intime de Voltaire, la traductrice savante de Newton, était l'émule de notre Marquise à nous, celle à qui Fontenelle expliquait l'Univers dans ses *Entretiens sur la pluralité des Mondes habités*, cette marquise *imaginaire* que notre fondateur et ami Gilbert Walusinski avait élevée au rang de correspondante fidèle des *Cahiers Clairaut*. Émilie du Châtelet était alors devenue (vers 1734) la maîtresse de Pierre-Louis Moreau de Maupertuis (1698-1759) à qui Voltaire l'avait présentée. Maupertuis était le célèbre (et fantasque) mathématicien et géodésien, le mentor de Clairaut (voir *Cahiers Clairaut*, à venir, "*Clairaut l'Astronome*"), et un brillant séducteur.

En 1736, Maupertuis et Clairaut préparaient ensemble l'expédition de Laponie. La marquise leur rendait visite... Comme Grandjean de Fouchy le rapporte¹: "*M. de Maupertuis et lui allèrent se retirer au Mont-Valérien; ce fut là qu'acheva de se former le projet de voyage du Nord, dans l'exécution duquel M. Clairaut rendit depuis de si grands services. L'éloignement de Paris ne les mit pas cependant à l'abri de toutes visites; la célèbre Mme la Marquise du Châtelet avoit résolu d'apprendre la Géométrie de M. Clairaut, & elle*

alloit souvent² à cheval le trouver au mont Valérien, & ce fut pour cette dame qu'il composa les Eléments de Géométrie qu'il publia depuis en 1741."

Cependant, l'expédition se poursuit.

Le 1 décembre 1736, Émilie du Châtelet, qui a eu vent de l'existence de laponnes³ dans l'entourage de l'expédition, stationnée à Tornéa, écrit à son ami Maupertuis: "*On dit que toutes les lettres que vous écrivez à Paris sont..... et qu'on y fait tout ce qu'on fait à Paris.*" *...pleines des éloges de ces dernières. C'est apparemment pour quelqu'une d'elles que votre compagnon ((Clairaut)) m'a quittée. Vous pouvez me le mander sans indiscretion*".

Le 6 avril 1737, Maupertuis répond indirectement dans une lettre⁴ à Madame de Verteillac: "*((Les lapons)) viennent souvent nous rendre visite; ils entrent sans se faire annoncer; et tout à coup nous voyons sans nous en être aperçus un lapon ou une Lapone dans notre chambre. Si vous n'aviez pas attaqué ma sincérité, ... je vous eusse dit que dans la zone glacée, il y a des personnes fort bien faites et fort aimables; qu'on y chante, qu'on y danse.*"

Et en effet Maupertuis se lie, lui aussi, avec une finnoise, fille d'un marchand de Tornéa, Christine Planström qui fera le voyage à Paris en 1738 pour y retrouver Maupertuis, lequel, "*amoureux d'une sauvage, dansant et chantant, au voisinage du*

¹ *Histoire de l'Académie royale des sciences pour 1765*, tome 35, Schreuder, Amsterdam, 1773.

² Selon Joseph Bertrand, *Revue des Cours Scientifiques*, 3, 57-73, 1865: "*Dans cette demi-solitude, Clairault (sic) ne vivait pas en cénobite; il recevait souvent des visites de Paris et madame du Châtelet, notamment, la célèbre amie de Voltaire, arrivait chaque matin à cheval – sans plus s'inquiéter du voyage que de ce que pourrait penser le monde, - pour prendre une leçon de géométrie.*"... Il n'est pas exclu que J. Bertrand ait un peu brodé !

³ Selon E. Badinter, *Les passions intellectuelles*, I, p 83, Fayard, 2002.

⁴ *ibid.*, I, pp 83-87.

*Cercle polaire, soignait son image de séducteur*⁵... l'image que voulait donner Maupertuis, mais qui était sans doute fortement enjolivée!

Mais qu'en est-il de son ami Clairaut, mis clairement en cause par la belle Émilie?



La marquise du Châtelet

Madame de Graffigny, autre relation de Clairaut, à qui Madame du Châtelet l'avait présentée, écrit dans une lettre à son ami Devaux le 18 décembre 1738 (les géodésiens sont revenus du Nord depuis longtemps): "*Le secrétaire de M. Clairault⁶, l'un des voyageurs aux pôles, a fait l'amour à une Lapone; il lui a promis le mariage, et est parti sans tenir sa parole. La demoiselle vient d'arriver à Paris avec une sœur à elle, pour suivre son amant. Elles sont débarquées chez M. Clairaut, qui les héberge quoique très médiocrement riche. L'épouseur ne veut point épouser, et la demoiselle ne veut point s'en retourner. Enfin M. de Clairaut, qui mande cela à Voltaire, lui marque qu'il lui a déjà fait donner une petite pension et va tâcher de la faire entrer dans quelque couvent pour la consoler. Tout Paris va chez lui pour voir ces Laponnes. Ah, mon Dieu, comment peut-on être lapon⁷ ?*"

Mais s'agit-il bien du secrétaire de Clairaut? On peut en douter! Ou un adjoint de Maupertuis? Et pas de Clairaut et de Maupertuis eux-mêmes? C'est ce que semble penser Émilie, directement impliquée dans ces jeux amoureux, et sans doute plus proche de la vérité que Françoise de Graffigny, qui ne

⁵ *ibid.*, I, p 87.

⁶ Orthographe assez courante de Clairaut. Le "de Clairault" est plus rare. Quant aux "Cleraut", "Clairo", etc.. Utilisés par Mme de Graffigny, il sont plus que fantaisistes, et indiquent peut-être quelque dépit de Françoise de Graffigny, en tout cas un peu de mépris pour le "petit" Clairaut!

⁷ La très littéraire Françoise de Graffigny a lu, de Montesquieu, les *Lettres Persanes*!

rencontra Clairaut pour la première fois qu'en 1739!... En tous cas, les deux compères avaient bien profité de leur séjour à Tornéa, tout en laissant leurs compagnons, Celsius, Lemonnier, Outhier... se concentrer sur les mesures de géodésie!

Madame de Graffigny, de loin l'aînée de ces jeunes gens qu'étaient alors Alexis, Pierre-Louis, et même Émilie, rencontre plusieurs fois l'ami Clairaut. Est-ce l'âge de celle que l'on appelait "la grosse Graffigny"? Un certain dépit? Toujours est-il que la femme de lettres n'aime guère le savant. Le 8 septembre 1739, elle écrit⁸ à son ami François-Antoine Devaux: "*Je fus hier à la bibliothèque du roi avec ((la marquise du Châtelet)) (...). J'y vis ((...)) le petit Clairo, avec qui j'ai fait connaissance sur le bien que j'en entends dire. Tu vas me demander qui c'est. C'est un jeune homme qui est si bon mathématicien qu'il est entré à l'académie à 17 ans: c'est le compagnon de voyage de Maupertuis*"...

Elle rencontre Clairaut plusieurs fois encore. Elle écrit le 29 septembre: "*((La Marquise du Châtelet)) a introduit le petit Clairo ((chez la duchesse de Richelieu))(...). J'ai dîné en tête-à-tête avec Cléraut, si c'est dîner qu'à quatre heures et demie, et si c'est tête-à-tête dans une chambre où il y a quinze personnes. Ah, mon Dieu, quelle vie! Qu'elle est différente de cette paix et aise avec laquelle on dîne avec les amis. Après, j'ai écouté causer, car j'ai si mal à l'estomac que je ne saurais parler.*" Le 8 octobre de la même année, elle en parle encore à Devaux: "*Le petit Clairo est très aimable, bien doux (ce qui est à l'opposé de ((Maupertuis))), une fine et jolie plaisanterie, mais point d'usage du monde. Il est absent; sans cela tu le verrais souvent sur les rangs.*"

Il n'est pas sur les rangs? Toujours est-il que le jeune Clairaut écrit à Françoise, qui relate cette lettre à son ami Devaux: "*Il y a une lettre de Clairaut qui m'écrit de sa campagne où il est. A propos de bottes, et par parenthèse, sa lettre est bien sotté.*"

À la fin de l'année (dans l'intervalle, Mme de Graffigny s'est brouillée avec Mme du Châtelet), elle écrit, toujours à Devaux, le 1^{er} Décembre: "*J'ai commencé ma journée par la géométrie. J'ai eu le matin la visite de Clairau. Je ne sais si je t'ai mandé que ((la marquise du Châtelet)) qui avait fait une tracasserie avec moi pour nous empêcher de nous*"

⁸ Les citations de Madame de Graffigny, de l'abbé Bossut, et de l'abbé Bonardy sont tirées de l'article d'Olivier Courcèlle, *Quadrature*, n°36, avril-mai-juin, 1999, archives de l'Académie des Sciences, pp 34-37.

voir". À la demande de Devaux, elle revient, le 12 décembre, sur notre Clairaut: "*Mais non, ((Clairaut)) ne m'amuse guère. Hors la géométrie, il est presque sot. Il a si peu de monde, il parle si platement, qu'il est impossible de s'en amuser. C'est un bon enfant, un bon caractère à ce qu'on dit, et puis c'est tout.*"

Dans la suite de cette longue correspondance, Françoise de Graffigny évoque plusieurs fois Clairaut. Elle se plaint de ce qu'il ne lui ait pas rendu visite lors d'un passage à Paris. Le 27 novembre 1742, elle écrit: "*Pour le petit Clairaut, c'est un animal qui n'ose, dit-il, me voir, parce que je suis brouillée avec ((la marquise du Châtelet)), cela ne lui conviendrait pas. Ah! Je l'ai mis entre bonnes mains: ((Maupertuis)) ne l'aime point du tout. Je lui ai lâché le propos de ce petit sot, je suis sûre qu'il lui revaudra.*"

Madame de Graffigny a joint en 1743 un cercle très en vogue, le cercle "du bout du banc", dont d'Alembert et Diderot font partie. Des dîners ont lieu chez Caylus, ou chez Jeanne Quinault. Mais Clairaut, semble-t-il, n'en fait pas partie et ne participe pas aux dîners. Cependant le 14 mars 1745, Françoise de Graffigny mentionne un "problème" que ce cercle aurait eu à étudier. L'attribution de ce problème anonyme est disputée. La Chaussée. Helvétius? Caylus? Françoise de Graffigny a une autre hypothèse: "*Le problème que ((Duclos)) trouve admirable et moi fort sot, est de Clairaut.*", ce qui sous-entend que Clairaut était quand même assez proche de ce cercle. Vrai ou non? Le 12 avril 1742, l'abbé Bonardy⁹ relate, dans une lettre au président Bouhier: "*Les ouvrages nouveaux, et qui ont fait plus de bruit sont Recueil de ces messieurs (sous ce titre singulier, on trouve des contes, et autres historiettes galantes attribuées à MM Piron, Moncrif, Coypel, Clairaut, Duclos et autres amis du comte de Caylus).*" On aimerait lire les "historiettes galantes" écrites par Clairaut !

On sait qu'en 1757, Clairaut travailla avec Lalande et Madame Nicole-Reine Lepaute (1723-1788), l'épouse du célèbre horloger, à la prédiction du passage de la comète de Halley, en appliquant à cette comète la théorie des perturbations qu'il avait mise au point. Reine Lepaute était une femme remarquable, acharnée à ce travail dont elle fut la principale réalisatrice. Mais curieusement, Clairaut ne cite pas son nom dans ses communications à l'Académie. Seul Lalande rend un juste hommage à cette très précieuse et savante collaboratrice, qui était sans doute un peu plus pour lui. Clairaut se

borne à une allusion, et, sans la nommer, qualifie Reine Lepaute de "surprenante" et de "savante calculatrice". Pourquoi ce silence relatif ? Lalande raconte¹⁰ que Clairaut supprima de son livre sur la comète, le nom de Mme Lepaute, "par pure complaisance pour une femme jalouse des mérites de Mme Lepaute". "*Cette femme*", selon Lalande, "parvint à faire commettre cette injustice à un savant judicieux mais faible, qu'elle avait subjugué". En 1762, - s'agit-il de la même femme? Sans doute!-, Mme Lepaute, dans une lettre à Lalande du 16 janvier, est cruelle: "*M. Clairaut a chez lui une fille qu'il entretient et qu'il a ramassée il y a trois ans chez une marchande de mode, rue Saint-Honoré. Elle se nomme Gourlier, et il lui a appris avec peine à faire des additions de nombres, mais c'est là toute sa capacité. Elle ignore la règle de trois et n'a jamais pu parvenir à la comprendre.*"

Concluons ce parcours (quelque peu ramené à ses étapes les plus connues) dans les amours réels ou supposés de Clairaut, par un extrait de la notice nécrologique que l'abbé académicien Charles Bossut (1730-1814) lui consacre en 1810: "*Engagé à des soupers, à des veilles, entraîné par un goût très vif pour les femmes, voulant allier le plaisir à ses travaux ordinaires, il perdit le repos, la santé, et enfin la vie*". ■

Les Cahiers Clairaut rentrent à la bibliothèque de l'Académie des Sciences. Un extrait de l'intervention de l'Académicien JP Kahane :

« *Quelque chose qui ne se trouve pas encore, je crois, à la bibliothèque de l'Institut, et qui ne se retrouve plus, sans doute, sur les tables à l'entrée parce que les visiteurs de ce matin ont mis la main dessus, il s'agit des Cahiers Clairaut, organe du Comité de Liaison Enseignants et Astronomes. C'est publié quatre fois par an. Ils ont choisi les solstices et les équinoxes comme dates de parution de ces Cahiers Clairaut. Ce n'est pas cela qui fait leur mérite ; leur mérite, pour tous ceux qui les connaissent, c'est sans doute la meilleure revue d'astronomie populaire qui il y ait. Populaire, disons au sens des professeurs de lycée intéressés par l'astronomie. Alors moi, je les ai découverts il y a peu de temps et vraiment je vous invite à les découvrir et peut être à faire plus que les découvrir ».*

⁹ Bonardy, Jean-Baptiste ; 1700-1756; Bouhier, Jean ; 1673-1746.

¹⁰ Selon E. Badinter, *Les passions intellectuelles*, II, p. 258 et sq., Fayard, 2002.

L'Everest détrôné ou

Pourquoi et comment mesurer la forme de la Terre ?

Félix Perosanz, ingénieur expert en géodésie spatiale au CNES

Comment peut-on déterminer précisément la forme d'une Terre bosselée et en mouvement ? Comment définir et mesurer l'altitude d'un système dynamique ? Quel niveau de référence choisir ? Que faire avec les autres planètes privées d'océans ? Autant de questions dont les réponses apparaissent dans l'article qui suit.

D'Ératosthène à la définition du mètre

La question de la représentation de la forme de la Terre et sa place dans l'Univers est fondamentale et a traversé les âges. Cette problématique a été influencée par des concepts mystiques, mythologiques, religieux philosophiques ou scientifiques : qu'il y a-t-il au-delà de l'horizon, au-delà des mers ? Certains affirment que les terres émergées sont entourées d'océans qui se terminent par des chutes d'eau, d'autres que la Terre est plate et que le ciel se trouve au-dessus et l'enfer en dessous. Et si la Terre était ronde comment les êtres vivants de l'autre côté pourraient-ils survivre la tête à l'envers ? Connaître la forme de la Terre c'est être capable de la mesurer et cette question a contribué au développement des mathématiques, de l'astronomie, de la géographie, de la cartographie par exemple. Les origines de la géodésie - cette science dont l'objet est de mesurer la Terre - remontent à l'antiquité. Au III^{ème} siècle avant notre ère, Ératosthène, avec sa célèbre expérience du puits de Syène et de l'obélisque d'Alexandrie, fut le premier géodésien à démontrer que la Terre était ronde et à en mesurer le rayon.

La méthode de triangulation et les premiers théodolites dès le XVI^{ème} siècle permettent de calculer des distances entre points en vue commune. En 1735 deux expéditions Françaises, l'une en Laponie l'autre au Pérou, mesurent par cette technique un arc de méridien terrestre pour confirmer l'intuition de Newton : la Terre est aplatie aux pôles. Sa forme est ellipsoïdale et tous ses méridiens ont par conséquent la même longueur. C'est de cette constatation qu'est née cette idée d'utiliser la forme de la Terre comme base d'un système d'unité de longueur universel : le mètre est défini (jusqu'en 1960) comme le dix millionième d'un quart de méridien terrestre.

Aujourd'hui la géodésie est devenue « spatiale » et son domaine d'activité et ses connexions avec les autres sciences de la Terre ne cessent de s'élargir. Ce propos sera illustré dans le paragraphe « Applications et contributions scientifiques de la géodésie ». Nous aborderons préalablement les notions d'approches géométriques et dynamiques dans la partie « définition de la forme de la Terre ». La suite sera dédiée aux techniques géodésiques de mesure. Il est intéressant de noter que l'ensemble de tous ces points peuvent être transposés aux planètes telluriques et aux lunes de notre système solaire.

Cet article ne prétend pas être exhaustif sur cette question fondamentale, complexe et dont la dimension sociétale prend de plus en plus d'importance. Le lecteur curieux trouvera aisément par ailleurs de la documentation. Nous mentionneront en particulier les ouvrages de Jean-Jacques Levallois [1] et d'Anny Cazenave et Kurt Fiegl [2] ainsi que les sites internet de l'IGN : <http://geodesie.ign.fr> et du Groupe de Recherche de Géodésie Spatiale : <http://grgs.obs-mip.fr>,

Définition de la forme de la Terre

Les limites de l'approche géométrique

Définir la forme de la Terre peut, à la réflexion, s'avérer un exercice délicat. À titre d'illustration, comparons les positions données par GPS des villes de Saint Paul et de la Nouvelle Orléans aux USA dans le tableau 1.

	Saint Paul	Nouvelle Orléans
X	- 245 595 m	- 6 819 m
Y	- 4 514 511 m	- 5 530 208 m
Z	4 483 749 m	3 166 982 m
distance géocentrique	6 367 km	6 373 km

Tab.1. Coordonnées cartésiennes et distance géocentriques des villes de Saint Paul et de la Nouvelle Orléans.

On déduit du tableau 1 que Saint Paul est plus proche de 6 km du centre de la Terre que la Nouvelle Orléans. Or Saint Paul se trouve près de la source du fleuve Mississippi alors que la Nouvelle Orléans est près de son embouchure. Comme expliquer alors que le fleuve s'écoule bien de Saint Paul vers la Nouvelle Orléans en « montant » de 6 km ? Les atlas s'accordent à dire que l'Everest est le plus haut sommet du monde. Pourtant, sa distance géocentrique (6382,3 km) est inférieure de 2,1 km à celle du volcan Chimborazo au Pérou (6384,4 km) ! L'Everest serait-il détrôné ? De façon plus générale, comment définir et mesurer l'altitude des points à la surface terrestre ?

Ces exemples montrent les limites d'une approche **géométrique** pour définir la forme de la Terre.

Pesanteur et ellipsoïde

Pour résoudre l'énigme de l'Everest et du Mississippi, commençons par définir la référence de mesure des altitudes. De façon intuitive, on peut avancer l'idée que le niveau moyen des océans définit l'origine des mesures des altitudes c'est-à-dire que tous les points à la surface des océans sont à la même altitude et que cette altitude vaut zéro. En fait les océans sont soumis à la pesanteur qui est la somme de l'attraction gravitationnelle terrestre et de la force centrifuge due à la rotation de la Terre sur elle-même. En tout point il est aisé de matérialiser la verticale (qui suit la direction de la pesanteur) à l'aide d'un fil à plomb et donc de définir le plan perpendiculaire à cette direction (figure 1). Le plan horizontal « local » peut être défini en tout point, on détermine ainsi la surface d'équilibre de l'océan.

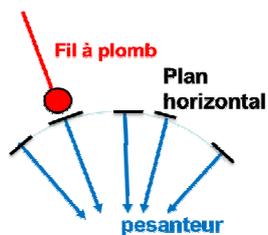


Fig.1. Le fil à plomb permet de proche en proche de définir une surface dont tous les points sont à la même altitude.

Ainsi, la surface des océans est en tout point perpendiculaire à la pesanteur et définit le niveau zéro des mesures des altitudes. Les géodésiens parlent de surface équipotentielle du champ de pesanteur. Dans l'hypothèse d'une Terre de forme régulière et de densité homogène, le champ de pesanteur terrestre induit une forme ellipsoïdale de ses équipotentielles. Le célèbre géodésien Clairaut parle d'équilibre hydrostatique et démontre ce résultat dès 1743. Cette hypothèse étant valide à l'échelle de quelques dizaines de mètres l'énigme du Mississippi (qui semble s'écouler en montant de

6 km) peut donc être résolue. En effet, si nous comparons les altitudes de Saint Paul et de la Nouvelle Orléans par rapport à l'équipotentielle de pesanteur de référence (de forme ellipsoïdale) il est clair à présent que la source du Mississippi se trouve à une altitude plus élevée que l'embouchure (figure 2). Cette approche est dite **dynamique** : la forme de la Terre dépend de son champ de pesanteur et non (uniquement) de sa géométrie.

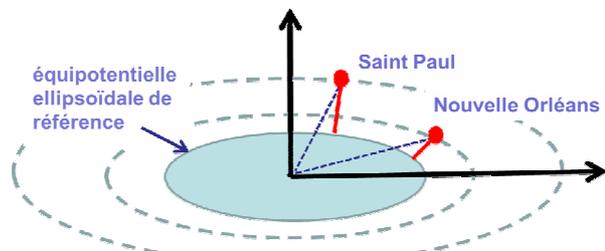


Fig.2. L'altitude des points se mesurant par rapport à un ellipsoïde (et non par sa distance géocentrique) Saint Paul est plus haut que La Nouvelle Orléans ce qui est cohérent avec le sens d'écoulement du Mississippi.

Les creux et bosses du géoïde

Mais l'hypothèse de forme régulière et de densité homogène n'est pas suffisante si l'on souhaite à présent définir la forme de la Terre en répondant aux exigences actuelles de précision. La figure 3a illustre le cas d'une croûte terrestre « idéale » : les équipotentielles de pesanteur sont en tout point perpendiculaires à la direction donnée par le fil à plomb.

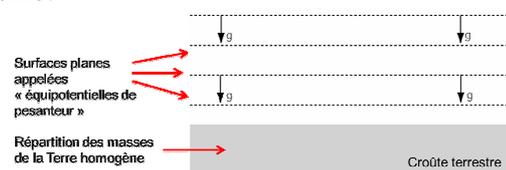


Fig.3a. Forme des équipotentielles de pesanteur

Mais quel serait l'effet d'un excédent de masse ? La figure 3b montre comment la pesanteur et le plan horizontal local sont déviés à l'approche de cette masse (les géodésiens parlent de déviation de la verticale). Par rapport à l'ellipsoïde de départ, cette nouvelle équipotentielle de pesanteur s'élèvera dans le cas d'une région présentant un excédent de matière, elle s'incurvera en dessous de l'ellipsoïde dans le cas contraire.

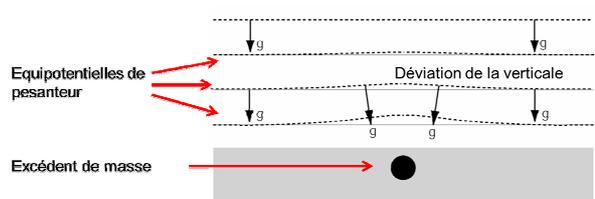


Fig.3b. Forme des équipotentielles de pesanteur en présence d'un « excédent de masse ».

Ainsi les équipotentielles du champ de pesanteur ne sont plus ellipsoïdales mais présentent « des creux et des bosses » selon la répartition des masses qui constituent la Terre. Par convention, la référence de mesure des altitudes est définie comme la surface équipotentielle qui coïncide avec le niveau moyen des océans. Les géodésiens l'appellent le **géοïde** et comme le montre la figure 4 il présente des écarts à l'ellipsoïde de plusieurs dizaines de mètres (bien que par conception, tous ses points soient à la même altitude !).

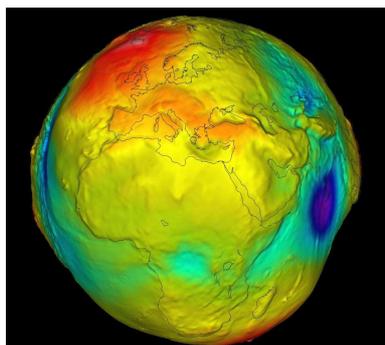


Fig.4. Creux et bosses du géοïde terrestre par rapport à un ellipsoïde.

Échelle de couleur :
bleu=-100m ;
rouge=+100m.
Source GRGS.

Nous remarquerons que la mesure rigoureuse de l'altitude est délicate et ne se limite pas à une simple distance géométrique au dessus d'une surface de référence. Elle dépend en réalité de la direction et de l'intensité de la pesanteur le long du trajet entre le point et le géοïde.

La déformation de la Terre

Il convient en réalité de parler de « système Terre » tant notre planète est complexe de par sa structure et sa dynamique (Cf. figure 5).

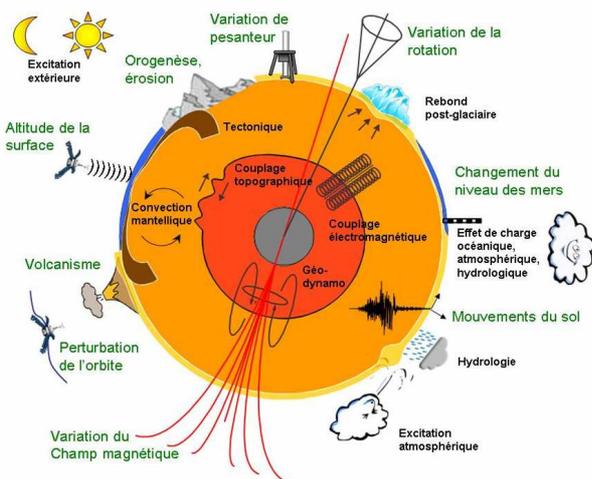


Fig.5. Les sources de déformation du système Terre.

La convection mantellique, les effets des océans et de l'atmosphère ainsi que les excitations externes de la Lune et du Soleil sont autant de sources de déformation de la Terre. Et la tâche du géοdésien devient plus complexe encore. Une activité

importante de déploiement d'infrastructures terrestres, de conception-réalisation-exploitation de missions spatiales et de traitement de données est nécessaire. Parmi les productions essentielles de cette communauté scientifique il faut noter l'édition de conventions et des standards internationaux. Pour sensibiliser le lecteur au caractère fondamental de cette activité nous poserons une simple question : Quelle est précisément la distance entre Paris et Washington? Comment en effet calculer cette distance alors que les deux continents s'éloignent de plusieurs centimètres par an du fait de la tectonique des plaques ? Un récepteur GPS donnerait-il des coordonnées de ces deux villes différentes tous les ans ? Sans doute mais alors comment comparer ces coordonnées à celles figées d'un atlas ou d'une carte ?

Le lecteur courageux trouvera le détail de la réponse à cette nouvelle énigme dans les conventions internationales de l'IERS (www.iers.org). Pour les autres nous nous limiterons à préciser qu'au sens de ces conventions, les coordonnées d'un point sont toujours définies à une date de référence (le 1^{er} janvier 2005 actuellement) et associées à des modèles de variations qui permettent notamment de tenir compte de déformations tectoniques. Ainsi on trouvera dans la table 2 les coordonnées ainsi que les vitesses tectoniques de Paris et Washington qui permettent de connaître leur position à n'importe quelle date.

	Paris		Washington	
	Position (01/01/2005)	Vitesse m/an	Position (01/01/2005)	Vitesse m/an
X	4202777.372	-0.0125	1112189.774	-0.0150
Y	171367.999	0.0178	4842955.027	0.0000
Z	4778660.203	0.0108	3985352.264	0.0024

Tab.2 : Position et vitesse de Paris et Washington,

Comment mesurer la forme de la Terre

Qu'elles soient de nature géométrique ou dynamique, les techniques de mesure de la Terre sont riches d'une longue histoire ponctuée de progrès scientifiques et technologiques. De plus, depuis le début de l'ère spatiale le géοdésien ne se limite plus à des observations locales mais peut appréhender la Terre dans sa globalité. À titre d'illustration nous donnerons un exemple pour chacune des 5 principales techniques géοdésiques actuelles.

Le théodolite et la triangulation

Il est fréquent de croiser un géomètre avec son théodolite au bord des routes par exemple. Bien que la conception de cet instrument date du XVI^{ème} siècle il est toujours largement utilisé. Son principe est celui de la triangulation qui permet de calculer les longueurs des côtés des triangles dont on vise les sommets. Nous qualifierons cette méthode de « géométrie locale ».

C'est de cette façon que l'IGN par exemple, a déployé et positionné un réseau de bornes géodésiques qui a servi de base à la réalisation des cartes topographiques de l'ensemble du territoire dans les années 1950.

Un des inconvénients de cette technique pour des chantiers de grande dimensions (régionaux ou nationaux par exemple) reste néanmoins la nécessité d'une vue commune et la propagation des erreurs de point en point.

Les mesures gravimétriques

Nous avons vu l'intérêt de pouvoir mesurer la pesanteur en différents points de la Terre. L'instrument le plus adapté est le gravimètre qui doit être déplacé de point en point. Nous parlerons de « méthode dynamique locale ». Le plus souvent l'accélération de pesanteur est déduite d'une mesure de temps de chute d'une masse d'épreuve. Le Bureau Gravimétrique International a la charge de collecter, archiver et distribuer toutes les mesures terrestres et marines disponibles (<http://bgi.omp.obs-mip.fr>).

Le GPS et la trilatération

Les systèmes de navigation par satellite comme le GPS étasunien ou le futur système européen Galileo permettent de positionner des utilisateurs en tout point du globe. Ils fonctionnent sur le principe de la trilatération c'est-à-dire la mesure de distances entre plusieurs satellites (de positions connues) et l'utilisateur.

La constellation de satellites de ces systèmes assurant un service en tout point du globe et à tout instant, il s'agit d'une « méthode géométrique globale ».

Les mesures de distances sont en pratique déduites des mesures des temps de propagation des signaux radio émis par les satellites. Il existe des récepteurs dédiés aux usages géodésiques qui permettent d'obtenir des précisions sub-centimétriques de positionnement. C'est par exemple par cette technique que le système cartographique légal français appelé RGF93 a été réalisé par l'IGN.

L'altimétrie spatiale

L'altimétrie spatiale est une technique basée sur des mesures de distances entre un satellite et l'océan. Elle permet néanmoins de cartographier la surface océanique qui reflète essentiellement (mais pas uniquement) la forme du géoïde. C'est à ce titre qu'elle est à la fois géométrique et dynamique... et « globale » dans le sens où les océans couvrent près de 70% de notre planète.

La continuité des observations altimétriques est assurée aujourd'hui par exemple grâce à la famille JASON des satellites franco-étasunien. Au-delà de son intérêt pour la forme de la Terre, l'altimétrie joue un rôle essentiel dans la cartographie du niveau des océans.

Les missions spatiales dédiées

En 2000, 2002 et 2009 furent lancés respectivement les satellites géodésiques CHAMP, GRACE et GOCE avec l'objectif d'améliorer la cartographie globale du champ de gravité terrestre.

La mission CHAMP est fondée sur la mesure des perturbations de trajectoire dont on déduit l'accélération gravitationnelle agissant sur le satellite.

Dans le cas de GRACE se sont les perturbations relatives observées entre deux satellites co-orbitants dont on mesure la distance (à quelques microns près) qui fournissent les observations.

Le gradiomètre de la mission GOCE enfin, mesure dans les 3 dimensions la différence de gravité entre 3 couples de masses d'épreuves distantes de 50 cm les unes des autres. Dans tous les cas il s'agit de « méthodes dynamiques globales ».

Plusieurs ordres de grandeur de précision ont été gagnés au cours de cette dernière décennie. Il est même possible aujourd'hui de suivre les variations temporelles du géoïde traduisant les modifications de la répartition des masses du système Terre. La mission spatiale GRACE-FO devrait prendre la relève à la fin de cette décennie.

Applications et contributions scientifiques de la géodésie

Nous avons vu dans les paragraphes précédents le rôle fondamental de la géodésie : définition de la référence des altitudes, réalisation de systèmes de référence (nécessaires à l'expression de coordonnées ou à l'établissement de cartes), publication de standards et de conventions internationales... Nous avons entrevu la complexité

du système Terre et les nombreux phénomènes impactant la forme et la déformation de la Terre ainsi que les différentes techniques de mesure toujours plus performantes pour répondre à la quête d'une précision de plus en plus grande. Dans ce contexte, le panorama des applications et des contributions de la géodésie aux disciplines connexes comme la géophysique, l'océanographie, l'hydrologie ou la glaciologie ne cesse de s'élargir. Les exemples suivants ne sont que quelques illustrations.

Mesure des déformations tectoniques et sismiques

La densité des réseaux de récepteurs GPS géodésiques permanents dans le monde ne cesse d'augmenter. Notre connaissance des vitesses tectoniques continue de s'améliorer. La figure 6 montre le dernier modèle publié par le service international I.E.R.S.

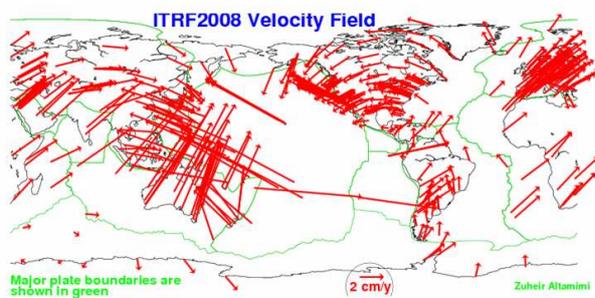


Fig.6. Champ de vitesse tectonique Source Z. Altamimi IGN.

De même, chaque séisme important est ausculté, souvent même en temps réel. La figure 7 illustre la finesse avec laquelle le déplacement des stations GPS proche de l'épicentre du séisme japonais du 11 mars 2011 a pu être mesuré.

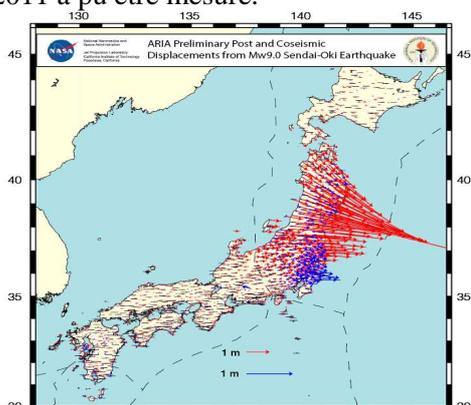


Figure shows horizontal displacements based on ARIA version 0.3 position estimates for GEONET stations. Coseismic displacement is shown in red, and first 8 hours of postseismic motion is shown in blue, including motion caused by aftershocks. Bars at end of vector show 95% error estimate. Solutions courtesy of ARIA team at JPL and Caltech (email aria@jpl.nasa.gov or aria@caltech.edu). All original GEONET RINEX data provided to Caltech by the Geospatial Information Authority (GSI) of Japan.

Fig.7. Déplacements horizontaux liés au séisme de Sendai du 11 mars 2011. Source ARIA/JPL aria@jpl.nasa.gov Droits réservés - © 2009 JPL / Caltech / GSI (Japan)

Sur la figure 8 enfin, on observe le phénomène de « relaxation post-sismique » qui plusieurs mois encore après le séisme qui a frappé le Chili le 27 février 2010 affecte la région de Concepción.

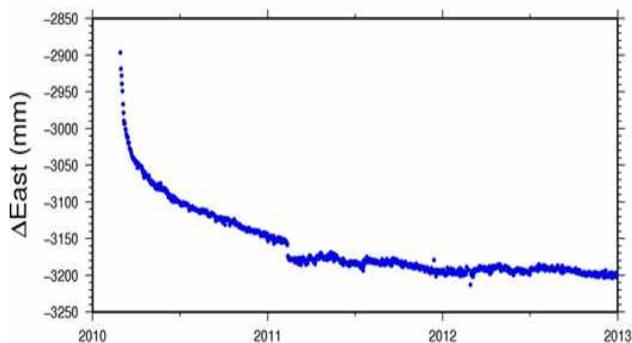


Fig.8. Relaxation de la croûte terrestre au Chili au cours de mois suivant le séisme de mars 2010. Dans la direction Est-Ouest la déformation dépasse les 200 millimètres. Source G. Galbada IRD/GET.

Les géophysiciens avancent dans l'observation, la compréhension et la modélisation de ces phénomènes... avec l'espoir de les prédire un jour.

Marées océaniques et terrestres

L'effet d'attraction gravitationnelle de la Lune, du Soleil (et des planètes du système solaire) est considéré avec attention par les géodésiens. Si le phénomène de marée océanique est très connu, celui de marée terrestre l'est moins. Pourtant, en France par exemple, deux fois par jour la croûte terrestre « monte et descend » de près de 30 cm. Cette déformation est bien modélisée par les géodésiens et peut facilement être observée à l'aide d'un récepteur GPS par exemple.

Mais les marées océaniques induisent un effet supplémentaire appelé « effet de charge » : lorsque la marée est haute, la charge de la masse d'eau s'exerçant sur le fond de l'océan déforme la croûte terrestre et cette déformation est sensible jusque dans l'intérieur des terres. Ainsi, la ville de Brest « monte et descend » de 8 centimètres au rythme des marées océaniques.

Variations du champ de gravité et hydrologie

Les données de la mission spatiale GRACE permettent de produire une carte du champ de gravité tous les 10 jours depuis 2002. Ces images mises bout à bout constituent le film du déplacement des masses du système Terre. Le

signal est dominé par les masses d'eau dont on voit pour la première fois l'évolution spatio-temporelle : fonte de glace au Groenland (figure 9), en Alaska en Antarctique, crues de l'Amazone, mousson en Inde. L'hydrologie spatiale est née.

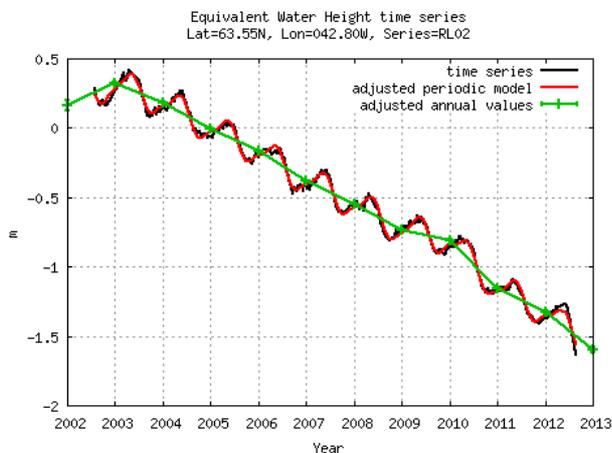


Fig.9. Variations temporelles de géoïde exprimées en hauteur d'eau sur la côte Est du Groenland.

Au-delà des variations saisonnières autour de 20 cm/an, on observe une perte de masse très rapide.

Cette figure est tirée de l'outil interactif du GRGS : <http://grgs.obs-mip.fr/grace/variable-models-grace-lageos/interactive-tools>.

Le bilan des masses d'eau aux échelles des grands bassins et de la Terre dans sa globalité peut être réalisé avec tout l'intérêt pour l'étude du changement climatique que l'on imagine. L'animation suivante montre à l'échelle globale les variations du géoïde (exprimées en hauteur d'eau) depuis 2002.

<http://gravitegrace.get.obs-mip.fr/data/RL02/variable/archives/GRGS.movie.water.rct.gif>

Géoïde et surface océanique

Si l'on fait l'approximation que les océans sont au repos alors les données altimétriques permettent de cartographier le géoïde océanique.

Cette équipotentielle du champ de pesanteur reflète comme nous l'avons illustré figure 3b, les excédents et défauts de masse dans la croûte terrestre. Ainsi un volcan sous marin générera une bosse à la surface de la mer alors qu'une fausse sous-marine produira un creux (figure 10).

La réalisation de la bathymétrie des océans c'est-à-dire la cartographie du relief du plancher océanique est donc possible grâce à cette technique. Elle a permis de mettre récemment en évidence des structures géologiques jusque là inconnues. Les

liens forts entre forme de la Terre et altimétrie sont détaillés par exemple dans :

http://earth.esa.int/workshops/venice06/participants/1322/paper_1322_mcadoo.pdf.

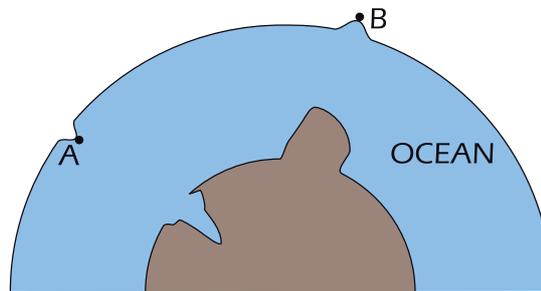


Fig.10. La forme de la surface océanique dépend de la répartition des masses dans la Terre. Les points A et B sont sur la même équipotentielle de pesanteur et sont donc à la même altitude.

Mais les océans sont soumis aux marées, aux courants, aux forçages atmosphériques et les données altimétriques ne collent pas exactement avec le géoïde. La différence entre la surface moyenne des océans déduites de l'altimétrie avec le géoïde tel que déterminé avec une remarquable précision par la mission GOCE, donne ce que les océanographes appellent la « topographie dynamique moyenne » de océans. Cette information est nécessaire au calcul des courants de surface et des modèles de prévision océaniques qui sont essentiels à l'étude des évolutions climatiques.

Niveau de la mer et déformation terrestre

De la même façon qu'à marée basse la croûte terrestre se soulève (voir paragraphe « Marées océaniques et terrestres »), la disparition de l'épaisse couche de glace qui couvrait les hautes latitudes de l'hémisphère nord (il y a 10 000 ans) a provoqué une déformation de la Terre. Au Canada, en Sibérie ou en Europe du nord par exemple ce « rebond postglaciaire » tel que le nomme les géodésiens se fait aujourd'hui encore ressentir avec une vitesse verticale de déformation qui peut atteindre 1 cm/an.

Ce signal est précisément observé à l'aide de récepteurs GPS et revêt un caractère majeur pour l'étude du niveau des océans. En effet, nous disposons de données de marégraphes – cet instrument qui mesure le niveau de la mer – sur la plupart des côtes du monde et ce parfois depuis plus d'un siècle comme à Marseille par exemple. Mais cet instrument fixé au sol ne mesure en réalité que le mouvement relatif entre l'océan et la croûte terrestre. Impossible alors de savoir si c'est l'océan qui monte ou la Terre qui s'enfonce ?

La figure 11 compare pour différentes stations d'Europe du Nord et d'Amérique du Nord (des zones subissant un rebond postglaciaire important) les séries marégraphiques brutes à celles corrigées du déplacement vertical observé par GPS. Dans le deuxième cas les résultats sont cohérents et peuvent contribuer à l'étude du changement climatique.

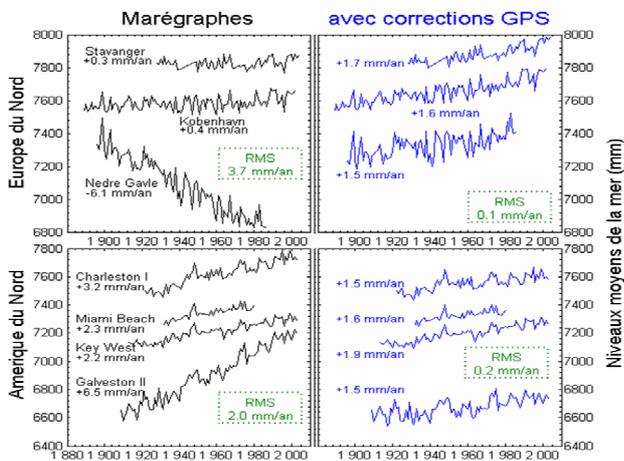


Fig.11. Enregistrements marégraphiques de 7 stations sur près d'un siècle. À gauche les séries brutes, à droite les séries corrigées du rebond postglaciaire, mesurées aujourd'hui par GPS. Cette déformation de la Terre doit être prise en compte pour interpréter correctement les données des marégraphes. Source G. Woppelmann
Liens. <http://liens.univ-larochelle.fr/Woppelmann-Guy>.

La forme des planètes et de la Lune

La géodésie ne se limite pas à l'étude de la Terre et toutes les questions soulevées dans cet article peuvent être transposées aux autres planètes. Ainsi, bon nombre de missions interplanétaires ayant pour objectif la cartographie du champ de gravité de planètes telluriques ou de leurs lunes ont été lancées depuis 1960.

Une meilleure connaissance des variations de l'aplatissement de Mars par exemple permettrait de trancher sur la nature – solide ou liquide – de son noyau. Récemment la mission de la NASA GRAIL a permis un bond en avant dans notre connaissance de notre Lune et mettant en évidence par exemple des concentrations de masses insoupçonnées comme le montre la figure 12.

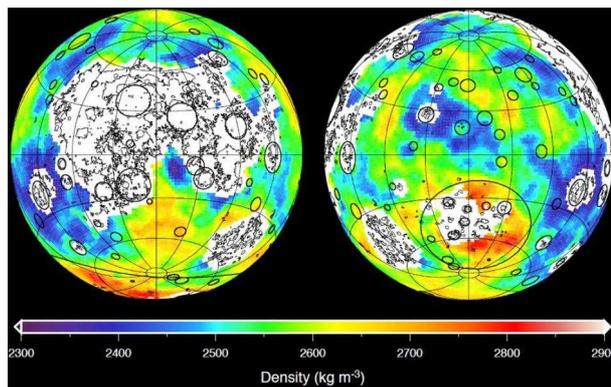


Fig.12. Anomalies de densité de la Lune cartographiées par la mission GRAIL de la NASA. Source : <http://grail.nasa.gov>

Conclusion

La mesure de la forme de la Terre est un besoin fondamental et qui reste d'actualité. La recherche en géodésie spatiale dans son effort de description du système Terre avec une précision toujours plus grande permet aussi de mieux le comprendre. Si la géodésie fournit des conventions et des références internationales elle contribue aussi à d'autres disciplines avec un rôle sociétal de plus en plus important : mesurer le niveau des océans, observer et quantifier la distribution des masses d'eau (« l'or bleu » de demain), contraindre les modèles tectoniques pour comprendre les processus et peut être un jour les prévenir.

Mais notre Terre est un système complexe et en perpétuelle évolution. Et si en connaître la forme n'est qu'un des aspects du problème il n'en reste pas moins essentiel.

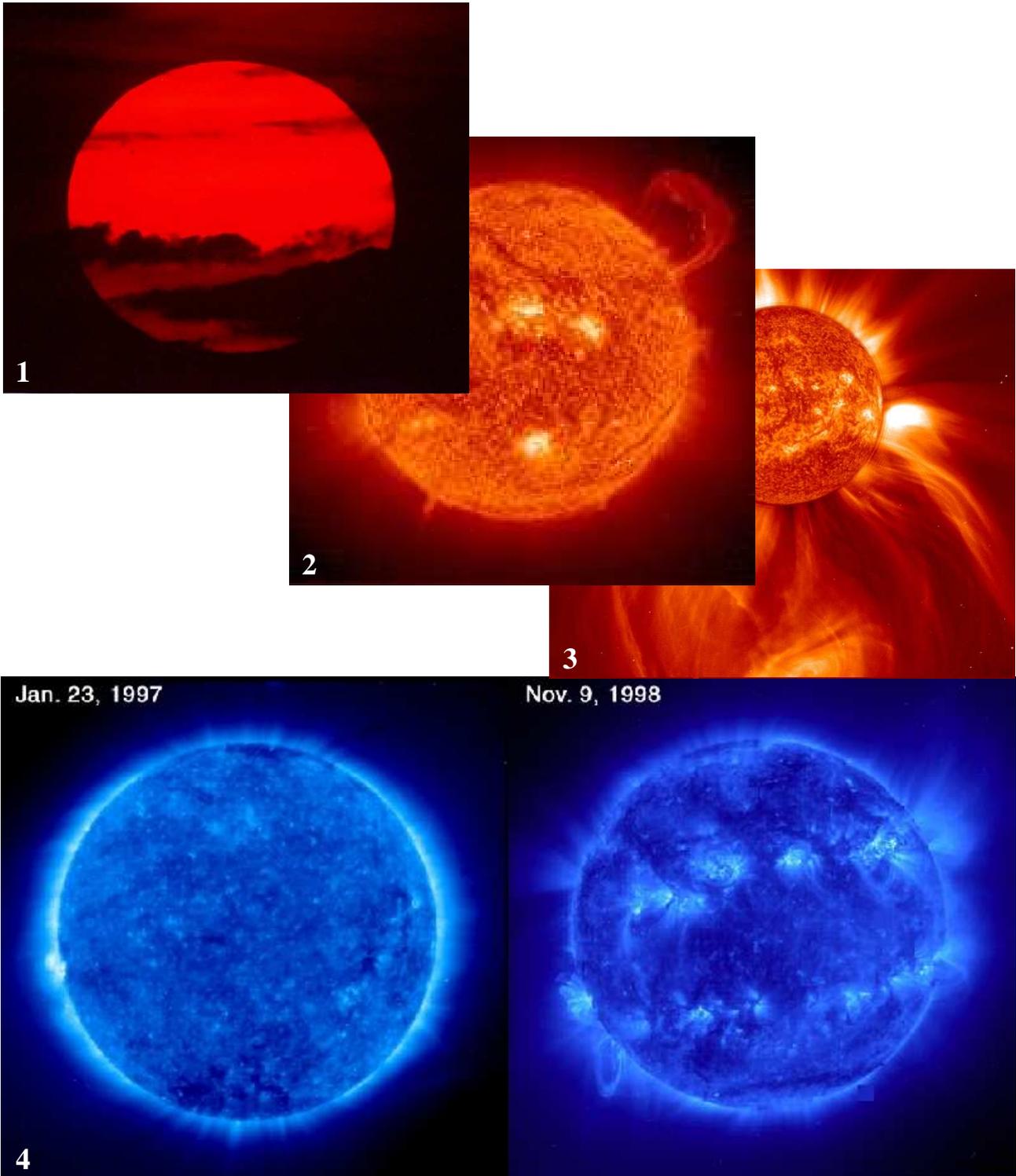
Références

- [1] Jean-Jacques Levallois, 1988. MESURER LA TERRE. 300 ans de géodésie française, De la toise du Châtelet au satellite. Ed. Ponts et Chaussées, ISBN 2-85978-114-5
- [2] Anny Cazenave & Kurt Fiegl, 1994. Formes et mouvements de la terre- Satellites et géodésie. Ed. Belin. ISBN-10: 2701117135.

Observez la comète ISON

Elle est pour l'instant un peu moins lumineuse que prévu mais cette comète sera visible à l'œil nu en décembre. Certains l'annoncent comme exceptionnelle mais les prévisions sont toujours difficiles. On pourra l'observer le matin en octobre novembre avec un instrument (magnitude prévue de 10 début octobre à 4 le 20 novembre). Le périhélie aura lieu le 28 novembre et on la retrouvera le soir en décembre, peut-être très lumineuse. Vous trouverez d'autres précisions ainsi qu'une carte sur le site du CLEA. (Voir la carte sur le site du CLEA)

THÈME : LE SOLEIL



1. Soleil au couchant (crédit : P. Causeret) ; **2.** Image d'une protubérance à 304 Å le 14 septembre 1999 (crédit : Nasa/Soho) ; **3.** Image de la couronne le 8 janvier 2002 superposée à une image du disque solaire (crédit : Nasa/Soho) ; **4.** Comparaison de l'activité solaire, maximum en 2000 (crédit : Nasa/Soho).

Le Soleil, notions de base

Pierre Causeret

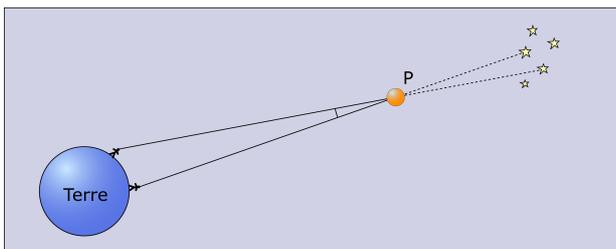
Vous trouverez dans ces notions de base les principales données sur le Soleil accompagnées des méthodes qui ont permis de les déterminer.

La distance du Soleil

L'observation de la position des planètes permet de connaître le plan du système solaire. On sait par exemple que la distance de Vénus au Soleil vaut 0,72 fois la distance Terre-Soleil appelée unité astronomique (ua) ou que Mars est à 1,52 ua de la Terre. Il suffit donc de mesurer une seule distance en km dans le système solaire pour connaître toutes les autres. Plusieurs méthodes ont été utilisées. En voici quelques-unes.

Parallaxe diurne

Deux personnes éloignées sur Terre observent le même objet, Mars par exemple, au même moment. Si on connaît le décalage de Mars par rapport aux étoiles lointaines ainsi que la distance entre les deux personnes, on peut calculer la distance de Mars.



C'est ce qu'ont fait Cassini et Richer en 1672 depuis Paris et Cayenne. Ils ont obtenu pour la distance Terre Soleil 140 millions de nos kilomètres (voir CC n° 137).

Cette méthode a été utilisée en 1931 avec l'astéroïde Éros qui passait à 22 millions de km de la Terre.

Passage de Vénus

La mesure de la durée d'un passage de Vénus devant le Soleil depuis deux lieux éloignés sur Terre permet aussi de déterminer la mesure de l'unité astronomique. À partir de 1761, chaque passage a donné lieu à de nombreuses expéditions mais la précision des résultats a été décevante (cf CC de 2004).

Écho radar sur Vénus

On envoie une onde radio en direction de Vénus et on récupère une très faible partie de l'onde réfléchi (réalisé dès 1961). La mesure du temps pour faire l'aller retour donne immédiatement la distance de Vénus. La précision était de l'ordre de 500 km.

Les résultats

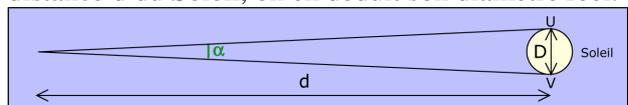
L'unité astronomique a été fixée à 149 597 870,7 km. La distance de la Terre au Soleil varie de 149 100 000 à 151 100 000 km.

Pour aller de la Terre au Soleil, il faudrait :

- plus d'un siècle à la vitesse d'une voiture sur autoroute (130 km/h) ;
- huit ans à la vitesse d'un avion de chasse (2000 km/h) ;
- huit minutes à la vitesse de la lumière (300 000 km/s).

Le diamètre du Soleil

On peut mesurer le diamètre apparent α du Soleil, on trouve $0,53^\circ$ en moyenne. Connaissant la distance d du Soleil, on en déduit son diamètre réel.



Ce calcul peut se faire sans trigonométrie, en assimilant le diamètre [UV] à un arc de cercle de centre T :

$$360^\circ \rightarrow 2 \times \pi \times 149\,600\,000$$

$$0,53^\circ \rightarrow 2 \times \pi \times 149\,600\,000 \times 0,53/360 \text{ soit}$$

1 400 000 km environ (plus précisément 1 392 000)

On peut aussi utiliser un angle en radian (et $D = d\alpha$) ou la trigonométrie.

Avec ses 696 000 km de rayon, le Soleil pourrait contenir largement l'orbite de la Lune.

La masse du Soleil

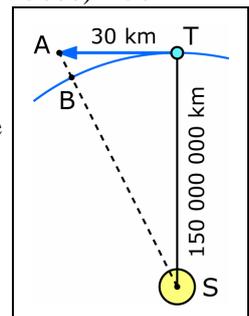
La Terre tourne autour du Soleil en suivant une orbite que l'on considérera circulaire. Sa vitesse moyenne est de 30 km/s :

$$2 \times \pi \times 149\,600\,000 / (365 \times 24 \times 3600) \approx 30.$$

Sans le Soleil, la Terre passerait de T en A après une seconde.

L'attraction du Soleil fait « chuter » la Terre de la distance AB qui vaut 3 mm (calculs dans l'encadré).

Sur Terre, un objet chute de 5 m la première seconde, soit 1 670 fois plus.



De plus, un objet à la surface de la Terre est à 6 370 km du centre de la Terre alors que la Terre est située à 150 000 000 km du Soleil, soit 23 500 fois plus loin.

On sait que l'accélération gravitationnelle est proportionnelle à la masse de l'objet qui attire et inversement proportionnelle au carré de la distance, on peut en déduire que le rapport de la masse du Soleil à la masse de la Terre est de :

$$23\,500^2 / 1\,670 \approx 330\,000$$

Ce qui signifie que le Soleil est 330 000 fois plus massif que la Terre.

De combien chute la Terre chaque seconde ?

Le calcul paraît simple. Avec le théorème de Pythagore dans le triangle ATS (figure ci-dessus), on trouve :

$$AB = AS - BS = \sqrt{150\,000\,000^2 + 30^2} - 150\,000\,000.$$

Si je demande à ma calculatrice, elle me répond zéro !

On peut s'en sortir grâce à l'approximation :

$(a+\epsilon)^2 = a^2 + 2a\epsilon + \epsilon^2$ qui est proche de $a^2 + 2a\epsilon$ si ϵ est petit devant a . Avec $a = 150\,000\,000$ et $\epsilon = 0,000\,0003$:

$$(150\,000\,000 + 0,000\,0003)^2 \approx 150\,000\,000^2 + 900$$

d'où

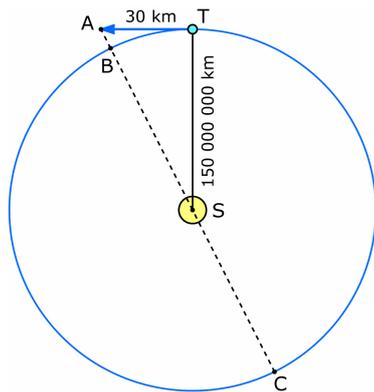
$$AB = \sqrt{150\,000\,000^2 + 900} - 150\,000\,000 \approx 0,000\,0003$$

Une autre méthode consiste à montrer que $AT^2 = AB \times AC$ (figure ci-dessus). Cela peut se faire avec la puissance d'un point par rapport à un cercle :

$$AB \times AC = (AS - r)(AS + r) = AS^2 - r^2 = AT^2$$

Si $AT^2 = AB \times AC$, alors $AB = AT^2/AC \approx AT^2/BC$.

On retrouve ainsi 3 mm.



Une méthode plus classique de calcul de la masse du Soleil est d'écrire l'égalité entre la force gravitationnelle et la force centripète :

$$G \times m_S \times m_T / d^2 = m_T \times v^2 / d$$

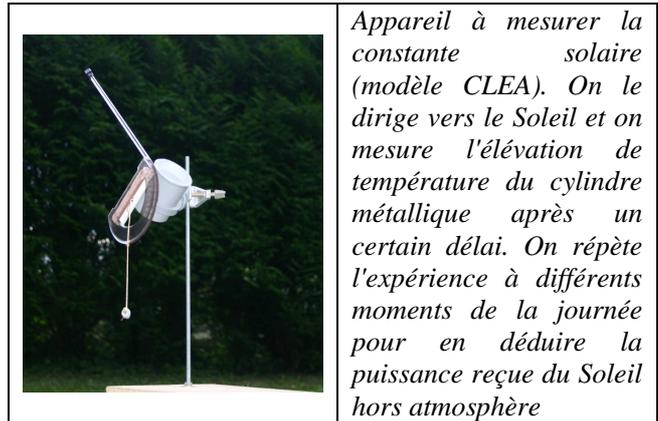
Avec $G = 6,7 \times 10^{-11}$; $d = 1,5 \times 10^{11}$; $v = 3,0 \times 10^4$ (unités SI), on trouve $m_S = d \times v^2 / G \approx 2 \times 10^{30}$ kg.

La masse volumique du Soleil

On connaît le rayon du Soleil et sa masse, on peut calculer son volume et sa masse volumique. On obtient $1,4 \text{ g/cm}^3$ (c'est entre la terre et le sable...). En réalité, le cœur du Soleil est beaucoup plus dense que les régions périphériques.

La température du Soleil

a. On mesure la puissance reçue du Soleil au niveau de la Terre. On obtient 1370 W/m^2 . C'est ce qu'on appelle la constante solaire.



Appareil à mesurer la constante solaire (modèle CLEA). On le dirige vers le Soleil et on mesure l'élévation de température du cylindre métallique après un certain délai. On répète l'expérience à différents moments de la journée pour en déduire la puissance reçue du Soleil hors atmosphère

b. Chacun des m^2 d'une sphère de 150 millions de km de rayon reçoit 1370 W . On peut calculer ainsi la puissance totale émise par le Soleil (dans toutes les directions). On trouve $4 \times 10^{26} \text{ W}$.

c. Puisque l'on connaît le rayon du Soleil, on connaît sa surface et on peut calculer la puissance rayonnée par chaque m^2 de la surface solaire.

d. La loi de Stefan relie (pour les corps noirs) la puissance émise par unité de surface à sa température : $P = \sigma T^4$ avec $\sigma = 5,67 \times 10^{-8}$. On en déduit T, environ 5800 K .

La période de rotation du Soleil

L'observation des taches solaires sur plusieurs jours permet de mesurer la période de rotation du Soleil sur lui-même vu depuis la Terre (voir page 27).

On obtient ce qu'on appelle la période de rotation synodique, observée depuis notre planète qui tourne autour du Soleil.

Pour trouver la période de rotation sidérale du Soleil, donc mesurée par rapport aux étoiles, il faut ajouter la vitesse de rotation angulaire de la Terre à celle observée du Soleil.

Si par exemple, on a trouvé une période de 30 jours pour les taches, le Soleil tourne à la vitesse de $1/30$ tour par jour par rapport à l'axe Soleil-Terre.

La vitesse angulaire de la Terre autour du Soleil est de $1/365$ tour par jour par rapport aux étoiles.

Donc la vitesse angulaire du Soleil par rapport aux étoiles est de $1/30 + 1/365$ ce qui donne environ $1/28$ tour/jour.

La période sidérale du Soleil est alors de 28 jours.

Autres données

Nous n'avons abordé ici que les données les plus simples, il en existe beaucoup d'autres. Par exemple, la composition du Soleil qui s'obtient grâce à la spectroscopie, l'âge du Soleil ou la température du cœur qui sont liés à la modélisation du fonctionnement d'une étoile... ■

L'origine de l'énergie du Soleil

Kamil Fadel, responsable du département de physique au Palais de la Découverte

Qu'est-ce qui fait briller le Soleil ? Voilà une énigme qui a donné du fil à retordre à plusieurs générations de scientifiques et a fait l'objet de violentes controverses issues d'un débat parallèle et très animé relatif à l'âge de la Terre où physiciens, géologues, paléontologues, biologistes... avaient chacun leur mot à dire et leurs arguments à avancer, mais où aucun consensus ne semblait possible. Dans ce premier volet nous effectuons un survol de cette histoire de Newton à la fin du XIX^e siècle.

De Newton à la constante solaire

Isaac Newton (1642-1727) est, semble-t-il, l'un des premiers à se demander comment les étoiles font pour briller « éternellement ». Les étoiles de manière générale et non le Soleil uniquement, puisque Newton partageait l'avis du philosophe italien Giordano Bruno (1548-1600) qui au XVI^e siècle avait émis l'idée que le Soleil n'était sans doute qu'une étoile parmi toutes celles qui peuplent le ciel, à cela près que celles-ci étaient « infiniment » plus éloignées de nous que ne l'était le Soleil.

Pour répondre à la question posée par Newton, il était indispensable de connaître au moins une chose : l'énergie libérée par le Soleil par unité de temps. Newton tente lui-même une première appréciation de cette quantité en comparant les températures affichées par deux thermomètres, l'un placé au soleil, l'autre à l'ombre. Très peu de mesures sont effectuées durant le XVIII^e siècle. Pierre Bouguer (1698-1758) dans les années 1720 et William Hyde Wollaston (1766-1828) en 1799 obtiennent des résultats, trop imprécis cependant, car la méthode mise en œuvre alors est très rudimentaire : elle consiste à comparer visuellement l'éclat d'une flamme de bougie à celui du Soleil au méridien. C'est à Claude Pouillet (1790-1868),

directeur du Conservatoire nationale des arts et métiers en 1831 que revient le mérite d'avoir su mesurer cette énergie avec une méthode fiable. Il emploie un pyrhéliomètre, appareil dont il est l'inventeur. À l'aide de cet instrument, il concentre la lumière solaire pour échauffer une masse



Fig. 1. — Pyrhéliomètre de Pouillet.

d'eau, puis en déduit le flux de chaleur solaire en

notant l'évolution de la température de l'eau au cours du temps. Après plusieurs années de mesures il arrive à la conclusion que ce flux dépend de deux facteurs, l'un variable d'un jour à l'autre, lié à la pureté de l'atmosphère, l'autre constant, qu'il baptise constante solaire. Pour ce travail, Pouillet s'appuie sur la formule suivante donnée par Bouguer :

$$Q = A a^\varepsilon$$

Q est la quantité de chaleur reçue au sol ; a est la « constante » atmosphérique ; A est la constante solaire : elle représente Q à la limite supérieure de l'atmosphère, là où l'épaisseur ε de celle-ci peut être considérée comme nulle.

Pouillet publie ses résultats en 1838 : il indique $A = 1,7633 \text{ cal/min/cm}^2$ soit 1228 W/m^2 , une puissance inférieure de 10 % seulement à la valeur moderne ($1,96 \text{ cal/min/cm}^2$ ou 1367 W/m^2). Il note alors que la quantité de chaleur qui atteint la Terre en un an aux limites de l'atmosphère permettrait de faire fondre une couche de glace d'environ 32 mètres d'épaisseur enveloppant la Terre ! La même année, John Herschel (1792-1871), dont le père William avait découvert Uranus (1781) et le rayonnement infrarouge (1800), aboutit à un résultat très proche de celui de Pouillet en employant un actinomètre de son invention.

La concordance des valeurs trouvées par Herschel et Pouillet est rassurante, mais cela ne dure pas longtemps, car on commence à remarquer que les cas où la formule de Bouguer s'applique sont finalement très rares. En effet, d'une journée à une autre, également belles, le calcul fournissait pour A des valeurs différentes. Cela conduit le physicien Jules Violle (1841-1923) à adopter une formule dans laquelle il remplace ε par une expression plus complexe qui faisait intervenir plusieurs paramètres dont la pression barométrique, le degré d'humidité

de l'air... Les mesures effectuées à l'aide de cette nouvelle formule donnent $A = 2,540 \text{ cal/min/cm}^2$, soit 30% plus élevée que la valeur admise de nos jours. Même si cette valeur était près d'une fois et demie supérieure à celle trouvée par Herschel et Pouillet, cela n'avait pas d'importance, car l'ordre de grandeur était le même. Connaissant le rayon de l'orbite terrestre, cela permettait d'estimer la puissance rayonnée par le Soleil : de l'ordre de 10^{26} cal/s , soit environ 10^{26} W .

Par ailleurs, la détermination de la valeur de la constante solaire - même approximative - allait permettre d'évaluer la température du Soleil. Du moins, c'est ce que l'on espérait. En effet, Pierre Dulong (1785-1838) et Alexis Petit (1791-1820) avaient montré en 1817 que la loi de Newton stipulant que la quantité de chaleur rayonnée par un corps était directement proportionnelle à sa température sous-estimait considérablement cette quantité. En s'appuyant sur de nombreux résultats expérimentaux, ils avaient proposé une nouvelle loi dont la validité n'était toutefois admissible, selon eux, qu'en dessous de $300 \text{ }^\circ\text{C}$ ¹. Malgré tout, par extrapolation de la loi d'émission de Dulong et Petit aux hautes températures, Pouillet et Violle estiment que la température de la surface solaire doit être située aux alentours de $1\,500 \text{ }^\circ\text{C}$. Pouillet note d'ailleurs que cette valeur est très proche de la température de fusion du fer ($1\,535 \text{ }^\circ\text{C}$). Ce point est intéressant, car jusqu'aux années 1920 on pensait généralement - comme le philosophe Anaxagore d'ailleurs - que le Soleil était essentiellement composé de fer en fusion.

La connaissance de la prodigieuse énergie rayonnée par le Soleil était un grand progrès par rapport à l'époque où Newton avait soulevé la question. Cent-cinquante ans s'étaient écoulés et l'on disposait au milieu du XIX^e siècle d'une donnée grâce à laquelle on allait pouvoir rejeter des théories et en bâtir d'autres.

Tentatives pour expliquer l'origine de l'énergie solaire

Compte tenu de l'importance de l'émission de chaleur par le Soleil, il devenait clair que celui-ci ne pouvait plus être assimilé - comme le pensaient certains - à une énorme masse chaude en train de se

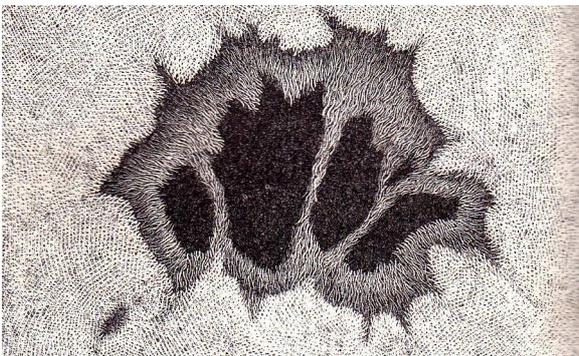
refroidir passivement. En effet, en raison des 10^{26} joules émis chaque seconde, il aurait subi en quelques milliers d'années un important refroidissement qui ne serait pas passé inaperçu. Il fallait donc raisonnablement écarter cette idée. Autre hypothèse que l'on avait avancée et qu'il fallait aussi écarter : ne se pourrait-il pas que la surface du Soleil frotte contre un frein extérieur ? Connaissant la masse et la vitesse de rotation du Soleil sur lui-même (environ 25 jours) on calcule son énergie cinétique et on montre qu'elle correspond à l'énergie que le Soleil rayonnerait en 125 ans seulement. Cette hypothèse ne tenait donc pas non plus la route. Il fallait trouver autre chose...

Robert Mayer et John James Waterstone

Le médecin allemand Julius Robert Mayer (1814-1878), connu pour avoir le premier énoncé que le travail mécanique peut se convertir en chaleur (1842), note que la quantité de chaleur dégagée en une heure par un centimètre carré de la surface solaire est de l'ordre de celle que libère la combustion d'une tonne de charbon ! Il en conclut que même si le Soleil était entièrement constitué de charbon brûlant dans du dioxygène pur, il se consumerait en 5 000 ans environ. Or, non seulement l'histoire ne révélait aucun témoignage relatif à une quelconque baisse de l'activité solaire, mais de plus on estimait que le Soleil était bien plus âgé que cela. Mayer est ainsi en mesure d'affirmer que le Soleil ne tire pas son énergie de réactions chimiques : aucune ne pourrait rendre compte à la fois de la longévité du Soleil et du taux auquel il rayonne de l'énergie. Le médecin allemand est alors amené à penser que le Soleil se renouvelle perpétuellement... mais comment ? Mayer croit trouver la solution de l'énigme en s'inspirant d'une idée avancée par l'auteur de l'Histoire naturelle, Georges-Louis Leclerc Comte de Buffon (1707-1788). Ce dernier croyait que les comètes sont des réservoirs de chaleur qui se vident sur le Soleil. Kepler n'avait-il pas dit « il y a davantage de comètes dans les cieux qu'il n'y a de poissons dans les océans » ? Pour Mayer qui avait déterminé l'équivalent mécanique de l'unité de chaleur et avait énoncé le principe de conservation de l'énergie, l'idée de Buffon était séduisante : traduite en langage moderne, elle signifiait qu'en tombant sur le Soleil l'énergie cinétique des comètes se transformait en chaleur, la chute d'une certaine quantité de matière délivrant au Soleil une énergie des milliers de fois supérieure à celle provenant de la combustion d'une masse équivalente de

¹ La relation donnant l'énergie rayonnée par unité de temps en fonction de la température, connue sous le nom de la loi de Stefan ne sera mise en évidence qu'en 1879. Pour aboutir à cette loi, Joseph Stefan (1835-1893) s'appuie d'ailleurs sur les résultats expérimentaux de Dulong et Petit.

charbon² ! Ce mécanisme, proposé par Mayer en 1846, était donc remarquablement efficace, d'autant qu'outre les comètes, il y avait les astéroïdes, les météorites, et sans doute beaucoup d'autres petits objets et corpuscules. En somme, pour Mayer le moteur solaire était la gravitation, et c'était finalement l'énergie gravitationnelle - potentielle dirions-nous aujourd'hui³ - qui se convertissait en chaleur. Par ailleurs, cette théorie permettait de rendre compte de manière simple de l'existence des taches solaires, lesquelles, pensait Mayer, correspondent aux points d'impact des gros bolides cosmiques. Bien que séduisante, cette théorie n'est que tièdement accueillie et Mayer est ainsi obligé de publier à compte d'auteur une version plus complète de son mémoire paru dans les Comptes rendus de l'Académie des sciences. En 1848 il souffre des troubles politiques et perd deux de ses enfants, puis des querelles de priorités au sujet du premier principe de la thermodynamique l'opposent à James Prescott Joule (1818-1889)... Déprimé, Mayer finit par se défenestrer du troisième étage en 1850 : il reste estropié jusqu'à la fin de sa vie et disparaît de la scène scientifique durant 10 ans, jusqu'à ce que William Thomson (1824-1907) - futur Lord Kelvin (1882) - reconnaisse la pertinence de sa thèse.



Ces taches solaires (Nasmyth XIX^e) étaient pour Mayer des points d'impacts de comètes chutant sur le Soleil.

En réalité, indépendamment de Mayer, l'hydrographe écossais John James Waterstone (1811-1883)⁴ était arrivé en 1845 à la même

² En effet l'énergie cinétique d'un kilogramme de matière tombant de l'infini sur le Soleil est de l'ordre de 10^{11} J et la combustion d'un kilogramme de charbon libre de l'ordre de 10^7 J

³ La notion d'énergie potentielle n'avait pas encore été introduite en physique : elle apparaît en 1853 sous la plume de William Rankine (1820-1872).

⁴ Waterston est connu comme le précurseur de J. C. Maxwell dans l'élaboration de la théorie cinétique des gaz. Malheureusement, ses travaux qui datent de 1845 n'ont pas retenu l'attention de la Royal Society qui les jugea inintéressants.

conclusion que le médecin allemand : l'énergie chimique étant insuffisante pour entretenir l'activité du Soleil, ce dernier doit nécessairement s'alimenter en énergie gravitationnelle. Toutefois, selon Waterstone, l'énergie gravitationnelle peut se transformer en chaleur de deux manières différentes : par la chute de corps étrangers comme le suppose Mayer ou, comme le pense Waterstone, grâce à la chute de la matière solaire elle-même, c'est-à-dire grâce à une contraction, un effondrement. Selon Waterstone, une contraction de 280 mètres par an permettrait de rendre compte du flux de l'énergie solaire. Au contraire, si l'origine de l'énergie rayonnée par le Soleil provient de la chute de météorites, le diamètre solaire devrait augmenter de 10 mètres par an, trop faible pour être observé.

William Thomson et Hermann Helmholtz

Pas plus que Mayer, Waterstone n'est pris au sérieux et son article (1845) est rejeté. Quelques années plus tard, en 1853, il annonce son hypothèse de l'effondrement lors d'une réunion de la British Association à laquelle assistait le fameux Hermann von Helmholtz (1821-1894). Ce dernier devient aussitôt un fervent défenseur et le principal promoteur de cette thèse. À cette époque, Thomson cherchait à déterminer l'âge du Soleil. Dans cet objectif, il avait été amené à s'intéresser lui aussi à l'origine de l'énergie solaire. En 1854, il prend connaissance de l'hypothèse cométaire de Mayer. Aussitôt séduit par cette explication, Thomson en fait la promotion pendant quelques temps... puis l'abandonne progressivement à partir du début des années 1860. En effet, il fallait se rendre à l'évidence, la théorie de Mayer était intenable, et cela pour plusieurs raisons.

Tout d'abord parce que le calcul effectué par Thomson montre que la masse de matière qui devait chuter annuellement sur le Soleil pour rendre compte de l'énergie rayonnée par ce dernier est égale au quinze millionième ($1/15\ 000\ 000$) de sa propre masse. Autrement dit, en 3 000 ans une masse de matière équivalente à $1/5\ 000$ de la masse solaire - soit plus de soixante globes terrestres - aurait dû tomber sur le Soleil. Or, avant sa chute sur le Soleil, cette masse de matière devait nécessairement être située à l'intérieur de l'orbite terrestre, car dans le cas contraire l'augmentation de la masse à l'intérieur de celle-ci depuis l'époque des Grecs aurait inévitablement entraîné des perturbations du mouvement de la Terre visibles et mesurables. En particulier, la durée de l'année

aurait été modifiée, ce qui n'était pas le cas. D'un autre côté, dans la sphère centrée sur le Soleil et de rayon égal à celui de l'orbite terrestre il n'y avait aucune trace de toute cette matière hypothétique nécessaire à l'hypothèse cométaire. Le même raisonnement appliqué aux orbites de Vénus et Mercure indiquait que les supposées comètes devaient toutes provenir de l'intérieur de l'orbite de Mercure, ce qui n'était pas raisonnable, bien que l'étude du mouvement de Mercure ait conduit Urbain Le Verrier (1811-1877) à postuler en 1860 l'existence d'une masse – trop petite cependant pour l'hypothèse cométaire - située entre le Soleil et la planète : l'hypothétique planète Vulcain.

Il y avait au moins une deuxième raison pour laquelle il fallait abandonner l'hypothèse cométaire : on avait montré que l'augmentation de la masse du Soleil combinée à la croissance de son diamètre (laquelle, d'après le calcul, devait s'effectuer à raison de 10 mètres par an environ), devait provoquer un ralentissement de la vitesse de rotation du Soleil sur lui-même, ralentissement que l'on avait évalué à un peu plus de 2 heures par siècle. Or, l'observation du déplacement des taches solaires n'avait révélé aucun ralentissement...

Après l'abandon définitif de l'hypothèse cométaire de Mayer en 1862, Thomson adopte la théorie de la contraction qu'approuvait également Helmholtz depuis 1853. L'idée de la contraction avait tout de suite séduit l'Allemand, car ce dernier défendait l'hypothèse de la « nébuleuse solaire » d'Emmanuel Kant (1724-1804) et de Pierre-Simon de Laplace (1749-1827), hypothèse selon laquelle le système solaire se serait formé par contraction d'une nébuleuse primitive. Il était donc tout à fait raisonnable, et de surcroît économique pour la pensée, d'admettre que ce mouvement se poursuivait encore de nos jours, et que le Soleil s'effondrait lentement sur lui-même.

L'effondrement solaire selon Helmholtz et Thomson

Les calculs effectués par Helmholtz et Thomson montrent qu'au rythme auquel le Soleil rayonne de l'énergie, il devrait voir sa température baisser de 1,4 °C par an, cela en admettant que sa chaleur massique est proche de celle de l'eau... et il y avait de bonnes raisons pour le penser. En effet, les observations spectroscopiques semblaient indiquer que le Soleil est formé d'un mélange fondu de fer, de manganèse, de sodium... Or, les chaleurs massiques de tous ces métaux sont de l'ordre de celle de l'eau. Ce refroidissement devait à son tour

provoquer une contraction du diamètre solaire de 1 % en 860 ans⁵, une diminution qui ne serait pas passée inaperçue si elle s'était vraiment produite. D'un autre côté, une contraction correspondant à une diminution d'énergie potentielle, cela devait augmenter la température solaire et donc entraîner... une dilatation. Helmholtz montre alors que si le diamètre du Soleil diminue d'un millième (soit de 1 400 km), la quantité de chaleur produite assurerait une émission de chaleur (au taux actuel) pendant plus de 20 000 ans. Autrement dit, au taux actuel d'émission, le diamètre solaire devrait diminuer tous les ans d'un vingt-millionième, soit de 700 m par an environ, soit du même ordre de grandeur que ce qu'avait trouvé Waterstone (280 m). Au milieu des années 1860, l'hypothèse de l'effondrement gravitationnel du Soleil comme origine de l'énergie rayonnée tenait parfaitement la route, sous réserve d'être compatible avec l'âge du système solaire, c'est-à-dire à condition que ce dernier ne soit pas trop vieux.

Thomson imagine alors l'immense nébuleuse primitive à l'origine du système solaire et montre que l'énergie gravitationnelle libérée sous forme de chaleur lors de sa contraction a sans doute été 100 à 500 millions de fois supérieure à celle que le Soleil libère en un an. Probablement, dit alors Thomson, le Soleil est vieux de 100 à 500 millions d'années maximum. Cela fait, il estime alors l'âge de la Terre en considérant comme un fait acquis depuis Descartes (1596-1650) et Leibniz (1646-1716) qu'à sa formation la Terre était une boule de matière en fusion à près de 4 000 °C qui n'a cessé de se refroidir depuis. Sachant qu'aujourd'hui la température de la Terre n'est pas uniforme mais augmente avec la profondeur à raison d'environ 1 °C en moyenne tous les 30 mètres, Thomson s'appuie sur la loi de diffusion de la chaleur établie par Joseph Fourier (1768-1830) pour estimer à travers le calcul l'ordre de grandeur du temps écoulé depuis la formation de la Terre : il trouve 200 millions d'années. Ce résultat était parfaitement compatible avec l'âge qu'il avait trouvé pour le Soleil, mais était en désaccord avec l'âge bien plus important que les naturalistes attribuaient à la Terre... d'autant qu'au cours des années 1890 Thomson revoit son estimation à la baisse lorsqu'il apprend de la part des géologues que certains basaltes fondent dès 1 200 °C. Il pose alors cette valeur (au lieu des 4 000 °C) comme température de la Terre primitive en fusion, si bien que cela réduit considérablement

⁵ En admettant que le coefficient d'expansion de la matière solaire est de l'ordre de ceux des matériaux terrestres.

la durée nécessaire à son refroidissement et donc aussi son âge que Thomson évalue désormais à 20 millions d'années.

Les naturalistes entrent en scène

Les géologues, paléontologues et biologistes avaient leurs propres estimations de l'âge de la Terre. Elles s'appuyaient sur des observations effectuées sur le terrain : épaisseurs de couches sédimentaires, hauteurs de montagnes, profondeurs de canyons, salinité de l'eau des océans, érosions de côtes, études de fossiles... Leurs calculs étaient toujours très simples. Par exemple, on évaluait tout d'abord le taux d'accumulation d'un certain sédiment puis, connaissant l'épaisseur de la couche sédimentaire, on en déduisait le temps nécessaire à sa formation par une simple règle de trois. Particulièrement intéressé par la géologie, Charles Darwin (1809-1882) était enclin à penser comme la plupart de ses collègues géologues que la Terre est bien plus vieille que ce que prétend Thomson, son âge frôlant sans doute le milliard d'années. En particulier, en étudiant l'érosion par la mer de la formation calcaire du Weald au sud-est de la Grande Bretagne, un processus que Darwin estime s'effectuer à raison de 2,5 cm par siècle, il arrive à la conclusion que cela fait 300 millions d'années que l'érosion agit sur la formation. Le processus géologique nécessaire à la constitution d'un tel dépôt crayeux étant extrêmement long, cela signifiait que le dépôt lui-même était beaucoup plus âgé que cela, ce qui amenait l'âge de la Terre à au moins un à deux milliards d'années. Signalons qu'un âge aussi important avait déjà été avancé au début du XVIII^e par un personnage excentrique, Benoist de Maillet (1656-1738), diplomate français et naturaliste amateur durant ses temps libres (voir encadré). En outre, pour Darwin, l'évolution des espèces est un processus extrêmement lent : 100 millions d'années lui paraissaient bien peu pour passer des premiers unicellulaires à l'homme. Cependant, tout le monde était conscient que les estimations des naturalistes reposaient généralement en premier lieu sur la délicate évaluation d'un taux d'érosion, de déposition... qu'il fallait ensuite extrapoler, moyennant certaines hypothèses simplificatrices. Or, ces taux sont très difficiles à évaluer d'autant qu'ils varient considérablement d'un lieu géographique à un autre. En raison de ces incertitudes, les estimations étaient peu fiables. Une fois cela admis, face à l'autorité d'un Thomson qui employait un arsenal physico-mathématique rigoureux et irréprochable, les naturalistes cèdent et ajustent leurs calculs afin que leurs estimations de

l'âge de la Terre correspondent aux dires de Thomson : quelques dizaines de millions d'années, voire cent millions, mais pas davantage. Darwin lui-même tente de revoir dans les éditions ultérieures de l'Origine des espèces les mécanismes de sélection afin d'accélérer le processus d'évolution. Cependant, progressivement, des voix s'élèvent contre Thomson, devenu Lord Kelvin depuis 1882. On lui reproche par exemple d'avoir admis que le transport de chaleur dans la Terre ne met en jeu aucun mouvement de convection, et ne s'effectue que par diffusion. Puis, en 1899, Thomas Chamberlin (1843-1928), professeur réputé de géologie à l'université de Chicago, fait remarquer que l'arsenal physico-mathématique du physicien a beau être irréprochable, ses hypothèses de base sont discutables et loin d'être des certitudes. En particulier, dit Chamberlin, il n'existe aucune raison sérieuse de penser que la Terre était une boule en fusion à sa formation. De plus, mettant en avant le fait que la science ne connaît que très peu de chose sur les atomes, Chamberlin annonce qu'il se peut que les atomes situés dans des conditions extrêmes dans les profondeurs de la Terre subissent des réactions libérant de la chaleur. Dans ce cas, dit-il, l'hypothèse de Thomson selon laquelle la Terre ne fait que se refroidir passivement serait invalidée et l'âge de la Terre largement sous-estimée. Intuition prémonitoire de Chamberlin... car la découverte de la radioactivité à la fin du XIX^e siècle allait lui donner raison. L'atome, ou plutôt le noyau atomique, allait bientôt non seulement permettre de déterminer l'âge de la Terre de manière indiscutable, mais il allait aussi apporter la clé de l'énigme relative à l'origine de l'énergie des étoiles.

De Maillet pensait comme René Descartes (1596-1650) que les planètes sont des étoiles éteintes. Selon lui, la Terre finira un jour par s'embraser et redevenir une étoile après l'assèchement complet des océans par évaporation. Le cycle étoile/planète devait selon lui durer 5 milliards d'années réparties également entre les deux phases. De Maillet pensait que jadis le niveau des mers et océans était plus élevé que les plus hautes montagnes. Ces dernières émergent, disait-il, à mesure que le niveau baisse par évaporation. Comme preuve il avance le fait que dans certains anciens ports comme ceux d'Alexandrie et de Carthage, le niveau d'eau a clairement baissé depuis l'époque des Grecs. Il estime ainsi la vitesse de retrait de la mer à environ 1 mètre tous les mille ans. Sachant qu'il existe à 2 000 mètres d'altitude des hameaux qui étaient autrefois, pense-t-il, en bord de mer, cela prouve que l'homme existe depuis au moins 2 millions d'années. La Terre devant être facilement mille fois plus âgée que l'homme, elle est vieille d'au moins 2 milliards d'années.

AVEC NOS ÉLÈVES

Une étude du Soleil au lycée

Bertrand Stortz, lycée Jean Moulin, Béziers

Le club d'astronomie du lycée Jean Moulin est équipé du matériel mis à sa disposition pour une période de 3 ans dans le cadre de l'opération « Science à l'École » en particulier d'un télescope et d'un appareil de photo numérique (APN). L'article qui suit décrit des manipulations réalisées par les élèves avec ce matériel.

Depuis septembre 2010, un atelier scientifique s'est mis en place au lycée Jean Moulin de Béziers (Hérault) autour de l'astronomie suite à la dotation par l'opération « Sciences à l'École¹ » d'un télescope Schmidt-Cassegrain de 8 pouces motorisé, d'une caméra CCD et d'un filtre solaire pleine ouverture.

Un groupe d'élèves motivés se retrouve donc 2 heures par semaine en classe pour découvrir l'astronomie. On organise également environ une fois par mois quand le temps le permet une soirée d'observation dans l'enceinte de l'établissement.

Nous essayons de faire découvrir un maximum de choses dans le domaine de l'astronomie pendant les séances nocturnes et diurnes ; dans cet article, c'est le travail réalisé autour du Soleil au cours de ces trois années qui vous est présenté, avec des lycéens mais également auprès de classes de primaire.

Pas si gros que ça en apparence...

Lorsque l'on demande aux élèves de tout âge de représenter le Soleil, c'est en général une forme ronde dardée de rayons en forme étoilée qu'ils nous proposent. C'est le passage de la lumière à travers l'atmosphère terrestre et le cristallin de l'œil qui est responsable de cette « fausse » image du Soleil.

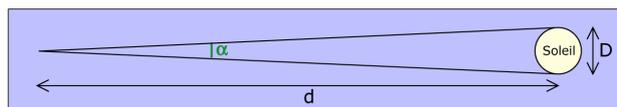


À gauche, vue du Soleil à l'APN sans filtre. À droite, à travers le filtre pleine ouverture, on voit principalement le reflet du photographe.

Aussi lors de notre première observation diurne, les élèves commencent toujours par passer les uns après les autres sous le filtre solaire en direction du

Soleil. Les premiers commentaires sont souvent : « Mais il est où le Soleil ? Je ne vois que mon reflet... ». Puis une petite boule orange attire leur attention, ils viennent de voir pour la première fois, la forme et la taille apparente du Soleil.

Depuis la Terre, un objet n'est pas défini par son diamètre en mètres mais par son diamètre apparent, c'est-à-dire l'angle sous lequel on le voit. En effet, le Soleil a beau avoir un diamètre D de près de 1,392 millions de kilomètres, il est situé à une distance d de 149,6 millions de kilomètres. Son diamètre apparent α est tel que : $\tan \alpha = D/d$



On en déduit que le diamètre apparent du Soleil est $\alpha = 0,0093$ rad soit $0,53^\circ$

Si cette donnée numérique n'a pas de signification pour les élèves, la comparaison avec celui de la Lune en a une. Car, à la question « de la Lune et du Soleil qui est le plus gros ? », la réponse est sans appel : le Soleil bien sûr...



Les deux photos ci-contre ont été réalisées le même jour dans les mêmes conditions de grossissement : zoom optique $\times 2$ et zoom numérique $\times 4$. Comparer les tailles vous verrez que les deux astres ont quasiment le même diamètre apparent.

Pourtant les diamètres apparents sont sensiblement les mêmes, c'est d'ailleurs l'origine de la possibilité des éclipses totales et annulaires de Soleil.

¹ www.sciencesalecole.org

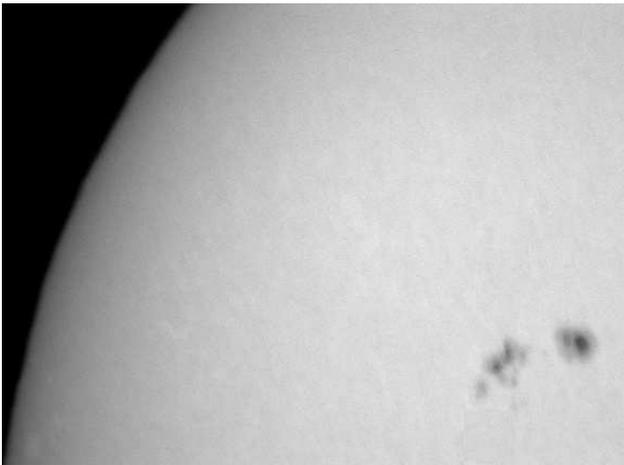


Tiens, des taches noires....

Lorsque leurs yeux s'habituent derrière le filtre, les élèves s'interrogent sur la présence de poussières sur le filtre ou de points noirs sur le Soleil et, dès lors qu'ils s'aperçoivent que ça bouge avec le Soleil, ils observent les fameuses taches solaires observées par Galilée en 1610. Les clichés pris à travers le filtre en zoomant permettent de figer l'activité du Soleil. Pour avoir un aperçu plus intéressant, on passe derrière le télescope.



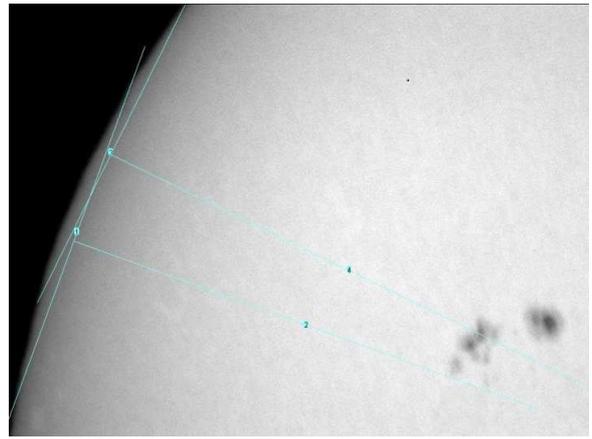
Le Soleil à l'APN au foyer du C8 en mars 2012.



Le Soleil avec une caméra CCD barlow x2 au foyer du C8 en mars 2010.

Sur le cliché de mars 2010, les élèves ont voulu déterminer la taille de la tache solaire la plus grosse. Le problème qu'ils ont dû résoudre est celui de l'échelle. Comment faire pour y parvenir ? Nous avons donc fait, comme les premiers astronomes, appel à la géométrie...

La médiatrice d'une corde passe par le centre du cercle ; si on en trace deux, on obtient la position du centre du Soleil ; connaissant le rayon du Soleil, on dispose d'un repère d'échelle. Il ne reste plus qu'à utiliser la règle de trois...



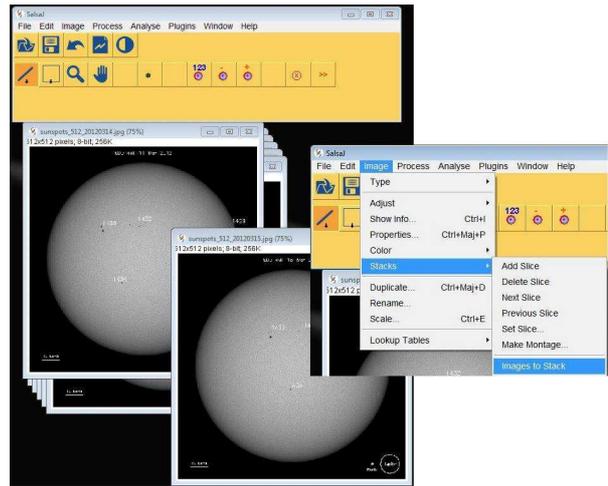
Le rayon du soleil étant de 696 000 km environ (13 cm ici), on trouve que la taille de la tache (5 mm ici) est de 26 800 km soit 2,5 fois la taille de la Terre...

Les taches sont la conséquence de l'activité magnétique du Soleil, on peut donc suivre le cycle solaire mais cela n'a pas été entrepris au niveau de nos travaux. Mais ces taches ont permis de mettre en évidence une autre propriété du Soleil.

Et le Soleil, il tourne lui aussi...

En effet, certains élèves se sont interrogés sur le fait de savoir si le Soleil avait lui aussi comme la Terre, une rotation autour de son axe. Malheureusement, les contraintes matérielles et météo ne nous ont pas permis de suivre l'évolution des taches de manière rigoureuse.

Toutefois, sur Internet, la NASA via le satellite SOHO nous offre la possibilité de suivre le Soleil une fois par jour en réalisant depuis le 20 janvier 2006 un cliché par jour².



Copies d'écran du logiciel Salsa que nous avons utilisé.

² SoHO, Solar and Heliospheric Observatory, conçu par l'ESA et la NASA, a pour objectif d'observer le Soleil en permanence.

Images sur <http://sohowww.nascom.nasa.gov/sunspots/>

Nous avons ainsi téléchargé les trois premiers mois de l'année 2012, et en utilisant le logiciel SalsaJ développé par Eu-HOU³, nous avons réalisé une vidéo visible sur Internet⁴ où l'on peut suivre la rotation du Soleil sur trois mois.

Pour réaliser cette vidéo, voilà comment procéder :

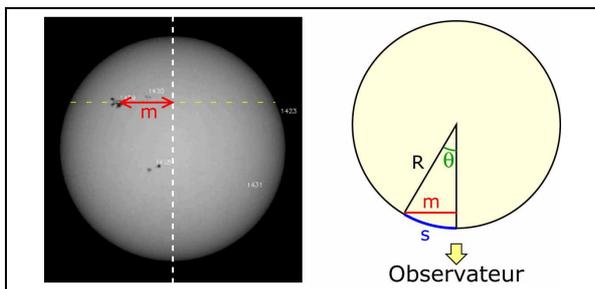
1. ouvrir les images en sélectionnant toutes.
2. il faut à présent les empiler avec la fonction image → Stacks → images to stack.
3. enfin dans le menu images → stacks → animation options en réglant 5 images par secondes on arrive au résultat.

Remarque : les images de SOHO sont corrigées de l'inclinaison de l'axe du Soleil.

À partir du stacking réalisé (empilement d'images), on peut étudier la rotation du Soleil en fonction de la latitude par rapport à l'équateur solaire.

Nous avons donc encore fait un peu de géométrie afin de tenir compte du fait que l'image est plane alors que le Soleil est quasiment sphérique. À l'aide de SalsaJ, nous avons défini une échelle en utilisant celle des images de SOHO.

Sur les images on réalise la mesure m donnant la position de la tache par rapport au diamètre vertical de la photo et à l'équateur. On en déduit avec la trigonométrie, la latitude et la longitude de la tache.



Puis sachant que l'abscisse curviligne s le long d'un cercle est proportionnelle à l'angle au centre θ tel que $s = R \times \theta$, on détermine la distance parcourue par la tache solaire par jour en fonction de sa latitude.

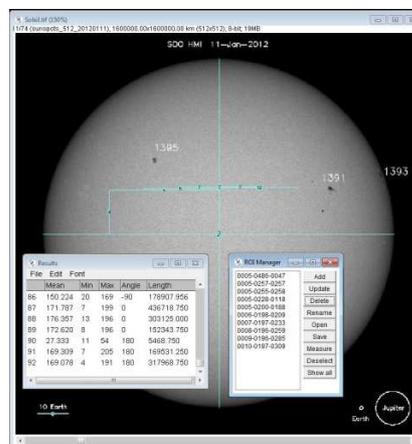
N° tache	1391				
« distance à l'axe »	date	angle longitude	Latitude moyenne	angle par jour	période rotation
-436719	05/01/2012	-38.84	14.89		
-303125	06/01/2012	-25.81	14.89	13.04	27.6
-152354	07/01/2012	-12.64	14.89	13.17	27.3
5469	08/01/2012	0.45	14.89	13.09	27.5
169531	09/01/2012	14.09	14.89	13.64	26.4
317969	10/01/2012	27.17	14.89	13.08	27.5
447657	11/01/2012	40.01	14.89	12.84	28.0
				Moyenne	27.4

³ www.fr.euhou.net.

⁴ http://www.dailymotion.com/video/xqqhnp_rotation-du-soleil-2012_webcam#.UcS2EpwQevk

Nous avons procédé ainsi avec différentes taches solaires à différentes latitudes et obtenu les résultats suivants :

N° tache	1389	1391	1395	1396	1416	1419	1428
latitude	-16,0	14,9	25,2	30,8	-10,9	34,8	9,6
période de rotation	28,5	27,4	29,6	32,5	28,5	32,7	27,5



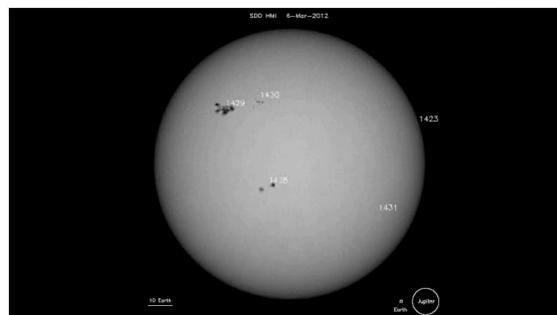
Étude de la rotation au niveau de la tache 1391

On retrouve ici des valeurs assez proches de celle que l'on peut trouver sur le Net. En faisant une extrapolation de ces résultats, on retrouve que la période de rotation du Soleil⁵ au niveau de l'équateur est de l'ordre de 25 jours.

La surface du Soleil présente donc des périodes de rotation différentes, elle n'est donc pas solide comme la Terre mais gazeuse.

Pour conclure

Voici donc les résultats du travail réalisé autour du Soleil dans le cadre du Club Astronomie du Lycée Jean Moulin de Béziers. Cette année, nous nous sommes dotés, grâce à la participation du Foyer Socio-Éducatif, d'une lunette PST Coronado qui nous a permis de voir les magnifiques protubérances solaires de quelques milliers de kilomètres au-delà de la surface du Soleil. Cependant nous n'avons pas encore réussi à réaliser des clichés, ce sera l'un des objectifs des années à venir.



Une des images de SOHO que l'on trouve dans la vidéo

⁵ On mesure ici la période de rotation synodique du Soleil vu par SOHO positionné entre la Terre et le Soleil. ■

La maquette Tournesol ou comment comprendre et visualiser les rotations du Soleil et de la Terre

Ph. Merlin Observatoire de Lyon

Regarder le Soleil c'est bien, en faire des images, aussi, mais pour utiliser pleinement les observations et les documents obtenus, il faut connaître les positions et orientations respectives du Soleil et la Terre lors des acquisitions afin de redresser les images pour qu'elles présentent toutes la même orientation. Or la rotation du Soleil sur lui-même, la rotation de la Terre sur elle-même et sa translation annuelle sur son orbite compliquent sérieusement la compréhension des orientations relatives. Une maquette et quelques explications concrétisées par son maniement, permettront d'en comprendre les rouages. On pourra appliquer aux observations les transformations nécessaires qui les rendront homogènes pour leur exploitation.

Si l'on reprend la citation célèbre, peut être prononcée en aparté par Galilée devant les juges de l'Inquisition, « Et pourtant elle se meut », on pourrait l'élargir et dire « Ils se meuvent ». En effet, dès les premières observations du Soleil à la lunette, par Galilée et ses contemporains, le mouvement de rotation du Soleil sur lui-même, même s'il fut contesté au début, est apparu clairement grâce à l'observation des taches.

Ainsi pour se repérer sur le Soleil, il faut connaître la rotation du Soleil, mais de plus connaître la position de la Terre sur son orbite car elle change l'angle de vision que l'on a du Soleil, et entre autres, celui de la direction de son axe de rotation qui conditionne les positions des détails que nous pouvons voir à sa surface.

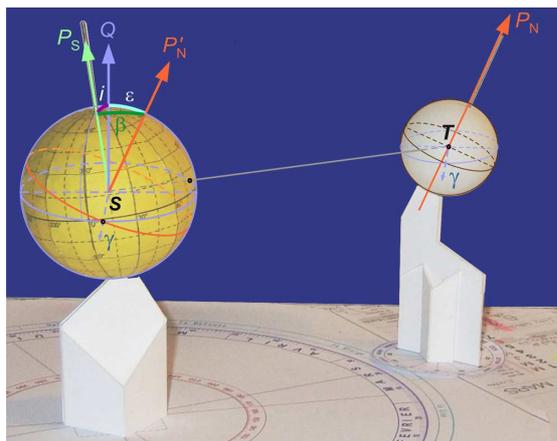


Fig.1. Les différents axes du système Soleil Terre. P_N et P'_N représentent la direction du pôle Nord terrestre, P_S le pôle Nord du Soleil et Q le pôle Nord de l'écliptique. SQ fait un angle de $7,25^\circ$ avec SP_S et de $23,44^\circ$ avec SP'_N . L'angle $P_S P'_N$ mesure $26,15^\circ$.

L'observation du Soleil avec les quelques précautions habituelles absolument nécessaires est une pratique

courante qui a beaucoup d'intérêt par la découverte et le suivi des structures essentiellement changeantes à la surface et sur le bord.

En faire des images est facile avec les appareils actuels disponibles. Un bon appareil numérique avec un zoom conséquent, permet de détecter la présence des plus grandes taches.

Relier diverses images échelonnées dans le temps demande quelques précautions. Il faut, lors de la prise des images, que l'orientation de l'appareil soit connue. Habituellement, sur un instrument équatorial, on règle l'appareil pour que les images soient orientées Nord-Sud et Est-Ouest²¹. L'orientation horizontale-verticale demande des corrections plus complexes qui sont fonction de l'heure et du lieu, à moins d'en rester à la photo artistique. Il serait quand même possible d'orienter ses images en se rattachant à d'autres images obtenues aux mêmes moments et d'orientation connue²².

Lorsque toutes nos images sont orientées, on s'aperçoit que le Soleil ne se présente pas sous le même aspect tout au long de l'année. La cause en est la variation apparente de l'inclinaison de son axe de rotation par rapport à notre axe polaire. Il faudrait pouvoir tracer l'axe polaire et l'équateur du Soleil et redresser de façon homogène les images en mettant l'axe de

²¹ Le côté est-ouest doit être parallèle au plan de l'équateur. Le côté de la photo que l'on appelle nord-sud ici est perpendiculaire au côté est-ouest. Il correspond à la projection orthogonale de l'axe de la Terre sur le plan de la photo (un plan perpendiculaire à la direction Terre Soleil).

²² Pour orienter une photo quand on n'a pas de monture équatoriale, une méthode consiste à prendre une première photo cadrée suivie d'une deuxième une minute plus tard sans avoir bougé l'appareil. Le mouvement apparent du centre du Soleil d'une photo à l'autre est parallèle à l'équateur.

rotation du Soleil dans le plan de l'image, parallèle à un côté de celle-ci et l'équateur solaire parallèle à l'autre côté de l'image. La maquette proposée ici permet de comprendre et de résoudre le problème.

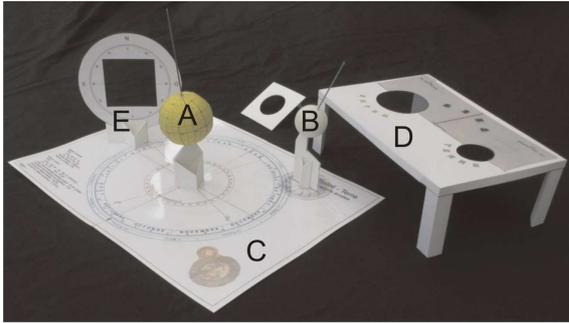


Fig.2. Les éléments de la maquette.

Le système géométrique

La géométrie du système est simple (figures 1 et 3) : un plan de référence, l'écliptique, deux axes de rotation, celui du Soleil et celui de la Terre, et un axe d'observation dans le plan de l'écliptique, la direction Terre Soleil. L'axe de rotation du Soleil est fixe par rapport au repère des étoiles et l'axe de la Terre est affecté par la précession. Mais la lenteur de la variation ne gêne guère pour la compréhension annuelle du phénomène.

Le côté géométrique du repérage est développé dans des documents donnés en référence [2] et [3].

L'observateur sur la Terre en T (fig. 3), dans un repère géocentrique et équatorial (axe Nord-Sud et Est-Ouest le long de l'équateur) voit l'axe de rotation solaire suivant un angle, celui des deux plans $P_N T S P'_N$ (en jaune) et $P'_s T S P_s$ (en vert).

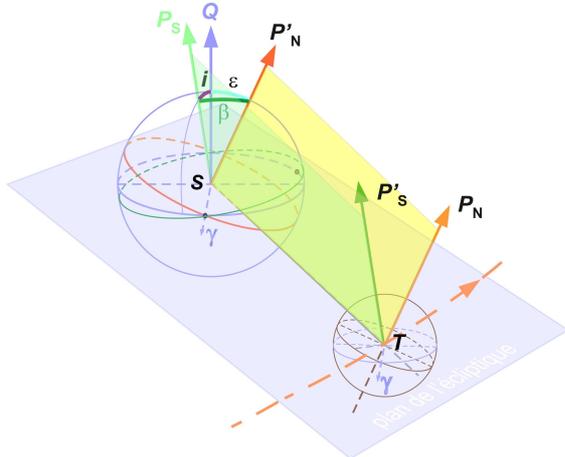


Fig.3. Géométrie du système. L'angle observé de l'inclinaison de l'axe de rotation du Soleil est l'angle entre les deux plans vert et orange.

En effet, la photo est faite dans un plan perpendiculaire à (TS). Si le côté horizontal de la photo est bien parallèle au plan de l'équateur, son côté vertical est situé dans le plan jaune et l'angle dont on doit faire tourner le Soleil pour voir son axe vertical est l'angle entre les plans jaune et vert. Au cours de l'année, l'observateur voit le Soleil et son axe de rotation SP_s et

son équateur osciller d'est en ouest et d'avant en arrière. L'utilisation d'une maquette permettra de voir les éléments, leur évolution, de saisir, de comprendre le processus et d'estimer les variations d'angle.

Description brève de la maquette

La description complète et détaillée ainsi que sa fabrication se trouvent dans le document [1].

L'ensemble comporte trois parties (figure 2):

1 - Les maquettes du Soleil (A) et de la Terre (B) sur leurs socles avec la bonne inclinaison de leur axe de rotation. Les centres des deux sphères sont à la même hauteur et concrétisent le plan de l'écliptique parallèle au plateau support (C).

2 - Un plateau support (C) parallèle au plan de l'écliptique avec l'orbite de la Terre graduée en calendrier et en longitude héliocentrique pour positionner au cours de l'année la Terre par rapport au Soleil. Des repères permettent d'orienter correctement l'axe solaire.

3 - Des constructions complémentaires qui permettent pour l'une de visualiser l'angle apparent des axes de rotation vu de la Terre (la table écliptique D) pour l'autre la vision de l'orientation du Soleil dans une visée équatoriale (le cadre de visée E).



Fig.4. Le plan équatorial

Pour faciliter la représentation du plan équatorial et son orientation par rapport à l'écliptique, une partie supplémentaire peut se construire (figure 4). Elle se clipse sur le socle de la Terre et visualise son plan équatorial. Elle ne peut pas être utilisée avec la table écliptique.

Positionnement du Soleil et de la Terre

Le Soleil se positionne et s'oriente sans ambiguïté au centre du plateau support, la projection de son axe de rotation sur l'écliptique étant tracé.

Pour positionner la Terre à une date précise, le socle de celle-ci est constitué d'un cercle gradué avec un calendrier et se place tangentiellement à l'extérieur du cercle calendrier du plateau support.

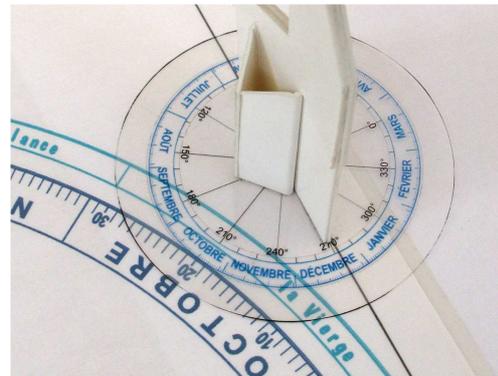


Fig.5. Positionnement de la Terre le 20 octobre.

Il suffit de faire coïncider (fig. 5) les dates des deux calendriers pour que la Terre soit correctement orientée. Le pôle Nord est alors dirigé vers la longitude héliocentrique 90° .

La maquette à ce stade permet de retrouver toutes les configurations Terre Soleil pour l'explication des mouvements et des saisons : variation de la hauteur du Soleil, éclaircissement des pôles, durées des jours et des nuits, etc.

En regardant à différentes dates de l'année les deux axes de rotation par alignement comme sur la figure 6, on voit avec la succession des mois, les variations de l'ouverture de l'angle vu par l'observateur terres-tre entre l'axe solaire et l'axe équatorial terrestre.

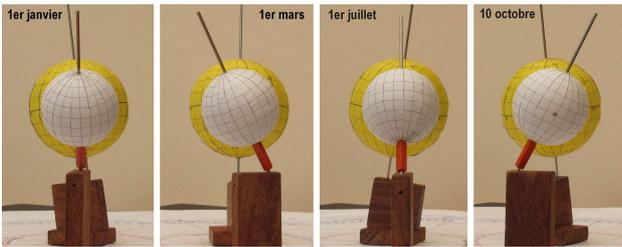


Fig.6. Changement de la vision de l'angle des deux axes de rotation en fonction de la date.

La vision du Soleil

L'axe solaire est incliné de $7,25^\circ$ sur la perpendiculaire à l'écliptique et de $26,15^\circ$ par rapport à l'axe polaire terrestre (fig. 1).

L'observateur terrestre est supposé en position géocentrique car avec la maquette, la vision se fait par alignement des deux globes avec son œil (figures 6 et 8). Au cours d'une révolution annuelle terrestre, il va tourner autour du Soleil et voir varier par rapport à son repère équatorial l'inclinaison apparente de l'axe solaire. Il en résulte que l'angle observé entre la direction polaire terrestre et la direction de l'axe solaire (angle entre les deux plans vert et jaune de la fig. 3 oscille entre deux valeurs extrêmes : $\pm 26,15^\circ$.

Les variations de cet angle peuvent être visualisées avec la maquette de deux manières :

1. en se servant de la table écliptique (fig. 7) et de ses deux plans transparents qui passent par l'axe Terre-Soleil, et contenant pour l'un l'axe de rotation du Soleil, pour l'autre l'axe de rotation de la Terre.

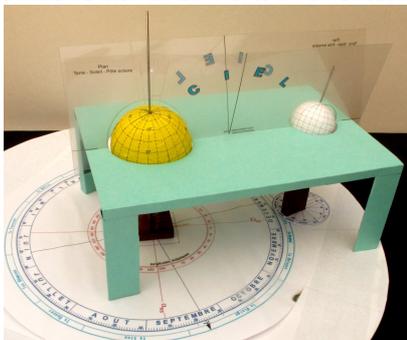


Fig.7. Le plan écliptique et les deux plans transparents passant par les axes de rotation.

En faisant déplacer la Terre sur son orbite, on voit l'angle du dièdre s'ouvrir et se fermer. Sur le calendrier on pourra trouver approximativement les dates qui correspondent aux maxima de l'angle du dièdre, et aussi les dates où cet angle est nul.

2. en utilisant, comme dans la figure 6, la perspective de vision. Mais pour mieux simuler l'observation faite par l'observateur, on adjoint un cadre gradué qui sert de fenêtre de vision. Par rotation sur lui-même, le cadre gradué peut tourner de façon que, quelle que soit l'époque de l'année, le carré du cadre soit toujours orienté Nord-Sud (fig. 8).

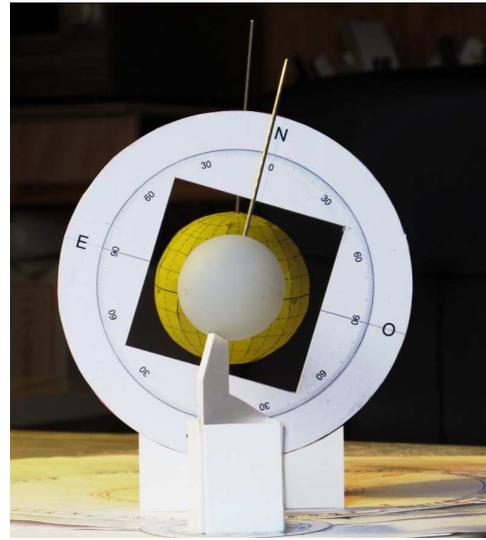


Fig.8. Le cadre de visée gradué et orientable

En alignant par visée et rotation du cadre, l'axe de la Terre sur la direction NS, on peut lire la valeur de l'angle vu entre les deux axes de rotation. Comme avec la table écliptique, on trouvera, en déplaçant la Terre tout au long de l'année, les dates des maxima de cet angle et celles où il s'annule. De plus l'observation attentive du Soleil fait apparaître le mouvement apparent du pôle du Soleil d'avant en arrière. Pendant six mois, le pôle Nord est apparent, le pôle Sud invisible, les six autres mois c'est l'inverse.

On constate ainsi qu'aux dates de superposition apparente des axes correspondent approximativement les minima d'inclinaison de l'équateur solaire dans le sens de la visée, les pôles du Soleil sont dans le plan de l'image et qu'au moment de l'écartement maximum, l'inclinaison d'avant en arrière est maximale.

En complément aux observations faites à ces dates avec la maquette, on peut retrouver toutes les valeurs des observations par le calcul [2].

Pour préciser ces deux variations d'angle, les astronomes définissent l'angle P et l'angle B_0 (fig. 9).

L'angle P correspond à l'angle apparent de rotation du pôle nord solaire d'est en ouest, P étant positif si le pôle nord solaire est à l'ouest et négatif à l'est.

L'angle B_0 se réfère à l'inclinaison de l'équateur solaire par rapport au point central de l'image observé sur le méridien central (fig. 9).

L'observation avec la maquette du Soleil tout au long de l'année, permet de mettre en évidence les deux mouvements de l'image solaire.

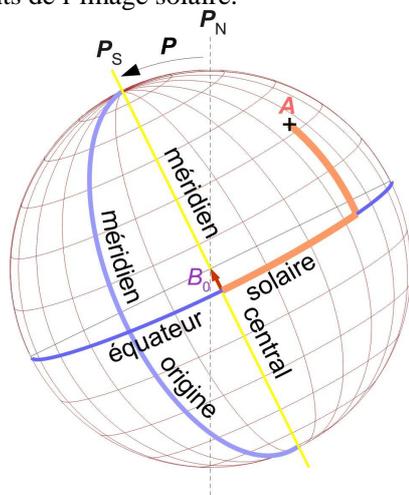


Fig.9. Projection des coordonnées du Soleil : équateur, méridien central, méridien origine, angles P et B_0 .

Observation du Soleil (simulation)

La vision du Soleil à travers le cadre correspond à celle d'un observateur terrestre. Il est en position d'observation équatoriale comme avec la majorité des instruments équatoriaux : lunettes ou télescopes. Cette vision simule l'image du Soleil prise avec un appareil placé sur un instrument équatorial du moment que les côtés de l'image ont été orientés est-ouest et nord-sud.

Redressement de l'image

Pour comparer correctement différentes images du Soleil, il faut qu'elles correspondent à une même orientation. Par convention, on ramène l'image du Soleil de façon que son axe de rotation soit dans le plan de l'image et son pôle Nord en haut. Les images quotidiennes du Soleil données sur les sites de Soho et SDO sont toutes redressées. Pour nos images, il faut donc connaître les deux angles P et B_0 . Les éphémérides de l'IMCCE ou certains sites donnent ces valeurs : (<http://bass2000.obspm.fr/ephem.php>).

Sur la maquette, l'angle P est facilement mesurable comme on l'a vu. L'angle B_0 , d'amplitude plus petite est plus difficilement estimable. Pour une date donnée, la Terre, le cadre et le Soleil alignés et réglés, si l'on enlève la Terre, l'angle B_0 se mesure sur le méridien central (méridien solaire passant par la ligne de visée Terre-Soleil), à partir de l'équateur solaire.

Passer de l'image équatoriale terrestre à l'image équatoriale solaire demande un peu de mathématique. Tout point de l'image va subir deux rotations : tourner autour de la direction de visée, l'angle $-P$ pour ramener l'axe de rotation du Soleil vertical dans l'image puis une rotation de $-B_0$ suivant l'axe est-ouest pour amener le pôle du Soleil dans le plan de l'image.

Repère en longitudes

La maquette est de peu de secours pour repérer la longitude d'une tache par exemple sauf si l'on construit un Soleil avec son réseau de coordonnées héliographiques. En effet, le méridien origine qui sert de référence résulte d'un choix arbitraire.

Il n'y a pas sur la surface du Soleil de structure permanente de référence visible. De plus la rotation différentielle de l'équateur aux pôles ne permet que de fixer une référence sur l'équateur. On définit le *méridien central* du Soleil à tout instant comme le méridien du Soleil passant par la ligne de visée Terre Soleil (fig. 9). Il change donc en permanence. À une date déterminée prise comme référence origine, le *méridien origine* ou *méridien de référence* était confondu avec le méridien central. Le méridien origine sert de référence aux longitudes *héliographiques* à la surface du Soleil. À cause de la rotation dans le sens direct du Soleil, la longitude du méridien central (L_0) décroît constamment.

Depuis la date origine, en connaissant la vitesse de rotation équatoriale du Soleil, la longitude héliographique du méridien central peut toujours être calculée par rapport au méridien de référence. Il suffit de connaître l'intervalle de temps entre la date origine arbitraire choisie et la date d'observation et calculer le nombre de tours fait par le Soleil pour placer le méridien origine.

Comme cet espace de temps croît sans cesse et devient grand, les éphémérides donnent les dates des passages du méridien origine devant le méridien central (comptage des tours), ou sa position à des dates déterminées, la position à un moment d'observation se faisant par interpolation.

Conclusions

Tout ceci est assez complexe, et seule une représentation concrète avec un peu de pratique sur une maquette permet d'en faciliter la compréhension.

Pour celles et ceux qui désireraient se lancer dans la construction de la maquette complète, demander renseignements aide et conseils à PhM (merlin@obs.univ-lyon1.fr)

Références et documents internet des fichiers téléchargeables à la page :

- [1] - www-obs.univ-lyon1.fr/labo/fc/astromanu/Tournesol/maquette_tournesol_texte.pdf
- [2] - www-obs.univ-lyon1.fr/labo/fc/astromanu/Tournesol/maquette_tournesol_maths.pdf
- [3] - www-obs.univ-lyon1.fr/labo/fc/astromanu/Tournesol/reperage_solaire_compressé.ppt

Documents imprimables pour construire la maquette

- www-obs.univ-lyon1.fr/astromanu/Tournesol/maquette_tournesol.html

AVEC NOS ÉLÈVES

Poursuite de l'exploration du Soleil à l'aide de Geogebra

Sylvie Thiault, professeur de mathématiques, Lyon

Dans le numéro 136 des Cahiers Clairaut, vous aviez pu lire un article présentant une mesure de la période différentielle de rotation du Soleil à l'aide du logiciel GeoGebra. Le présent article reprend la méthode pour insérer des images, calibrer puis propose de mesurer des structures remarquables sur le Soleil. Il s'appuie largement sur une activité proposée par Philippe Merlin dans un « atelier du mercredi » à l'observatoire de Lyon.

Les images

Le satellite SDO (Solar Dynamics Observatory) a été lancé par la NASA le 11 février 2010 de Cap Canaveral en Floride. Depuis sa mise en service, sa mission est d'étudier et de comprendre l'activité solaire.

SDO accueille trois programmes scientifiques :

- AIA pour « Atmospheric Imaging Assembly » ;
- HMI pour « Helioseismic and Magnetic Imager » ;
- EVE pour « EUV Variability Experiment ».

AIA est un ensemble de 4 télescopes conçus pour photographier la photosphère et l'atmosphère du Soleil. Ces instruments disposent de différents filtres permettant des prises de vues à 10 longueurs d'onde différentes. En sondant l'atmosphère du Soleil dans différents domaines, les images obtenues donnent des résultats complémentaires.

HMI est un dispositif conçu pour dresser une carte des champs magnétiques à la surface du Soleil.

EVE mesure la variation des émissions en rayonnement « ultraviolet extrême ».

Nous utiliserons ici des images fournies par AIA¹.



Page d'accueil du site de SDO.

Évaluation des dimensions de taches solaires.

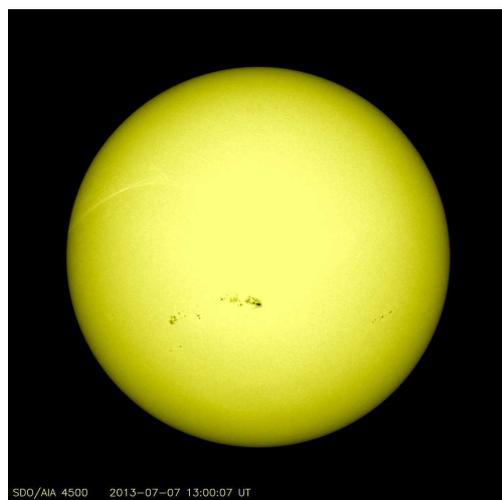
Après observation de taches sur le Soleil au Solarscope, on définit une plage de dates pour que la tache étudiée soit suffisamment éloignée du bord apparent du disque solaire. On choisit des taches qui ont des « bords » le plus nets possibles.

Pour étudier la dimension des taches solaires, nous choisirons les images fournies par l'instrument AIA4500 avec la meilleure définition 4096×4096.

Elles correspondent à des enregistrements à 4500 angströms, c'est-à-dire 450 nm donc en lumière visible. Toutefois le disque solaire est représenté en jaune alors que la « vraie couleur » serait bleu-violet. Ce sont des images en fausse couleur.

Les images sont carrées, elles ont toutes le même cadrage et l'axe du Soleil est toujours l'axe « vertical » de l'image.

Les noms de fichiers sont au format : YYYYMMDD_HHMMSS_4096_4500.jpg.



L' image choisie 20130707_130007_4096_4500.jpg.

¹ Pour en savoir plus sdo.gsfc.nasa.gov/mission/instruments.php

Le traitement des images.

Ouvrir une nouvelle fenêtre GeoGebra

(*)

Insérer image

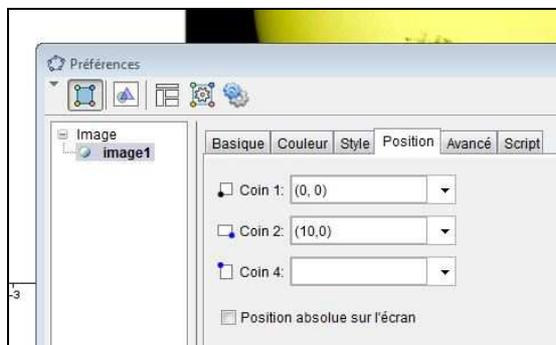
20130707_130007_4096_4500.jpg



Clic droit Propriétés/ image 1

position choisir coin 1 (0,0), coin 2(4096,0);

basique/ objet fixe.



Les images restent carrées, de même dimension et ne bougent pas avec le zoom.

Construire un cercle défini par trois points en cliquant sur le limbe du Soleil. (GeoGebra les nomment A, B et C). GeoGebra nomme le cercle **c**. Zoomer et affiner... On veillera à tenir compte de l'assombrissement du « bord » (astuce, on peut changer l'aspect du point en un rond vide, plus facile pour cadrer dans Éditer/propriétés/style). Un pixel est une unité de GeoGebra).

Construire le centre du cercle **c** : point / Milieu ou centre. GeoGebra le nomme D.

On peut aussi construire le centre « à l'ancienne » en demandant la construction de deux médiatrices et ensuite leur intersection.

On construit le segment [DA] ; sa longueur a s'affiche dans la fenêtre d'algèbre. On la renomme r_S (clic droit /renommer).

Pour mieux voir les tracés, on peut modifier le style et la couleur des points et des traits par « clic droit propriétés ... »

On essaie d'avoir une tache proche de l'axe vertical du disque solaire pour qu'elle ne subisse pas de déformation en longitude due à la projection. Pour s'en assurer :

- construire le méridien passant par D : « droite perpendiculaire / passant par D et perpendiculaire à l'axe des abscisses », la renommer m ;
- construire l'équateur : « droite passant par D et parallèle à l'axe des abscisses », la renommer eq.

On zoome sur la tache où l'on veut évaluer une distance entre deux points (ce peut être la taille de la tache, la largeur de la pénombre...).

On construit les deux points E et F.

On construit leur milieu et on s'assure qu'il est proche du méridien a.

(**)

Sinon, on recharge une autre image, un peu plus ancienne ou un peu plus récente, selon la position du milieu.

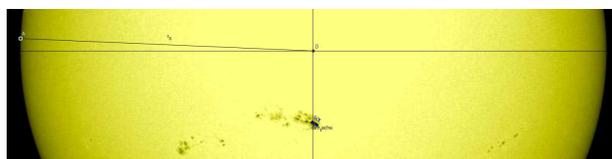
On recommence de (*) à (**) avec cette autre image de la tache. On vérifie que le cercle **c** s'ajuste convenablement avec cette image. Au besoin on rectifie.

Tache proche de l'équateur

Pour une tache proche de l'équateur, on négligera la déformation due à la projection dans le plan perpendiculaire à la ligne de visée.

On construit le segment [EF]. Sa longueur d s'affiche dans la fenêtre « algèbre ».

On la renomme $dim_{\{tache\}}$ et on passe directement au calcul de la taille réelle (page suivante).



Tache plus éloignée de l'équateur

Il est possible de tenir compte de la déformation due à la projection (voir encadré).

On travaille sur une image où la tache est bien axée sur le méridien a.

On construit :

- la parallèle en G à l'équateur eq, on la renomme p,
- l'intersection de p avec le cercle c ; ce sont les points H et I.

Dans la barre de saisie on tape :

- $d_p = \text{segment}[H,I]$
- $c_p = \text{cercle}[D,d_p/2]$.

On construit :

- la parallèle en E à l'équateur eq, on la renomme p_E ,
- la parallèle en F à l'équateur eq, on la renomme p_F ,
- l'intersection de p_E avec le cercle c : ce sont les points J et K,
- l'intersection de p_F avec le cercle c : ce sont les points L et M.

On construit l'arc de cercle défini par son centre D et les points J et L. Attention à l'ordre... arc orienté !

Le renommer « a_1 »

On construit :

- la parallèle en E à l'axe des ordonnées; on la renomme m_E ,
 - la parallèle en F à l'axe des abscisses; on la renomme m_F .
- On construit :
- l'intersection de m_E avec le cercle c_p : ce sont les points N et O,
 - l'intersection de m_F avec le cercle c_p : ce sont les points P et Q.

On construit l'arc de cercle défini par son centre D et les points N et P. on le renomme « a_2 ».

On assimile a_1 et a_2 aux longueurs des deux côtés d'un triangle rectangle d'hypoténuse [EF].

Dans la fenêtre de saisie on calcule :

$$dim_{tache} = \sqrt{a_1^2 + a_2^2}$$

(On pourrait encore améliorer la précision de notre évaluation en ayant recours à la trigonométrie sphérique)

Calcul de la taille réelle de la tache et comparaison au diamètre terrestre

Dans la fenêtre de saisie, on tape $R_S=700000$ (rayon du Soleil en km) et $R_T=6370$ (rayon terrestre moyen en km).

On ouvre une feuille de calcul « fenêtre tableau ».

Dans la feuille de calcul remplie comme ci-dessous

	A	B	C
1		réelles	réduites
2	rayon sol...	700000	1572.86
3			

on tape :

- en B2 : « =R_S »
- en C2 : « =r_S ».
- en C3 : « =dim_{tache} »
- en C2 : « =B2*C3/C2 »
- en B5 : « =R_T »
- en C5 : « =B5*C2/B2 »
- en D3 : « =C3/C5 ».

Pour mieux visualiser, on construit en E un cercle de centre E et de rayon C5. Le renommer t_{erre}

	A	B	C	D
1		réelles en km	réduites	réelle en rayon terrestre
2	rayon solaire	700000	1572.86	100.75
3	tache solaire	8426.43	21.18	1.48
4				
5	rayon terrestre	6370	14.33	
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				
13				
14				
15				
16				
17				
18				
19				
20				
21				
22				
23				
24				

L' image de la tache et la feuille de calcul

On peut recommencer en insérant une image d'une autre tache et en ajustant les points E et F.

Pour la tache choisie, on trouve que la distance entre les points E et F qu'on a choisi est d'environ trois rayons terrestres.

Évaluation des dimensions des protubérances

Pour étudier les dimensions de protubérances, nous choisirons les images fournies par l'instrument AIA304 avec la définition 4096×4096.

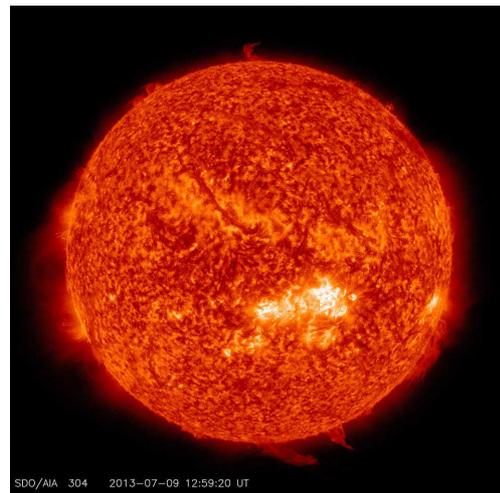
Elles correspondent à des enregistrements à 304 angströms, c'est à dire 30,4 nm (bande de l'HéliumII dans l'extrême ultraviolet). Là encore ce sont des images en fausse couleur !

On choisit une plage de dates qui contient le développement maximum de la protubérance.

Les noms de fichiers sont au format :

YYYYMMDD_HHMMSS_4096_0304.jpg.

On procède comme précédemment pour insérer une image.



L'image choisie 20130709_125920_4096_0304.jpg

On choisit une image dans la plage proche du maximum de développement. On construit le cercle c passant par trois points A, B et C comme précédemment.

On construit le centre D du cercle c .

On construit le sommet de la protubérance E.

On construit [DE] puis son intersection avec c ; c'est le point F.

On construit le segment [DF] ; on le renomme r_S .

On construit le segment [EF] ; on le renomme h .

On pourra tester plusieurs images en les insérant (elles se placent sur l'image insérée précédemment) et choisir celle qui correspond le mieux au maximum de hauteur.

Calcul de la taille réelle de la protubérance et comparaison au diamètre terrestre

On ouvre une feuille de calcul « fenêtre tableau » et on effectue exactement les mêmes opérations que pour une tache solaire en remplaçant simplement $\text{dim}_{\text{tache}}$ par h en C3 (voir encadré colonne de gauche).

	A	B	C	D
1		réelles en km	réduites	réelle en rayon terrestre
2	rayon solaire	700000	1572.86	100.75
3	hauteur prot.	60000.00	146.07	10.10
4				
5	rayon terrestre	6370	14.33	
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				

Pour la protubérance choisie on trouve environ 10 rayons terrestres.

D'autres études sont possibles :

- évaluation de la vitesse d'expansion de structures au limbe en calculant la vitesse moyenne d'expansion entre deux prises de vue ;
- comparaison des images obtenues à la même date mais avec des instruments différents.

(Le programme des ateliers du mercredi de l'observatoire de Lyon se trouve sur www-obs.univ-lyon1.fr/spip.php?article429)

OBSERVATION

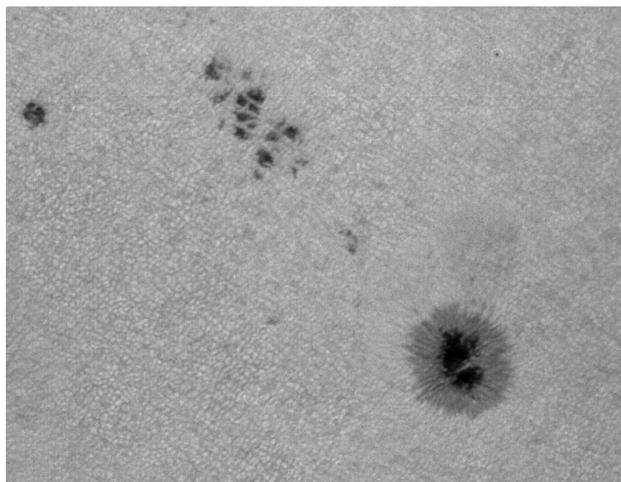
Imagerie solaire

Roger Meunier

Roger Meunier nous fait partager ici ses images du Soleil réalisées avec différentes techniques.

Avec un filtre pleine ouverture

Pour la photographie en lumière blanche, j'opère avec une lunette non apochromatique de 150 mm de diamètre ; je mets devant un filtre Astrosolar de densité 3,8 et devant le capteur, j'ajoute un filtre interférentiel à 530 nm de 10 nm de bande passante¹. J'utilise une petite caméra vidéo PL1M raccordée à un ordinateur portable avec des acquisitions de 500 à 700 images qui sont ensuite traitées avec Registax 6. J'y fais quelques améliorations mineures avec le logiciel Capture NX2 (recadrage, enlèvement de défauts cosmétiques, augmentation du contraste).



Groupe de taches photographié le 17 avril dernier (référéncé AR 1726). On distingue bien sur la tache principale ce qu'on appelle l'ombre (en noir) et la pénombre (en gris). Ces termes d'ombre et de pénombre sont trompeurs, il ne s'agit que de régions moins brillantes de la photosphère.

La zone grisée au-dessus de la tache principale est due au traitement de l'image.

Avec un filtre H alpha

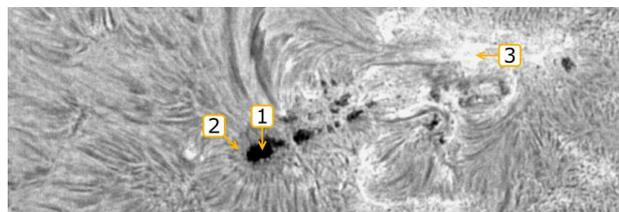
La page suivante, colonne de droite, présente une même région du Soleil (référéncée AR 1785 par les

¹ On peut aussi opérer plus simplement avec uniquement un filtre pleine ouverture. Ceux que l'on trouve dans le commerce sont en général de densité 5 (ne laissant passer que 1/100 000 de la lumière). On en trouve aussi de densité 4 pour la photo, à ne pas utiliser en visuel.

astrophysiciens solaires) photographiée du 06 au 10 juillet 2013 aux alentours de 7 h T.U. Le matériel utilisé est une lunette de 110 mm de diamètre et 1 500 mm de focale, équipée d'un filtre H alpha Coronado de 90 mm de diamètre. Là aussi, les acquisitions se font à l'aide d'une petite caméra vidéo de type PL1M.

Le filtre H alpha isole la raie de l'hydrogène à 656,3 nm et donne des images monochromatiques² montrant principalement les structures chromosphériques ; la chromosphère, couche d'environ 2 500 km est située juste au-dessus de la photosphère, « surface » du Soleil d'environ 500 km d'épaisseur.

On peut commencer l'étude de ces images par l'identification des taches solaires composant ce groupe, facilement reconnaissables à leur ombre (environ 4000 °C) et pénombre (environ 5000 °C).



Détail de l'image du 8 juillet :

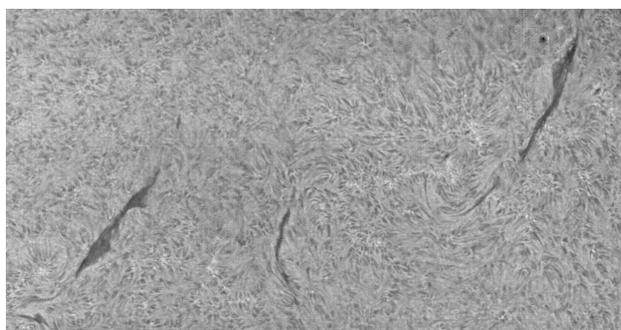
1. Ombre. 2. Pénombre. 3. Plage chromosphérique

En règle générale, les groupes de taches se scindent en deux sous-groupes de polarité magnétique opposée, Nord et Sud. C'est souvent à l'interface entre ces deux régions qu'existent des gradients importants de champs magnétiques, que se déclenchent des phénomènes de libération d'énergie, suivant le mécanisme de reconnexion.

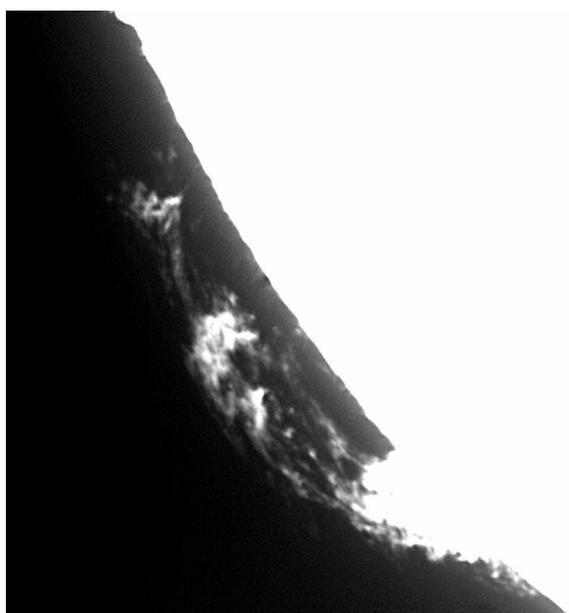
Les deux sous-groupes Nord et Sud sont séparés par une *ligne neutre*, qui fait la transition entre les deux polarités ; il y a de fortes probabilités que la ligne neutre dans le cas présent soit une ligne vaguement sinueuse, quasi verticale et passant dans la région située entre les deux sous groupes où il n'y a pas de région brillante. Ces régions brillantes sont appelées

² Ce type d'image est souvent colorisé pour faire plus joli mais à l'origine, la caméra enregistre des intensités lumineuses ou niveaux de gris.

plages chromosphériques. On notera qu' autour de chaque tache, le champ magnétique impose sa direction aux structures fibreuses de la chromosphère, les *fibrilles*, qui ont une largeur de 800 à 2 000 km et une longueur de 10 000 km environ. La taille du groupe photographié est d' environ 100 000 km ; on notera qu' au fil des jours, si les différents éléments voient leur morphologie évoluer lentement, la structure générale de toute la région est maintenue fermement par le champ magnétique. On notera en haut et à gauche de l' image du 06 juillet une structure sombre et allongée, appelée *filament*, qui représente le dernier phénomène d' une région active, maintenant dispersée par la *rotation différentielle* . Une autre photographie, datée du 08 juillet en montre trois de formes légèrement différente. Lorsque ces *filaments*, par suite de la rotation du Soleil, sont visibles sur le bord solaire, ils sont appelés *protubérances* (image du 09 juillet).

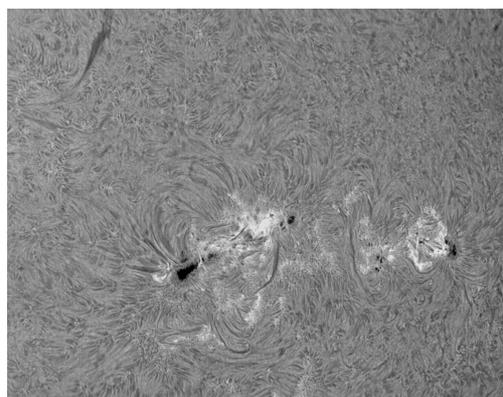


Les protubérances observées sur la chromosphère apparaissent comme des filaments (image du 8 juillet dernier).

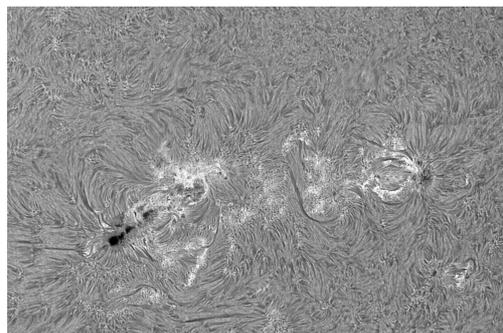


Protubérances observées sur le bord du Soleil le 9 juillet 2013.

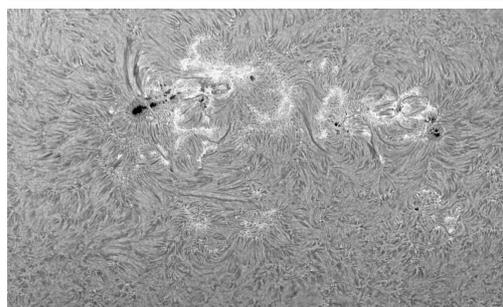
6 juillet 2013



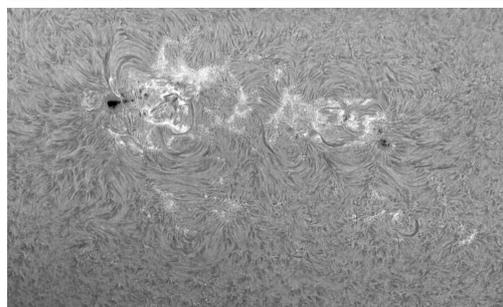
7 juillet 2013



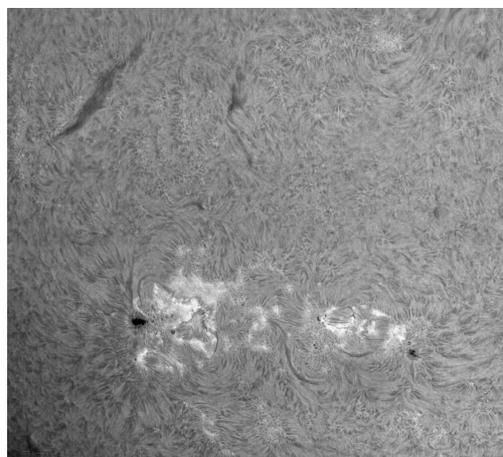
8 juillet 2013



9 juillet 2013



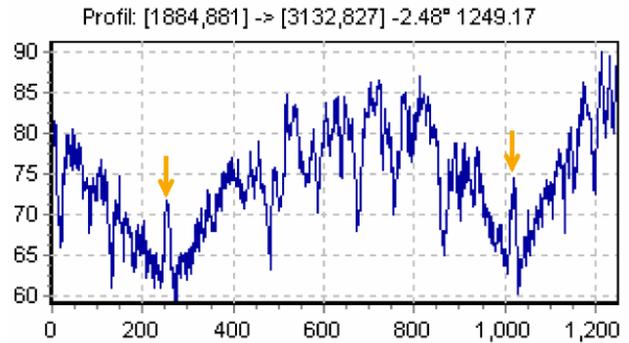
10 juillet 2013



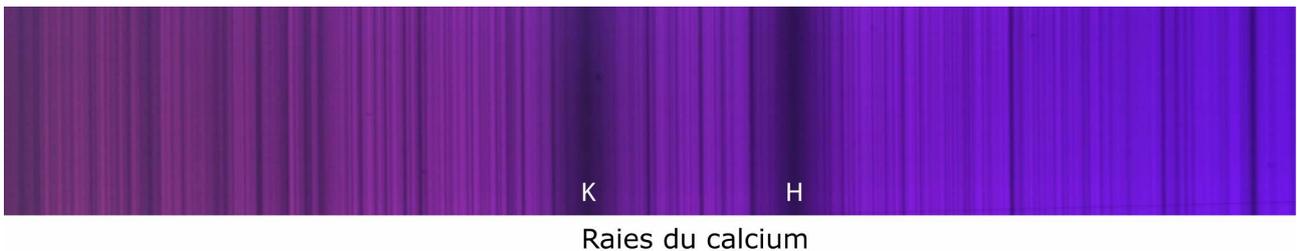
Avec un spectrographe

Pour obtenir un spectre, il faut d'abord placer la fente du spectrographe sur une région active (zones brillantes sur les clichés H alpha). En longueur d'onde, le spectrographe est réglé à l'extrémité bleue du spectre visible, plus particulièrement sur le doublet du calcium ionisé, situé à 393,4 nm et 396,8 nm. Ces deux raies, très larges (spectre 1), mesurent chacune environ 2 nm de large. Les ailes de la raie prennent naissance à la base de la chromosphère, tandis que la région centrale de la raie prend naissance à environ 1 000 km au-dessus, la chromosphère ayant une épaisseur totale d'environ 2 500 km. Le spectre 2 montre également une bande transversale aux raies qui est l'image étalée d'une tache solaire, preuve que nous sommes bien sur une région « perturbée ». Le pic d'émission constaté au centre de chaque raie en absorption correspond à une région active où la température est élevée (environ 15 à 20 000 °C). C'est d'ailleurs la température qui compense partiellement le phéno-

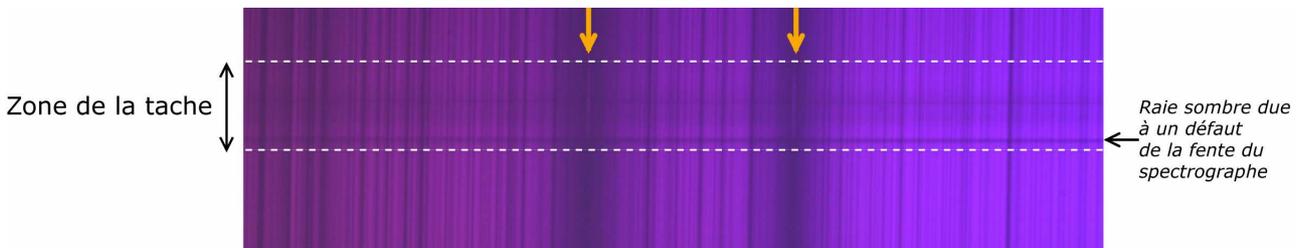
mène général d'absorption qui existe dans les raies. Le profil associé au spectre est une simple coupe horizontale passant par un endroit où la réémission est évidente (bande claire dans l'axe de la raie) ; la partie en réémission s'étend sur environ 0.1 nm.



Coupe horizontale du 2^e spectre. Les deux flèches orange correspondent à la zone claire au centre des raies H et K du calcium.



Spectre d'une région "normale" du Soleil à l'extrémité bleue du spectre visible. Les raies H et K du calcium y sont très identifiables.



Spectre réalisé dans les mêmes longueurs d'onde que le précédent mais cette fois, la fente du spectrographe a été placée sur une tache solaire. On distingue sous les deux flèches orange une zone plus claire. Ces spectres ont été réalisés à partir d'un spectrographe construit par l'auteur (réseau de 2160 traits/mm).

Voici quelques images de la nova du 14 août dernier, dans la constellation du Dauphin. Vous trouverez plus de détails sur le site du CLEA.

Photos : François Hurter, Olivier Gayraud.
Spectre JM Vienney.



Voir sur : <http://acces.ens-lyon.fr/clea/aLaUne/nova-dans-le-dauphin/>

LE COIN DES PETITS CURIEUX

Dis-moi, le Soleil qu'est-ce que c'est ?

ÉMILIE - Les vacances sont bien finies, l'école a repris. As-tu bien profité du Soleil cet été ?

ALEXIS - Oh oui, il a même fait très chaud. Dis-moi, le Soleil, qu'est-ce que c'est et à quel endroit se trouve-t-il dans la Galaxie ?

ÉMILIE - Le Soleil est une étoile comme il en existe des milliards dans notre Galaxie. Comme elles, il tourne autour du centre de la Galaxie et en fait le tour en 220 millions d'années. Il se trouve sur le bord de la Galaxie à 25 000 années de lumière du centre qui se trouve être un trou noir, c'est-à-dire un astre très massif.

ALEXIS - C'est donc l'étoile la plus proche de nous. Mais dis-moi, ces étoiles ont-elles toujours été là ?

ÉMILIE - Non, bien sûr, dans l'Univers rien n'est statique et permanent. Tout naît, vit et meurt comme sur Terre. Notre étoile, le Soleil, est née il y a environ 4,5 milliards d'années dans un très grand nuage de gaz et de poussières, comme il en existe de nombreux dans l'Univers. La gravité a rassemblé en un point central la plus grande partie des gaz et les poussières. La gravité tu t'en rappelles, nous en avons parlé précédemment.

ALEXIS - Oui, oui je m'en rappelle. C'est une force qui attire les objets proches.

ÉMILIE - C'est cela. Au cours de milliers d'années, la gravité a agglutiné une très grande quantité de matière qui tournait lentement. Au fur et à mesure que la matière se condensait, la vitesse de rotation augmentait ainsi que la pression et la température.

ALEXIS - La température ?

ÉMILIE - Oui, si la pression d'un gaz augmente, sa température suit la même ascension. Tiens, imagine une pompe à vélo dont tu empêches l'air de s'échapper avec ton pouce. En poussant sur le piston, la pression dans la pompe augmente et tu sens la pompe s'échauffer.

ALEXIS - Ah oui, c'est vrai. J'ai déjà fait cela.

ÉMILIE - Revenons à notre amas de gaz qui va devenir le Soleil. Au fur et à mesure de

l'accumulation de la matière la température s'élève et lorsque celle-ci atteint plusieurs millions de degrés, cet amas de gaz (qui est devenu un mélange de particules) produit des réactions qui dégagent beaucoup d'énergie et cette étoile, notre Soleil, brille de mille feux. Mais il consomme une partie de la matière qui le constitue.

ALEXIS - Mais ce que je ne comprends pas : s'il perd de la matière, il va disparaître, or le Soleil brille depuis plus de 4 milliards d'années ?

ÉMILIE - La grosseur du nuage de gaz est si importante qu'il a permis d'accumuler dans le Soleil une masse énorme d'hydrogène, environ 2.10^{30} kilogrammes (2 mille milliards de milliards de milliards) Le cœur du Soleil étant à 15 millions de degrés, il s'y produit une réaction qu'on appelle nucléaire, c'est-à-dire la transformation de l'hydrogène en un autre corps l'hélium. Cette transformation s'accompagne d'un important dégagement d'énergie. À chaque seconde, environ 600 millions de tonnes d'hydrogène sont ainsi transformées en hélium. L'énorme masse du Soleil permet cette transformation pendant environ 10 milliards d'années. Voilà le secret de la longévité du Soleil.

ALEXIS - Et que se passera-t-il après ces 10 milliards d'années ?

ÉMILIE - Après que tout l'hydrogène du centre ait été transformé en hélium, le Soleil va consommer l'hydrogène des couches plus extérieures, il va grossir avant de finir sous la forme d'une petite étoile, une naine blanche. Cela arrivera à toutes les étoiles du ciel. Mais rassure-toi, cela n'arrivera pas demain et pas toutes les étoiles en même temps.

ALEXIS - Tu m'as dit que notre Soleil est une étoile parmi tant d'autres. Mais les étoiles sont blanches et notre Soleil est jaune. Il n'est donc pas comme les autres étoiles ?

ÉMILIE - Les étoiles ne sont pas toutes blanches, elles ont toutes une couleur qui dépend essentiellement de leur température de surface. Il y en a des bleues, des jaunes, des rouges, des blanches. Les étoiles bleues, ont les températures de surface les plus élevées jusqu'à 40 000 degrés. Les rouges

beaucoup moins, jusqu'à 2 500 degrés. Le Soleil, quant à lui, a une température de surface d'environ 6 000 degrés, ce qui correspond à la couleur jaune.

ALEXIS - Le Soleil nous chauffe et nous éclaire. Mais nous envoie-t-il autre chose ?

ÉMILIE - C'est grâce au Soleil que la vie est possible sur Terre. En effet, il nous envoie la lumière que nous voyons, mais aussi des infrarouges, ce sont eux qui nous donnent la sensation de chaleur quand nous sommes au soleil. Il envoie aussi des ultraviolets qui brûlent notre peau et donnent des « coups de soleil ». La lumière, les infrarouges et les ultraviolets sont en fait des rayonnements que nous pouvons voir ou ressentir. Il existe d'autres types de rayonnements que nos yeux ne perçoivent pas.

Par exemple les ondes radio qui font fonctionner ton transistor et ton téléphone portable. On ne les voit pas. Il y a aussi les rayons X qui permettent de voir à l'intérieur de ton corps lors d'une radiographie. On ne les voit pas non plus.

Les rayons X sont plus dangereux pour la vie que les ondes radio. Il existe des rayonnements encore plus dangereux, les rayons gamma.

Et bien tu vois, le Soleil et les étoiles envoient toutes ces sortes de rayonnements. Heureusement pour nous, ils sont pour la plupart arrêtés par l'atmosphère.

ALEXIS - Est-ce que c'est le Soleil qui envoie le rayon vert ?

ÉMILIE - Non, le rayon vert est dû à l'atmosphère terrestre.

La lumière blanche envoyée par le Soleil est en fait une combinaison de toutes les couleurs de l'arc en ciel.

Et chaque couleur est déviée différemment lorsqu'elle traverse l'atmosphère. Au coucher du Soleil, ses rayons traversent une grande couche d'atmosphère et dans certaines conditions, sans nuages, ciel très pur, le rayonnement de couleur verte est le dernier visible à nous parvenir ou le matin un des premiers.

ALEXIS - J'ai compris que le Soleil est source de toute vie sur Terre mais c'est aussi un ami dont il faut se méfier et se protéger.



Mots croisés solaires

Horizontalement

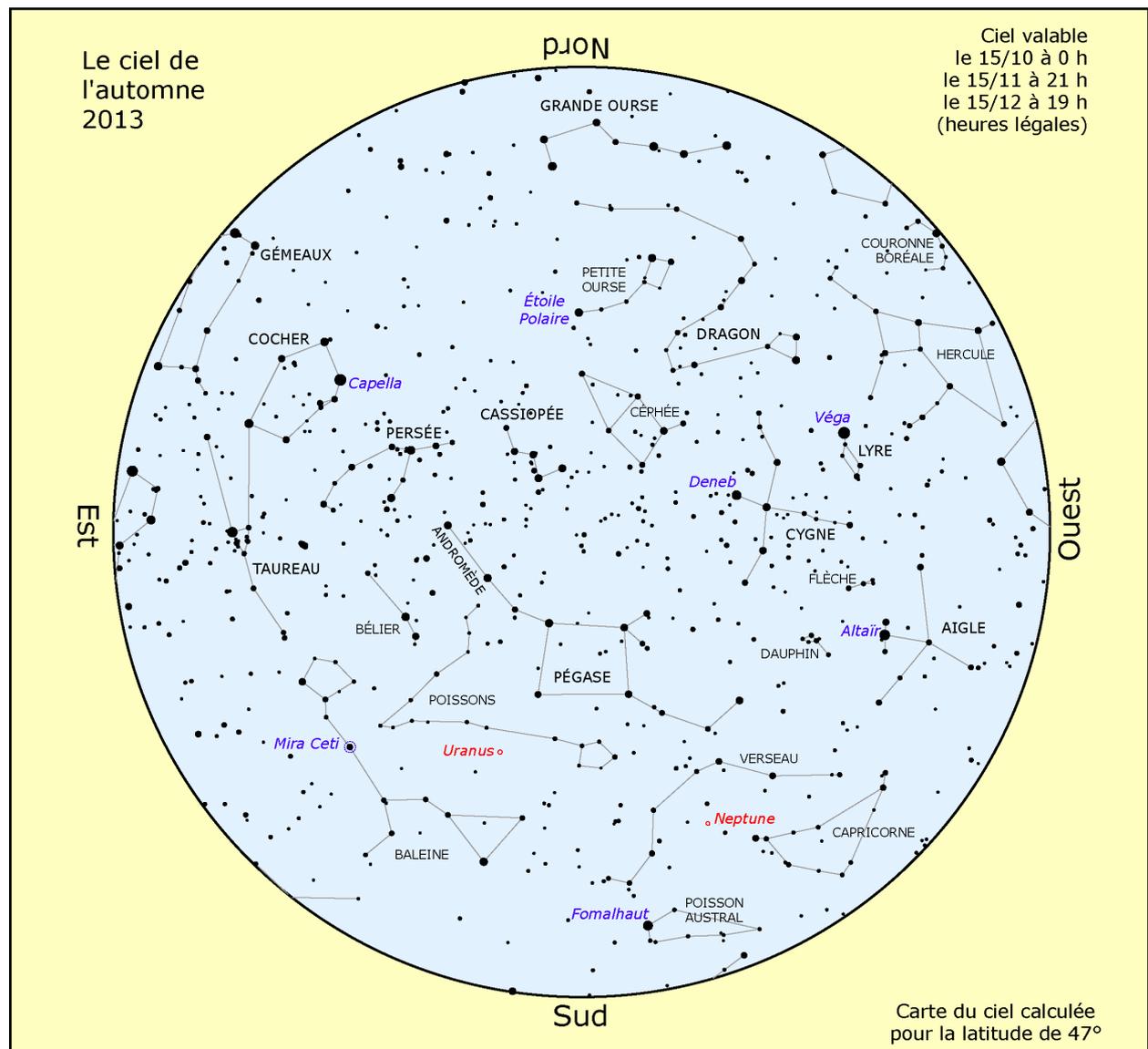
- Dans les couches externes du Soleil.
- Le Soleil y est proche de Procyon. Comme doit l'être un cliché du Soleil pour pouvoir être exploité.
- Comme la zone interne du Soleil.
- Ils font penser aux trous noirs. Peut servir à calibrer le spectre solaire.
- Rivière bretonne. Toisai mais après 1792.
- Le soleil les fortifie. Énergie émise par le Soleil en 0,1 femtoseconde. Le Soleil y passe chaque jour dans nos régions.
- Note. Comme un parhélion (ou faux soleil).
- Quand vous en voyez un, il a de fortes chances de venir du Soleil. Dégage.
- À l'origine de la lumière du Soleil.
- Elle possède sa garde. Et parfois approuvé. Vieux soleil.
- On peut en faire un avec les ombres. Proche du CERN.
- Primaire et secondaire par exemple. Telle la lumière par le Soleil.

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

Verticalement

- Elle se laisse voir pendant une éclipse.
- Le Soleil en fait des magnétiques. Mieux que le super.
- Touffu. Celui de Copernic met le Soleil au centre.
- Elle peut être ferrée ou lactée. Comme des championnes.
- Il a fait des tables du Soleil. Lac palindrome.
- Fin de récit. Attrapée.
- Halé par le soleil. Attrapé.
- Le Soleil la pratique tous les 11 ans. Soldat.
- Soustrait. Dépouillés.
- Négation. Comme une ville en été. Le Soleil en a un, comme les planètes

Le ciel de l'automne 2013



Visibilité des planètes

Mercury sera observable le matin à l'est les trois dernières semaines de novembre (élongation maximale le 18).

Vénus brillera le soir à l'ouest pendant tout l'automne. Élongation maximale le 1/11 (elle apparaît en quartier au télescope), éclat maximal début décembre (elle apparaît alors en croissant). C'est la planète de l'automne.

Mars est visible le matin dans le Lion puis la Vierge. Il faudra plutôt l'observer cet hiver et au printemps.

Jupiter est visible en deuxième partie de nuit au début de l'automne et se lève ensuite de plus en plus tôt ; elle devient observable en milieu de soirée en décembre (opposition le 5/01).

Saturne passe derrière le Soleil le 6/11. Inobservable.

Uranus et **Neptune** sont à chercher dans un instrument.

Quelques événements (heures légales)

Passage de la comète ISON : voir CC 141 page 14.

22/09 : équinoxe d'automne à 22 h 44.

3/10 : opposition d'Uranus.

8/10 : maximum des Draconides (étoiles filantes).

18-19/10 : éclipse partielle de Lune par la pénombre, peu visible. Maximum à 1 h 50.

2/11 (matin) : occultation de Spica par la Lune.

3/11 : éclipse annulaire de Soleil (Atlantique, Afrique).

Partielle dans l'extrême sud-ouest et au sud de la Corse.

17/11 : Léonides mais proches de la pleine Lune.

26/11 (matin) : rapprochement Saturne Mercure.

28/11 : périhélie de la comète ISON.

14/12 : Géminides mais proches de la pleine Lune.

21/12 : solstice d'été à 18 h 11.

Lune Nouvelle Lune : les 5/10, 3/11, 3/12. Pleine Lune : les 19/10, 17/11, 17/12.

LECTURE POUR LA MARQUISE

Quelle est notre place dans l'univers ?

Dialogues sur la cosmologie moderne

Suzy Collin-Zahn ; Christiane Vilain

L'Harmattan 2012 ; 255 pages

Dans la forme ce livre ressemble un peu au fameux ouvrage de Galilée : « Dialogue sur les deux grands systèmes du monde ».

En effet, il présente comme lui un dialogue entre trois personnages ainsi qu'un découpage en plusieurs journées.

La ressemblance s'arrête là car si le livre est bien un échange entre les deux auteurs, le troisième personnage ne ressemble pas à Simplicio. Dans cet ouvrage il se prénomme Candide, manifestement en référence avec le conte de Voltaire du même nom. Ce personnage joue un rôle important : il évite un dialogue qui pourrait être un peu trop rude lorsque les points de vue divergent entre les deux auteurs ; il pose judicieusement des questions faussement naïves qui font progresser ou relancer le débat et, à la fin de l'ouvrage, il devient même une sorte d'arbitre.

Il y a au total dix journées mais ce découpage est plutôt formel. L'échange se déroule comme une conversation libre à trois, les idées s'enchaînent assez naturellement les unes les autres apparemment sans progression spécifique.

Dès le début de l'ouvrage il est annoncé que la discussion portera sur « *ce que l'on sait actuellement de l'Univers, de son histoire, de l'évolution de la Science, et, de façon générale, de tout ce qui nous viendra à l'esprit ! Et nous essaierons d'aborder à la fin le problème des origines* ». À la fin du livre ce contrat est rempli même si la plupart des questions ne sont que rapidement ébauchées.

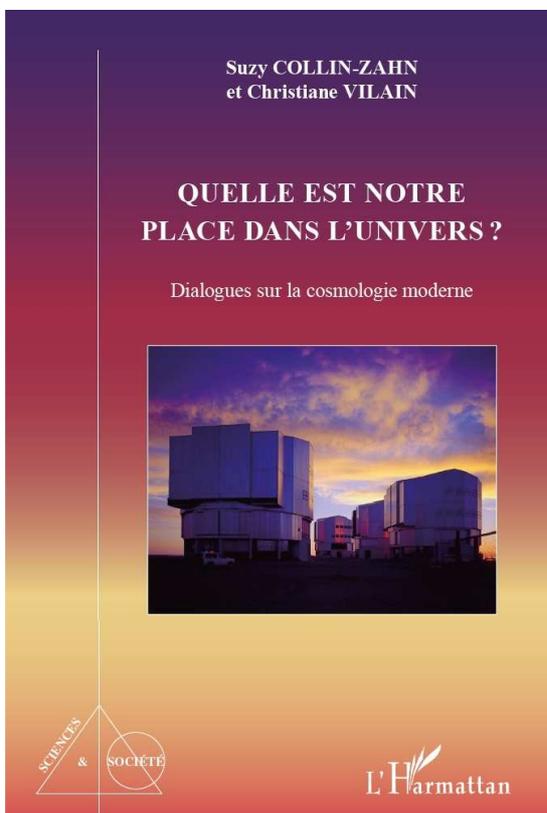
La discussion abordée, dès le premier jour, porte sur les « *limites de la Science* », sur la place - s'il en faut une - qu'il convient d'attribuer à la Science, à la philosophie, à la religion. La Science a-t-elle eu à « *se libérer de sa gangue philosophique ?* » ou celle-ci permet-elle « *au contraire de voir plus clair sur ce que l'on fait quand on prétend « expliquer » et « comprendre » ?*...Existe-il une réalité indépendante de nous ? Sommes-nous « *comme un poisson rouge dans son bocal, incapable de concevoir le monde qui entoure le bocal.* » La Science a-t-elle besoin ou non de la philosophie ?

Cette discussion est reprise à la fin du livre en particulier quand il s'agit d'aborder la notion de réalité.

Peut-on prétendre l'atteindre alors que la simple observation d'une expérience peut modifier son résultat ? Les mathématiques sont-elles seules à pouvoir rendre compte de l'ensemble de la réalité ? Sont-elles inhérentes à la nature ou fabriquées par notre cerveau ? Existe-t-il une théorie du tout ? Un seul Univers ou une multitude ? Enfin les constantes physiques ont-elles été initialement choisies afin de faire apparaître les observateurs que nous sommes ? En définitive est-ce que les lois de la Nature sont nécessaires ou contingentes ? Cette Nature est-elle le fruit « du hasard **et** de la nécessité » ou « du hasard **ou** de la nécessité » ?

Le débat n'est pas près d'être clos.

Christian Larcher



Variations sur un même ciel

Éditions la ville brûle, 2012

Préface d'Hubert Reeves

Un livre étonnant, écrit par une pléiade de scientifiques de renom et coordonné par Jean-Philippe Uzan. Chaque auteur choisit un extrait d'un texte d'un grand auteur, susceptible d'apporter du sens à l'histoire de l'Univers, extrait qu'il juge essentiel ; il y apporte ses propres commentaires à l'aune des connaissances actuelles et potentielles.

Il en résulte une mine de réflexions abordant des sujets de nature mythologique, philosophique, cosmologique et surtout scientifique. Les regards apportés par ces 24 auteurs se complètent harmonieusement et donnent à l'ouvrage une exceptionnelle richesse.



L'ouvrage est divisé en quatre grandes parties :

- Variations mythologiques,
- Variations fondatrices,
- Variations modernes,
- Variations libres.

Les extraits des textes choisis et leurs commentaires sont clairement différenciés par la typographie, la couleur et la taille de caractères.

Parmi les variations mythologiques, on trouve les cosmogonies traditionnelles de différentes cultures (Grèce, Chine, Pays Dogon, Inde, Japon, Mayas...). Dans les quelques lignes d'introduction de cette partie, on précise judicieusement que : « Ces regards nous enseignent autant sur le cosmos que sur ceux qui le contempnent et essaient de lui donner un sens ».

Les variations fondatrices reposent d'abord sur les textes incontournables de la Grèce antique. Le mot grec « cosmos » évoque déjà la notion de beauté et d'harmonie. C'est donc surtout Platon et Aristote qui seront sollicités. Leur héritage sera transformé par les « mécaniciens newtoniens » comme Kant et Laplace. Le problème de l'origine et de l'âge de la Terre sera posé avec Buffon.

Les variations modernes

Les textes choisis ont pour auteur Albert Einstein, Alexandre Friedmann, Georges Lemaître, Georges Gamow, Brandon Carter ou Rabindranath Tagore.

Je mentionne tout spécialement la reproduction de l'échange du 14 juillet 1930 entre Rabindranath Tagore et Albert Einstein, qui porte sur *la nature de la réalité*.

Les titres choisis par les auteurs pour leur contribution sont significatifs :

- *Comment ne pas en faire tout un monde ?* (J.Ph. Uzan),
- *La cosmologie, un espace de liberté pour penser la relativité générale* (J. Eisenstaedt),
- *Quand l'univers était un atome* (D. Lambert),
- *L'Opéra cosmique de Gamow* (D. Lambert),
- *Le principe anthropique en cosmologie* (B. Carter),
- *Métacosmologie ; Du positivisme à la poésie* (M. Cassé).

Les variations libres sont l'occasion de sortir d'une vision scientifique trop imprégnée de réductionnisme. Elles font appels aux regards de l'art, de la poésie, de la fiction, c'est à dire à un espace de liberté pour poser des questions que l'on n'oserait aborder autrement.

Les textes choisis dans cette partie ont été écrits par Cyrano de Bergerac, A. Blanqui, L. Borges, Edgar Poe, Raymond Queneau, Ph. J. Farmer.

Avec le concours de JP Luminet ; R. Lehoucq ; A. Barrau et d'autres, on accède à la question du statut cosmologique de l'homme et de son lien à l'infini.

Ces textes, sont l'occasion d'aborder une série de sujets dont les titres sont bien évocateurs :

- *L'histoire cosmologique du vide* (E. Gunzig),
- « *Infini* » est un mot impossible qui peut rendre possibles toutes sortes de choses (J.P. Uzan),
- *L'Univers n'est plus donné : il est à construire et à multiplier* (A. Barrau),
- *C'est le beau qui défend le vrai* (JP Luminet),
- *Jeunesse, ô jeunesse, Zazie dans le cosmos* (JP Luminet),
- *La sortie ? A droite au fond de l'Univers !* (R. Lehoucq),
- *Hybridons science et bande dessinée* (R. Lehoucq).

Ce livre devrait avoir beaucoup de succès. Une bonne idée pour un cadeau de fin d'année par exemple...

Christian Larcher ■

JEUX

La navette de l'espace lettre

Michel Bobin

Michel Bobin a composé ce nouvel "espace lettre" qui vous donnera à découvrir deux phrases d'un auteur fameux. La règle n'a pas changé. Il s'agit de trouver des mots à partir de leur définition puis de reporter, grâce aux numéros des cases, les lettres ainsi trouvées dans la grille du bas. Le texte s'étoffant, cette grille elle-même vous aidera à reporter, grâce à leur codage, des lettres dans la grille de définitions. Pour vous aider, la première colonne entourée en rouge de la grille de définitions contient le nom de l'auteur du texte suivi du titre de l'ouvrage où l'extrait fut puisé.

Productrice de plus d'un disque	A	36	1	117	11	71	151	28	212	58
Dans l'abîme du temps, en 1936	B	20	138	67	181	77	97	7	189	34
Croquer	C	5	210	141	84	161	51	22	149	205
Propulse la sonde Dawn	D	191	2	126	130	66				
Bobine et raisonnement	E	206	8	99	199	169	207	62	92	30
Entre Grenoble et Innsbruck	F	203	73	120	131	95	139	121		
Boîtes à lunettes	G	15	83	103	113	118	102	215	200	
Elles font les poussières	H	195	53	147	148	159	116			
Additions	I	218	124	177	74	70	220			
Telle l'Astronomie d'Asa Smith	J	9	109	182	115	185	179	168	19	134
Henry, astronome ou Bertrand, logicien.	K	18	93	26	104	192	201	198		
Photographier des stars	L	49	52	204	111	160	12	190	183	31
Observatoire royal	M	24	211	217	114	10				
On pouvait y adorer le ciel	N	3	32	158	166	37	123	133		
Une affection l'est parfois	O	79	154	61	42	119	152	23	44	89
Elles ont un de ces culots...	P	87	86	214	101	184	146			
L'une d'elles est une constellation	Q	145	171	172	164	41	55	68	176	
Kepler la liait aux errants	R	213	100	165	60	43	157	76		
Une touche de lecteur	S	143	46	47	174	78				
Corps simples	T	69	187	135	57	4	39	122		
Neptune, Valéry, Gavroche s'y entendent à Sète.	U	98	142	108	128	88	17	162	80	170
Pionnier de l'astrophotographie	V	140	90	136	82	209	16			
Sortes de verseaux	W	167	186	96	125	144	163	180	33	
Entre deux nouvelles ou deux pleines.	X	75	112	216	56	50	150	132	193	105
Pleuvent mi-décembre	Y	38	25	107	106	219	188	208	175	59
Étalage pour en imposer	Z	14	155	40	129	29	54	48	196	
« Avec nos élèves » le concernera peut-être	a	137	35	153	156	13	65	178	110	27
Repousser	b	63	64	94	127	194	202	72		
Engager dans du délicat	c	21	6	197	45	91	85	173	81	

A1	D2	N3	T4	C5		c6	B7	E8	J9	M10	A11	L12		a13		Z14	G15	V16	U17	K18	J19		B20	c21	C22		O23	M24	Y25	K26	a27	A28	Z29
E30	L31		N32	W33	B34		a35		A36	N37	Y38	T39	Z40	Q41	O42		R43	O44	c45		S46	S47		Z48	L49	X50	C51		L52	H53	Z54	Q55	
X56	T57	A58	Y59	R60		O61	E62	b63	b64		a65	D66	B67	Q68	T69	I70	A71	b72		F73	I74		X75	R76	B77	S78	O79	U80	c81				
V82	G83	C84	c85		P86	P87	U88	O89	V90		c91	E92	K93	b94	F95	W96	B97	U98		E99	R100		P101	G102	G103	K104		X105	Y106	Y107	U108	J109	a110
	L111	X112		G113	M114	J115	H116		A117	G118	O119	F120	F121	T122	N123		I124	W125		D126	b127		U128	Z129	D130	F131	X132	N133	J134		T135		V136
a137	B138	F139	V140		C141	U142	S143		W144	Q145	P146		H147	H148	C149	X150	A151	O152	a153	O154	Z155		a156	R157	N158	H159	L160	C161	U162	W163	Q164	R165	
N166	W167	J168	E169	U170		Q171	Q172	c173		S174	Y175		Q176	I177	a178	J179		W180	B181	J182	L183	P184	J185		W186	T187	Y188		B189	L190	D191	K192	X193
b194		H195	Z196		c197	K198	E199	G200		K201		b202	F203	L204	C205	E206	E207		Y208	V209	C210		M211	A212	R213	P214	G215	X216	M217	I218	Y219	I220	

Le Soleil avait rendez-vous avec l'école d'été du CLEA !

Lionel Muller

Le CLEA a proposé sa traditionnelle école d'été d'astronomie du 22 au 29 août 2013, au centre d'Oxygénation du col Bayard situé sur les hauteurs de Gap. La beauté du site et des repas gastronomiques ont contribué à la réussite de cette école d'été pour laquelle plusieurs organisateurs se sont dépensés sans compter pour la préparer puis l'animer ! Ce rendez-vous devenu désormais incontournable se déroule au col Bayard depuis 1988. Auparavant, des universités d'étés s'étaient tenues en d'autres lieux à partir de 1977, année de création du CLEA.

Une cinquantaine de participants, animateurs et stagiaires, se sont retrouvés au cours de ce séjour qui s'est déroulé dans une très bonne ambiance, voire une entente exceptionnelle que l'on rencontre rarement ailleurs ! Chaque participant, à son propre niveau, a pu assouvir « sans coup férir » sa passion de l'astronomie tant les cours proposés le matin et les ateliers l'après-midi étaient vastes et éclectiques. Le thème abordé cette année était le Soleil qui passe actuellement par un maximum d'activité, ce qui se traduit par l'existence de « taches » à sa surface. Celles-ci ont été observées à travers les lunettes et télescopes, de façon directe après la mise en place d'un filtre à l'entrée de l'instrument ou par projection. Des filtres H α permettaient de scruter les protubérances à sa surface. Une journée entière était consacrée à la découverte des cadrans solaires au pays du Buëch, ces horloges silencieuses magnifiquement décorées aux couleurs locales, témoins d'un passé révolu, qui permettaient jadis, à partir de la lecture de l'heure solaire, d'en déduire l'heure du pays au moment de l'harmonisation de celle-ci. Des cours et exposés de très grande qualité ont porté sur l'étude de la décomposition de la lumière, messagère des astres, les dimensions dans l'Univers et les différentes méthodes utilisées pour estimer les distances qui nous séparent des objets célestes (planètes, étoiles, galaxies, nébuleuses...) en fonction de leur éloignement. Le Soleil, fil conducteur de l'école d'été tenait une place de choix dans les autres interventions : activité solaire et aurores polaires, la place du Soleil dans l'histoire de l'astronomie, la théorie de la relativité appliquée à l'astre du jour. Des « rudiments de physique stellaire »

ont permis d'esquisser « l'âge », du Soleil, l'origine de l'énergie solaire en lien avec les réactions de fusion nucléaire qui se produisent en son sein, son évolution d'ici à quelques milliards d'années.

Ateliers l'après-midi et observations le soir

Certains ateliers présentaient des notions abordées dans les programmes d'enseignement : « la Lune, de l'école au lycée », « le zodiaque », « Lune et énigmes », « les jours et les saisons ». D'autres ateliers proposaient l'élaboration de maquettes et d'instruments, en carton ou en bois, que les stagiaires ont pu ensuite emmener chez eux : constructions de cadrans solaires, d'une monture équatoriale, d'un spectroscopie, d'un appareil à mesurer les angles, d'un théodolite, d'un astrolabe ; réalisation d'un planétarium et autre carte du ciel mobile. Un planétarium gonflable proposait des séances d'initiation de repérage des étoiles. Des ateliers plus calculatoires abordaient la notion de relativité restreinte et proposaient de déterminer de manière indirecte la température du Soleil, ainsi que sa vitesse de rotation à partir de l'exploitation des positions de relevés de taches solaires. L'outil informatique permettait notamment de déployer les logiciels « Stellarium » et « Geogebra ». Un arpentage du terrain et la mesure de différents angles sur le site ont abouti à déterminer les dimensions de celui-ci.

Les soirées étaient consacrées à l'observation du ciel à l'œil nu, au repérage et légendes des principales constellations estivales. Télescopes et lunettes astronomiques pointaient des objets bien plus lointains, comme l'amas globulaire dans la constellation d'Hercule ou la galaxie d'Andromède, galaxie la plus « proche » de nous formée de 100 à 200 milliards d'étoiles dont la lumière a mis plus de deux millions d'années à nous parvenir, partie de « là-bas » au moment où les premiers êtres humains sont apparus sur notre planète. Plusieurs amas dans la constellation du Sagittaire ont été repérés, dans la direction de centre de « notre » Voie lactée.

Le Soleil avait même rendez-vous avec la Lune, le satellite naturel de notre planète qui était bien visible

durant le stage : la formation et la structure de la Lune ont été détaillées au cours d'un des exposés. Le stage s'est terminé par une conférence de haute tenue portant notamment sur l'étude de l'activité solaire, la production et la détection des neutrinos solaires, particules « mystérieuses » qui sont loin d'avoir livré toutes leurs caractéristiques.

Cette école d'été s'inscrit dans le cadre dynamique de la transmission des connaissances et du savoir astronomique de « passionnés à passionnés » sans

distinction de niveau, à l'instar de la façon dont jadis nos lointains ancêtres, à leur manière et avec leurs moyens, racontaient le ciel à leurs descendants en fonction des connaissances et croyances de l'époque.

Si le Soleil a joué de temps en temps à « cache-cache » avec les nuages, il était en tout cas omniprésent dans le cœur de l'ensemble des participants ravis d'avoir passé ensemble une belle semaine « au plus près des étoiles ! »



Solutions des mots croisés page 34

Horizontalement : 1. Convection ; 2. HR (le Soleil et Procyon sont proches sur ce diagramme). Orienté ; 3. Radiative ; 4. Ogres. Ne (pour néon) ; 5. Meu. Métrai ; 6. Os. TEP (tonne équivalent pétrole). Sud ; 7. Mi. Irisé ; 8. Photon. Ote : 9. Hydrogène ; 10. Épée. Lu. Ra ; 11. Relevé (un relevé d'ombres permet de suivre le mouvement apparent du Soleil). Gex ; 12. Ères. Émise.

Verticalement : 1. Chromosphère ; 2. Orages. Hyper ; 3. Dru. Modèle ; 4. Voie. Titrées ; 5. Érasme. Oo ; 6. Cit. Épinglée ; 7. Teint. Eu ; 8. Inversion. GI ; 9. Ote. Austères ; 10. Ne. Vidée. Axe.

Solution de la navette de l'espace-lettres de la page 38

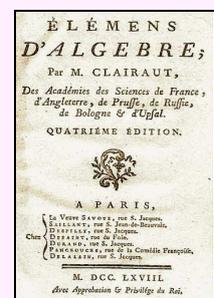
qu'on fait pour la résoudre. Cette manière d'écrire les questions, est l'Algèbre que je fais, pour ainsi dire, inventer au Lecteur.

Pour aller toujours du plus simple au plus composé, je ne propose d'abord que des questions numériques, parce que ce sont celles qui fixent le plus l'esprit des Commencans. Après

« Cette manière d'écrire les questions est l'algèbre que je fais, pour ainsi dire, inventer au Lecteur.

Pour aller toujours du plus simple au plus composé, je ne propose d'abord que des questions numériques parce que ce sont celles qui fixent le plus l'esprit des Commencans ».

Alexis Clairaut, *Elémens d'algèbre*, 1746.



Vous trouverez cette citation dans la préface (pages iv et v) des « élémens d'algèbre » d'Alexis Clairaut. Vous pouvez y accéder sur www.clairaut.com, un site d'une très grande richesse, en cliquant sur 4 août 1745 puis sur C31⁴ (4^e édition des élémens d'algèbre) et télécharger.

Écoles d'Été d'Astronomie



Vous souhaitez débiter 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

Voir la vidéo à l'adresse :

accens.ens-lyon.fr/clea/aLaUne/EEA-clea

Les productions du CLEA

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

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

Fiches pédagogiques

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

Fascicules thématiques de la formation des maîtres, en astronomie

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

Matériel

Filtres colorés et réseaux de diffraction.

DVD

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

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

Le formulaire de commande est sur le site

Planétarium

Il est possible également de louer le planétarium gonflable (starlab) du CLEA. Cette année 2013, il sera en Région Midi-Pyrénées. (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 ;
Réalizations d'instruments et de maquettes ;
Observations ;
Informatique
Les Potins de la Voie Lactée.

COMMENT NOUS JOINDRE ?

Informations générales :

www.clea-astro.eu

OU

www.ac-nice.fr/clea

Siège Social :

CLEA, c/o CFEED
5, rue Thomas Mann
case courrier 7078
75205 PARIS Cedex

École d'Été d'Astronomie :

daniele.imbault@cea.fr

Cahiers Clairaut :

christianlarcher3@gmail.com

Ventes des productions :

<http://ventes.clea-astro.eu/>

Site internet :

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

Adhésion / Abonnement :

Adhésion CLEA pour 2013 :	5 €
Abonnement CC pour 2013 :	25 €
Adhésion + abonnement CC :	30 €
Adhésion + abonnement CC + abonnement numérique :	35 €

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

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

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

Prix au numéro : 7 €

Revue trimestrielle : numéro 143, septembre 2013