

LES CAHIERS CLAIRAUT

N° 141 - Mars 2013 7 €

Bulletin du Comité de Liaison Enseignants et Astronomes

Numéro 141 - printemps 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 Gougouenheim,
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, Nicolas Biver, Michel Bonin, Nathalie Cartier, Pierre Causeret, Christine Dalloubeix, Jean-Luc Fouquet, Gilbert Grébillat, Jean-Jacques Hillairet, Christian Larcher, Chantal Lecoutre, Georges Lecoutre, Philippe Malburet, Jean-Claude Pecker, Frédéric Pitout, Jean Ripert, Béatrice Sandré, Christiane Vilain.

Image de couverture :

La couverture de ce numéro présente une photographie de la comète Hale-Bopp prise par Philippe Canceil du Club d'astronomie de Gigouzac (Lot).

Elle a été réalisée avec un Mamiya C330 (6x6), avec un objectif de 180mm ouvert à 4, pellicule fuji 800ASA. Sur la couverture on peut distinguer le passage d'un avion.

Les Cahiers Clairaut

Printemps 2013 n° 141

Éditorial

Le ciel peut-il nous tomber sur la tête ? A suivre l'actualité récente on pourrait le penser puisque le vendredi 15 février 2013, alors que tout le monde surveillait le passage de l'astéroïde 2012 DA 14 qui frôlait la Terre, un astéroïde tombait dans l'Oural, occasionnait de nombreux blessés et produisait des dégâts matériels.

Dans la partie thématique de ces Cahiers Clairaut nous n'allons pas vous parler d'astéroïdes mais de comètes. Celles-ci étaient, le plus souvent, annonciatrices de prochains malheurs, mais pas toujours, comme en témoignent encore de nos jours la petite étoile ou la petite comète figurant à la base de certains bouchons de champagne. En dehors de l'aspect historique sur les comètes et de la méthode pour les désigner, vous trouverez une étude scientifique sur leurs principales caractéristiques : origine probable, détermination des éléments orbitaux, description de leur double queue de plasma et de poussières, justification de ce qui ressemble à un dard orienté vers l'avant, etc. Par ailleurs les cruciverbistes auront de quoi satisfaire leur passion sur ce sujet.

En plus de ce thème, nous vous invitons à découvrir les mécanismes qui régissent les interactions entre le Soleil et la Terre et particulièrement celles qui provoquent, souvent près des pôles, l'apparition de draperies magnifiques qu'on appelle aurores boréales ou australes.

Nous vous convions à réviser les concepts intuitifs sur la question du mouvement des corps avec Galilée et Poincaré : que veulent ils dire par l'expression « *le mouvement est comme rien* » ou « *il est plus commode de supposer que la Terre tourne* » ?

Pour commencer, donnons la parole à notre président d'honneur JC Pecker. Tout au long de l'année 2013 il nous parlera d'Alexis Clairaut à l'occasion du tricentenaire de sa naissance.

Christian Larcher, pour l'équipe.

Histoire

Alexis Clairaut

Jean-Claude Pecker

p 2

Thème : LES COMÈTES

p 5

Article de fond

Images et mythes de la comète

Philippe Malburet

p 6

Article de fond

Description d'une comète

Philippe Malburet

p 9

Avec nos élèves

Des maquettes pour comprendre le mouvement des comètes

Francis Berthomieu

p 14

Nom d'une comète

Pierre Causeret

p 16

Avec nos élèves

La comète de Halley

Michel Bonin

p 17

Article de fond

Les noyaux des comètes

Nicolas Biver

p 19

À propos de l'excentricité des orbites des comètes

Pierre Causeret

p 24

Mots croisés

p 24

Article de fond

Les relations Soleil - Terre

Frédéric Pitout

p 25

Ciel de printemps

Pierre Causeret

p 30

Article de fond

Espace et relativité autour de 1900 : Henri Poincaré

Christiane Vilain

p 31

Adhésion, abonnement et vente en ligne

p 34

Lecture pour la marquise

Une histoire de la lumière

Christian Larcher

p 35

Courrier des lecteurs

p 36

École d'été d'astronomie Gap 2013

p 37

La relativité sur le site

p 37

Vie de l'association

AG 2012

Jean-Luc Fouquet, Cécile Ferrari

p 38

Solutions mots croisés

p 40

Alexis CLAIRAUT (*) (13 mai 1713 - 17 mai 1765)

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

Les Cahiers Clairaut et le CLEA ne pouvaient pas laisser passer le tricentenaire de la naissance d'Alexis Clairaut sans rappeler ce qu'il fut et ce qu'il fit. Tout à la fois géomètre, physicien, astronome, voyageur, il eût une grande influence sur son époque, et contribua fortement à édifier la pensée scientifique des Lumières dont est issue la science moderne.

Cet article traite de la vie d'Alexis Clairaut, d'autres suivront sur son œuvre.

Le père d'Alexis, Jean-Baptiste, était lui-même mathématicien. Professeur de mathématiques, il était membre de l'Académie royale des Sciences de Berlin que présida Maupertuis à partir de 1740. C'est cet homme savant et introduit dans les milieux intellectuels de son temps, qui se chargea de l'éducation du jeune et précoce Alexis. Sa mère, Catherine Petit, se consacrait à la vie familiale. Elle eut de ce bon mari vingt enfants. Alexis-Claude, né à Paris le 13 mai 1713, était le second ; son frère cadet montrait des capacités d'abstraction aussi profondes que celles de son aîné mais il mourut à seize ans, trop jeune pour les exercer. Alexis fut brillant pour deux. C'est sur les figures des *Éléments* d'Euclide que son père lui fit apprendre l'alphabet. À quatre ans, il savait lire et écrire. Il apprit l'arithmétique avec des techniques pédagogiques simples, mais originales et fort efficaces, et il devint vite un virtuose de la numération. Le goût pour les armes le poussa à entrer plus avant encore dans l'étude, condition nécessaire à tout avenir militaire éventuel. À neuf ans, Alexis lut et assimila l'ouvrage alors célèbre de Guisnée, *"Application de l'algèbre à la géométrie"*, et, à dix ans, les deux traités de M. de l'Hospital, l'un sur les *Sections coniques* et l'autre sur *l'Analyse des infiniment petits* fondé sur les leçons de Jean I Bernouilli (1667-1748) le célèbre mathématicien bâlois. Delisle, professeur au Collège Royal (aujourd'hui Collège de France), ami de Jean-Baptiste Clairaut, s'étonna d'une telle précocité, et le dit. Le jeune Alexis s'indigna d'un doute si vexatoire et démontra qu'il possédait la

géométrie de façon fort correcte.

C'est en 1723 que le destin d'Alexis se précisa. Le dramaturge Philippe Néricaut Destouches, revenu d'une mission diplomatique en Angleterre, vint loger dans la même maison que Clairaut, avec sa femme prête à accoucher. Ce voisinage devint vite très amical, et Destouches présenta le jeune Alexis à l'abbé Bignon, académicien influent, et directeur de la Bibliothèque royale (future Bibliothèque Nationale) ainsi qu'à quelques autres académiciens. De là date la réputation flatteuse qui accompagna Clairaut depuis lors. Ces débuts flatteurs stimulèrent le jeune Alexis. En cachette, avec son jeune frère, il s'attela à la rédaction d'un mémoire sur des courbes particulières. Son père, à la fois furieux et fier de cette *"studieuse débauche"*¹, obtint qu'il présentât son mémoire, *"Quatre problèmes sur de nouvelles courbes"*, devant l'Académie. Alexis Clairaut reçut les éloges les plus vifs des académiciens. Dès lors, les travaux de géométrie savante se suivent (voir dans une livraison ultérieure des Cahiers, l'article consacré à *Clairaut mathématicien*). Mais Clairaut n'était pas le savant concentré uniquement sur ses propres recherches. À treize ans, il fut l'un des artisans de la création d'une association savante, la "Société des Arts", et donc aussi des sciences. Les premiers membres en furent Clairaut père bien sûr, et ses deux fils, les horlogers Leroy, le musicien Rameau, et quatre futurs académiciens, alors encore des jeunes gens, Grandjean de Fouchy, l'abbé Nollet, le physicien de La Condamine et l'abbé de Gua.

(*) Le nom est parfois orthographié "CLAIRAULT", et sa date de naissance est le 13 mai selon Grandjean de Fouchy, le 7 mai selon d'autres auteurs (DSB, Dictionary of Scientific Biography, 3, p.281).

¹ Le mot est de Grandjean de Fouchy, dans son éloge de Clairaut.

La maladie avait quelque peu retardé les travaux d'Alexis. En 1729, son ouvrage fut enfin fini. Présenté le 16 juillet à l'Académie, imprimé le 22 août, cette belle oeuvre attira sur Clairaut la vive sympathie des académiciens unanimes. Ayant obtenu une dispense d'âge de la part de M. de Maurepas (alors secrétaire d'État à la Marine de Louis XV), Alexis Clairaut entra à 18 ans à l'Académie des Sciences, comme adjoint mécanicien. Dès lors, les mémoires se succèdent (voir dans une livraison ultérieure des Cahiers, l'article consacré à *Clairaut mathématicien*).

Les mémoires, et les voyages aussi ! En 1734, Alexis, suivant l'exemple et l'avis de Maupertuis, part pour Bâle, accompagné d'ailleurs de Maupertuis lui-même, pour y travailler avec Jean I Bernoulli avec lequel il noua une durable amitié. Revenu de Bâle, Clairaut trouve l'Académie occupée à définir la figure de la Terre. "*Il était impossible que Clairaut ne prît part à une question si intéressante*"². Comment sortir de cette opposition³ parfois violente entre partisans de la Terre aplatie comme un potiron (les newtoniens), et partisans de la Terre oblongue comme un citron (les cartésiens) ?



On disait en effet que selon les théories newtonienne, les effets de la gravitation devaient se traduire dans un corps en rotation par l'aplatissement de la sphère dans ses régions polaires ; la théorie de Descartes, plus ancienne,

² Selon Grandjean de Fouchy, *Éloge de Clairaut*.

³ Voir dans une livraison ultérieure des Cahiers, l'article consacré à *Clairaut astronome*.

prédit que des tourbillons, qui remplissent l'espace et transmettent les influences des astres sur les autres astres, auraient l'effet au contraire d'allonger la sphère en écrasant en quelque sorte les régions équatoriales. Les « anciens », la famille Cassini-Maraldi en tenaient pour Descartes, les modernes, Maupertuis principalement, stimulés par Madame du Châtelet et Voltaire, en tenaient pour la théorie newtonienne. En janvier 1735, Maupertuis et son jeune confrère et ami Clairaut s'isolent au monastère du Mont-Valérien pour réfléchir à la question en toute tranquillité, une tranquillité troublée seulement parfois par les visites de Madame du Châtelet, qui comme Voltaire se fait le héraut des idées de Newton. C'est là que furent discutées les propositions du cartésien Cassini. Et c'est là, pour trancher entre les deux visions, que fut élaborée l'idée d'une expédition destinée à mesurer, dans le "grand Nord", un arc de méridien.

Laisant à Maupertuis la tâche de l'organisation d'une telle expédition, Clairaut publie plusieurs importants mémoires mathématiques notamment sur l'aplatissement de la Terre, mais aussi sur l'aberration des étoiles (voir dans une livraison ultérieure des Cahiers, l'article consacré à *Clairaut astronome*). L'expédition, fortement appuyée par Maurepas, ministre de la Marine et vice-président de l'Académie, est décidée par l'Académie. Les astronomes se mettent en route à Dunkerque, sur le navire Le Prudent, le 20 avril 1736. Outre Maupertuis et Clairaut, l'expédition comprend Camus, Lemonnier, l'abbé Outhier, ainsi qu'Andréas Celsius, savant suédois qui les accompagnera dès Dunkerque et qui fera bénéficier l'expédition de plusieurs instruments de géodésie. L'abbé Outhier se fera le narrateur de l'expédition qui ne fut pas de tout repos, même si elle fut menée avec précision et rapidité, dans une atmosphère de jeunesse et de gaîté, ce qui fut parfois reproché à Maupertuis et à ses jeunes collègues. Les voyageurs reviennent à Paris le 20 août 1737 et présentent aussitôt leurs résultats au Roi et à l'Académie. L'arc de méridien était en Laponie plus long qu'en France. L'affaire était entendue ! Newton avait raison. Mais il fallut encore longtemps pour que l'argument ait valeur de preuve pour les cartésiens (voir dans une livraison ultérieure des Cahiers le texte: "Clairaut astronome", le détail de l'argumentation). Le mémoire de Clairaut sur l'aplatissement de la Terre lui valut l'admission, comme membre, à la Royal Society de Londres et une pension du roi Louis XV. À l'Académie des sciences, il monte en grade et devient membre le 12 mai 1738.

L'expédition avait tenu compte dans ses calculs de l'aberration de la lumière découverte par Bradley. Mais la théorie de Bradley était sommaire. Clairaut s'attelle donc à la question, dès son retour de Laponie et publie plusieurs articles sur l'aberration de la lumière.

Et Clairaut continue à travailler, à publier de nombreux mémoires, essentiellement mathématiques, mais où il se préoccupe des applications à l'astronomie, comme à la physique, et surtout à la mécanique céleste. Il collabore activement à la rédaction du *Journal des Sçavans*, et guide Madame du Châtelet dans la traduction élégante qu'elle entreprend des *Principia* de Newton. Cette traduction comprend de nombreuses additions dues à Clairaut.

Clairaut entreprend une étude de l'orbite de la Lune. Sa théorie de la Lune aboutit à une grande difficulté, le calcul newtonien ne correspondant qu'assez mal aux observations. Euler et d'Alembert avaient rencontré la même difficulté. Ce fut Clairaut qui démontra l'origine de cette erreur et qui la corrigea. Mais une controverse survint alors avec Buffon, controverse que Clairaut conclut par la considération des perturbations causées par les autres planètes. Ses *Tables de la Lune* firent longtemps référence, et il obtint en 1751 le prix créé sur cette question par l'Académie de Petersbourg.

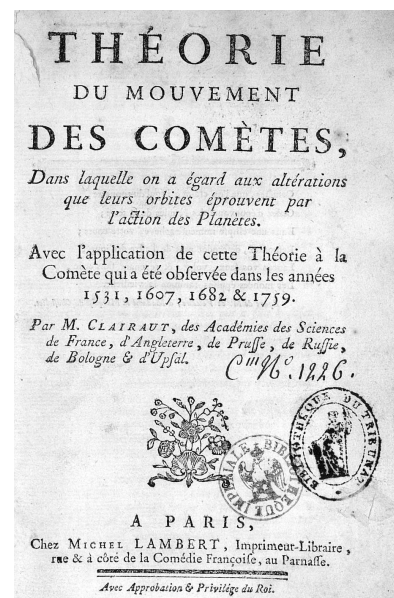
En 1754, Clairaut publie un ouvrage sur la détermination de l'orbite terrestre ; c'est là qu'il présente sa théorie des perturbations ; en effet l'attraction gravitationnelle des planètes doit se combiner à celle du Soleil. La même idée s'applique aussi aux comètes. Et c'est grâce à cette théorie que Clairaut, Lalande et Mme Lepaute arrivent à calculer avec une bonne exactitude la date du "retour" de la comète de Halley, qui fut observée en janvier 1759, avec une très faible avance sur la prédiction. Ce véritable exploit assura définitivement le triomphe de la théorie newtonienne de la gravitation universelle. Cependant cette prouesse fut à l'origine d'une dispute pleine d'acrimonie⁴ avec d'Alembert. Le sujet de la querelle fut essentiellement un désaccord sur la théorie des trois corps, les deux auteurs ayant proposé des solutions différentes. Il semble que l'avantage soit revenu à Clairaut. Le brillant théoricien ne dédaignait pas de s'occuper de besognes moins valorisantes. Ainsi participa-t-il en 1756, sur le terrain, aux

⁴ Clairaut s'en explique longuement dans le *Journal des Sçavans* (juin 1761), dont il était rédacteur.

opérations de mesure de la base géodésique de Villejuif.

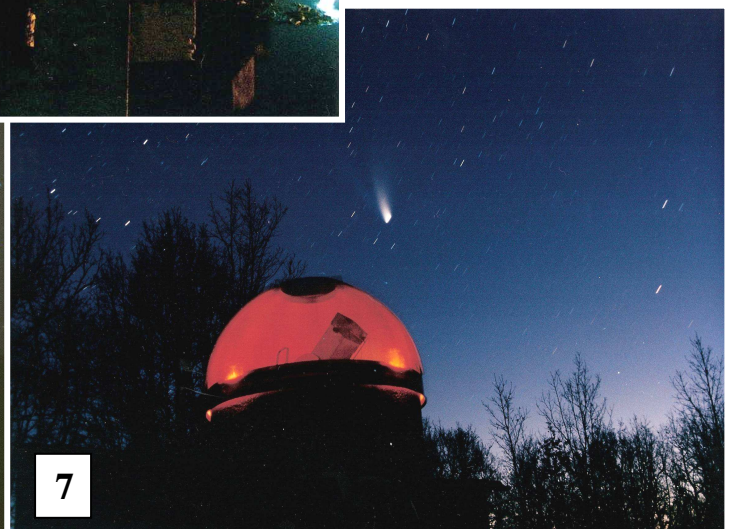
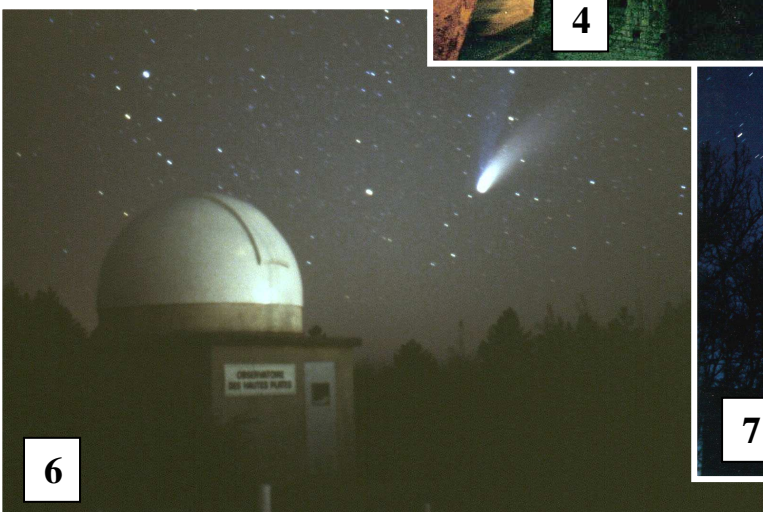
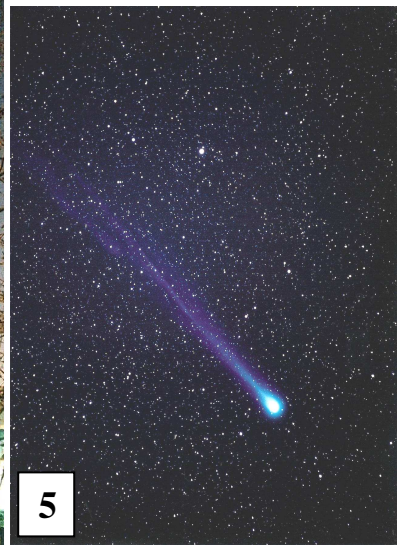
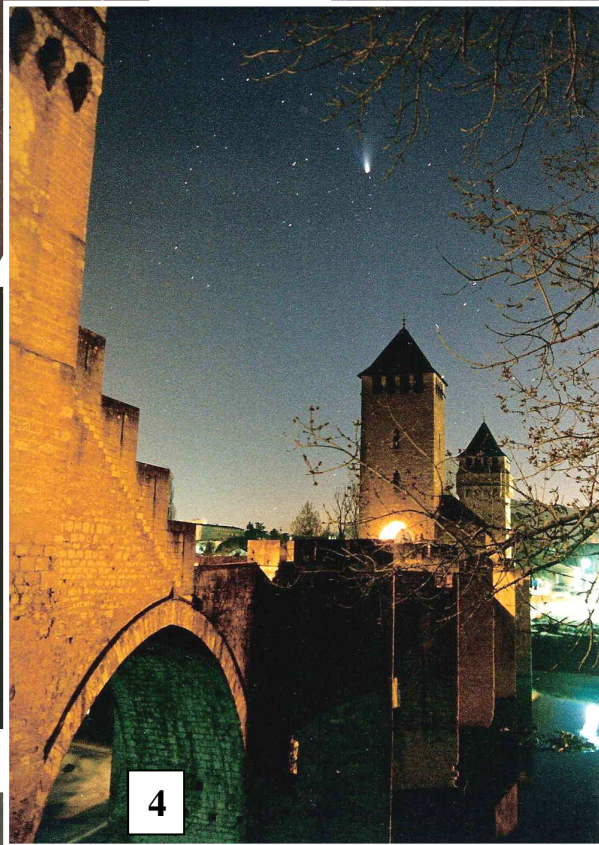
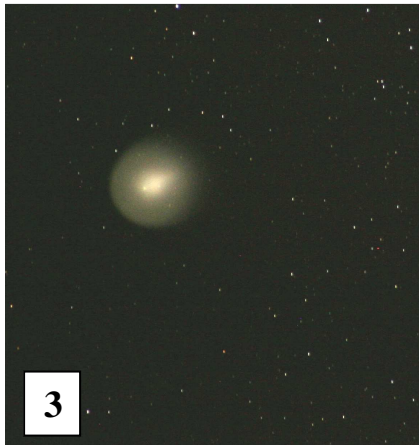
Stimulé par une bourse pour travailler à la Marine, Clairaut s'intéresse de nouveau en 1758, à l'optique, qu'il avait déjà étudiée dès sa lecture de la théorie de la lumière de Newton et qu'il avait exposée devant l'Académie en 1739. Mais les questions pratiques le stimulèrent plus encore. Comment fabriquer des lunettes d'approche performantes, débarrassées notamment des aberrations chromatiques, si gênantes pour les marins ? Il établit (1761-1762) une théorie complète de l'association de verres différents afin, par leurs combinaisons, d'obtenir une lentille achromatique. Cette contribution à l'optique reste utile de nos jours, et l'on utilise encore des "objectifs de Clairaut" (voir, dans une livraison ultérieure des Cahiers l'article "Clairaut astronome").

L'homme "était de taille médiocre, bien fait, et d'un maintien agréable. La douceur et la modestie étaient peintes sur son visage"⁵. Aussi sa vie fut-elle exempte de passion (sauf dans les controverses scientifiques !), et s'écoula dans le calme de l'étude. On dit cependant que cet homme aimable avait quelque succès auprès des femmes ; il ne se maria jamais. Clairaut avait toujours refusé de "souper en ville". Ayant finalement accepté, convaincu par quelques amis, de transgresser ce vœu, il eut une indigestion qui s'ajouta à un "rhume" contracté depuis quelques jours. Cette maladie lui fut fatale. Il en mourut le 17 mai 1765, à l'âge de 52 ans.



⁵ Grandjean de Fouchy, *Éloge de Clairaut*.

THÈME : LES COMÈTES



1. comète Morehouse 1908, ph Wolf Orsay RMN ; 2. comète Halley 31 mai 1910, dessin abbé Moreux ; 3. comète Holmes 6 nov 2007, ph P. Causeret ; 4. comète Hale-Bopp 1997 sur Pont Valentré, ph J. Ripert ; 5. comète Yakutake 1996, ph Ph. Canceil ; 6. comète Hale-Bopp et obs Haute Provence, ph P. Causeret ; 7. comète Hale-Bopp et obs de Gigouzac, ph J.Ripert.

ARTICLE DE FOND

IMAGES ET MYTHES DE LA COMÈTE

Philippe Malburet ⁽¹⁾, Aix en Provence

Les comètes ont certainement, de tout temps, intrigué les hommes : leurs « traînées » lumineuses, leur déplacement apparent souvent détectable d'un jour à l'autre, leur venue comme leur disparition étaient autant de mystères qui intriguaient. De ce fait, elles ont été généralement associées à des calamités : les comètes apportaient le malheur, rarement elles annonçaient des événements heureux. Nous nous proposons de présenter ici certaines images et certains mythes accompagnant les comètes.

Les plus anciennes représentations des comètes

En Occident, il existe assez peu de représentations anciennes de comètes. L'une des plus célèbres est celle qu'en rapporte Hevelius, dans son « *Descriptio Cometae* » où sont reproduites des formes de comètes telles que les aurait proposées Pline l'Ancien, en 77 de notre ère. On y voit des armes : javelot, poignard, épée, lance..., pourtant, Pline n'assimile pas directement les comètes aux événements tragiques qu'elles sont censées produire : ce sont des annonceurs de tels événements.

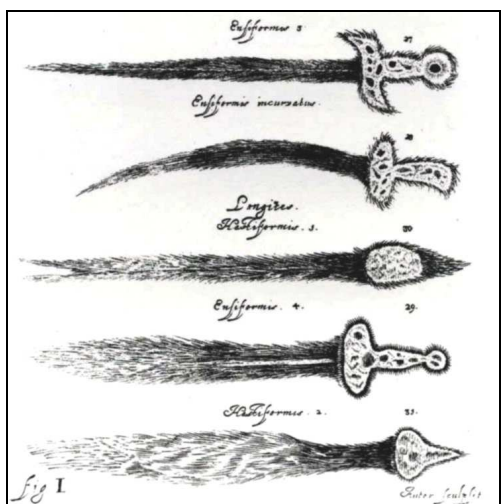
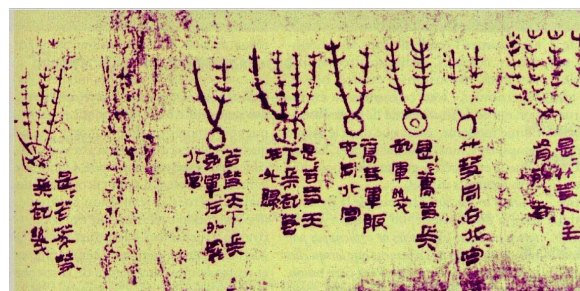


Fig.1. Représentations de comètes dans le livre *Cometographia* d'Hevelius (1668).

Cependant, on a retrouvé, dans une autre partie du monde, les dessins réalisés par les Chinois. Ces représentations nous paraissent beaucoup plus fidèles à l'objet lui-même : les comètes chinoises comportent toutes une tête bien distincte et des queues qui s'en détachent (souvent deux).

(1) Philippe Malburet est professeur agrégé de mathématiques en retraite, fondateur du planétarium Peiresc d'Aix-en-Provence, et a été collaborateur au CNRS en particulier sur les comètes.



Credit NASA JPL

Fig.2. Représentations de comètes données par les Chinois, 300 ans av. J-C.

En 1066, la comète (qui s'appellera plus tard la comète de Halley) est présente dans la célèbre tapisserie de Bayeux (ou broderie de la reine Mathilde). Elle peut être diversement interprétée, notamment du côté du roi Harold qui va subir l'invasion : s'agirait-il d'un mauvais présage ?



Fig.3. Partie de la tapisserie de Bayeux où l'on distingue une comète (« isti mirant stella » : ceux-ci regardent avec étonnement l'étoile).

À la fin du Moyen-Âge, les représentations des comètes indiquent une meilleure adéquation avec l'observation.

En 1301, la comète de Halley se montre en Europe. Devant décorer la chapelle des Scrovegni

(Padoue), le peintre italien Giotto (Ambrogio di Bondone, 1267-1337) l'utilisa (en 1303-1306) pour figurer l'étoile des rois mages.



Fig.4. Fresque de Giotto dans la chapelle des Scrovegni.

De bons observateurs, comme Apianus⁶, ont remarqué assez tôt que les queues des comètes restaient en permanence dans la direction opposée à celle du Soleil.

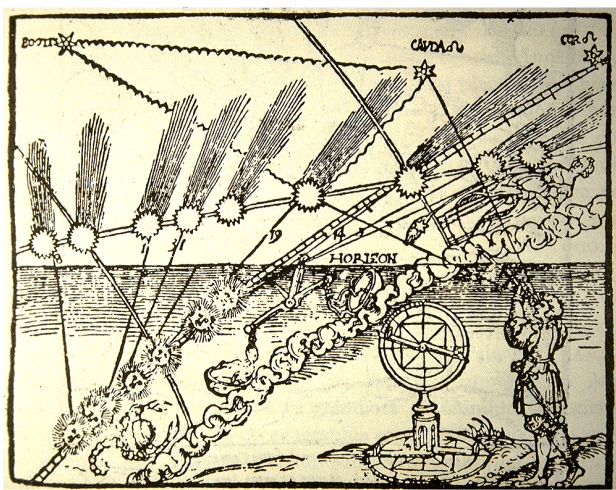


Fig.5. Gravure du mouvement d'une comète laissée par Apianus. On note que la queue s'oppose au Soleil : au fur et à mesure que celui-ci progresse le long de l'écliptique, la comète se déplace mais sa queue reste dans l'alignement du Soleil.

Le vulgarisateur alsacien Conrad Lycosthènes (1518 - 1561) laissa des gravures sur bois représentant des comètes assez réalistes.

⁶Petrus Apianus (16/04/1495 - 21/04/1552), de son vrai nom Peter von Bennewitz, était un astronome allemand. Il fut le mathématicien de Charles Quint. Il s'intéressa aux instruments astronomiques et fut l'un des premiers à suggérer l'emploi de la Lune pour déterminer les longitudes, alors mal connues du fait qu'il n'était pas possible de transporter l'heure (il faudra attendre les chronographes pour cela). Il dessine en 1520 un planisphère resté célèbre.

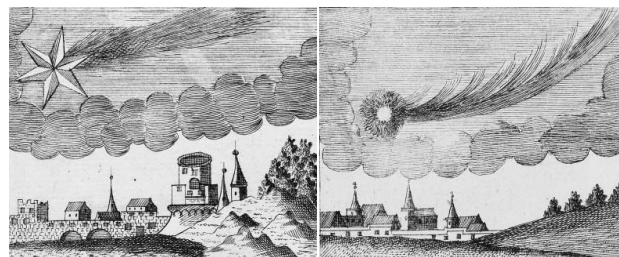


Fig.6. Représentations d'une comète par Lycosthènes.

Les temps modernes

Il fallut attendre Edmund Halley (1656 - 1742) pour que les comètes perdent un peu de leur mystère : désormais on sait qu'une comète n'est pas un météore (manifestation lumineuse dans notre atmosphère), mais qu'il s'agit d'un corps du Système solaire qui évolue, comme le font les planètes, sur des orbites elliptiques. La physique n'a pas encore permis de les caractériser : ce n'est qu'au cours de la seconde moitié du XX^e siècle que ce mystère sera résolu.

Plus tard, les humoristes s'emparèrent de ce symbole comme ce fut le cas de Daumier.

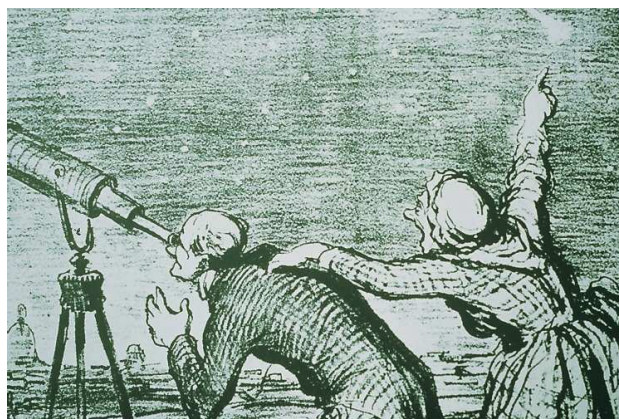


Fig.7. Daumier fustige l'astronome Babinet : alors qu'il cherche sa comète avec une lunette, sa bonne lui montre qu'il s'est trompé de direction.

La grande comète de 1811

Une très belle comète fit son apparition dans le ciel de 1811 : elle ne porte pas de nom. Cette même année correspondit, notamment en France et au Portugal, à une récolte de vin de très bonne qualité : on parla du « vin de la comète ». Un syndicat de producteurs de champagne en fit son symbole. C'est la raison pour laquelle on voit, à la base de nombreux bouchons de champagne, une étoile ou une comète.

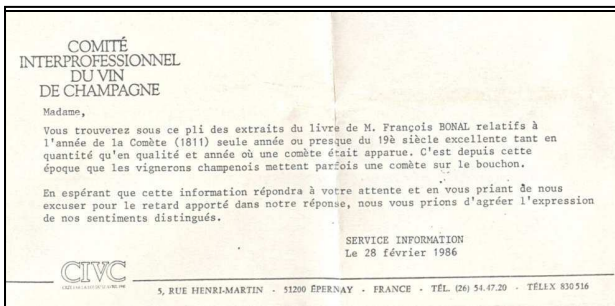


Fig.8. Lettre d'un syndicat de producteurs de champagne indiquant : « ...l'année de la Comète (1811) seule année ou presque du XIX^e siècle excellente tant en quantité qu'en qualité... C'est depuis cette époque que les vignerons champenois mettent parfois une comète sur le bouchon ».



Fig.9. Trois exemples de bouchons de champagne.

Les grandes peurs associées au retour de 1910 de la comète de Halley

Bien que les comètes aient perdu de leurs mystères, le retour de 1910 fut l'occasion de scènes de panique dans de nombreuses villes d'Europe ou des États-Unis.

Il était connu, depuis peu, que les queues de comètes contenaient un gaz mortel : le cyanogène. Un calcul prédictif indiquait que la queue de la célèbre comète serait traversée par la Terre dans la nuit du 18 au 19 mai 1910.

C'est ainsi que plusieurs scènes sont rapportées par les chroniqueurs du moment. Jean-Marie Homet (in « *le retour de la comète* ») cite Camille Flammarion et livre nombre d'anecdotes :

- un Hongrois s'est suicidé, préférant se donner la mort : « *je me tue avant d'être tué ; je crains la mort apportée par un astre* » ;
- un certain nombre d'habitants ont vendu le peu qu'ils avaient pour consacrer en bombances jusqu'au 18 mai le produit de cette vente ;
- en Allemagne, à Bezenburg, près de Trèves, un enfant de six mois a été jeté dans un puits par sa mère devenue folle de terreur ;
- un membre de la Société m'écrit de Moscou que les trois quarts des gens paraissent aliénés et me cite le cas d'une femme du monde très connue, appartenant à une riche famille, âgée de cinquante-quatre ans, qui dans son désespoir, s'est livrée à la boisson alcoolique et a décidé de

mourir en état d'ivresse pour ne rien ressentir le jour fatal ;

- « *donnez-moi une explication sur la rencontre de la comète, je vous en supplie à genoux. N'ayant que seize ans, je trouve que mourir, le 18 mai, c'est trop tôt, je n'ai pas fait mon temps, je ne connais rien de la vie. Ayez pitié d'une petite fille qui ne peut surmonter sa peur* » écrit-on à C. Flammarion.

D'autres anecdotes, dans la fameuse nuit du 18 au 19 mai, sont caractéristiques de cette peur panique :

- en Italie des foules envahissent les églises demeurées ouvertes ;
- à Rome, soixante mille personnes passent la nuit en prières sur la place St Pierre ;
- en Amérique, on calfeutre les fenêtres pour tenter de ne pas laisser passer le gaz mortel ;
- en France, nombreux sont ceux qui, malgré la pluie, passent la nuit au dehors, ou se retrouvent dans les églises, les mairies. Des charlatans vendent une potion *anti-Halleyne*.

Cependant il y eut, à côté de ces scènes de peur, d'autres scènes montrant que l'événement intéressait scientifiques et spectateurs :

- à Paris, Gustave Eiffel invite Camille Flammarion et les astronomes de l'observatoire à suivre l'événement ;
- l'usine d'Air Liquide de Paris procède à des prélèvements d'air aux fins d'analyse ;
- le Bon Marché utilisa cette opportunité pour éditer des affiches pour sa marque ;
- à Marseille, la société Flammarion loue des tramways pour permettre de monter à Notre Dame de la Garde ;
- le quotidien *Le Petit Marseillais* diffuse des indications permettant de suivre d'heure en heure la progression de la comète.



Fig.10. Carte postale du début du XX^e siècle, annonçant la fin du monde pour le 19 mai 1910, jour où la comète de Halley passa au plus près de la Terre, à environ 23 millions de km.

DESCRIPTION D'UNE COMÈTE

Philippe Malburet, Aix en Provence

Les comètes sont maintenant assez bien connues. Les anciens modèles qui ont évolué au cours des temps ont été soit abandonnés soit confortés par les missions spatiales récentes qui permettent d'avoir une bonne idée de ce qu'est une comète. Nous nous proposons, dans cet article, de présenter les différentes parties constitutives d'une comète.

Depuis Edmund Halley, on sait que les comètes ne sont pas des objets sublunaires comme cela était évoqué jusqu'à la fin du Moyen Âge, mais font bien partie du Système solaire, gravitant autour du Soleil. À l'instar des planètes – ou des astéroïdes dont elles constituent une famille spécifique – on sait qu'une comète est constituée de cinq parties principales lorsqu'elle devient visible pour nous, c'est-à-dire lorsqu'elle est relativement proche du Soleil. Toute comète possède les éléments suivants :

- un noyau ;
- une chevelure (ou coma) ;
- une queue de poussière ;
- une queue de plasma ;
- une enveloppe d'hydrogène.



Fig.1. Schéma d'une comète (ici la comète Hale-Bopp).

Le noyau

Il est désormais acquis que le noyau, qui est l'élément central d'une comète, est un astéroïde composé essentiellement de roches et de glaces. C'est vers les années 1950 que l'astronome américain Fred Whipple a émis l'hypothèse qui se révélera correcte, que le noyau était une « boule de neige sale ». Des analyses spectrométriques de la coma montraient en effet la présence de radicaux OH, issus de molécules H₂O (molécules mères) qui ne pouvaient qu'être issues de la sublimation de la glace d'eau. Il fallut attendre les premières missions spatiales pour en avoir la certitude : les missions Giotto, puis les suivantes, confirmèrent cette analyse.

À l'heure actuelle, cinq comètes ont été approchées : Halley par *Giotto* et les sondes *Véga*, Borelly par *Deep Space One*, Wild 2 par la sonde *Stardust*, Tempel 1 par la sonde *Deep Impact* et la comète Hartley par la sonde *Deep Impact* rebaptisée *EPOXI* (voir les photos des fig 1 p 19 et 2 p 22)

Plusieurs paramètres sont désormais connus :

- le noyau est un objet non sphérique, généralement de forme plutôt allongée, dont les plus grandes dimensions peuvent varier entre 1 et 40 km. Il est invisible depuis la Terre ;
- il s'agit d'un corps solide constitué de glaces (eau, monoxyde de carbone, dioxyde de carbone, méthanol et autres composants en moindre quantité) et de matières météoritiques agglomérées, sans doute réparties par moitié ;
- l'albédo est très faible : de l'ordre de 3 à 4 %, ce qui fait que les noyaux cométaires sont parmi les objets les plus sombres que l'on connaisse. Ce fut l'une des principales surprises lorsque ce fait a été découvert sur le noyau de la comète de Halley avec la sonde Giotto ;
- la densité constatée sur les noyaux qui ont pu être étudiés est très faible, entre 0,25 et 1,2 g/cm³ ;
- le matériau cométaire est très poreux et peu conducteur de la chaleur : c'est un corps réfractaire laissant très peu pénétrer la chaleur du Soleil sous la croûte que l'on observe à la surface.

La structure interne d'un noyau est encore mal connue. Deux hypothèses principales sont actuellement en concurrence : celle de l'empilement (*layered pile*) et celle d'une structure fractale (*rubble pile*). On peut sans doute raisonnablement estimer que la vraie réponse sera une synthèse des deux modèles.

Malgré les résultats rapportés par les expériences spatiales (*Giotto* et *Deep Space*) la composition précise des noyaux cométaires est encore largement inconnue. Il faudra prévoir de déposer un module automatique à la surface d'un noyau de manière à étudier in situ directement la croûte cométaire. Ceci est au programme de la sonde *Rosetta* qui devrait

être satellisée autour du noyau de la comète Churyumov-Gerasimenko en 2014. Pour l'heure, l'approche (risquée) des sondes spatiales a permis d'étudier certaines molécules « mères » qui quittent le noyau avant leur transformation par le rayonnement solaire en molécules « filles ». Les résultats les plus certains dont on dispose actuellement sont ceux obtenus par spectroscopie.

Le noyau est animé d'un mouvement de rotation sur lui-même selon un axe dont la direction n'est pas constante notamment du fait des forces non gravitationnelles⁷ qui modifient l'orientation du noyau par rapport au Soleil. Cette rotation est généralement de quelques heures.

La coma

Lorsque le noyau commence à se rapprocher du Soleil, la sublimation des glaces produit le départ de molécules qui vont constituer une véritable atmosphère, appelée chevelure ou coma. Ses dimensions sont considérables par comparaison avec celles du noyau lui-même : alors que ce dernier est de l'ordre de quelques dizaines de kilomètres, la coma peut prendre une extension en général comprise entre 10 000 et 200 000 km. On rencontre dans cette atmosphère des molécules neutres et des radicaux, des atomes et des ions, mais aussi des poussières entraînées par la sublimation des glaces. C'est le rayonnement UV du Soleil qui va casser les molécules et certains atomes pour donner naissance aux radicaux et aux ions : ainsi, le radical OH provient de la molécule H₂O. Il se forme ainsi un plasma qui va interagir avec le vent solaire, qui en est lui-même un, et donner naissance à la queue de plasma.

Éléments trouvés dans la coma et les queues

Composition	Abondance	Composition	Abondance
H ₂ O	100	HNC	0.004-0.007
CO	2-30	CH ₃ CN	0.01-0.02
CO ₂	2-10	HC ₃ N	0.02
H ₂ CO	0.03-4	N ₂	0.02-0.2
CH ₃ OH	1-7	NH ₂ CHO	0.01-0.08
HCOOH	0.05	H ₂ S	0.1-0.6
CH ₃ OCHO	0.05	H ₂ CS	0.02
CH ₄	0.7-2	CS ₂	0.1-0.2
C ₂ H ₆	0.4	HNC	0.004-0.007
C ₂ H ₂	0.2-0.9	CH ₃ CN	0.01-0.02
Phénanthrène	0.15	HC ₃ N	0.02
NH ₃	0.1-1.5	N ₂	0.02-0.2
HCN	0.05-0.2	NH ₂ CHO	0.01-0.08

Tableau des molécules détectées dans différentes comètes, avec leur abondance relative comparée à H₂O.

⁷ Les forces non-gravitationnelles sont celles, imprévisibles par nature, qui résultent de l'action du Soleil. Lorsque des grains de poussière quittent le noyau, ils sont soumis à une force d'éjection de même nature que la poussée d'une fusée.

La queue de poussière

La queue de poussière (dénommée jadis queue de type II) est formée par les poussières issues de la sublimation des glaces du noyau. La pression de radiation solaire les repousse dans une queue spécifique, généralement de couleur jaune. Les grains, dont l'albédo est assez élevé (de 0,1 à 0,4) sont constitués pour l'essentiel de silicates.

Théorie mécanique de sa formation

Cette queue peut être bien modélisée par l'outil informatique grâce à une approche mécanique de la question. Selon une théorie développée par Friedrich Bessel⁸ (1830) et Fiodor Bredikhin⁹ (1900) puis modélisée par Michael Finston et Ronald Probst¹⁰ (1968) un grain de poussière quitte le noyau sans vitesse initiale sous l'effet de la sublimation des glaces. Tout se passe ensuite comme s'il était soumis à une force unique que l'on peut considérer comme la somme de la force de pression (répulsive et proportionnelle à la section du grain supposé sphérique) et de la force de gravitation (attractive, mais d'intensité plus faible). Ceci permet alors de considérer qu'un grain est soumis à une force unique issue du Soleil : la mécanique newtonienne peut alors être employée pour déterminer le mouvement des grains à l'intérieur de la queue de poussière.

Les grains quittant le noyau sont de tailles et de densités différentes. Soumis à deux forces émanant du Soleil (la force de gravité et la pression de radiation), ils sont donc soumis à une force centrale et vont suivre des trajectoires différentes à des vitesses distinctes. Suivant les lois de Newton, ces trajectoires sont des coniques. Si l'on s'intéresse à leur répartition spatiale, on constate que l'on peut analyser la situation en prenant en compte deux variables : une quantité β (fonction du produit de leur densité par leur diamètre) et le temps t . On obtient ainsi deux types de lieux géométriques :

- Pour des valeurs de β constantes, la variable t produit une répartition selon des lignes dénommées *synchrones* ;
- Pour des valeurs de t constantes la variable β

⁸ **Friedrich Wilhelm Bessel** (1784-1846) était un astronome et mathématicien allemand. Il a en particulier déterminé les premières mesures précises des distances des étoiles. Il émit l'hypothèse que les queues de comètes pouvaient être dues à une force répulsive émanant du Soleil.

⁹ **Fiodor Aleksandrovitch Bredikhine** (1831-1904) était un astronome russe, professeur d'astronomie à Moscou et directeur de l'observatoire de cette ville, puis de Poulkovo. Il s'est intéressé aux comètes et particulièrement à leurs queues, reprenant les idées de Bessel et définissant des lieux géométriques appelés synchrones et syndynames.

¹⁰ In *Astronomical Journal*, Vol 154, octobre 1968.

produit une répartition selon les *syndynames* (ou syndynes).

La superposition des synchrones et des syndynames permet une très bonne modélisation, dans le plan cométaire, de la queue de poussière. La forme de la queue est donnée par la réunion de ces deux ensembles de lieux géométriques (figure 2).

Les trois images suivantes montrent des photographies de la comète de Halley prises à trois dates distinctes. On a reproduit en dessous les tracés synchrones-syndynames correspondants : on notera que ces tracés modélisent bien la forme générale de la queue de poussière qui, progressivement, se referme au fur et à mesure que le plan de l'orbite de la comète change d'inclinaison par rapport à un observateur terrestre.

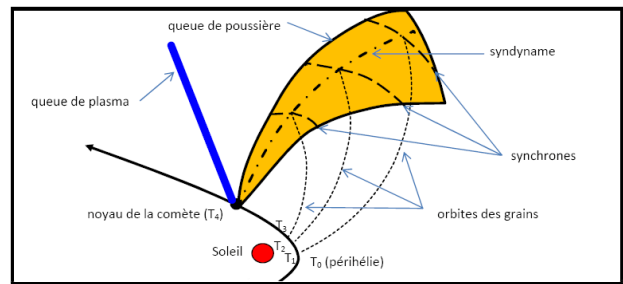
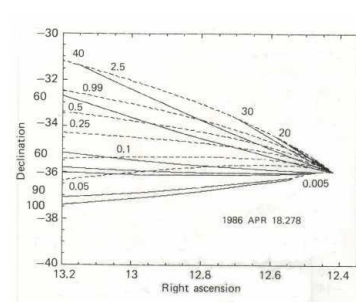
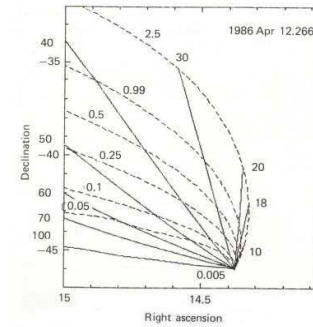
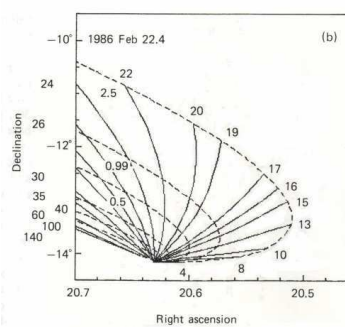
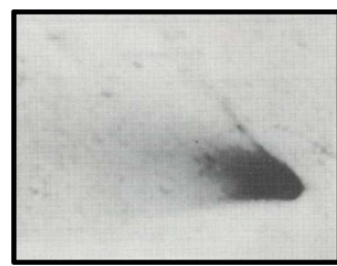
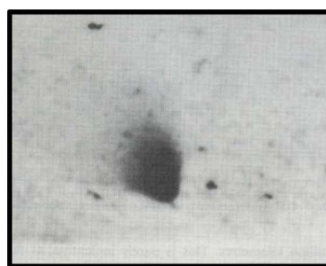


Fig.2. Des grains de même taille ont quitté le noyau aux époques T_1 , T_2 et T_3 . Ils se retrouvent sur la même syndyname lorsque le noyau est soumis à une force centrale ; il décrit une conique dont le Soleil est le foyer. Ils se retrouvent également sur trois synchrones distincts puisque partis à des dates distinctes.



H. Pederson (ESO-Wide Field CCD Camera)

Dessins Ph. Lamy et Ph. Melburet

Fig.3. Interprétations de la queue de la comète de Halley à trois dates différentes. De gauche à droite : le 22 février 1986, le 12 avril 1986 et le 18 avril 1986. Les syndynames sont représentés en lignes discontinues, alors que les synchrones sont en traits pleins.

Les anti-queues

Certaines comètes (Arend-Roland en 1956) présentent une sorte de dard, appelé anti-queue, dans la direction solaire, ce qui posa longtemps un problème d'interprétation. La théorie mécanique exposée ci-dessus permet de très simplement en rendre compte. Les grains les plus gros ne quittent le voisinage du noyau que très lentement. Ces grains s'alignent sur des syndynames très resserrés et lorsque la Terre traverse le plan de l'orbite cométaire, ceux-ci apparaissent sous la forme d'un jet relativement court, contenu dans ce plan et qui, par effet de perspective, semble dirigé vers le Soleil.

La queue de plasma

La queue de plasma, aussi appelée queue de gaz, queue ionique ou queue de type I, est constituée des gaz sublimés par échauffement solaire des glaces

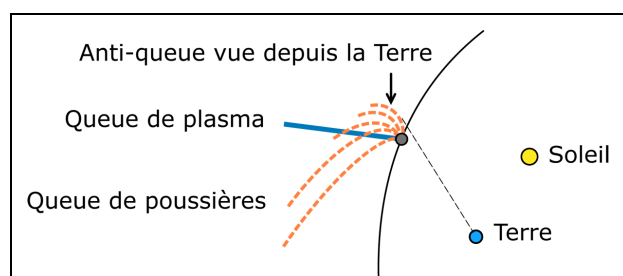


Fig.4. La comète Arend-Roland et son « anti-queue ».

Photo K.W. Schirrick, 1957

contenues dans la croûte du noyau et ionisés par l'action du rayonnement ultraviolet. Comme tout plasma, cette queue est électriquement neutre et transporte un champ magnétique.

Les ions formés au sein de la coma sont ainsi repoussés dans la direction antisolaire et donnent naissance à une queue rectiligne qui paraît filamenteuse. Ce sont les ions CO^+ (qui lui donnent sa couleur bleutée) et H_2O^+ qui dominent le spectre.

Le physicien suédois Hannes Alfvén (1908-1995) étudia les déplacements des particules électrisées dans un plasma et en déduisit le mode de formation de la queue ionique des comètes (figure 5). La tête de la comète, symbolisée par le cercle gris, pénètre dans le champ magnétique interplanétaire dont les lignes de force sont parallèles (a). Au fur et à mesure de la progression de la tête, les lignes de force se déforment (b) et (c) jusqu'à donner naissance à un faisceau qui sera la queue de plasma (d).

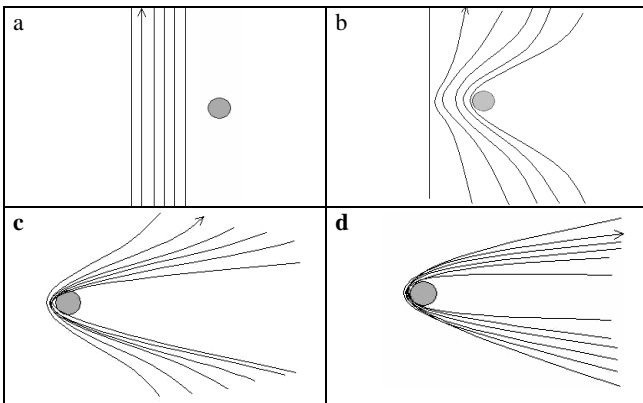
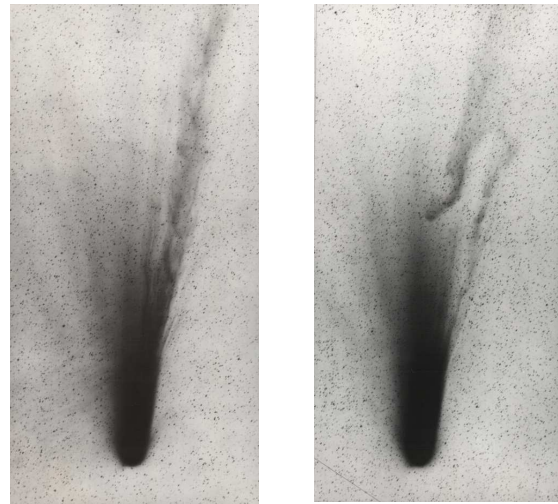


Fig.5. Hypothèses de Alfvén sur la formation de la queue de plasma d'une comète.

Comme le plasma solaire (le vent solaire), le plasma cométaire transporte un champ magnétique qui peut entrer en conflit avec le vent solaire : si les polarités de l'un et de l'autre s'opposent, la queue de plasma se coupe pour se reconstituer dans les heures qui suivent, ainsi que cela a été observé pour la comète de Halley (aussi bien lors du retour de 1910 que lors de celui de 1985-86).

On sait en effet que le vent solaire est un plasma issu du Soleil. Ce dernier est constitué par des zones de polarités opposées, séparées par un feuillet neutre et qui se développent en quittant le Soleil comme une robe de ballerine. En conséquence, lorsque le plasma solaire entre en contact avec le plasma cométaire, il peut se produire un conflit de polarité qui détermine la rupture de la queue de plasma.

L'interaction des queues de comètes avec le vent solaire a été mise en évidence en 1951 par l'astronome allemand Ludwig Biermann (1907-1986).



9 mars 1986.

10 mars 1986.

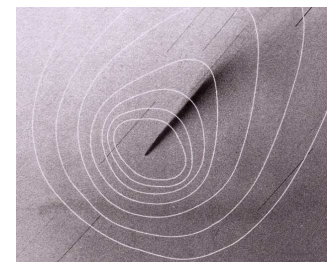
Photos H.E. Schuster, télescope Schmidt de l'ESO (Chili)

Fig.6. Comète de Halley photographée à un jour d'intervalle. On distingue nettement sur la figure (a) la queue de plasma rectiligne, sur la droite du cliché. Sur le cliché (b) la queue de plasma (dont on voit le lambeau qui se détache), se reconstitue quelques heures après la séparation du lambeau initial.

L'enveloppe d'hydrogène

Les premières observations de comètes dans l'ultraviolet depuis des fusées Aerobee, largement confirmées par des observations spatiales, ont montré l'existence d'un halo d'hydrogène atomique de très grandes dimensions (il peut s'étendre sur plusieurs centaines de millions de kilomètres) qui s'étire au-delà de la queue de plasma. La découverte dès 1970 de cette enveloppe d'hydrogène et de radicaux OH renforça l'hypothèse de la boule de neige sale proposée par F. Whipple. Elle fut confirmée par les analyses spectrales effectuées dans l'espace par les sondes spatiales.

Fig.7. Superposition des isophotes de la raie Lyman α du halo d'hydrogène sur un cliché de la comète Bennett pris à l'OHP réalisée par J.L. Bertaux, J.E. Blamont et M. Festou.



Le fonctionnement d'une comète

Éléments orbitaux

Comme tout corps appartenant au système solaire, le mouvement des comètes se fait sur une conique parfaitement définie par six paramètres qui sont :

- T , l'instant du passage au périhélie ;
- a , le demi-grand axe (ou q , distance au périhélie) ;
- e , l'excentricité ;
- i , l'inclinaison du plan de l'orbite cométaire sur l'écliptique ;
- Ω , la longitude du nœud ascendant ;
- ω , l'argument de latitude du périhélie.

Ce mouvement est parfaitement décrit par les lois de Kepler. Par convention, si $i > 90^\circ$, la comète est dite rétrograde, et directe dans le cas inverse. Ces divers éléments permettent d'en déduire notamment la période P.

Lorsqu'une nouvelle comète est découverte, il faut au moins trois observations pour déterminer une orbite osculatrice (méthode de Gauss), en faisant l'hypothèse qu'elle se trouve sur une orbite parabolique ($e = 1$). Les observations suivantes servent à déterminer une orbite plus proche de la réalité, ce qui permet de calculer la vraie excentricité et d'affiner les autres paramètres.

Le mouvement d'une comète

À l'instar des autres astres du système solaire, une comète est soumise à la force gravitationnelle du Soleil (problème des deux corps). En général elle décrit une orbite elliptique. Il peut cependant advenir que la comète subisse l'action gravitationnelle d'une planète massive, notamment avec Jupiter. Le mouvement est alors perturbé : la valeur de l'excentricité change. Si celle-ci devient supérieure à 1, la trajectoire est une hyperbole et la comète quittera le système solaire.

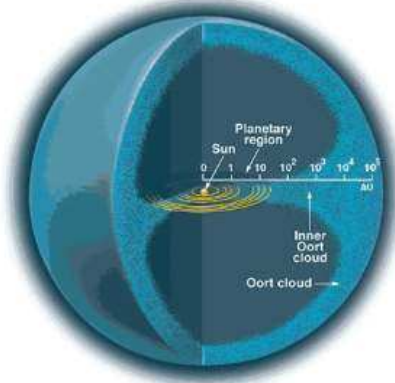
Cependant, on constate souvent, dans le cas des comètes périodiques, de forts écarts entre les paramètres déjà connus et ceux lors du retour suivant. En effet, les forces de gravitation ne sont pas les seules à agir. On sait que le dégazage d'une comète libère du gaz et des poussières. Ce phénomène provoque un véritable effet de réaction, modifiant parfois de manière conséquente le mouvement. Cet effet porte le nom de « forces non gravitationnelles ». Bien entendu, rien ne permet de les prévoir : il y a donc toujours des incertitudes quant aux variations que va subir un noyau cométaire au cours de son périple.

Le nuage d'Oort

Étudiant 46 comètes en 1950, l'astronome néerlandais Jan Hendrik Oort (1900-1992) a formulé l'hypothèse que les comètes pourraient provenir d'une région située à la limite externe du Système solaire, dans une vaste enveloppe comprise entre 30 000 et 100 000 UA du Soleil. Pour ce faire il a étudié la distribution des inverses des demi-grands axes et constaté un pic de valeurs lorsque a est supérieur à 20 000 UA. Bien qu'aucune observation directe de ce nuage d'Oort n'ait pu être réalisée, cette hypothèse est actuellement bien admise par les spécialistes.

Le mécanisme par lequel un noyau de comète quitte les parties lointaines du nuage d'Oort est assez mal connu. L'une des hypothèses serait une perturbation d'ordre gravitationnel. Une étoile « proche » pourrait avoir un effet perturbateur sur les noyaux

les plus rapprochés, ce qui aurait pour effet de projeter ce noyau en direction du Soleil. Lorsque celui-ci arrive à proximité de la Terre, on assiste à la venue d'une comète dite « nouvelle ».



Credit ESO

Fig.8. Représentation du nuage d'Oort selon une échelle logarithmique. Les cercles jaunes sont les orbites des planètes.

La fin d'une comète

La durée de vie d'une comète est grande. Cependant on a assisté à des « fins » de comètes.

Cela a été le cas pour la comète West. Lors de son passage au périhélie, les forces de cohésion du noyau n'ont sans doute pas été suffisantes et le noyau s'est fragmenté après : on a assisté à sa disparition en direct.

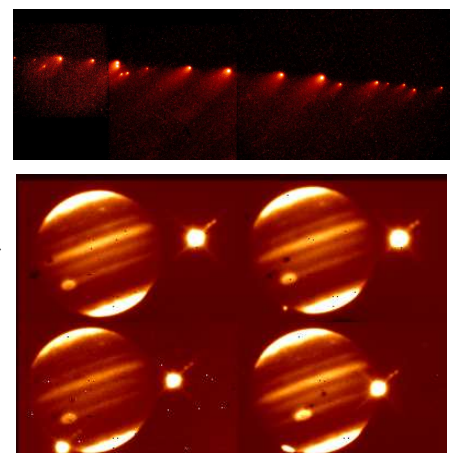
De la même manière, le noyau de la comète Shoemaker-Levy après être passé à proximité de Jupiter, s'est fragmenté en petits éléments le long de l'orbite. Lors du retour suivant, ces fragments ont pénétré dans l'atmosphère de Jupiter, y provoquant de véritables petits cataclysmes dont la marque est restée quelques temps dans la haute atmosphère.

La sonde Soho, dont l'objectif était d'étudier la couronne solaire en continu, a assisté, ici encore en direct, au véritable plongeon mortel de petites comètes dans le Soleil.



Source : New Mexico State University.

Fig.9. Fragmentation du noyau de la comète West (mi-avril 1976).



HST

JPL/NASA

Fig.10. Fragmentation du noyau de la comète Shoemaker-Levy 9. Sur le cliché inférieur, on assiste à l'éclat de lumière produit par la pénétration des fragments de cette comète dans l'atmosphère de Jupiter (16 juillet 1994).

AVEC NOS ÉLÈVES

Des maquettes pour comprendre le mouvement des comètes

Francis Berthomieu

Les prochains mois devraient être, selon les spécialistes, d'excellentes opportunités pour observer des comètes. Deux d'entre elles sont annoncées comme potentiellement très brillantes : C/2011 L4 - PANSTARRS et C/2012 S1 - ISON. Pour mieux comprendre les éventuels phénomènes que l'on pourra observer, voici quelques suggestions pour construire des maquettes en trois dimensions de leurs trajectoires.

Les paramètres orbitaux

Comme pour tout objet qui parcourt le système solaire, les paramètres orbitaux d'une comète sont généralement établis à partir du suivi de sa trajectoire : si l'on néglige les perturbations gravitationnelles des objets célestes qu'elle va côtoyer, cette trajectoire est plane et il s'agit d'une conique, dont le Soleil occupe un foyer.

D'un point de vue mathématique, les orbites des comètes sont définies à l'aide de cinq paramètres principaux :

Lorsque ce satellite du Soleil passe au point le plus proche du Soleil, P, on dit qu'il est au périhélie.

Sa distance au Soleil est alors appelée *distance périhélique*, généralement notée « q ».

Selon la valeur de son *excentricité* « e » l'orbite de la comète peut être quasiment circulaire ($e = 0$), elliptique ($e < 1$), parabolique ($e = 1$) ou hyperbolique ($e > 1$).

Dans le seul premier cas, la comète est périodique et l'on note T sa période. Dans les deux derniers il s'agit d'une comète non périodique qui ne devrait effectuer qu'un seul passage dans le système solaire.

Ces deux paramètres q et e suffisent pour construire l'orbite, mais il faut préciser la position du plan orbital par rapport à celui de la Terre, le plan de l'écliptique : ces deux plans contenant le Soleil, ils se coupent selon une droite, qui elle-même rencontre l'orbite cométaire en deux points, les nœuds ascendant et descendant.

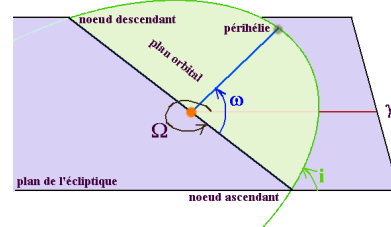
L'angle Ω que fait la direction Soleil-point vernal γ , avec la direction Soleil-nœud ascendant est la *longitude du nœud ascendant*.

Dans le plan de l'orbite cométaire, l'angle « ω » que font la direction Soleil-nœud ascendant et la

direction Soleil-périhélie, est l'*argument de latitude du périhélie*.

Enfin, l'*inclinaison* « i » est l'angle que fait le plan orbital de la comète avec celui de l'écliptique. Il ne peut varier qu'entre 0 et 180°. Vu depuis le pôle nord de l'écliptique, une comète qui semble tourner, comme la Terre, dans le sens trigonométrique, direct, aura une inclinaison inférieure à 90°. Si c'est l'inverse, son inclinaison sera comprise entre 90 et 180°.

On peut obtenir facilement ces paramètres sur le site de l'IMCCE : à la rubrique "éphémérides", il existe un lien vers des "notes cométaires", et des onglets pour s'informer sur les comètes, classées par numéro, nom ou date de découverte.



Comment construire l'orbite?

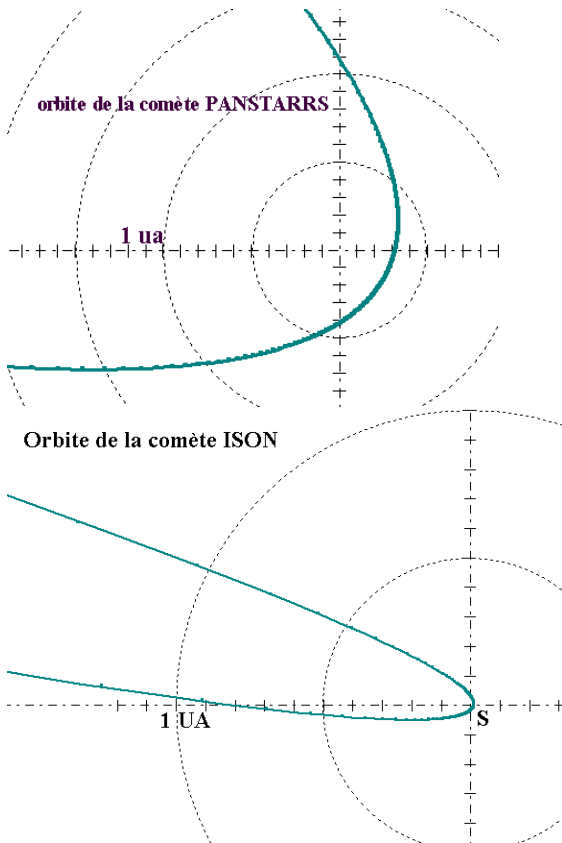
L'ordinateur est un moyen commode de tracer la courbe représentative d'une orbite en coordonnées polaires. En prenant le Soleil pour centre, en appelant respectivement α et r l'*angle polaire* et le *rayon*, l'équation classique, en fonction des paramètres orbitaux définis précédemment est :

$$r = \frac{(1 + e) q}{1 + e \cos(\alpha - \omega)}$$

Voici les paramètres orbitaux des deux comètes que nous attendons avec impatience.

comète	PANSTARRS	ISON
q	0,30167 ua	0,01244 ua
e	1,00013	1,00000
Ω	65,6677 °	295,6552 °
ω	333,6333 °	345,5633 °
i	84,1396 °	62,3863 °

On constate ($e = 1$) que ces deux comètes ont une trajectoire parabolique : cela semble prouver qu'elles viennent directement du nuage de Oort. Il est facile de faire tracer leurs orbites à un ordinateur : on obtient les courbes suivantes.



Il est un peu plus délicat de situer la comète à une date donnée : en effet, les éphémérides ne donnent pas l'angle polaire. Mais on peut le calculer à partir de la distance au Soleil qui, elle, est donnée. On trouve :

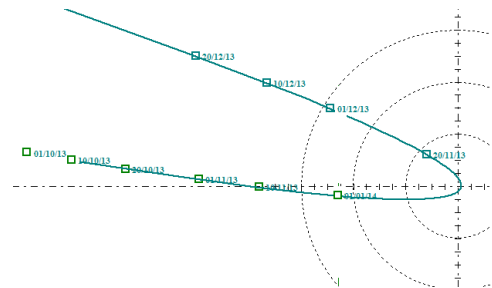
$$\alpha = \omega + \arccos \left[\frac{(1+e)q - r}{re} \right]$$

Des maquettes

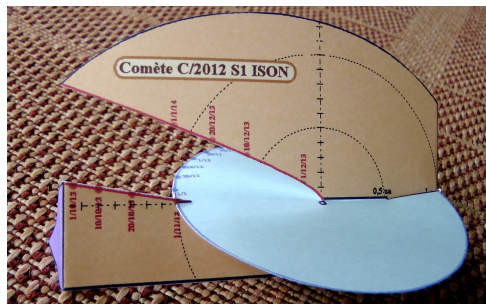
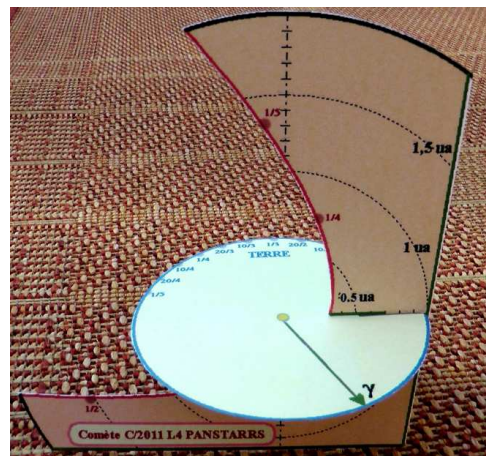
En choisissant ainsi quelques dates caractéristiques, on peut placer la comète sur sa trajectoire aux dates choisies, et en associant ce tracé à un découpage adéquat, construire en 3D une maquette où sera visualisée l'orbite de chacune des deux comètes lors de son passage au voisinage de l'orbite terrestre.

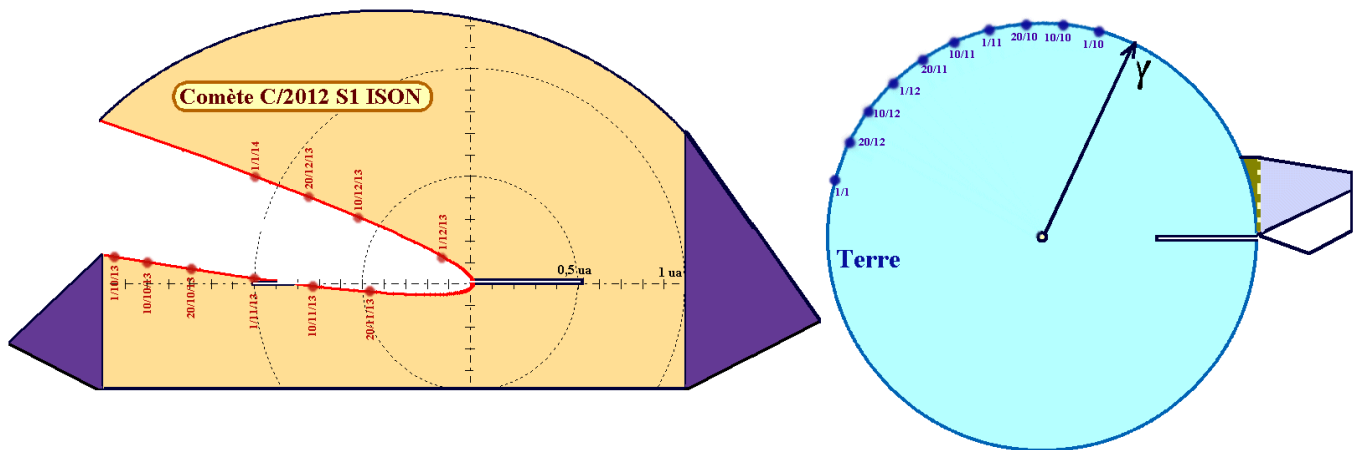
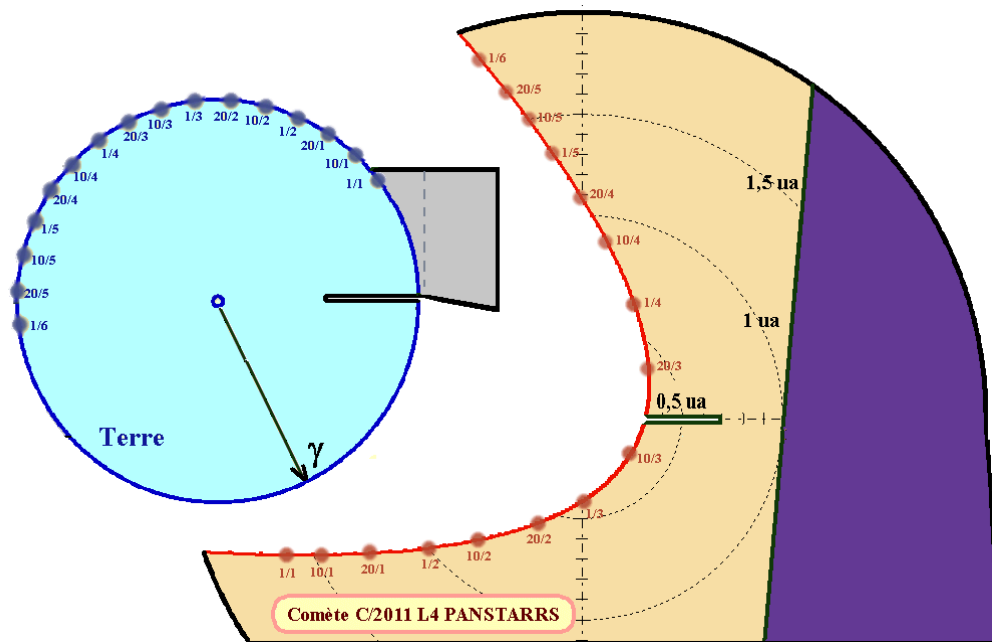
Voici le tableau obtenu avec REGRESSI pour la comète ISON, suivi de la trajectoire « datée ».

i	r	α	date
	ua	°	
0	1.65	-184.4	01/10/13
1	1.48	-183.9	10/10/13
2	1.27	-183	20/10/13
3	0.99	-181.5	01/11/13
4	0.76	-179.7	10/11/13
5	0.46	-175.5	20/11/13
6	0.17	134.2	01/12/13
7	0.57	148.6	10/12/13
8	0.83	151.5	20/12/13
9	1.12	153.5	01/01/14



On peut faire de même pour PANSTARRS. Vous trouverez sur la page suivante les éléments à photocopier sur bristol puis à découper pour construire les deux maquettes, que voici.





Le nom d'une comète

Deux comètes facilement observables sont annoncées pour 2013 : C/2011 L4 (PANSTARRS) et C/2012 S1 (ISON). D'où viennent ces noms barbares ?

Depuis le 1^{er} janvier 1995, le nom d'une comète est composé ainsi :

- la lettre P/ pour périodique (période < 200 ans) ou C/ pour non périodique (ou à période longue) ;
- l'année de la découverte ;
- une lettre indiquant la quinzaine de découverte dans l'année. On compte deux quinzaines par mois, donc 24 par an, les lettres I et Z ne sont pas utilisées ;
- un numéro indiquant l'ordre de découverte dans sa quinzaine.

On ajoute à cette dénomination le nom du ou des découvreurs.

C/2011 L4 (PANSTARRS) est donc une comète non périodique ou à période longue, la quatrième découverte dans la 11^e quinzaine de 2011 (L est la 11^e lettre de l'alphabet puisqu'on ne prend pas le I) donc début juin (en réalité le 6 juin). Elle n'a pas été trouvée par M. Panstarrs mais par le programme automatique Pan-STARRS (acronyme de Panoramic Survey Telescope And Rapid Response System) doté de 4 télescopes et qui a pour but de repérer des objets croisant l'orbite terrestre.

C/2012 S1 (ISON) est elle aussi non périodique, c'est la première comète à avoir été découverte dans la 18^e quinzaine de 2012 (fin septembre) à l'aide d'un télescope de l'International Scientific Optical Network (ISON).

La comète de Halley

Michel Bonin, enseignant en sciences physiques

Les deux activités qui suivent peuvent être réalisées en travaux pratiques en classe de Terminale S quand les lois de Kepler, les notions de vitesse et d'accélération, ainsi que la seconde loi de Newton, sont abordées. Vous trouverez les solutions sur le site du CLEA

Activité 1 :

Kepler et la comète de Halley

a. Objectif

Vérifier les trois lois de Kepler à partir de la trajectoire de la comète de Halley de 1938 à 2012.

b. Prérequis

Savoir que le périhélie est le point de l'orbite le plus proche du Soleil et que l'aphélie est le point de l'orbite le plus éloigné du Soleil.

Savoir que l'unité astronomique (ua) représente la distance Terre-Soleil (1 ua \approx 150 millions de km)

c. Lois de Kepler

La trajectoire de la comète de Halley a été tracée sur le document 1. On a placé la comète le 1^{er} janvier de chaque année, de 1938 à 2013.

Première loi : loi des orbites (1609)

- Placer le périhélie P et l'aphélie A sur l'orbite de la comète $a = PA/2$.
- Mesurer le segment PA et en déduire le demi grand axe a de l'orbite de la comète.
- Placer le point O au milieu de [PA] et S' symétrique de S par rapport à O.
- Mesurer le segment [OS].

- Calculer l'excentricité e de l'orbite de la comète ($e = OS / a$)
- Soit M un point quelconque de la trajectoire. Vérifier que $SM + S'M = 2a$ (propriété de l'ellipse).
- Conclure en énonçant la première loi de Kepler.

Deuxième loi : loi des aires (1609)

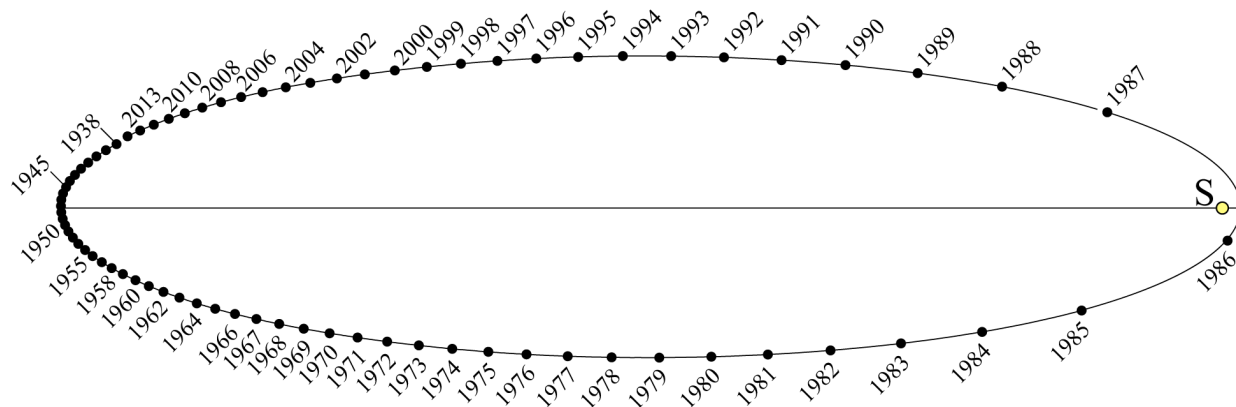
- Découper les contours des surfaces limitées par deux segments Soleil - comète et par la trajectoire de la comète. On prendra à chaque fois deux positions de la comète espacées de 15 ans comme (1945, 1960), (1970, 1985) et (1987, 2002).
- À l'aide d'une balance électronique, peser les différentes surfaces.
- Conclure en énonçant la deuxième loi de Kepler.

Troisième loi : loi des périodes (1618)

- En exprimant a en unité astronomique et T en année, calculer la valeur du rapport k suivant pour la Terre.

$$k = a_T^3 / T_T^2$$

- Vérifier que $a_C^3 / T_C^2 = k$ pour la comète.
- Conclure en énonçant la troisième loi de Kepler.



Document 1. Positions de la comète de Halley du 1^{er} janvier 1938 au 1^{er} janvier 2013 (données IMCCE). Sur ce graphique, 1 cm représente 2,2 unités astronomiques.

Activité 2 : Gravitation et comète

a. Objectif

Vérifier la loi de la gravitation universelle de Newton à partir d'une portion de la trajectoire de la comète de Halley, celle située à proximité du Soleil, et calculer la masse du Soleil.

b. Prérequis

- Savoir que le périhélie est le point de l'orbite le plus près du Soleil.
- Savoir tracer des vecteurs vitesse sur une trajectoire et savoir déterminer les vecteurs accélération⁽¹⁾ à partir de ces vecteurs vitesse.
- Savoir que l'anomalie vraie (a_v) est l'angle orienté déterminé par les vecteurs Soleil-périhélie et Soleil-comète. Cet angle est négatif avant le passage au périhélie et positif après.

c. Travail

Il conviendra d'utiliser une partie des données du document 2 et le document 3 pour réaliser l'activité.

- À partir du tracé des deux vecteurs vitesse \vec{V}_{t-5} et \vec{V}_{t+5} aux instants $t-5$ et $t+5$, construire le vecteur $\Delta\vec{V}_{t=5} = \vec{V}_{t+5} - \vec{V}_{t-5}$ à partir du point n° t (t est en jours).

Échelle : 1 cm \leftrightarrow 10 km.s⁻¹. Faire les constructions pour les positions 10, 30, 50 et 70.

- Calculer puis construire le vecteur accélération

$$a_t = (\vec{V}_{t+5} - \vec{V}_{t-5}) / 2\Delta t = \Delta\vec{V}_v / 2\Delta t$$

Échelle : 1 cm \leftrightarrow 4.10⁻³ m.s⁻²

- Compléter le tableau suivant

t (jours)	10	30	50	70
ΔV_t (km.s ⁻¹)				
ΔV_t (m.s ⁻¹)				
2Δt (j)				
2Δt (s)				
a_t (m.s ⁻²)				

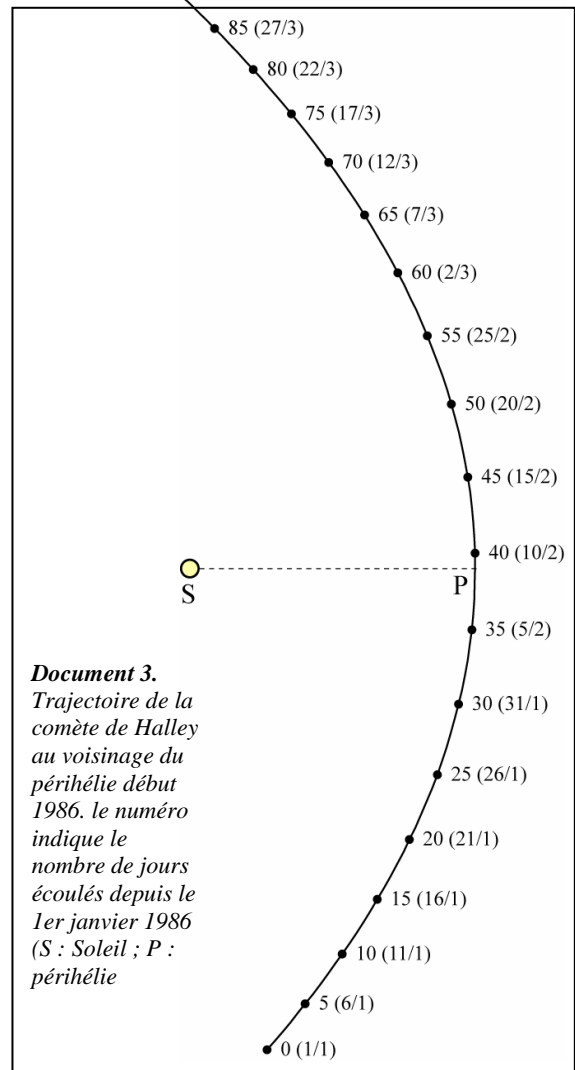
- Dans le référentiel de Copernic, appliquer la

seconde loi de Newton à la comète. Que peut-on dire de la force à laquelle elle est soumise (direction et sens) ? Conclure.

- Représenter l'accélération a_t en fonction de $1/r^2$, où r est la distance de la comète au Soleil.

Montrer qu'à partir de ce résultat on peut calculer la masse M_S du Soleil. La calculer.

Donnée : constante de la gravitation universelle $G = 6,67259 \cdot 10^{-11} \text{ N.m}^2.\text{kg}^{-2}$



Document 3.

Trajectoire de la comète de Halley au voisinage du périhélie début 1986. le numéro indique le nombre de jours écoulés depuis le 1er janvier 1986 (S : Soleil ; P : périhélie)

t (jours)	0	5	10	15	20	25	30	35	40
distance au Soleil (ua)	0,9991	0,9234	0,85	0,7803	0,7164	0,6615	0,6192	0,5936	0,5876
vitesse (km.s ⁻¹)	41,55	43,27	45,14	47,16	49,26	51,31	53,06	54,22	54,5
anomalie vraie (°)	-80,84	-75,1	-68,35	-60,36	-50,87	-39,66	-26,69	-12,2	3,07

t (jours)	45	50	55	60	65	70	75	80	85
distance au Soleil (ua)	0,602	0,6351	0,6831	0,7421	0,8087	0,8802	0,9548	1,031	1,1081
vitesse (km.s ⁻¹)	53,83	52,39	50,48	48,39	46,31	44,34	42,53	40,88	39,39
anomalie vraie (°)	18,13	32,05	44,3	54,76	63,6	71,05	77,35	82,73	87,37

Document 2. La comète de Halley au moment du passage au périhélie en 1986 ; 1 ua (unité astronomique) = 149 597 870 000 m

(1) Il s'agit bien évidemment d'une approximation.

Les noyaux des comètes

Nicolas Biver, LESIA (Observatoire de Paris)

Les comètes sont au départ constituées d'un noyau cométaire, petit corps irrégulier du système solaire et renfermant des glaces, en orbite autour du Soleil. Sur une partie plus ou moins importante de son orbite, le noyau cométaire est inactif et se présente comme un astéroïde reflétant faiblement la lumière du Soleil. Sa dimension typique est de l'ordre du kilomètre. Cependant des objets de plusieurs centaines de kilomètres de diamètre comme les objets trans-neptuniens (jusqu'à Pluton ou Éris de 2 300 km de diamètre environ) pourraient devenir un jour des comètes si l'évolution de leur orbite les amenait plus près du Soleil.

Les noyaux cométaires sont des vestiges de la formation du système solaire. On estime qu'ils se sont formés assez tôt, dans le premier million d'années après l'allumage du Soleil au sein de la nébuleuse proto-planétaire. Au delà d'une distance de 3 à 5 UA du Soleil, là où Jupiter s'est formé, la température était suffisamment basse pour que l'eau se condense en glace. Les planétésimaux qui s'y sont formés renferment donc une grande quantité de glace mais aussi sans doute des matériaux issus des régions internes plus chaudes (silicates, matériaux réfractaires) ainsi que des régions extérieures plus froides. Les molécules qui proviennent des régions extérieures ont probablement été moins modifiées dans la nébuleuse proto-planétaire et révèlent davantage la composition initiale d'origine interstellaire. L'étude actuelle des comètes vise à connaître plus précisément l'origine des matériaux qui les composent.

Saturne, migrant d'abord vers le Soleil ("Grand Tack") puis s'en éloignant, vont déjà mélanger les objets riches en glace avec ceux formés plus près, pauvres en éléments volatils.

Pendant la centaine de millions d'années suivante, quand les planètes géantes finissent d'évoluer, une grande partie des planétésimaux glacés qui subsistaient dans leur voisinage vont être éjectés à grande distance dans toutes les directions de l'espace. Ces objets, pour ceux n'étant pas définitivement expulsés du système solaire, vont former le **nuage de Oort**, à une distance actuellement estimée de 30 000 à 50 000 ua du Soleil, à la limite de son influence gravitationnelle. Il s'agit d'une enveloppe sphérique autour du Soleil contenant de l'ordre de 10^{12} noyaux cométaires de plus de 5 km. Il est probable que ce « nuage » comporte aussi une partie interne à 10 000 ou 20 000 ua, stable à l'échelle du système solaire (4,6 milliards d'années) et qui aurait pu ré-alimenter sa composante externe plus sujette aux perturbations gravitationnelles extérieures. La majeure partie des noyaux cométaires qui le composent sont restés inaltérés là-bas depuis 4,5 milliards d'années. À l'occasion d'une perturbation due au passage d'une étoile voisine, lorsque le Soleil traverse une zone plus dense de la Voie Lactée (nuage moléculaire) ou suite aux effets de marée de la Galaxie, certains objets peuvent être précipités vers le Soleil et donner naissance à une comète, s'ils passent suffisamment près du Soleil. Ces comètes se caractérisent par une orbite d'inclinaison quelconque. Lorsqu'elles arrivent directement du nuage de Oort (et c'est ainsi que Jan H. Oort a proposé son existence dans les années cinquante), leur orbite est quasiment parabolique (excentricité proche de 1,000) avec une période de l'ordre de 1 à 10 millions d'années (aphélie dans le nuage de Oort). Très peu (environ 5 %) retournent dans le nuage de Oort du fait des perturbations gravitationnelles près

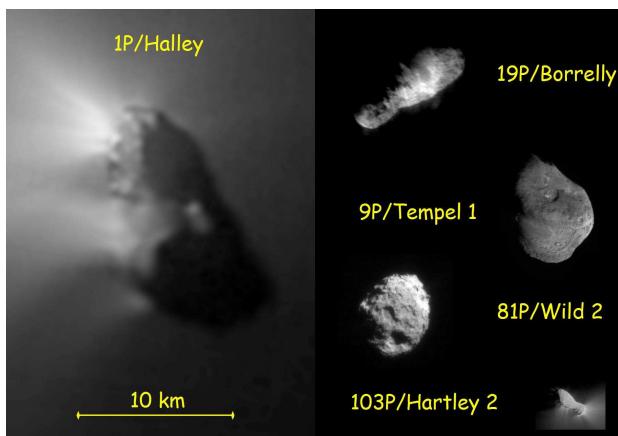


Fig.1. Noyaux cométaires imagés par des sondes spatiales, à la même échelle (© ESA, NASA)

Après la formation des planètes géantes, les trajectoires des planétésimaux (noyaux cométaires pour ceux renfermant de la glace) vont être perturbées à plusieurs reprises. Dans le cadre des derniers modèles d'évolution du système solaire, Jupiter et

du périhélie. Soit elles sont définitivement expulsées hors du système solaire, soit leur orbite est raccourcie. Après quelques passages au périhélie, elles peuvent finir sur une orbite elliptique bien plus courte sous forme de comète périodique (période < 300 ans environ) du **type de Halley**.

Les objets situés au-delà de Neptune après la formation des planètes vont demeurer dans le plan de l'écliptique (orbites peu inclinées) et former la **ceinture de Kuiper**. Il est probable que près de 800 à 900 millions d'années après la naissance du système solaire, l'arrivée en résonance orbitale 2:1 de Jupiter et Saturne a significativement modifié le système solaire externe : Uranus et Neptune sont repoussées deux fois plus loin du Soleil et balayent la ceinture de Kuiper massive, initialement située entre 15 et 35 UA du Soleil, en lui faisant perdre plus de 99 % de sa masse (« modèle de Nice »). C'est de cette époque que daterait le bombardement tardif (LHB) qui a laissé des traces sur toutes les planètes, notamment sur la Lune où le bombardement intense par des astéroïdes ou noyaux cométaires a donné naissance aux grands bassins lunaires. Les objets restant dans la ceinture de Kuiper, notamment ceux sur des orbites devenues plus excentriques, vont alimenter une autre famille

de comètes. Après perturbations successives de Neptune à Jupiter, certains de ces objets voient leur orbite raccourcie (tout restant dans un plan proche de l'écliptique) jusqu'à amener leur périhélie suffisamment près du Soleil (1 à 2 UA) – leur aphélie étant alors ramené au niveau de Jupiter – pour apparaître sous forme de comètes dites de la « **famille de Jupiter** ». La ceinture de Kuiper a été mise en évidence à partir de 1992 et on y a découvert actuellement près d'un millier d'objets de plus de 100 km (les plus petits étant indétectables directement). Les principaux objets sont Pluton et Charon, Éris, Haumea, Makemake, Quaoar... de plus de 1 000 km de diamètre. D'autres objets appelés Centaures sont sur des orbites intermédiaires entre Jupiter et Neptune, et près de 10 % montrent une activité cométaire.

Enfin une dernière catégorie d'objets catalogués comme comètes vient d'être mise à jour : des petits objets au sein de la ceinture principale d'astéroïdes qui montrent une activité de type cométaire de manière épisodique les "Main Belt Comets". Leur origine pose problème car il est peu probable que des objets glacés aient pu survivre 4.5 milliards d'années à moins de 4 UA du Soleil.

Réservoir Origine / distance	Type d'orbite intermédiaire / demi grand-axe (a) / période (P) / périhélie (q) / aphélie (Q)	Type d'orbite finale / a, Q, q, P	Nouveau classement / inclinaison orbite	Nombre d'objets recensés / observés
Nuage de Oort $r_h = 20\ 000$ à $50\ 000$ ua	Longue période (dynamiquement neuve) $a \approx 20\ 000$ ua, $P > 1$ million années		Comètes "isotropes" Inclinaison quelconque	> 400
		Longue période (dynamiquement ancienne) $40\ \text{ua} \leq a \leq 10\ 000\ \text{ua}$		> 400
		Famille de Halley $a \leq 40$ ua $20 \leq P \leq 200$ ans		68
Ceinture de Kuiper (disque dispersé) $r_h = 30$ à 55 ua	Centaures $Q < 40$ ua, $q > 5$ ua		Comètes "écliptiques" Inclinaison faible	19
		Famille de Jupiter $Q \leq 5$ ua ; $P < 20$ ans		461
		Type Encke $Q < 4,5$ ua ; $q < 1$ ua		1
Ceinture d'astéroïdes ? $r_h = 2,5$ à 4 ua		Comètes de la ceinture principale d'astéroïdes $Q < 4,5$ ua ; $q > 2,5$ ua	Dans la ceinture d'astéroïdes	8

Tableau 1: Types orbitaux de comètes (au 1^{er} février 2013).

Propriétés physiques, dimension, rotation, structure

A priori, tous les noyaux cométaires comportent une partie de glace (glace d'eau au moins) dans leur

composition pour les rendre « actifs » lorsqu'ils sont exposés au soleil. Cependant les noyaux dont le pouvoir réflecteur dans le visible a été mesuré, montrent un albédo très faible de l'ordre de 3 à 4 % avec peu de glace en surface. Les tailles sont très

variées mais même s'il existe des objets glacés de plus de 1 000 km qui dégazent (Pluton, Triton avec une atmosphère transitoire et probablement d'autres satellites des planètes géantes) et qu'il y en a probablement aussi dans le nuage de Oort, la plus grosse comète officiellement mesurée et répertoriée est 95P/Chiron (tableau 2) et la majeure partie des comètes actives observées doivent avoir un diamètre inférieur à 100 km. Les plus petits objets sont irréguliers et mesurent moins du kilomètre. Certaines mini comètes comme celles du type SOHO qui ne survivent pas à leur passage près du Soleil ou des débris de plus grosses comètes comme les fragments observés de la comète 73P/Schwassmann-Wachmann 3 en 2006 ne doivent même pas mesurer 10 m (figure 3).

Les périodes de rotation observées sont très variées, de moins de 6 h à plusieurs jours, et sont parfois complexes (période de précession comparable à la rotation), voire chaotiques. De plus, du fait de l'activité de la comète, on a observé une variation au cours du temps de la période de rotation pour certaines comètes.

Quant à la structure interne, elle est sans doute très variée, à l'image de la diversité des terrains de surface observés (figure 1). Les densités estimées sur certains objets (9P/Tempel 1) sont de l'ordre de 0,4. Un bon nombre de ces objets ont donc une densité faible, bien inférieure à la glace d'eau (≈ 1) et aux objets rocheux (2 à 3) : ils sont poreux avec beaucoup de vide à petite échelle. C'est ce qui fait des noyaux cométaires des objets très fragiles qui se brisent en morceaux facilement comme D/1993 F2 (Shoemaker-Levy 9) en 1992 sous les effets de marées dus à un passage proche de Jupiter (cohésion estimée très faible) ou du fait de la simple activité de la comète comme on en voit des exemples plusieurs fois par décennie. Les objets plus gros (100 km ou plus) ou fragments de plus gros objets ont par contre une masse et une gravité qui ont pu initialement modifier la structure interne par différenciation : migration d'espèces ou des vides du fait de la gravité ou de la chaleur interne d'origine radioactive (désintégration de ^{26}Al après accréation).

<i>Nom comète</i>	<i>Dimensions</i>	<i>Période rotation</i>	<i>Fraction active</i>	<i>Orbite</i>
<i>C/1996 B2 (Hyakutake)</i>	$\approx 3\text{ km}$	<i>6,27 h</i>	$\approx 100\%$	<i>Longue période, P = 75 000 ans, q = 0,23 ua</i>
<i>C/1995 O1 (Hale-Bopp)</i>	$\approx 50 \times 90\text{ km}$	<i>11,35 h</i>	$\approx 20\%$	<i>Longue période, P = 4 200 ans, q = 0,91 ua, i = 89°</i>
<i>109P/Swift-Tuttle</i>	$\approx 26\text{ km}$	<i>69 h</i>	$\approx 6\%$	<i>Halley-Family, P = 135 ans, q = 0,96 ua</i>
<i>1P/Halley</i>	$15,3\text{ km} \times 7,4\text{ km} \times 7,2\text{ km}$	<i>53 et 178 h</i>	<i>20%</i>	<i>P = 76 ans, q = 0,59 UA</i>
<i>8P/Tuttle</i>	$5,0\text{ km} + 3,0\text{ km}$ <i>(binaire en contact)</i>	<i>11,444 h</i>	$\approx 6\%$	<i>Halley Family P = 13,5 ans, q = 1,03 ua</i>
<i>95P/Chiron</i>	<i>180 km</i>	<i>5,918 h</i>		<i>Centaure, P = 51 ans, q = 8,47 ua</i>
<i>10P/Tempel 2</i>	$8\text{ km} \times 4\text{ km} \times 4\text{ km}$	<i>8,95 h + 0,004 h/P</i> <i>aug à chaque orbite</i>	$\approx 10\%$	<i>Jupiter Family P = 5,5 ans, q = 1.48 ua</i>
<i>19P/Borrelly</i>	$8,0\text{ km} \times 3,2\text{ km} \times 3,2\text{ km}$	<i>25 h</i>	<i>12%</i>	<i>Jupiter Family P = 6,9 ans, q = 1,35 ua</i>
<i>9P/Tempel 1</i>	$7,6\text{ km} \times 4,9\text{ km}$	<i>40,76 h - 0.25 h/P</i>	<i>5%</i>	<i>Jupiter Family P = 5,5 ans q = 1,51 ua</i>
<i>81P/Wild 2</i>	$5,5\text{ km} \times 4\text{ km} \times 3,3\text{ km}$	$\approx 13,5\text{ h}$	<i>10%</i>	<i>Jupiter Family P = 6,4 ans, q = 1,59 ua Centaure ava1974</i>
<i>67P/Churyumov-Gerasimenko</i>	$\approx 4\text{ km} \times 3\text{ km}$	<i>12,3 h</i>	<i>10%</i>	<i>Jupiter Family P = 6,6 ans, q = 1,29 ua</i>
<i>103P/Hartley 2</i>	$2,0\text{ km} \times 0,4\text{ km}$	<i>18 h et 27 h + 2 h/P</i>	$> 100\%^1$	<i>Jupiter Family P = 6,5 ans, q = 1,03 ua</i>
<i>45P/Honda-Mrkos-Pajdusakova</i>	$\approx 0,7 \text{ à } 1,6\text{ km}$	<i>?</i>	<i>11%</i>	<i>Jupiter Family P = 5,3 ans, q = 0,53 ua</i>
<i>73P/Schwassmann-Wachmann 3</i>	<i>Noyau C : 1,6 km × 0,9 km</i> <i>Noyau B : 0,4 km</i>	$\approx 15\text{ h ?}$	<i>30%</i> $> 100\%$	<i>Jupiter Family P = 5,4 ans, q = 0,94 ua</i>

Tableau 2. Caractéristiques de quelques noyaux cométaires.

¹ Car une partie du gaz est émise par des grains dans la chevelure.

L'activité des comètes

Dégazage, formation de la coma et évolution héliocentrique

Ce qui fait le trait caractéristique d'une comète c'est l'émission de gaz à partir du noyau et la formation d'une chevelure. Mais une majorité du temps, le noyau cométaire reste nu et inactif car sa température ne permet pas aux glaces de passer à l'état gazeux. Dans le vide les glaces chauffées passent directement à l'état gazeux (sublimation), à des températures qui vont dépendre du type de molécule et de la manière dont elle est piégée ou mélangée aux autres espèces moléculaires ou matériaux réfractaires. La glace d'eau étant l'espèce majoritaire c'est en grande partie sa sublimation qui gouverne l'activité de la comète. À moins de 2,5 ua du Soleil environ, la température moyenne de la surface du noyau cométaire peut atteindre les 180 K nécessaires à la sublimation de l'eau dans le vide. Au-delà le taux de sublimation de la glace d'eau va chuter très vite, tandis qu'en se rapprochant du Soleil on attend un taux de sublimation proportionnel au chauffage solaire (en $1/r_h^2$).

En pratique, les comportements sont beaucoup moins simples. On a observé des températures très variées à la surface des noyaux cométaires (180 à 330 K à 1,5 ua du Soleil). Les petits grains de la chevelure, suivant la quantité de glace qu'ils renferment mais aussi en fonction de leur taille, peuvent atteindre des températures d'équilibre encore plus élevées et libérer plus facilement la vapeur d'eau. D'autre part la glace d'eau est bien souvent recouverte d'une couche de poussières qui l'isole du chauffage solaire. Les observations montrent en général que c'est entre 3 et 1,5 ua que les comètes passent au régime d'activité dominée par la sublimation de l'eau.

Au-delà de 3 ua du Soleil, on observe encore de la vapeur d'eau dans la chevelure des comètes mais souvent en partie du fait de la sublimation de grains de glace. D'autres molécules abondantes dans les glaces cométaires (CO_2 et CO) sont bien plus volatiles que l'eau et peuvent théoriquement se sublimer jusqu'à respectivement 10 et 100 ua du Soleil. La sublimation de CO a gouverné l'activité de la comète Hale-Bopp sans doute jusqu'à plus de 25 UA du Soleil et l'observation a effectivement montré qu'entre 4 et 14 ua environ, c'était la principale molécule qui s'échappait du noyau. Dans certaines comètes, CO est très peu abondant mais CO_2 reste présent en grande quantité et pourrait

prolonger l'activité de la comète à plus de 2 ou 3 ua du Soleil.

L'abondance de CO , voire de CO_2 et aussi la structure des premières couches du noyau cométaire (profondeur des glaces, fraction de la surface couverte de glace, épaisseur de poussière et albédo en surface...) doivent certainement déterminer le comportement des comètes à l'approche du Soleil entre 4 et 1,5 ua du Soleil. En pratique, on observe des noyaux cométaires inactifs à 4 ua et d'autres actifs bien au-delà de 10 ua.

Les jets de gaz et de poussières, l'environnement de grains de glaces

La sublimation ne se fait pas de manière uniforme à la surface d'un noyau, d'une part parce que l'éclairement est inégal et le noyau irrégulier, mais aussi parce que les hétérogénéités de surface font que les glaces ne sont pas réparties de manière homogène. De ce fait, on observe très souvent une émission réduite à plusieurs zones actives d'où partent des jets de gaz et des jets de poussières soulevés par le gaz (figure 2). En fait ces jets, structures linéaires ou incurvées à plus grande échelle en raison de la rotation du noyau, correspondent à des zones de plus forte densité de poussières (tels que vus en lumière visible) et/ou de gaz.

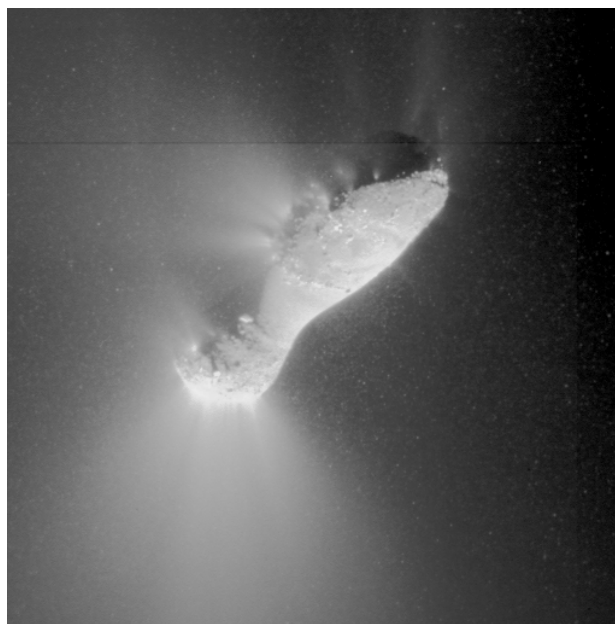


Fig.2. Noyau de la comète 103P/Hartley 2. Plus d'une dizaine de jets de poussières partent du noyau. La présence de petits grains de glace a aussi été mise en évidence autour du noyau et dans les jets. Cette image montre aussi une multitude de points brillants, "boules de neige" de taille centimétrique à décimétrique. Image EPOXI-MRI, © UMD, JPL- NASA.

En réalité c'est l'émission anisotrope de gaz à partir de ces zones actives qui va jouer un rôle déterminant dans le confinement des poussières et la formation de ces structures qui ne pointent pas forcément directement vers leur zone d'émission.

Le gaz quitte la surface du noyau avec la température de surface mais en s'échappant dans le vide, par détente adiabatique il va vite se refroidir et convertir son énergie thermique en énergie cinétique. La vitesse d'expansion (v_{exp}) typiquement atteinte par les molécules du gaz est de 0,4 à 1 km/s (voire plus en se rapprochant du Soleil).

Les poussières, en fonction de leur taille, vont être entraînées plus ou moins rapidement : les poussières microniques observées dans le visible vont atteindre une vitesse v_d proche de v_{exp} près du noyau (jusqu'à 0,5 km/s) tandis que v_d va diminuer avec la taille des particules jusqu'à atteindre 0 pour les plus grosses qui resteront liées gravitationnellement au noyau. Des milliers de "boules de neige" de taille centimétrique à décimétrique ont été détectées par radar et par imagerie visible autour de certains noyaux comme 103P/Hartley 2, comme le montre aussi les images visibles de la mission EPOXI (figure 2). Ces particules macroscopiques sont plus ou moins en orbite autour du noyau mais la sublimation de glace par effet de réaction a tendance à les accélérer en direction anti-solaire.

Fragmentation et désintégration

Les « boules de neige » observées autour du noyau de 103P/Hartley 2 sont une étape intermédiaire vers les fragments plus gros, véritables mini-comètes de quelques mètres de diamètre qui ont été observées en s'échappant du noyau principal. Ces fragments ont des durées de vie de quelques heures à quelques jours et se subliment comme les glaces du noyau. Par effet de réaction à la sublimation du côté solaire ils sont accélérés à quelques mètres par seconde vers la queue de la comète (figure 3).

L'émission de tels fragments témoigne de la fragilité des noyaux cométaires (faible cohésion et faible gravité). On observe régulièrement des comètes se désintégrer complètement et disparaître en quelques jours. En juillet 2000, on a pu imager des dizaines de fragments de taille décimétrique au sein du nuage de poussières lors de la désintégration de la comète C/1999 S4 (LINEAR). Un mois plus tard ils avaient quasiment tous disparus, entièrement sublimés et dispersés.

Certaines comètes peuvent se briser en plusieurs morceaux plus conséquents donnant lieu à plusieurs comètes, au début rapprochées sur la même orbite, puis se dispersant.

Par exemple les comètes Liller de 1988 et Tabur de 1996, passées près du Soleil à 8 ans d'intervalle sont vraisemblablement issues du même corps parent. La famille de comètes rasant le Soleil du groupe de Kreutz, dont font partie une dizaine de grandes comètes vues à l'œil nu depuis quelques siècles (C/1843 D1, C/1882 R1, C/1965 S1 Ikeya-Seki, C/2011 W3 Lovejoy...) mais aussi les milliers de fragments de comètes SOHO est probablement originaire d'une seule et même comète passée près du Soleil il y a environ 1 700 ans et qui s'est fragmentée à plusieurs reprises suite au stress de l'échauffement intense et de l'effet de marée en passant à moins d'un million de km du Soleil.



Fig.3. Désintégration et fragments cométaires relâchés par le noyau G de la comète 73P/Schwassmann-Wachmann 3 en avril 2006. Image HST/NASA/ESA.

Les missions spatiales et les observations récentes nous ont fait mieux connaître les noyaux cométaires et leur comportement. Mais si on commence à avoir une vue un peu globale, chaque comète est différente des autres, dans son aspect, son évolution...

La mission spatiale Rosetta va nous faire découvrir un nouveau noyau cométaire l'année prochaine : celui de la comète 67P/Churyumov-Gerasimenko. Elle l'auscultera de très près (le module Philae s'y posera en novembre 2014) et l'escortera durant toute son approche au Soleil et même après. La communauté espère donc en apprendre beaucoup plus sur le fonctionnement des noyaux cométaires.

À propos de l'excentricité des orbites cométaires

On peut se demander quelle est l'excentricité de l'orbite elliptique d'une comète venant du nuage de Oort et passant à proximité du Soleil par exemple à 0,3 unité astronomique comme PANSTARRS. Prenons une distance moyenne de 40 000 unités astronomiques pour le nuage de Oort.

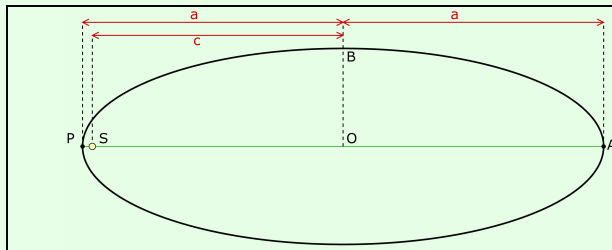


Fig.1. *Orbite elliptique d'une comète. S est le Soleil, A l'aphélie et P le périhélie. On a noté a la demi-grand axe et c la distance du centre de l'ellipse à son foyer S. Par définition, l'excentricité de l'ellipse est égale à c/a.*

On a donc $SP = a - c = 0,3$ et $SA = a + c = 40\,000$.

On en tire $c = (40\,000 - 0,3)/2 = 19\,999,85$ et $a = (40\,000 + 0,3)/2 = 20\,000,15$

L'excentricité e est égale à c/a soit 0,999 985, très proche de 1. On peut calculer que le petit axe vaut alors 0,5 % du grand axe. Le dessin de l'orbite pourrait s'inscrire dans un rectangle de 20 cm de long et 1 mm de large...

Fig.2. *L'orbite de la comète Panstarrs supposée elliptique.*

Si on regarde les données du minor planet center, on lit $e = 1,000\,028$ pour cette comète. Ce qui signifie qu'elle a une orbite hyperbolique et devrait quitter le Système solaire. Les planètes géantes ont dû la perturber...

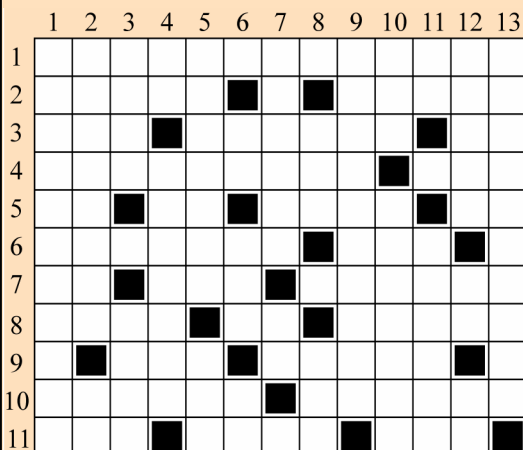
Pour ISON qui passera à 0,012 ua du Soleil, en supposant qu'elle vient elle aussi du nuage de Oort, le calcul donne une excentricité de 0,999 999 4 pour une orbite elliptique (1,000 005 pour le minor planet center).

Horizontalement

1. Elles compliquent le calcul de la trajectoire d'une comète.
2. Il avait compris que la queue d'une comète était à l'opposé du Soleil. Vis avec lui.
3. « À travers les embûches jusqu'aux étoiles » est sa devise. Spécialité d'Éros. Ville d'eaux.
4. Dans certaines comètes. Haut lieu de l'astronomie.
5. Types chauds. Comme un œil sans lunette. CCCP à l'américaine. A financé la sonde Giotto qui a survolé la comète de Halley.
6. A l'aspect d'une chevelure de comète. Entre AQR et SGR.
7. On en trouve dans les astéroïdes et dans certaines comètes. Elle va analyser la comète Churyumov-Gerasimenko grâce à sa sonde Rosetta. Astronome belge qui a co-découvert une célèbre comète en 1956.
8. Sans doute la plus belle comète de l'année ou même de la décennie. Petit nom mais gros satellite. On y a découvert la grande comète de 1577 observée ensuite par Tycho Brahé.
9. Risque. Point de l'orbite d'une comète.
10. Entrevu à l'envers. Pose.
11. Très grand télescope. Il a donné son nom à une comète qui a frôlé la Terre en 1983. Héberge le CLEA.

Verticalement

1. Comme une orbite moyenne de comète.
2. Radieux. Demi-sel.
3. Comme Valles marineris. Il a cherché l'origine des comètes.
4. Possessif. Comme le rayonnement solaire sur le noyau de la comète au périhélie.
5. Rares. Le 18 novembre prochain, la comète ISON devrait passer juste à côté.
6. Article. Il a décidé de la dénomination des comètes. On en a trouvé dans Hale-Bopp.
7. On y voit une représentation de la comète de Halley. Pronom.
8. Parcours. Organisation de sinistre mémoire.
9. Ils sont plus adaptés aux nébuleuses qu'aux comètes.
10. In a comet. Ronchon.
11. Matière silencieuse. Fête bretonne.
12. Partie d'une comète. Non anglais. Ville de mots croisés.
13. En arrêt de travail. *Pierre Causeret (solution page 40)*



Les relations Soleil-Terre -

1. Introduction

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

L'auteur nous fait entrer dans les relations intimes entre le Soleil et la Terre. Les aurores polaires ont toujours fasciné les hommes, mais qu'en savons-nous aujourd'hui ?

À l'aube des aurores polaires

Les aurores polaires (figure 1) font partie de ces phénomènes naturels qui ont défié l'entendement de l'Homme pendant des millénaires. Les premières traces d'observations ont été trouvées en Chine et remontent à environ 2600 avant notre ère mais il faudra pourtant attendre le XVII^e siècle pour commencer à voir émerger des ébauches d'explications « sérieuses » ! Et même à cette époque, des générations de scientifiques de renom comme Galilée, Descartes, Celsius et bien d'autres se cassèrent les dents sur ce phénomène. On soupçonnait bien un rapport avec le Soleil mais via sa lumière. C'est le Français Jean-Jacques Dortous de Mairan qui émit le premier l'hypothèse que les aurores polaires pussent être directement dues non pas à la lumière de notre astre mais à son « atmosphère ». En effet, dans son œuvre pionnière *Traité physique et historique de l'aurore boréale* publiée en 1733, il décrit les aurores polaires comme issues de la rencontre entre l'atmosphère solaire et l'atmosphère terrestre. Au cours du siècle suivant, du milieu du XVIII^e au milieu du XIX^e, des successions d'observations permettent de mettre en évidence que le Soleil suit un cycle d'activité de 11 ans environ et qu'autour des maxima solaires des taches sombres apparaissent à sa surface. De plus, l'activité géomagnétique ainsi que l'intensité et la fréquence d'apparition des aurores augmentent pendant ces maxima. Si le lien de cause à effet n'était pas encore établi, la corrélation était flagrante. Henri Becquerel propose en 1878 que des particules électriquement chargées (l'électron sera découvert un peu plus tard) soient émises par le Soleil et guidées par le champ magnétique terrestre jusqu'aux régions polaires où elles interagissent avec l'atmosphère. Cette hypothèse sera vérifiée expérimentalement par le Norvégien Kristian Birkeland à l'orée du XX^e siècle avec sa terrella, un

dispositif ingénieux avec lequel il bombarde d'électrons une boule en métal magnétisée ; il reproduit des émissions lumineuses ! (Ce simulateur d'aurores a été remis au goût du jour par des chercheurs de l'Institut de Planétologie et d'Astrophysique de Grenoble ; quelques exemplaires sont visibles à Grenoble, Paris et Toulouse).



*Fig.1. Aurores polaires rouges et vertes au-dessus du Spitzberg
(crédit photo: Guillaume Gronoff)*

Et le vent solaire fut

Une centaine d'années plus tard, nos connaissances se sont évidemment considérablement précisées et affinées. L'avènement de l'ère spatiale ainsi que les rapides progrès de l'informatique et de la simulation numérique ont naturellement largement contribué à nous faire progresser ; même si d'autres obstacles, souvent théoriques, ont été rencontrés.

On sait aujourd'hui que lors des maxima solaires, tous les 11 ans en moyenne, la polarité du champ magnétique du Soleil s'inverse : le pôle magnétique nord devenant un pôle magnétique sud et vice-versa. Les taches sombres qui apparaissent alors à la surface du Soleil (la photosphère) semblent jouer un rôle essentiel dans ce renversement (les taches paraissent sombres car elles sont moins chaudes que la photosphère environnante : 4000-4500 K contre

6000 K environ ; et donc moins lumineuses). Au cours des cycles solaires, la luminosité du Soleil dans le domaine visible ne varie que très peu : de l'ordre de 0,1 %. En revanche, les flux de rayonnement ionisant UV et X peuvent varier de 100 % ! (figure 2).

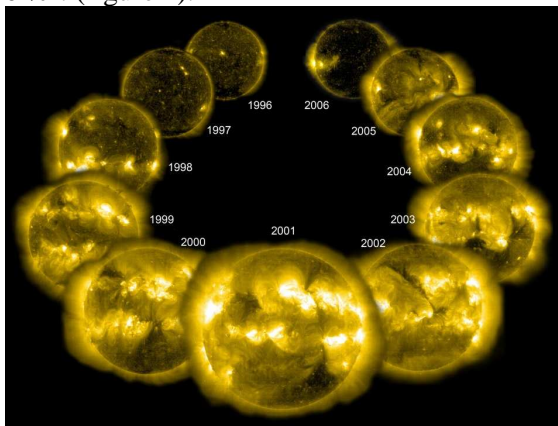


Fig.2. Cycle solaire No 23 vu année après année en extrême UV (284nm de longueur d'onde) par l'instrument EIT à bord du satellite SOHO. On voit là toute la variabilité de la luminosité du Soleil dans ce domaine de longueur d'onde. Remarque : la variation de diamètre apparent n'est qu'esthétique.
(crédit photo : NASA/ESA)

Par ailleurs, les mises en évidence du vent solaire, cette émission continue de particules chargées (un plasma essentiellement constitué de protons, d'électrons, et noyaux d'hélium mais aussi de traces d'ions plus lourds ionisées à divers degrés), ainsi que de l'environnement ionisé terrestre furent des étapes décisives.

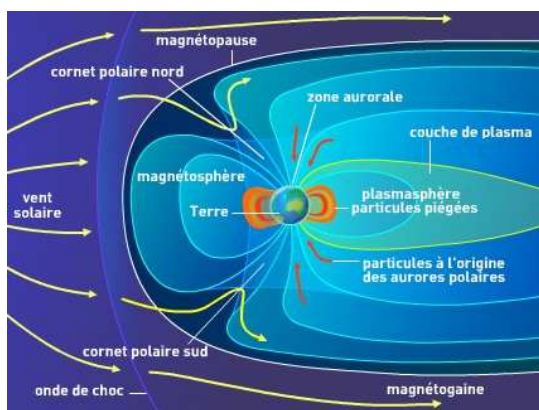


Fig.3. Coupe transversale de la magnétosphère terrestre dans le plan midi-minuit. Sont montrés entre autres sur ce schéma le vent solaire provenant du Soleil (à gauche), le choc d'étrave qui se produit en avant de la magnétosphère et la magnétopause (l'interface entre le vent solaire comprimé par le choc d'étrave et la magnétosphère).

Le champ magnétique terrestre constitue un obstacle à l'écoulement supersonique (350 km/s pour 5 particules/cm³ environ) du vent solaire. Dans ce cas, il se forme un choc devant l'obstacle pour décélérer l'écoulement à une vitesse subsonique. Ce

choc d'étrave, qui est l'équivalent du choc se produisant devant les avions supersoniques et qui crée le « bang », ralenti donc le vent solaire et le comprime. En effet, le flux de matière doit se conserver à la traversée du choc donc le gaz se comprime d'autant qu'il est ralenti. Au niveau du choc d'étrave terrestre, le facteur de compression est d'environ 3 en moyenne : le plasma de la magnétogaine (la région entre le choc et la magnétosphère) est trois fois plus lent et trois fois plus dense que le vent solaire.

Il est établi que le vent solaire déforme le champ magnétique terrestre pour former une cavité bien moins dense en plasma, la magnétosphère. Cette magnétosphère (figure 3), comprimée côté Soleil et étirée en une queue côté nuit, nous protège du vent solaire en le déviant de part et d'autre (dans le système solaire, outre la Terre, Mercure et les quatre planètes gazeuses Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune ont une magnétosphère).

Cependant, la magnétopause (la limite externe de la magnétosphère) n'est pas totalement étanche et une petite partie du vent solaire parvient à entrer dans la magnétosphère. Ceci a posé (et pose toujours dans une certaine mesure) un gros problème théorique. Pour plus de détails, voir *Les relations Soleil-Terre – 2. Plasma et reconnexion magnétique*, Cahiers Clairaut n°142.

Une fois dans la magnétosphère, le mouvement des particules chargées est fortement contraint par le champ magnétique terrestre : elles suivent les lignes de champ magnétique en spiralant autour avec un rayon qui dépend de leur énergie et de l'intensité du champ magnétique ambiant. Ces particules peuplent ainsi toute la magnétosphère terrestre même si elles ont tendances à s'accumuler dans certaines régions comme les cornets polaires nord et sud (zones d'entrée directe du vent solaire) et la couche de plasma dans la queue magnétosphérique (figure 3).

Il est important de comprendre que puisque les particules chargées suivent en quelque sorte les lignes de champ magnétique et que ces dernières convergent vers les zones polaires, les particules de la magnétosphère vont avoir tendance à venir se déverser dans la haute atmosphère des zones polaires. Pas toutes cependant : les particules dont la vitesse n'est pas suffisamment orientée le long du champ magnétique (angle d'attaque trop grand) vont subir un effet de rebond quand le champ magnétique, qui augmente au fur et à mesure qu'elles se rapprochent de la Terre, sera trop intense (notion de miroir magnétique). Il existe ainsi des populations de particules piégées dans le champ

magnétique terrestre. On peut citer la ceinture de radiation, ou ceinture de Van Allen, qui se trouve dans la magnétosphère interne et qui est peuplée de particules de très hautes énergies (provenant entre autre du rayonnement cosmique).

Les couplages magnétosphère-ionosphère

L'ionosphère est la composante ionisée de la haute atmosphère, au-dessus de 70 km d'altitude environ. Elle est essentiellement créée par ionisation des atomes et molécules neutres par le rayonnement solaire (photo-ionisation). Rappelons que l'énergie de première ionisation des composants principaux de la haute atmosphère (oxygène, azote, hydrogène) se situe autour des 12-14 eV. Donc pour ioniser ces atomes, il faut un rayonnement électromagnétique qui possède au moins cette énergie. L'énergie E d'un rayonnement électromagnétique de longueur d'onde λ s'écrit :

$$E = h.c / \lambda$$

avec h la constante de Planck et c la vitesse de la lumière.

Un rapide calcul montre que 12-14 eV correspondent à des longueurs d'onde d'environ 100 nm, soit du rayonnement ultraviolet. L'ionosphère est donc créée par le rayonnement UV solaire (d'où l'extrême importance de sa variabilité durant les cycles solaires). C'est l'ionosphère, couche électriquement conductrice, qui est utilisée pour la réflexion des ondes radioélectriques et leur propagation sur de longues distances.

Mais l'ionisation de l'atmosphère peut aussi se faire dans les régions polaires par l'apport – on parle de précipitation – de particules de la magnétosphère ou du vent solaire. Le tout se faisant avec un « produit dérivé » : des émissions lumineuses. Les électrons principalement (et dans une moindre mesure les protons) présents dans la magnétosphère ont accès suivant leur énergie à la haute atmosphère polaire terrestre. Ils y interagissent avec les atomes ou molécules présents en les excitant, c.-à-d. en leur cédant tout ou partie de leur énergie. Les atomes et molécules qui accèdent alors à un niveau d'énergie supérieur qui est généralement instable, doivent céder cet excédent d'énergie au milieu extérieur et ceci se fait par l'émission de photons, c'est l'aurore polaire.

Les couleurs que nous observons le plus couramment sont le rouge (raie à 630 nm) et le vert (raie à 557,7 nm), correspondant toutes deux à deux transitions de l'oxygène atomique, espèce dominante de la haute atmosphère au-dessus

d'environ 200 km d'altitude. Des raies de l'azote peuvent aussi être observées dans certaines conditions, donnant une couleur pourpre caractéristique.

L'observation des aurores n'est pas uniquement contemplative, elle est précieuse à plus d'un titre. Leur forme donne des indications sur la dynamique des couches magnétosphériques d'où les particules précipitantes sont issues. Leur couleur est un indicateur de l'énergie de ces mêmes particules précipitantes. Les aurores vertes par exemple sont créées par des particules d'une énergie plus élevées que celles qui créent des aurores rouges. Notons au passage qu'une particule d'énergie plus élevée aura tendance à pénétrer plus profondément dans l'atmosphère, ce qui explique que les aurores vertes se produisent à des altitudes (≈ 150 km) plus basses que les rouges (≈ 250 km). Enfin, leur intensité lumineuse donne accès au flux de particules précipitantes.

Les moyens instrumentaux

Les boussoles (aussi sensibles fussent-elles) utilisées par nos prédécesseurs pour observer les variations magnétiques au sol et les lunettes astronomiques qui ont permis (sans filtres adaptés...) les premières observations du Soleil ont laissé place à des instruments toujours plus sophistiqués et performants. Nous utilisons aujourd'hui des sondes spatiales pour imager le Soleil, analyser les propriétés du vent solaire et du milieu magnétosphérique. Nous avons à disposition des capteurs ultra sensibles pour scruter l'activité aurorale à différentes longueurs d'ondes et des radars pour sonder l'ionosphère.

Pour l'observation de l'activité solaire, citons SOHO (Solar Heliosphere Observatory) et ACE (Advanced Composition Explorer) tous deux orbitant autour du point de Lagrange L1 entre le Soleil et la Terre.

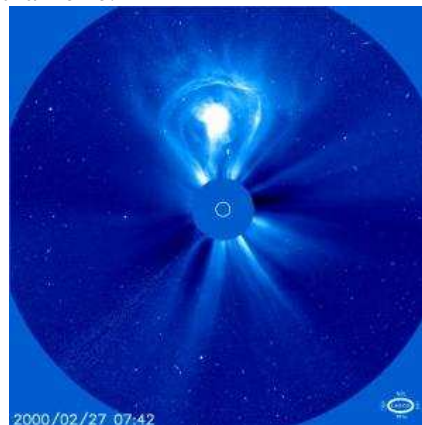


Fig.4. Éjection coronale de masse vue par le coronographe LASCO à bord de la sonde SOHO (crédit photo : NASA/ESA)

La figure 4 montre une éjection coronale de masse, phénomène éruptif violent, observée par le coronographe LASCO (qui crée artificiellement une éclipse en obstruant le disque solaire pour observer sa couronne) à bord de SOHO.

Des missions satellitaires sont aussi lancées pour faire des mesures *in situ* des milieux magnétosphériques terrestre et planétaires. La figure 5 montre les orbites de trois missions spatiales pour l'étude de l'environnement spatial terrestre :

- la mission Cluster (en rouge) composée de quatre sondes qui orbitent en configuration tétraédrique pour reconstruire en 3D les mouvements des couches ou structures traversées ;
- les deux satellites Double Star (en vert) dont un est en orbite équatoriale, l'autre en orbite polaire ;
- les 5 sondes de la mission Themis (en bleu) dont le but principal est l'étude multipoint de la queue magnétosphérique et des sous-orages magnétiques (reconnexion impulsive du côté nuit donnant lieu aux plus belles aurores) qui s'y produisent.

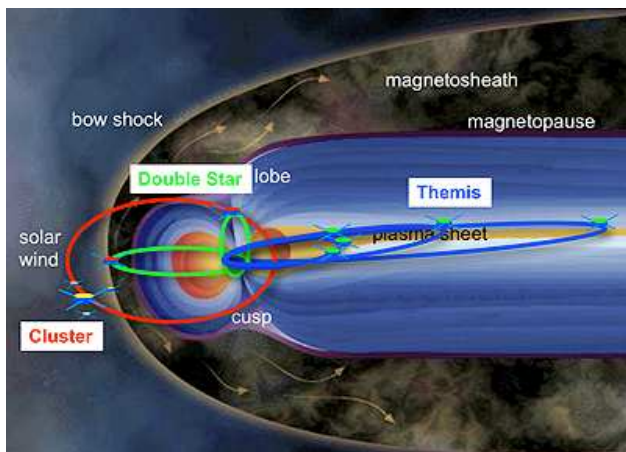


Fig.5. Coupe transversale de la magnétosphère terrestre dans le plan midi-minuit montrant les orbites des missions Cluster (rouge), Double Star (vert) et Themis (bleu).

Toutes ces sondes embarquent à leur bord une instrumentation scientifique dédiée à la mesure des propriétés du plasma (concentrations, énergies, flux, fonctions de distribution) et des champs électrique et magnétique (composantes continues et ondes).

En ce qui concerne les instruments au sol, outre les observations optiques des émissions aurorales, les techniques de télédétection et les propriétés de propagation des ondes radio sont avantageusement mises à contribution pour sonder l'ionosphère. Le premier fut l'ionosonde qui utilise la propriété qu'a un plasma de réfléchir une onde radio. Cette réflexion se produit quand la fréquence de l'onde égale la fréquence d'oscillation naturelle des charges électriques constituant le plasma, la fréquence plasma f_p :

$$f_p = 1/2\pi \cdot (ne^2/m \cdot \epsilon_0)^{1/2}$$

où n est la concentration en électrons, e est la charge élémentaire, m la masse d'un électron, et ϵ_0 la constante diélectrique.

On constate que la fréquence plasma ne dépend que de la concentration électronique du milieu ; on peut donc déterminer la concentration électronique de la couche qui réfléchit l'onde émise dont on connaît la fréquence. Grâce au temps de propagation (laquelle se fait à la vitesse de la lumière c) entre l'émission et la réception Δt on déduit l'altitude h de cette couche :

$$h \approx c \cdot \Delta t / 2$$

En faisant varier la fréquence émise (quelques Mhz typiquement), on peut ainsi sonder l'ionosphère jusqu'au maximum de concentration électronique qui se situe vers 250-300 km d'altitude. Au-delà de la fréquence appelée foF_2 , l'onde EM ne sera plus réfléchi car sa fréquence est trop grande et ne correspond à aucune fréquence plasma du plasma ambiant (figure 6).

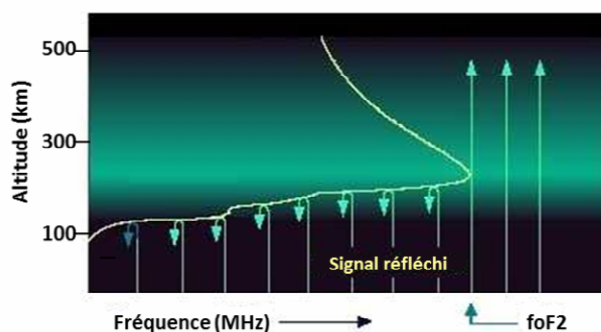


Fig.6. Schéma illustrant le principe de fonctionnement d'une ionosonde. La courbe blanche montre l'évolution de la fréquence plasma (c.-à-d. de la concentration électronique) avec l'altitude. L'onde radio émise (flèches verticales) est réfléchi tant que sa fréquence est inférieure à la fréquence plasma foF_2 de la région, dite F_2 , la plus dense de l'ionosphère.

Les instruments les plus récents pour sonder l'ionosphère sont les radars à diffusion incohérente. Ces instruments émettent une onde radio de très haute fréquence (500-1 000 MHz) vers l'ionosphère et cette onde est rétrodiffusée (diffusion de Thomson) en première approximation par les électrons libres du milieu mais aussi par des ondes, telles que les ondes acoustiques ioniques. Le signal rétrodiffusé, capté par le même radar ou d'autres antennes réceptrices, a des propriétés bien particulières. À partir de ces propriétés (décalage Doppler-Fizeau, étalement spectral), on déduit des paramètres physiques comme la concentration électronique, les températures électronique et ionique (qui ne sont pas nécessairement les mêmes car le milieu est très peu collisionnel et les électrons

sont bien plus légers et donc mobiles que les ions) et la vitesse ionique le long de la ligne de visée. La portée de cette technique dépend de la puissance émise qui est typiquement de l'ordre du MW cependant que la puissance de signal rétrodiffusée est de l'ordre de 10^{-22} W ! Autant dire qu'il faut de grandes « oreilles » ! Avec cette technique, on peut raisonnablement sonder entre 80 et 1000 km

d'altitude. La figure 7 est une photo des deux radars de l'association scientifique EISCAT situés sur l'île du Spitzberg. L'antenne mobile à gauche a un diamètre de 32 mètres ; celle de droite, qui est fixe et orientée le long du champ géomagnétique local, est un peu plus grande : 42 mètres de diamètre. EISCAT dispose de quatre autres antennes en Norvège, Suède et Finlande.



Fig.7. Les deux radars à diffusion incohérente de l'association scientifique EISCAT implantés sur l'île arctique du Spitzberg : l'antenne mobile de 32 m de diamètre à gauche, et l'antenne fixe de 42 m de diamètre à droite.

Les défis d'aujourd'hui et de demain

La recherche dans le domaine des relations Soleil-Terre a balbutié pendant plusieurs siècles pour s'accélérer au cours du XX^e siècle. Les possibilités d'observations *in situ* et les efforts de simulations numériques ont révolutionné notre façon d'appréhender les problématiques scientifiques. Pourtant, des domaines demeurent à approfondir, voire à défricher.

La prévision de l'activité solaire et de ses conséquences sur notre environnement spatial font partie des grands défis. Cet aspect est au cœur de ce qu'on appelle la météorologie de l'espace.

Nous pouvons aussi mentionner l'étude des environnements spatiaux des autres planètes du système solaire mais aussi des planètes extrasolaires et la caractérisation des couplages entre ces dernières et leur étoile.

Enfin, s'il semble indiscutable que les activités humaines jouent un rôle important dans le réchauffement climatique, nous savons que des périodes de glaciations correspondent à de longs minima d'activité solaire. Les effets du Soleil sur la haute atmosphère terrestre et surtout les couplages entre différentes couches ionosphériques et

atmosphériques ne sont pas encore suffisamment compris et constituent un réel — et urgent — défi.

Bibliographie

Pour tous :

Lilensten, J. et J. Bornarel, *Sous les feux du Soleil, vers une météorologie de l'espace*, Collection Grenoble Sciences, 2001.

Savage, C., *Les aurores boréales ou les lumières mystérieuses*, édition Trécarré, 2002 (malheureusement indisponible à la vente dans sa version française ; trouvable en bibliothèque ou à la vente en version originale : *Aurora, the mysterious northern lights*).

Pour les férus d'histoire des sciences :

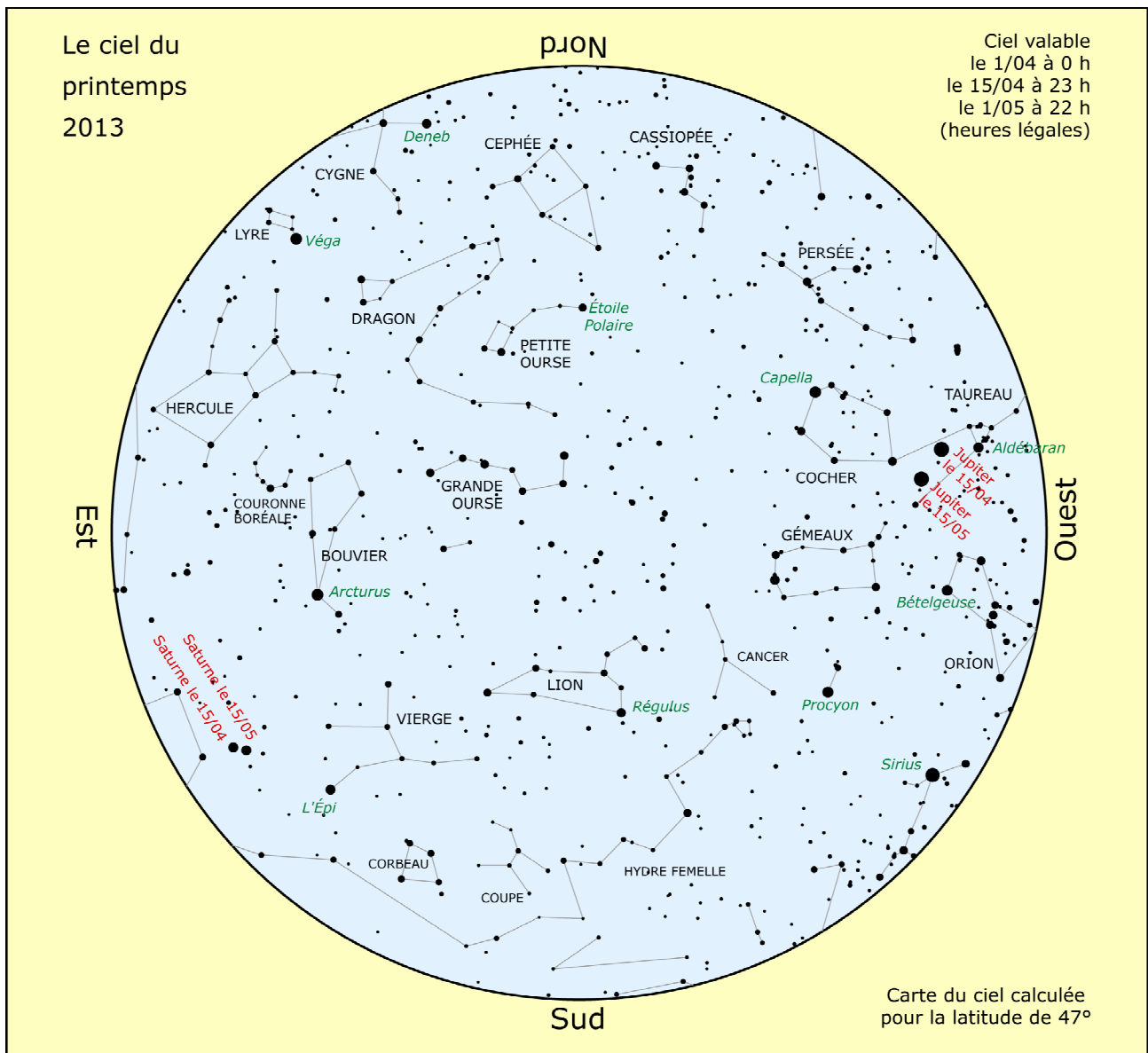
Dortous de Mairan, J.-J., *Traité physique et historique de l'aurore boréale*, Imprimerie Royale, 1733 (la version scannée de la seconde édition de 1754 est disponible dans les archives numériques de la BnF : <http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k3586v/>)

Legrand, J.P. , M. Legoff, C. Mazaudier, W. Schröder, *L'activité solaire et l'activité aurorale au XVII^e siècle*, La vie des Sciences, Comptes rendus de l'Académie des Sciences, tome 8, No 3 1991.

Pour approfondir :

Lilensten, J. et P.-L. Blelly, *Du Soleil à la Terre, aéronomie et météorologie de l'espace*, Grenoble Sciences, Presses Universitaires de Grenoble, 1999.

Le ciel du printemps 2013



Visibilité des planètes

Saturne passe à l'opposition le 28 avril et sera donc observable toute la nuit à cette époque-là. Ses anneaux commencent à être bien ouverts cette année.

Jupiter reste encore visible le soir jusqu'au mois de mai et passe derrière le Soleil le 19 juin.

Vénus démarre sa période de visibilité en planète du soir en avril. Elle est de mieux en mieux visible et atteindra son élongation maximale cet automne.

Mercure est à observer le soir en juin peu après le coucher du Soleil. On pourra la trouver entre Vénus et la Lune le 11, et à côté de Vénus aux alentours du 19.

Il faudra attendre cet été pour retrouver **Mars** le matin.

La comète **C/2011 L4 Panstarrs** passera au périhélie le 10 mars. On la trouve peu après le coucher du Soleil dans les Poissons mi mars et dans Andromède fin mars.

Quelques événements (heures légales)

20/03 : équinoxe de printemps à 12 h 01.

25/04 : toute petite éclipse de Lune. À 22 h 07, moins de 1 % du disque lunaire sera dans l'ombre de la Terre.

28/04 : Opposition de Saturne.

10/05 : éclipse annulaire de Soleil (Australie, Pacifique).

11 et 12/05 (soir) : Vénus, croissant de Lune et Jupiter dans le Taureau à l'horizon ouest.

23 au 28/05 (soir) : rapprochement Mercure, Vénus et Jupiter.

19 et 20/06 : rapprochement Mercure Vénus (2°).

21/06 : solstice d'été à 7 h 04.

Lune

Pleine Lune : 27/03, 25/04/25/05.

Nouvelle Lune : 10/04, 10/05, 8/06.

Espace et relativité autour de 1900 : Henri Poincaré

Christiane Vilain

LUTH, Observatoire de Paris, site de Meudon et SPHERE, Université Denis Diderot.

La question de la relativité du mouvement est familière au physicien qui sait, depuis Galilée, que le mouvement rectiligne uniforme est « comme rien », tandis que les accélérations entraînent des conséquences que l'on appelle les « forces d'inertie » bien formalisées depuis Newton.

Mais la nature de l'espace et du mouvement est en fait un problème depuis l'Antiquité, et la façon dont nos lois mécaniques effacent cette difficulté est périodiquement remise en question, jusqu'à aujourd'hui, ce qui entraîne une révision des rapports entre l'expérience et nos concepts les plus intuitifs...

On se demande déjà au Moyen Âge si le mouvement est quelque chose qui se trouve vraiment dans le corps mobile ou bien seulement dans une apparence relative aux autres corps. On se demande aussi si le vide peut exister, à l'intérieur des corps ou en dehors du Monde visible. Mais les concepts utilisés alors sont trop éloignés de notre culture pour que nous puissions en rendre compte ici en deux mots. L'historien des sciences sait bien qu'il lui faut beaucoup de temps et de patience pour abandonner ses réflexes d'homme du 20^e (21^e) siècle et accéder vraiment à ce qu'il appelle un autre « contexte » culturel, afin de comprendre vraiment ce que voulaient dire les médiévaux, ou même notre cher Galilée dans la République de Florence de 1630.

En ce qui concerne la perception du mouvement, certaines remarques semblent cependant échapper à la particularité d'une culture : la vision du mouvement est toujours relative puisque nous voyons encore le Soleil et les étoiles tourner autour de nous, bien que Copernic et Galilée nous aient persuadés que cette apparence n'était due qu'aux mouvements de la Terre sur elle-même et autour du Soleil. Mais sur la Terre elle-même, certains mouvements semblent relatifs et d'autres absolus ; lorsque le train roule à sa vitesse de croisière on peut bien penser, en lisant tranquillement, être au repos ; on peut même avoir l'impression que le paysage recule ; ce n'est plus la même chose si le train freine brusquement et qu'un sac nous tombe dessus ; nous remarquons également les virages : bien que le rayon de courbure soit grand nous sommes déportés d'un côté et savons que nous sommes en mouvement sans même regarder dehors.

Or ces forces d'inertie n'ont pas jusqu'à présent d'explication physique. Ayant acquis une bonne connaissance de la physique classique vous allez me répondre :

- Mais si ! Ce sont des forces fictives dues au fait que nous ne sommes pas dans un repère inertiel ! Tout le monde sait cela.

- Oui, mais qu'est-ce qui différencie un repère inertiel d'un autre si ce n'est que nous l'avons décidé ?

- Mais ce sont ces forces d'inertie justement, que nous éprouvons et mesurons !

- Est-ce que nous ne serions pas en train de tourner en rond ?

- Hmm, peut-être...

Isaac Newton refusait de tourner en rond et avait décidé d'attribuer à un espace vide absolu le pouvoir d'être la cause de ces forces. Cet espace presque divin possédait donc pour lui une puissance dynamique, principe qui sera refusé par beaucoup de ses contemporains et de ses successeurs. Newton avait conçu plusieurs expériences de pensée dont la plus célèbre est celle d'un seau en rotation : une fois entraînée par le mouvement du seau, l'eau tourne et sa surface se déforme pour prendre la forme d'un paraboloïde ; même un observateur lié au seau et qui ne voit rien de l'extérieur « sait » alors que le seau tourne. Newton affirmait de plus que l'effet serait le même s'il n'y avait aucun autre corps présent dans l'Univers et ce n'est donc pas le mouvement relatif qui est perçu mais bien un mouvement absolu.

Les spécialistes de mécanique céleste du 18^e siècle comme Léonard Euler ou Pierre-Simon de Laplace ne s'en préoccupent guère, car le système mis au point par Newton, une fois réécrit en langage

algébrique et différentiel, permet d'expliquer et de prévoir tellement de phénomènes célestes qu'il n'y a aucune raison de se poser des questions sur la nature de l'espace, du mouvement ou du vide. Les physiciens travaillent et la mécanique de Joseph Louis Lagrange permet de développer des méthodes de perturbation, d'affiner la théorie des mouvements de la Lune et des planètes et d'obtenir de bonnes éphémérides. Le siècle suivant voit naître diverses branches d'une nouvelle physique expérimentale : électricité, magnétisme, optique et thermodynamique, avec les succès que l'on connaît.

Aux environs de 1900

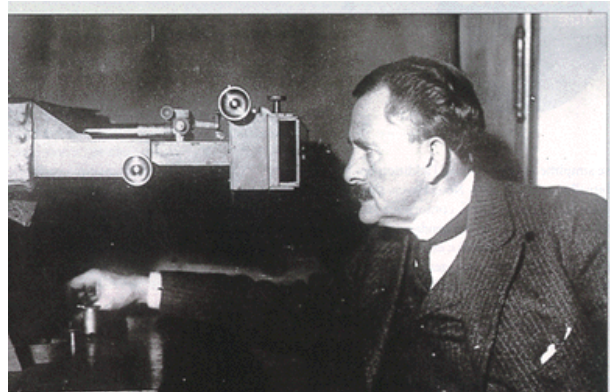
Vers la fin du 19^e siècle, on assiste chez les physiciens à un renouveau d'intérêt pour les fondements des sciences, questions qui avaient été abandonnées aux métaphysiciens ou tout au moins aux philosophes depuis au moins deux siècles. Ainsi, Hermann von Helmholtz et Ernst Mach en Allemagne, ou Henri Poincaré en France, « philosophe », s'interrogent sur la connaissance scientifique, se demandent de quoi elle est faite et jusqu'où elle peut aller.

On peut s'étonner d'une telle réflexion, d'une remise en question qui semblerait signaler une crise de la physique. Au début du 20^e siècle émergent en effet les théories révolutionnaires de la Relativité restreinte et générale, puis de la Mécanique quantique. Mais si l'on veut parler de « crise » avant 1900, il faudrait évoquer d'abord la querelle qui oppose dans les années 1870-80 les nouveaux « atomistes » comme Ludwig Boltzmann aux « énergétistes » qui refusent cette représentation par les atomes, un peu trop métaphysique à leur goût, de toute la matière. Ce qui a fait émerger de nouveaux problèmes est sans doute le désir qu'ont les scientifiques d'unifier leurs résultats : électricité et magnétisme, puis électromagnétisme et optique ; thermodynamique et mécanique. L'écosse James Clerk Maxwell a montré que les ondes électromagnétiques se propagent à la vitesse de la lumière, et que la lumière est donc une de ces ondes. Rudolph Clausius, Maxwell et Boltzmann proposent une interprétation mécanique de la chaleur. Et c'est là qu'interviennent l'éther et les atomes, qui ne sont pas directement visibles ni mesurables.

Mais plus précisément, deux questions épineuses agitent la communauté des physiciens :

1. Depuis les expériences de Thomas Young vers 1800 et les premières expériences de François Arago, la **théorie ondulatoire de la lumière**, avait été adoptée par l'ensemble de la communauté contre l'hypothèse corpusculaire défendue autrefois

par Newton. Mais il fallait à ces ondes lumineuses un support appelé « **éther** », dans lequel elles auraient une vitesse bien définie, comme le son dans l'air. La fameuse expérience de Michelson et Morley, faite et refaite entre 1881 et 1887, avait été conçue pour détecter le mouvement de la Terre par rapport à l'éther, mais on ne trouvait rien. Or si l'éther était totalement entraîné par la Terre, on ne pouvait plus expliquer le phénomène de l'« aberration stellaire » découvert par l'astronome britannique James Bradley en 1725.



Albert Abraham Michelson.

2. À partir de 1880, on connaissait de mieux en mieux le « **rayonnement de corps noir** » émis par tout corps chauffé et donc par les étoiles, mais aucune théorie ne parvenait encore à en expliquer les caractéristiques, pourtant simples et universelles. La meilleure formule proposée était celle que Wilhelm Wien avait déduite d'une analogie avec la physique statistique de Boltzmann, mais elle expliquait mal le comportement du spectre de rayonnement aux faibles énergies.

Réflexions épistémologiques.

Dans ce contexte de la fin du 19^e siècle, Helmholtz s'interroge sur la définition et la mesure des quantités physiques, et Poincaré commence à se demander ce que l'on peut dire de certain en science, quel est le lien véritable entre l'expérience et l'hypothèse. Ce n'est pas vraiment une période de crise, mais on y est sans doute moins optimiste qu'avant, lorsque les découvertes se succédaient en thermodynamique, électromagnétisme, astronomie ou spectroscopie, tout au long de ce siècle caractérisé par le triomphe de la méthode expérimentale.

Nous ne doutons plus aujourd'hui du bien fondé, de la « vérité », de la nature électromagnétique de la lumière ni du fait que la chaleur soit du mouvement. Nous avons d'ailleurs gardé les atomes qui nous semblent bien « réels », même s'ils sont composés

de quarks et de gluons. Pourtant l'éther a disparu et les ondes électromagnétiques n'ont plus de support ; elles vibrent dans le vide, ce qui ne correspond à aucune intuition puisque toute vibration est la vibration de quelque chose : de l'air, d'une corde, d'une membrane, ou encore de la surface de la mer. Mais cet éther aurait dû être à la fois indépendant du mouvement de la Terre autour du Soleil et entraîné par elle, ce qui est impossible. Heinrich Anton Lorentz avait alors imaginé une contraction des longueurs expliquant que l'interféromètre de Michelson ne puisse détecter le mouvement, pourtant réel pensait-il, de notre Terre par rapport à l'éther. Poincaré prolonge son travail sur les transformations des longueurs et des temps d'un repère à l'autre, de façon à assurer la réciprocité de la transformation et donc la relativité de cette contraction des longueurs (ainsi que de la dilatation du temps).

Pourquoi fait-il cela ?

Henri Poincaré et le mouvement relatif

Poincaré, déjà connu comme spécialiste de la mécanique céleste et plus généralement de la physique mathématique, publie en 1902 un ouvrage qui va avoir beaucoup de succès : *La science et l'hypothèse*, dans lequel il s'interroge sur la nature de nos principes physiques dans leurs rapports avec l'expérience.



Henri Poincaré en 1890.

C'est ainsi qu'il affirme : « *Le mouvement d'un système quelconque doit obéir aux mêmes lois,*

qu'on le rapporte à des axes fixes, ou à des axes mobiles entraînés dans un mouvement rectiligne et uniforme. C'est là le principe du mouvement relatif, qui s'impose à nous pour deux raisons : d'abord, l'expérience la plus vulgaire le confirme, et ensuite l'hypothèse contraire répugnerait singulièrement à l'esprit. »

Il semble que là, contrairement à son habitude, Poincaré demeure tributaire de son apprentissage qui lui a fait considérer comme évident un principe établi difficilement par Galilée au début du 17^e siècle. L'expérience « vulgaire » en question est en effet celle de l'**invariance galiléenne**, qui fait constater que le mouvement rectiligne et uniforme d'un navire, d'un train ou de tout autre contenant, n'affecte aucune des expériences mécaniques que l'on peut effectuer à l'intérieur. Mais ce n'est vrai que si le mouvement est parfaitement régulier, ce qui est rare. Alors les lois de la physique devront s'écrire de la même façon dans ce repère que dans celui de la berge, considérée comme au repos. Quant à ce qui répugnerait à l'esprit, il est dangereux de l'avancer ainsi, car peu de personnes sont persuadées encore aujourd'hui de l'équivalence des repères, qu'il s'agisse du train en mouvement rectiligne uniforme, de l'ascenseur en chute libre ou de la navette en orbite. Les inégalités du mouvement du train font sentir le mouvement, même si on peut avoir l'impression par moment que c'est le paysage qui recule. Ce que Galilée a établi est que la **relativité visuelle** du mouvement n'était pas seulement une illusion d'optique : le mouvement, à condition qu'il soit parfaitement uniforme, est vraiment « comme rien ».

Mais revenons à Poincaré, convaincu de l'évidence du principe de relativité :

« *Mais alors, pourquoi le principe n'est-il vrai que si le mouvement des axes mobiles est rectiligne et uniforme ? Il semble qu'il devrait s'imposer à nous avec la même force, si ce mouvement est varié, ou tout au moins s'il se réduit à une rotation uniforme. Or dans ces deux cas, le principe n'est pas vrai. [...]*

Si le ciel était sans cesse couvert de nuages et si nous n'avions aucun moyen d'observer les astres, nous pourrions, néanmoins, conclure que la Terre tourne ; nous en serions avertis par son aplatissement, ou bien encore par l'expérience du pendule de Foucault. »

Le pendule de Foucault joue, pour la rotation de la Terre, le même rôle que la surface incurvée de l'eau du seau de Newton dont nous avons parlé au début de ce texte et semble bien détecter de l'intérieur,

donc de façon absolue et non pas relative, le mouvement de rotation.

Quelle physique feraient donc ces terriens privés de tout repère extérieur ? Il leur faudrait rendre compte des forces d'inertie - force centrifuge et de Coriolis - par des forces d'attraction qui, au lieu de décroître en raison de la distance, croîtraient. Il leur faudrait admettre une dissymétrie dans les mouvements, une orientation de leur surface, et peut-être introduire un « éther » spécifique pour transmettre ces forces. Poincaré sait très bien nous montrer qu'une telle physique serait possible, mais aussi compliquée que le système des cercles – déférents et épicycles- que Claude Ptolémée avait inventé pour traduire le mouvement compliqué des planètes autour de la Terre supposée immobile. Alors, dit-il, sur cette Terre isolée par les nuages, surviendrait un autre

Copernic qui, sans voir aucune étoile ni aucune planète dirait : « la Terre tourne ». Et Poincaré de conclure :

« Et de même que notre Copernic à nous, nous a dit : il est plus commode de supposer que la Terre tourne, parce qu'on exprime ainsi les lois de l'astronomie dans un langage bien plus simple ; celui-là dirait : Il est plus commode de supposer que la Terre tourne, parce qu'on exprime ainsi les lois de la mécanique dans un langage bien plus simple. »

Poincaré, voulant « enfoncer le clou », conclut en disant que l'expression « la Terre tourne » n'a aucun sens, soulevant immédiatement une vague de protestations indignées dans le milieu scientifique !

Suite dans le prochain CC

Adhésions, abonnements et ventes en ligne

The screenshot shows the website interface for 'ventes.clea-astro.eu'. At the top left is the logo for 'Comité de Liaison Enseignants et Astronomes clea'. The main navigation bar includes links for 'Le CLEA', 'Adhérer au CLEA/ S'abonner aux Cahiers Clairaut', and 'J'ai déjà un compte'. A search bar is present on the right. Below the navigation bar, there are two main sections: 'CRÉEZ VOTRE COMPTE' and 'DÉJÀ ENREGISTRÉ'. The 'CRÉEZ VOTRE COMPTE' section has a form with an email address field and a 'Créer votre compte' button. The 'DÉJÀ ENREGISTRÉ' section has fields for email and password, a 'Mot de passe oublié ?' link, and an 'Identifiez-vous' button. On the right side, there is a 'NOUVEAUX PRODUITS' section with two product images and two text boxes: 'EEA 2013' and 'HS10: Mathématiques et Astronomie', each with a 'Lire plus' link.

Depuis décembre 2012 un site internet nous permet de gérer adhésions au CLEA, abonnements aux Cahiers Clairaut, ventes diverses à l'adresse <http://ventes.clea-astro.eu/>

TOUS les adhérents du CLEA ayant payé leur cotisation 2013, ont un compte sur ce site ; ils devront passer par le volet « **DÉJÀ ENREGISTRÉ** » pour passer une autre commande et seront ainsi exemptés de l'adhésion de 5 € qui est mise automatiquement dans le panier pour les nouveaux visiteurs.

Les abonnés 2013 aux Cahiers Clairaut qui ne sont pas adhérents ont aussi un compte ; ils doivent aussi passer par « **DÉJÀ ENREGISTRÉ** » mais la cotisation sera mise automatiquement dans leur panier.

Ce compte a été créé par l'adhérent lui-même (inscription en ligne), ou par nous avec l'email écrit sur le bulletin d'adhésion ou un « alias » qui renvoie sur la boîte mail du gestionnaire du site. Les personnes qui n'ont pas fait l'inscription eux-mêmes et souhaitent faire un autre achat doivent suivre le lien « **Mot de passe oublié** » pour réinitialiser leur mot de passe.

Si possible, passez vos commandes par le site internet et choisissez de régler par virement (c'est simple et sans frais pour l'adhérent et le CLEA), par chèque ou par carte bancaire.

En cas de problème ne pas hésiter à suivre le lien en bas de chaque page du site « **Contactez-nous** ».

Roseline Jamet, Charles-Henri Eyraud et Daniel Paupart.

LECTURE POUR LA MARQUISE

Une histoire de la lumière ; La spectroscopie, Stéphane Le Gars ; Vuibert 2012

Cet ouvrage est divisé en 3 parties :

- la construction du spectroscopie ;
- la théorisation des spectres ;
- l'usage de la spectroscopie.

La construction du spectroscopie

L'ouvrage commence par une étude historique sur les diverses conceptions sur la lumière.

Pour Pythagore « *les rayons sortent de l'œil et vont sonder les qualités des corps vus* ».

Épicure pense que « ce sont les corps eux-mêmes qui émettent de la lumière ». Enfin Platon élabore une théorie mixte : « *la vision des couleurs provient de la rencontre d'un feu visuel sorti de l'œil et de rayons émis par les corps perçus* ».

Aristote, lui, propose une étrange théorie selon laquelle les couleurs naîtraient de l'affaiblissement de la lumière blanche. Chaque couleur résulterait d'un certain dosage de noir et de blanc.

Pour le rouge il y aurait plus de blanc que pour toutes les autres couleurs, le vert plus de noir et moins de blanc etc.

Au XVIII^e siècle, Newton émet une théorie corpusculaire d'émission de la lumière qui rend compte de nombreuses propriétés de la lumière.

Au début du XIX^e siècle, le spectre de la lumière visible est prolongé à ses deux extrémités par l'infrarouge et l'ultraviolet.

Avec J. Von Fraunhofer débute véritablement la spectroscopie. Celui-ci associe un système constitué d'une fente-prisme à une lunette astronomique et étudie le spectre du Soleil dans lequel il observe la présence de raies sombres. Au milieu du XIX^e siècle, Kirchhoff et Bunsen (l'inventeur du bec de gaz bien connu) établissent les lois que nous connaissons aujourd'hui.

Cette première partie conduit à la conclusion que le positivisme d'Auguste Comte est largement pris en défaut. Il soutenait que l'on ne connaîtrait jamais la composition chimique du Soleil à distance.

La théorisation des spectres

On pense à cette époque (milieu du XIX^e siècle) que la richesse spectrale des raies données par une molécule ressemble au spectre des ondes sonores produit par un corps résonant ; il serait composé lui

aussi d'une vibration fondamentale assortie d'une série d'harmoniques.

La recherche d'une relation numérique conduit J. Balmer, un professeur de mathématiques suisse versé dans la numérologie, à établir pour l'atome d'hydrogène les termes d'une suite mathématique que l'on nomme aujourd'hui série de Balmer. Ces raies traduisant des discontinuités d'énergie pour l'atome d'hydrogène seront à la base des différents modèles proposés pour décrire la structure de l'atome. On passera du modèle « plum-pudding » de J.J. Thomson au modèle de l'atome de Bohr et plus tard à la théorie des quanta.



Usage de la spectroscopie

La spectroscopie devient un remarquable outil d'analyse. Les expériences deviennent de plus en plus fines, par exemple, pour le spectre solaire, l'Américain Rowland parvient, en 1880, à produire un spectre de 20 m de long contenant plus de 20 000 raies. La spectroscopie va constituer un apport majeur pour la métrologie, en particulier pour la définition de l'unité de longueur (le mètre étalon), et plus tard de celle de l'unité de temps (la seconde).

C'est en 1875 qu'est créé le Bureau International des Poids et Mesures (BIPM).

Dans le domaine de l'astronomie l'apport de la spectroscopie est immense au point de voir apparaître une nouvelle branche qui prendra le nom

d'astrophysique. Cette nouvelle science permet de décoder les messages transmis par la lumière des astres.

L'ouvrage s'achève avec une partie copieuse consacrée à l'analyse chimique par spectroscopie : la spectroscopie Raman, des notions sur la Résonance Magnétique Nucléaire, RMN, l'effet Zeeman et la structure hyperfine de certaines des raies spectrales...

Comme le titre l'indique, cet ouvrage est avant tout

un livre d'histoire de la lumière et de l'évolution des différents dispositifs instrumentaux qui permettent son étude. Il privilégie particulièrement le domaine de la chimie. Sa lecture devrait permettre aux enseignants de mieux saisir la scientificité du concept de lumière. Une théorie aussi complexe que celle de la lumière ne peut vraiment s'appréhender qu'en situant son étude dans une perspective historique.

Christian Larcher

COURRIER DES LECTEURS

À propos du dernier numéro des Cahiers Clairaut

Nous avons reçu le courrier suivant de Michel Dumont :

"Je viens de recevoir les Cahiers Clairaut n° 140 , que je n'ai pas encore lu(s) en entier. Dans le jeu n°1, page 17, il y a une solution qui est erronée ! Il s'agit de la photo 7. Nous sommes d'accord, le diamètre apparent de la Lune est beaucoup trop grand. Mais la position de la Lune et l'orientation du croissant sont possibles ; si c'est la Nouvelle Lune, avec une Lune située à un peu plus de 5° au-dessus de l'écliptique, le croissant serait plus fin , mais aurait bien cette orientation !!



La deuxième erreur de la photo est alors que le Soleil n'étant pas couché, le ciel ne serait pas noir, mais bleu-clair et de ce fait, le-dit

croissant ne serait pas visible aussi près du Soleil. La troisième erreur est qu'il n'y a pas de montagne au Pôle Nord, qui est situé en plein océan arctique."

Effectivement, un croissant en nouvelle Lune avec une déclinaison de 5° N vu du pôle Nord aurait théoriquement cette forme mais serait tellement fin qu'il ne pourrait pas être visible : l'épaisseur du croissant serait de 0,004 rayons lunaires (1 - cos 5°) soit 7". Cela revient à voir une Lune sur l'écliptique âgée d'environ 10 heures... Ce qui est impossible. La réponse était effectivement mal rédigée. Un croissant lunaire de cette épaisseur ne peut pas être vu au pôle ainsi. Merci à ce lecteur attentif.

Nous avons aussi reçu un courrier de Jacques Valade où il nous parle du remue méninges de la page 19 :

"La Lune est-elle devant ou derrière la Terre sur la célèbre photo du couple prise par Galiléo ? Jean-Luc avait apporté une réponse très simple. En creusant un peu, on voit qu'on peut calculer la distance Terre/sonde et déboucher sur un calcul d'incertitude instructif".

Nous avons trouvé 3,5 comme rapport des diamètres apparents Terre/Lune au lieu de 3,66 en réalité, nous en avons conclu que la Lune était au premier plan. Pour avoir une photo identique (mêmes diamètres apparents) avec une Lune au niveau de la Terre, il faudrait que la Lune soit plus grosse d'un facteur 3,66/3,5.

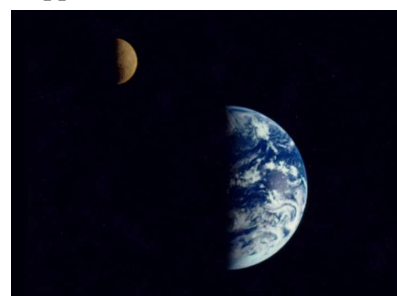
Un petit schéma et le théorème de Thalès nous donne alors

l'équation $d/(d - 384\ 000) = 3,66/3,5$
d'où $d \approx 8\ 800\ 000$ km (d = distance sonde Terre).

Il suffit ensuite d'aller vérifier sur le site de la NASA :

<http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/pia00134>
pour voir que la distance était de 6 200 000 km.

Avec une erreur inférieure à 50 %, on ne s'en sort pas si mal... Il reste à faire le calcul d'incertitude.



ÉCOLE D'ÉTÉ D'ASTRONOMIE

L'École d'Été d'astronomie du CLEA, se déroulera du 22 au 29 août 2013
au col Bayard près de Gap.

Si vous n'avez jamais participé à une EEA, pour avoir un aperçu du contenu et de l'ambiance, visionnez la vidéo à l'adresse suivante :

<http://acces.ens-lyon.fr/clea/aLaUne/EEA-clea/>

Où se déroule l'EEA ?

Au centre d'oxygénation de Col Bayard, près de Gap, un lieu très agréable et propice à l'observation.



Qui anime les Écoles d'Été d'Astronomie ?

Des astronomes professionnels et des enseignants passionnés par l'astronomie et l'astrophysique.



Qui participe aux Écoles d'Été d'Astronomie ?

Des professeurs des écoles, de collèges et de lycées de différentes matières et parfois aussi des animateurs. Souvent, ils viennent y faire leurs premiers pas en astronomie.



Comment se déroule l'EEA ?

Elle est organisée autour de cours-conférences, d'observations et d'ateliers en petits groupes qui permettent des réalisations concrètes.



Quels thèmes seront abordés ?

Des thèmes liés aux nouveaux programmes mais aussi **astronomie à l'école**, on mettra le zoom cette année sur le **Soleil** (hyperactif ?), **l'ombre et la lumière** (images et spectres).

Et en prime ...

Peut-être une balade « cadrans solaires » dans les villages du Büech.

Voir les modalités d'inscription sur :

<http://acces.ens-lyon.fr/clea/aLaUne/EEA-clea/>

Vous trouverez d'excellents documents sur la relativité, de Pierre Magnien entre autres, sur le site du CLEA :

<http://acces.ens-lyon.fr/clea/aLaUne/relativite-restreinte-principes-et-applications/>

VIE ASSOCIATIVE

Assemblée Générale de l'association

Le 10 février 2013 à la Cité de l'Espace, Avenue Jean Gonord à Toulouse

L'accueil à la Cité de l'Espace

Christophe Chaffardon, responsable Éducation de la Cité de l'Espace, souhaite la bienvenue à chacun et décrit rapidement le fonctionnement et les projets du service éducatif. Le CLEA remercie chaleureusement C. Chaffardon et la Cité de l'Espace pour son accueil chaleureux et la qualité exceptionnelle des prestations offertes tout au long du week-end.

L'actualité du CLEA, par Cécile Ferrari :

C. Ferrari, présidente du CLEA, dresse le bilan de l'année écoulée. Nombre d'adhésions en hausse (+54) abonnements constant (-4), un nouveau hors-série (HS10) publié qui a du succès, un nouveau site de vente en ligne performant et rapidement mis en place, une école d'été toujours très appréciée par les stagiaires et un nouveau dépliant publicitaire sont autant de réalisations et point positifs pour cette année 2012. Cependant les frais de l'école d'été restent difficiles à couvrir (4 100 euros de déficit pour un déficit de l'association de 3 700 euros). L'organisation interne autour du nouveau site de vente reste à parfaire. De ce fait les avoirs du CLEA diminuent d'année en année. Le Conseil d'administration a décidé pour équilibrer les comptes d'instaurer dès la prochaine la prochaine école d'été des frais d'inscription. La vente du nouvel hors-série devrait dégager un peu de marge. La recherche de subventions sera engagée en proposant des projets de mise en ligne de ressources, entre autre pour enrichir le soutien aux nouveaux programmes de lycée. Ceci devrait aussi favoriser les nouveaux abonnements et les adhésions. Une demande de déclaration d'utilité publique de l'association pourrait aider en ce sens. Les projets pour 2013 sont évoqués: la production d'un nouveau hors-série, HS11 sur le thème des constellations. Un HS sur l'astronomie à l'école primaire pourrait suivre. Un projet de co-édition d'une « Enquête de Sciences » sur la relativité en collaboration avec le SCEREN et le laboratoire de didactique André Revuz (LADR) dont Cécile de Hosson est co-directrice, devrait aussi voir le jour en 2013.

Roseline, Jamet, trésorière, présente le bilan financier et le détail des recettes et dépense pour l'année 2012. Le compte de résultats sera mis en ligne pour les adhérents dans les meilleurs délais. Le CLEA prévoit essentiellement d'investir dans la production du HS11 en 2013 après avoir investi dans le HS10 et des supports publicitaires en 2012 (film sur l'école d'été, nouveau dépliant). Il est noté que la possibilité de payer par Paypal ses achats sur le nouveau site de vente en ligne va induire de nouveaux frais, estimés à 600 euros maximum. Le paiement par chèque ou par virement bancaire est possible. *Un vote est proposé sur le rapport d'activités puis sur le rapport financier : les deux rapports sont adoptés à l'unanimité des votants.*

Désignation des membres du Conseil et de la composition du bureau.

Deux nouveaux adhérents se portent candidats : Frédéric Pitout (Toulouse) et Nathalie Cartier (Clermont-Ferrand). Le vote auquel participent 81 votants a permis d'élire les 40 membres suivants : BALIN Dominique, BARDIN Daniel, BERTHOMIEU Francis, BILLARD Francine, BOBIN Michel, BRAHIC André, CARTIER Nathalie, CAUSERET Pierre, CAVARAZ René, CHATY Sylvain, DE HOSSON Cécile, DUVAL Marie France, EYRAUD Charles-Henri, FERRARI Cécile, FOUQUET Jean-Luc, GARREAU Brigitte, GAYRARD Olivier, GRAUSS Bernard, HAUGUEL Véronique, IMBAULT Danièle, JAMET Roseline, JOSSELIN Éric, JOUGUET Éric, JOUVARD Jean-Marie, LAHELLEC Marie-Agnès, LARCHER Christian, LE FUR Pierre, LE LAY Claire-Mireille, LECOUTRE Chantal, LECOUTRE Georges, MAUREL Danièle, MULLER Lionel, PAUPART Daniel, PECKER Jean-Claude, PITOUT Frédéric, RIPERT Jean, SANDRÉ Béatrice, SERT Josée, THIAULT Sylvie, VIENNEY Jean-Michel.

Les nouveaux membres du Conseil présents ce dimanche élisent les membres du bureau du CLEA pour 2013. Sont désignés, à l'unanimité des 28 votants :

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

L'écho des sites, par Francis Berthomieu et Charles Henri Eyraud.

Francis précise le travail accompli par quelques membres du CLEA sur le site de Nice (études sur la rétrogradation de Mars et le transit de Vénus, création de liens avec les Cahiers Clairaut avec accès direct sur un thème référencé, documents pour la classe de 1^{ère}S). Charles Henri fait en direct une démonstration de l'utilisation du site de ventes et abonnements en ligne. La question de l'unicité d'un site internet CLEA est soulevée, le basculement du site de Nice vers les sites hébergé par l'Ifé (Institut français de l'éducation, ex INRP) n'est pas encore à l'ordre du jour, la fréquentation de chacun d'eux étant équivalente. Abonder la partie « actualités » avec des échos des formations continues et des activités des correspondants académiques est fortement souhaitable.

La vie associative, par Jean-Michel Vienney.

Des échos des actions et des stages sont échangés par des correspondants de quelques académies :

- Toulouse et Cahors (Jean Ripert) : La « Maison des Sciences » se met en place en Midi-Pyrénées avec des antennes dans les départements. Ces structures nouvelles sont à la recherche d'intervenants pour les formations et le CLEA devrait s'y impliquer. Deux stages de formation des professeurs d'école ont d'ailleurs eu lieu à Cahors sur les thèmes au programme du cycle 3.
- Bordeaux (Roseline Jamet): un stage « Action Culturelle » organisé l'an dernier pour les professeurs de collège a connu un vif succès et est reconduit cette année en avril. Le CLEA y contribue pour l'organisation des ateliers.
- Orléans (Danièle Maurel): un stage d'astronomie a été organisé par un professeur de collège avec conférences, ateliers et le planétarium du CLEA venant de Cahors.
- Nice (Francis Berthomieu) : deux stages ont été organisés avec l'étiquette CLEA, dont l'un à l'observatoire du Pic des Fées à Hyères.
- Marseille (Marie-France Duval) : 15 professeurs des écoles par mois assistent à un stage qui pour eux est important car ils n'ont pas dans leur cursus reçu de formation scientifique.
- Paris (Christian Larcher) : « Science à l'école » proposera en mars une dotation en matériel d'observation (prêt de 3 ans) et une formation pour les établissements qui en feront la demande. Même démarche avec l'opération « Cosmo à l'école » qui propose des formations au CERN pour les enseignants. Éric Jouguelet témoigne du bon niveau de la formation et de la qualité de l'accueil.
- Dijon (Pierre Causeret) : il serait souhaitable d'animer sur la liste de diffusion une aide concrète aux membres du CLEA qui s'occupent d'un club d'astronomie.

Cécile Ferrari suggère d'étendre encore à d'autres académies les propositions de stages au PAF, coordonnés entre le CLEA pour les ateliers et des chercheurs ou universitaires des laboratoires d'astronomie locaux.

Les Cahiers Clairaut, par Christian Larcher.

Après un rappel du fonctionnement de l'équipe avec Pierre Causeret (articles thématiques) et Jean Ripert (mise en pages), il est précisé que les deux prochains numéros porteront sur les comètes et la gravitation. Il serait souhaitable d'avoir plus régulièrement des articles sur l'astronomie à l'école primaire.

Les productions pédagogiques, par Pierre Causeret et Francis Berthomieu.

À l'aide de quelques images, Pierre explique le contenu du HS10 « Mathématiques et astronomie », désormais disponible sur le site. Francis, responsable du projet HS11 « Constellations » propose une maquette des titres de chapitre, des articles recueillis ou envisagés et fait part de sa recherche de volontaires pour relire, corriger, écrire, proposer des idées nouvelles et des compléments. Le plan sera définitivement fixé au début du mois de mars. Il est aussi possible de s'engager dans les projets de rédaction des hors-séries n°12 (école) avec Jean Ripert.

L'école d'été, par Danièle Imbault.

Danièle relate le déroulement de la dernière école d'été avec ses 40 participants dont 17 nouveaux (3 professeurs des écoles), ses 11 animateurs et ses 6 intervenants pour les cours du matin, ainsi que le déplacement à Cadarache pour la visite du site d'ITER. Les évaluations des stagiaires sont très positives. La prochaine école d'été se déroulera à Gap du 22 au 29 août 2013. Les modalités d'inscription seront précisées très prochainement (mars 2013).

L'assemblée prend fin vers 13h. La prochaine se tiendra à Paris, sans doute en mars 2014. À 14h30, Lionel d'Uston entame sa conférence, ouverte au public toulousain de la Cité, sur le thème des dernières découvertes sur la planète Mars avec le rover Curiosity.

Jean-Luc Fouquet, secrétaire du CLEA & Cécile Ferrari, Présidente du CLEA.



Solutions des mots croisés

Horizontalement

1. Perturbations ; 2. Apian. Écrou ; 3. RAF (C' est bien la devise de la Royal Air Force). Idylle. Ys ; 4. Antiqueue. Gap (lieu de l' école d' été du CLEA) ; 5. BO (les étoiles de type spectral O et B sont les plus chaudes). Nu. USSR. UE (Giotto était une sonde de l' Agence Spatiale Européenne qui vit des fonds des différents pays membres mais aussi de l' Union Européenne) ; 6. Ouateux. Cap (Capricorne, entre le Verseau et le Sagittaire) ; 7. Li (on a trouvé du lithium dans la Comète Shoemaker-Levy 9). ESA (European Space Agency). Roland (la comète Arend-Roland) ; 8. ISON. Io. Pérou ; 9. Ose. Nœud ; 10. Ucrepa (aperçu à l' envers). Assois ; 11. ELT (Extremely Large Telescope, terme qui regroupe des projets de télescopes de plus de 20 m comme l' E-ELT). IRAS (satellite infrarouge qui a détecté la comète IRAS-Araki-Alcock). ENS.

Verticalement

1. Parabolique ; 2. Épanouis. Cl (de NaCl) ; 3. Rift. Oort ; 4. Ta. Intense ; 5. Uniques. Épi ; 6. Du. UAI (Union Astronomique Internationale). Ar (de l' argon a été détecté dans Hale-Bopp) ; 7. Bayeux (lka comète de Halley est représentée sur la tapisserie de Bayeux du XI^e siècle). On ; 8. Lus. OAS ; 9. Télescopes ; 10. Ice. Rôleuse ; 11. Or. Pardon ; 12. Noyau. No. Is ; 13. Suspendues.

Écoles d'Été d'Astronomie



Vous souhaitez débiter en astronomie ?

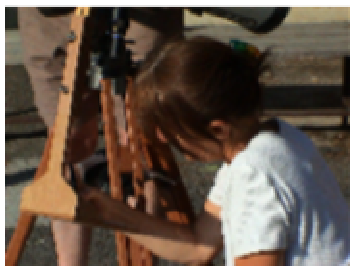
Vous souhaitez vous perfectionner ?

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 :

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

Les productions du CLEA ⁽¹⁾

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

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

Fiches pédagogiques

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

Fascicules thématiques de la formation des maîtres, en astronomie

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

Matériel

Filtres colorés et réseaux de diffraction.

DVD

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

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

Le formulaire de commande est sur le site.

(1) vente aux adhérents uniquement

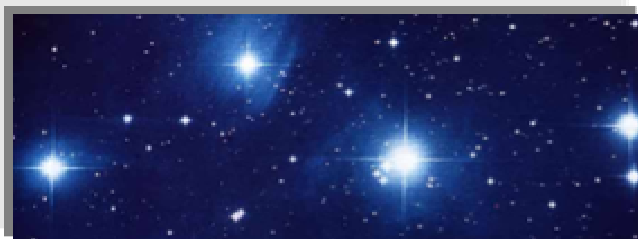
Planétarium

Il est possible également de louer le planétarium gonflable (starlab) du CLEA. Cette année 2013, il sera en Région Midi-Pyrénées. (uniquement pour le planétarium contact : jean.a.ripert@wanadoo.fr)

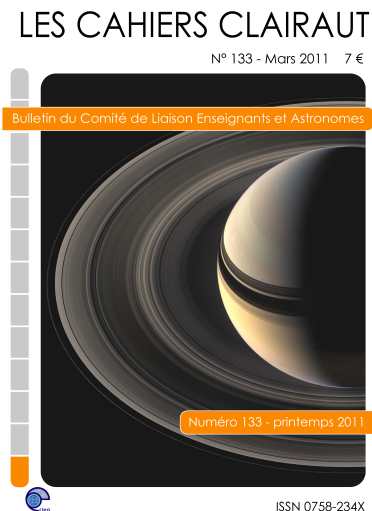
Le site internet

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 €

Chèque à l'ordre du CLEA, à envoyer à :
Roseline Jamet
83, rue Pierre Curie
33140 VILLENAVE D'ORNON

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 141, mars 2013