

LES CAHIERS CLAIRAUT

N° 172 - Décembre 2020 9 €

Bulletin du Comité de Liaison Enseignants et Astronomes



Numéro 172 - hiver 2020-2021

Thème de ce numéro, les astéroïdes

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 :

Lucienne Gouguenheim
Georges Paturel

Bureau du CLEA pour 2020

Président : Frédéric Pitout
Trésorière : Sylvie Thiault
Trésorière adjointe : Chantal Lecoutre
Secrétaire : Grégory Silva
Secrétaire adjoint : Vincent Bouneb

Responsables des groupes

Vie associative : Jean-Michel Vienney
Cahiers Clairaut : Christian Larcher
Productions Pédagogiques : Pierre Causeret
École d'Été d'Astronomie : Danièle Imbault
Responsables du site : Jean-Michel Vienney



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

David Alberto, Thomas Appéré, Daniel Bardin, Jean-Claude Berçu, Ghislain Bernard, Pierre Causeret, Daniel Descout, François Hurter, Christian Larcher, Anne-Marie Louis, Philippe Malburet, Jean-Pierre Martin, Floriane Michel, Alain Ortais, Jean Ripert, Béatrice Sandré, Sylvie Thiault, Jean-Michel Vienney, Cédric Willemin.

Les auteurs recevront plusieurs numéros 172 afin de faire connaître la revue autour d'eux.

Vue d'artiste de l'astéroïde Itokawa, d'après les images de la sonde Hayabusa. Cette image est extraite d'une vidéo où l'on peut voir l'astéroïde sous toutes ses faces (<https://www.eso.org/public/videos/eso1405b/>). Itokawa est un astéroïde Apollon : c'est un géocroiseur qui s'approche de l'orbite terrestre et qui peut éventuellement la croiser (demi grand axe de 1,3 ua et périhélie à 0,95 ua). Il mesure 607 mètres de long. Il est sans doute constitué d'un agrégat de fragments rocheux. La sonde japonaise Hayabusa s'y est posé le 19 novembre 2005 et a ramené sur Terre en 2010 des échantillons de poussière de cet astéroïde.

Image JAXA, ESO/L. Calçada/M. Kornmesser/Nick Risinger (<http://skysurvey.org>).

Les Cahiers Clairaut

Hiver 2020-2021

Éditorial

Les missions Apollo sur la Lune ont permis de mieux connaître notre satellite mais également d'apporter des renseignements précieux sur la Terre. La Lune est criblée de nombreux cratères. Les expéditions lunaires montrèrent que ces cratères ne résultaient pas d'un effet volcanique mais de l'impact de météorites. L'étude de la répartition et de l'âge de ces cratères à sa surface a conduit à considérer qu'un phénomène très semblable concernait aussi notre planète. Mais sur la Terre, les cratères d'impacts disparaissent assez rapidement à cause des phénomènes d'érosion ; on peut cependant toujours observer le magnifique « Meteor Crater » dans l'état de l'Arizona aux USA qui date de 55 000 ans.

Des phénomènes plus récents sont préoccupants comme l'explosion du 30 juin 1908 (dans le calendrier grégorien) qui détruisit une zone très importante de forêt près de la rivière Tounghouska en Sibérie. Le 15 février 2013, près de Tcheliabinsk en Russie, l'entrée d'un astéroïde dans l'atmosphère provoqua une intense luminosité suivie d'un violent choc supersonique. De nombreuses personnes s'approchant des fenêtres furent blessées par l'explosion des vitres.

Le thème de ce numéro concerne des astéroïdes : comment les détecter, comment les étudier, comment se protéger de géocroiseurs dangereux ?

Vous trouverez de nombreuses idées d'activité à réaliser au sein des clubs astronomiques ou avec vos élèves.

Cet été la visite de la magnifique comète NEOWISE a permis de réaliser de nombreuses photos. En particulier de l'immense queue de poussière, de la fine queue bleue de gaz, mais aussi avec un instrument plus puissant, de la structure spiralée de la zone proche du noyau. Un article revient sur son interprétation.

Ce numéro vous propose d'explorer des liens entre l'astronomie et d'autres domaines. En effet, elle peut être utile dans le domaine de l'art afin de déterminer exactement où et quand un tableau fut peint, on peut aussi l'associer à la philatélie ; elle est, de toutes façons, étroitement liée au concept de temps.

Au moment où l'on cherche à abandonner le changement d'heure annuel, l'arrivée de la covid vient brouiller nos repères spatio-temporels. En particulier avec le télétravail où l'on est à la fois chez et soi au travail.

Christian Larcher pour l'équipe

Sommaire

Curiosité

L'astronomie au service de l'art

Jean-Claude Berçu

p 2

Article de fond

Les structures spiralées des jets de poussières issus des noyaux de comètes

Philippe Malburet

p 6

Thème : les astéroïdes

p 9

Article de fond

Les astéroïdes

Jean-Pierre Martin

p 10

Avec nos élèves

Comment détourner un astéroïde et à toutes fins utiles sauver le monde ?

Floriane Michel

p 15

Avec nos élèves

Construction de trajectoires d'astéroïdes

Ghislain Bernard

p 20

Article de fond

Astéroïdes, astrométrie et science participative

Daniel Descout

p 26

Avec nos élèves

La mission *はやぶさ2* (Hayabusa 2), projet interdisciplinaire japonais-physique chimie

Alain Ortais, Thomas Appéré

p 32

Le thème dans les Cahiers Clairaut et mots croisés

Pierre Causeret

p 35

Observation

Le ciel de l'automne 2020

Pierre Causeret

p 36

Avec nos élèves

Système de détection de météores et d'aéronefs

La radioastronomie à la portée des amateurs

Cédric Willemin

p 37

Réflexion

Suppression annoncée

du changement d'heure saisonnier

David Alberto

p 40

Curiosité

L'astronomie dans les timbres (5)

Anne-Marie Louis

p 42

Vie associative

Souvenir, souvenirs

Daniel Bardin

p 47

Le rallye mathématique de l'académie de Lyon

p 48

Croyances et idées fausses en astronomie

p 48

Solutions des mots croisés

p 48

L'astronomie au service de l'art

Jean-Claude Berçu, président de la commission histoire de la SAF.

De nombreux tableaux ont pour sujet des paysages avec des levers ou couchers de Soleil, les phases de la Lune. Le peintre a-t-il représenté le ciel avec exactitude ou a-t-il pris quelques libertés avec le réel pour dramatiser sa composition ? Connaissant l'année de l'œuvre, peut-on retrouver le mois, le jour et l'heure ? De puissants outils disponibles sur Internet : Google Maps, Google Earth, les éphémérides de l'IMCCE et des logiciels (Stellarium, Cartes du Ciel) permettent de tenter de répondre à ces questions. « Vue de Dresde au clair de lune » de Johan Christian Dahl (1839) est l'occasion d'utiliser ces outils.

Les peintres ont souvent été inspirés par le ciel. Nombreux sont les couchers de Soleil, les nuits de pleine Lune, les comètes, les étoiles qui entrent dans la composition d'un tableau. Mais les artistes ne sont pas des astronomes et n'ont pas toujours daté avec précision leur œuvre. Les indications fournies se limitent parfois au mois et à l'année. Et pour certains tableaux, les historiens d'art sont même en désaccord sur l'année.

C'est là qu'intervient l'astronomie. En reconstituant très exactement le ciel observé par le peintre, il est possible de retrouver la date d'un tableau et ainsi de mettre fin aux incertitudes des experts.

Bien entendu, cette enquête n'est possible que si des repères sont facilement identifiables : église, château, pont, monument, relief. Il sera souvent nécessaire de compléter l'étude par d'autres éléments permettant par exemple de connaître la saison : aspect de la végétation, ombres, travaux des champs, habillement des personnages.

Des outils gratuits permettent de mener l'enquête : Google Maps pour localiser l'endroit où le peintre

avait posé son chevalet, Google Earth pour déterminer l'azimut d'un astre et un logiciel tel que Stellarium ou Cartes du ciel utilisant des éphémérides de haute précision, par exemple celles développées par le Jet Propulsion Laboratory (JPL) à Pasadena en Californie.

Dans le monde, un astrophysicien, Donald W. Olson, de la Texas University, est un expert internationalement reconnu dans ce domaine, au point que les médias l'ont surnommé le Forensic Astronomer (le Détective céleste). Il s'est notamment intéressé à Vincent van Gogh (*Paysage nocturne au lever de lune, La Maison blanche, la nuit*), à Claude Monet (*Impression, soleil levant, Soleil couchant à Étretat*) et Édouard Manet (*Clair de lune sur le port de Boulogne*). En datant ces œuvres il a mis fin aux controverses existantes.

L'astronomie permet aussi de différencier la réalité de l'observation de la licence artistique : un paysage d'hiver avec une pleine Lune visible derrière un clocher peut être impossible à cette saison.

Pour illustrer ce travail de « détective céleste », une œuvre du peintre Johan Christian Claussen Dahl est étudiée.



Blick auf Dresden bei Vollmondschein Vue de Dresde au clair de Lune, 1839 (Wikimedia).

Johan Christian Claussen Dahl (24 février 1788 - 14 octobre 1857) était un artiste norvégien considéré comme le premier grand peintre romantique de Norvège, fondateur de « l'âge d'or » de la peinture norvégienne, et, par certains, l'un des plus grands artistes européens de tous les temps.

Une recherche sur Google Maps permet de localiser le paysage après réglage de la luminosité.



© 2020 Google Maps.



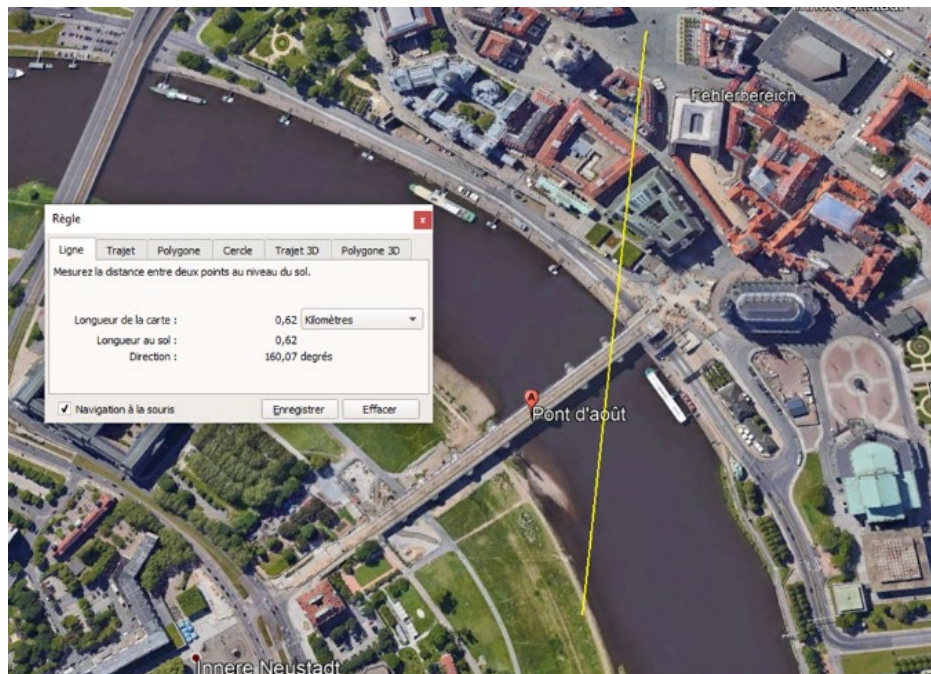
Vue sur le pont Auguste sur l'Elbe, au centre l'Église Notre-Dame.

Coordonnées géographiques du lieu où se trouvait le peintre près du Marienbrücke :

51° 03' 37,9" N, 13° 43' 51,5" E

Pour en savoir plus sur cette peinture, il y a un ouvrage de référence : *Moonwatchers*, Caspar David Friedrich, The Metropolitan Museum of Art, Yale University Press, 2011. On y apprend que Dahl a vécu à Dresde et qu'il a peint de nombreux tableaux représentant le pont Auguste et la ville de Dresde au bord de l'Elbe.

Avec Google Earth, déterminons l'azimut de la Lune depuis ce lieu : on trouve **160°**.



© 2020 Google Earth.

Le tableau est daté de 1839. Le site de l'Institut de mécanique céleste et de calcul des éphémérides (IMCCE) permet de connaître les dates de la pleine Lune en 1839 : 29 janvier, 28 février, 30 mars, 28 avril, 28 mai, 27 juin, 26 juillet, 24 août, 23 septembre, 22 octobre, 21 novembre et 20 décembre.

(<https://promenade.imcce.fr/fr/pages4/441.html>)

Peut-on déterminer la saison en fonction des détails du paysage ?

On aperçoit au premier plan à droite une jeune femme assise avec son chien qui regarde l'Elbe, il y a des feuilles sur les arbres, des lavandières qui accrochent leur linge.



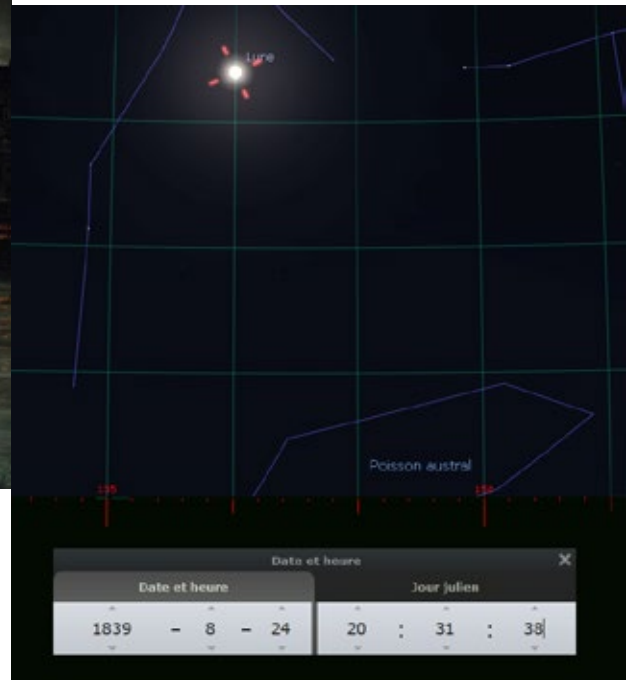
On peut donc exclure l'automne et l'hiver pour privilégier la fin du printemps ou l'été soit les pleines Lunes des 28 mai, 27 juin, 26 juillet et 24 août.

Reste à déterminer si à ces dates la pleine Lune était visible au-dessus du pont Auguste avec un azimut de 160° et quelle était sa hauteur.

Le logiciel Stellarium avec les éphémérides DE430 du JPL fournit les réponses (heures en UT) :

Le 28 mai, la hauteur de la Lune était $8^\circ 33'$ à 21 h 52 UT, le 27 juin $8^\circ 51'$ à 22 h 29 UT, le 26 juillet, $14^\circ 41'$ à 22 h 15 UT, le 24 août $23^\circ 43'$ à 21 h 55 UT et le 23 septembre, 42° à 22 h 28 UT.

La hauteur de la Lune le 24 août permet de privilégier cette date.



Dans la mesure où Dahl n'a pas indiqué le jour et le mois de son œuvre, on peut considérer que la date du 24 août 1839 est en accord avec l'aspect général du paysage et le comportement des personnages.

Pour aller plus loin

- Donald W. Olson (trad. Janet Borg), *Clair de lune sur le port de Boulogne Une enquête sur un tableau de Manet*, L'Astronomie, n° 98, octobre 2016, p. 40-45.
- <http://clea-astro.eu/actualites/impression-soleil-levant-monetaumuseemarmottan>
- <https://www.smithsonianmag.com/arts-culture/forensic-astronomer-solves-fine-arts-puzzles-116770403/>
- Stellarium : <https://stellarium.org/fr/>
- IMCCE : <https://www.imcce.fr/>

■

Les structures spiralées des jets de poussières issus des noyaux de comètes

Philippe Malburet, Aix en Provence.

De nombreux observateurs amateurs ou professionnels ont eu le plaisir de suivre l'été dernier le passage de la comète C/2020 F3 découverte en mars dernier par le télescope spatial NEOWISE. Une occasion de réaliser de magnifiques photos. Certaines de ces photos, prises avec un dispositif adapté, permettaient de distinguer une structure spiralée dans la zone proche du noyau. Cet article explique la nature de ce phénomène.

L'aspect spiralé des têtes des comètes

La comète qui a fait le bonheur de certains cet été, *Neowise*, a montré une structure spiralée qui a intrigué certains observateurs. De quoi s'agit-il ?

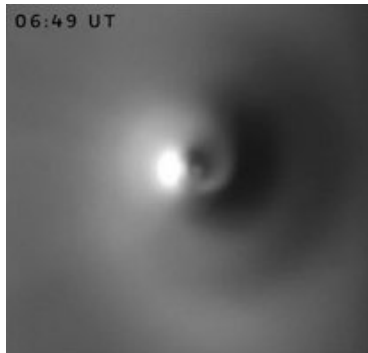


Fig.1. Cliché de la comète Neowise pris le 1^{er} août 2020, montrant nettement un aspect spiralé du noyau de cette comète. Cliché M. Drahus et P. Guzik ; observatoire Gemini à Hawaï.

Cette structure particulière n'est pas propre à Neowise. Elle a déjà été rencontrée pour plusieurs autres comètes, généralement des comètes brillantes, ainsi que le montrent les clichés suivants.

Spirales de la comète de Halley (1986)

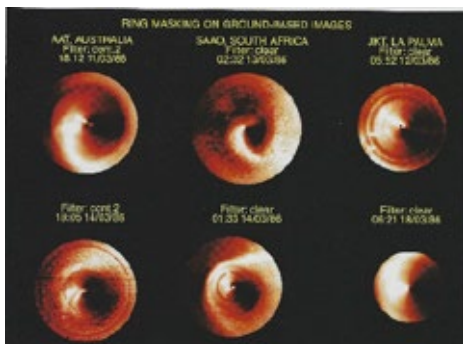


Fig.2. Suite de clichés de la comète de Halley pris depuis le sol en mars 1986 et montrant l'évolution en spirale des gaz et des poussières quittant le noyau. Cliché ESA.

Spirales de la comète de Hale-Bopp (1997)

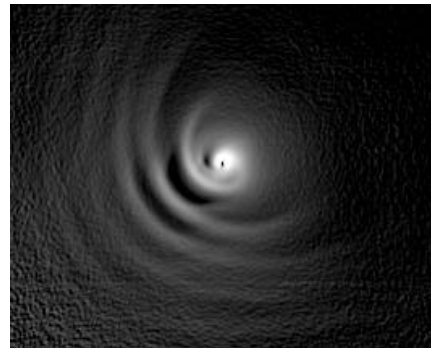


Fig.3. Aspect spiralé de Hale-Bopp. Observation faite le 8 avril 1997 au Pic du Midi par Jean Lecacheux et François Colas.

Pourquoi des spirales ?

Il est connu que l'activité d'une comète est due à l'éjection de gaz et des poussières présentes sur le noyau lorsque, chauffées par le Soleil, les glaces se subliment.

Des structures spiralées, visibles en général sur les têtes des comètes brillantes sont dues à de puissants jets issus des zones actives du noyau en rotation ; ces zones actives sont en effet riches en matériaux volatils tels que les glaces. L'aspect spiralé est dû à un effet de « tourniquet » d'arrosage : alors que la source des jets est en rotation, ceux-ci s'écartent du noyau en produisant ces spirales. L'effet est observable dès que l'axe de rotation (qui n'a pas une direction fixe) forme un angle de 30 à 40° par rapport à la direction de la Terre. L'intérêt de l'étude des jets ainsi mis en évidence est de déterminer en particulier la période de rotation du noyau. Des observations effectuées pendant plusieurs semaines, voire des mois, permettent également de déterminer la latitude des zones actives ainsi que la direction du pôle nord du noyau. Nous envisageons dans ce qui suit le cas

de deux comètes : 109P/Swift-Tuttle et C1995/Hale-Bopp O1.

La comète Swift-Tuttle : une comète célèbre

La comète 109P/Swift-Tuttle est une comète bien connue ; il s'agit d'une comète périodique de période moyenne (environ 130 ans), appartenant à la même famille que la comète de Halley. Elle a retenu l'attention des observateurs pour ses passages de 1862 (année de sa découverte) et 1992.

Elle fut découverte le 16 juillet 1862 par l'astronome américain Lewis Swift et, indépendamment, le 19 juillet de la même année, par son compatriote Horace Parnell Tuttle. C'est la raison du nom qui lui a été attribué. Elle fut redécouverte en septembre 1992 par l'astronome amateur japonais Tsuruhiko Kiuchi. La célébrité de cette comète lui vient surtout de l'essai d'étoiles filantes bien connu des Perséides que l'on observe autour du 12 août. Cette découverte de la similitude entre l'orbite de 109P/Swift-Tuttle et les météorides constituant l'essai des Perséides fut le fait de l'astronome italien Giovanni Schiaparelli, en 1886.

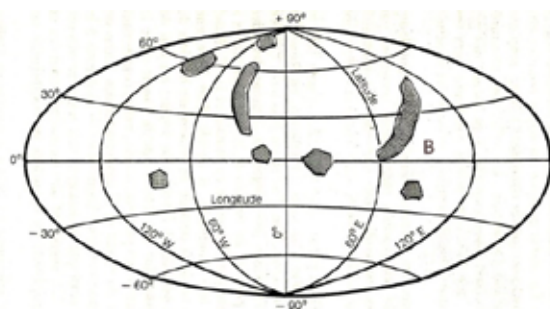


Fig.4. Mise en valeur des zones actives du noyau de 109P/Swift-Tuttle par Z. Sekanina.

La zone B est considérée comme la plus active. Elle est située entre 0 et 45° N de latitude. Source : AC Levasseur-Regourd et Ph. de la Cotardière, Denoël, 1985.

Le noyau de 109P/Swift-Tuttle est de petite taille : il s'agit sans doute d'un noyau dont le rayon moyen serait compris entre 20 et 30 km. Comme pour toute comète, le noyau n'est pas uniformément actif : il existe des plages plus actives que d'autres, d'où sont issus les jets que l'on peut observer. L'astronome tchèque Zdeněk Sekanina reprit les images de la comète 109P/Swift-Tuttle datant du retour de 1862 réalisées par Bond et Winnecke. Z. Sekanina put mettre en évidence un certain nombre de zones actives à partir de ces dessins. Ne connaissant pas la forme exacte du noyau (il n'est jamais sphérique), Z. Sekanina le supposa ellipsoïdal et proposa une période de 2,77 jours.

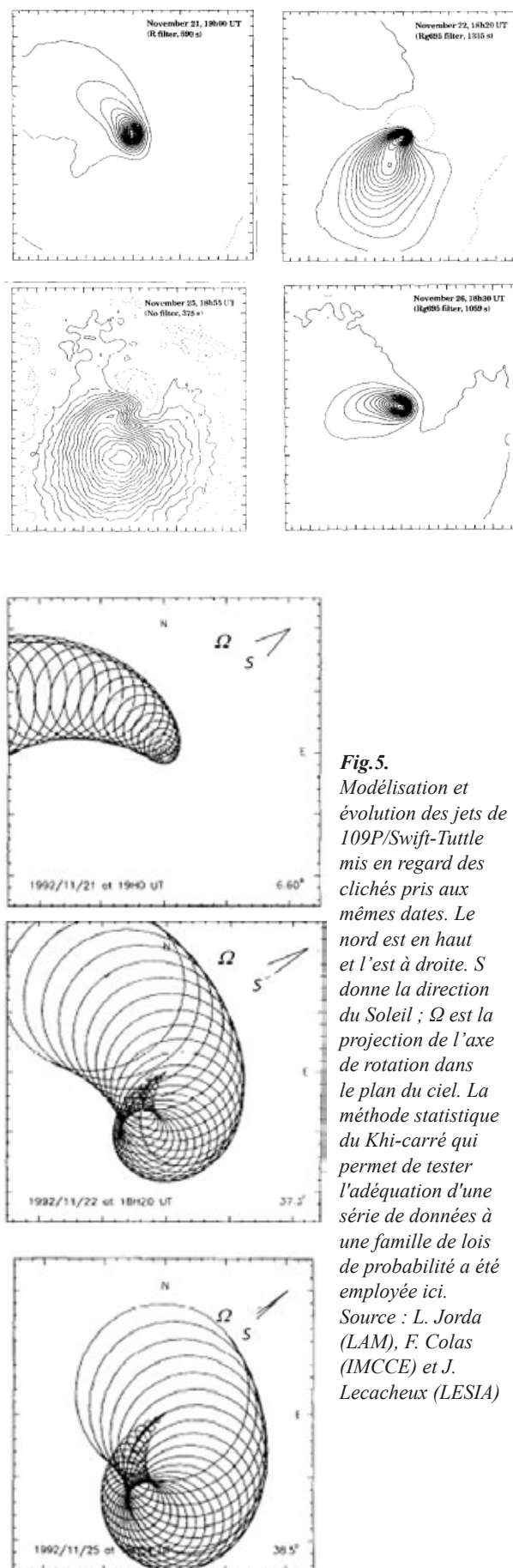
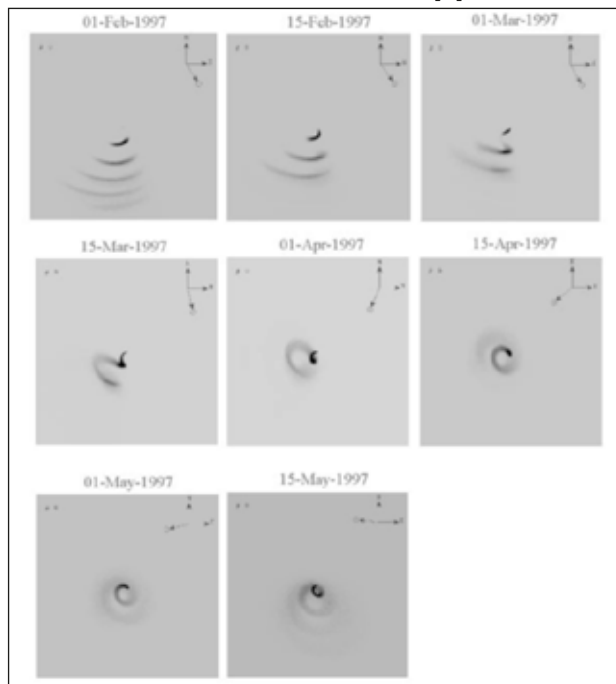


Fig.5. Modélisation et évolution des jets de 109P/Swift-Tuttle mis en regard des clichés pris aux mêmes dates. Le nord est en haut et l'est à droite. S donne la direction du Soleil ; Ω est la projection de l'axe de rotation dans le plan du ciel. La méthode statistique du Khi-carré qui permet de tester l'adéquation d'une série de données à une famille de lois de probabilité a été employée ici.

Source : L. Jorda (LAM), F. Colas (IMCCE) et J. Lecacheux (LESIA)

Les modélisations (les trois schémas ci-dessus) sont construites à partir d'ellipses correspondant aux isochrones séparés de 0,1 jour ; elles ont été faites sur des images prises à l'observatoire du Pic du Midi entre le 20 novembre et le 21 décembre 1992. Ces simulations ont permis à leurs auteurs de trouver une période de rotation de 2,75 jours qui est conforme aux calculs faits par d'autres observateurs, et de positionner la latitude haute, zone source, à 70°.

Cas de la comète Hale-Bopp.



Il s'agit d'une comète à très grande période (sans doute autour de 2 500 ans). Son noyau a un rayon moyen d'environ 80 km. Elle a été la plus belle comète observée au XX^e siècle, visible à l'œil nu pendant 18 mois. Elle est désignée par C/1995 O1.

Elle fut aussi l'objet d'une étude de ses jets, comme on peut le voir ci-dessous.

L'étude des images des comas de comètes présentant un aspect spiralé permet de déterminer les maxima d'intensité des profils azimutaux en fonction du temps et d'en déduire l'angle de position des jets par rapport au noyau. Les paramètres ainsi définis sont ensuite optimisés grâce à l'utilisation d'un programme informatique *ad hoc*, dès lors que l'on dispose de suffisamment de données. Pour ce qui concerne la comète Hale-Bopp, de tels calculs ont permis de donner la période de rotation du noyau égale à $11,35 \pm 0,05$ h et de placer la zone d'émission à $64 \pm 3^\circ$. Pour approcher les séries statistiques caractérisant les spirales, on a employé ici la méthode de Monte-Carlo. Les clichés utilisés (au nombre de 30 000) étaient ceux qui ont été pris

à l'Observatoire du Pic du Midi, du 2 février au 31 mars 1997, avec le télescope de 1,05 m. Ces clichés étaient pris automatiquement toutes les 10 min.

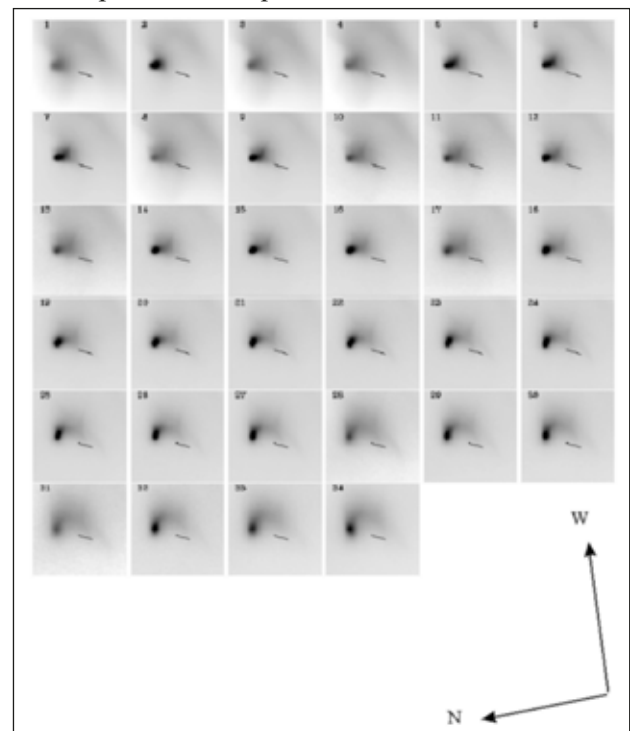


Fig.6. Images synthétiques de la comète Hale-Bopp. Source : L. Jorda, K. Rembor (Max-Planck Institut), J. Lecacheux et P. Colom (LESIA), F. Colas (IMCCE), E. Frappa (planétarium de St Etienne), L.M. Lara (ESA).

Conclusion.

Les jets issus des zones actives d'un noyau des comètes les plus brillantes donnent naissance à des spirales de poussière dans les jours qui suivent leur éjection, visibles depuis la Terre lorsque l'axe de rotation du noyau (dont la direction varie depuis la Terre) est dirigé approximativement vers la Terre. L'étude de ces spirales, en utilisant des modèles statistiques, permet d'avoir une bonne approche de la valeur de la période de rotation du noyau, de la direction du pôle et de la latitude des zones d'émission des jets observés.

Je tiens à remercier tout particulièrement Laurent Jorda, astronome au LAM d'avoir accepté de relire mon manuscrit et de m'avoir fourni tous les éléments qui m'ont permis de rédiger cet article.

Bibliographie.

- The rotational parameters of Hale-Bopp (C/1995 O1) from observations of the dust jets at Pic du Midi Observatory, L. Jorda et al., Springer, CH, 1998.
- The dust jets of P/Swift-Tuttle 1992t, L. Jorda et al., Planet Space Sci, Elsevier Science Ltd, GB, 1994.

THÈME: LES ASTÉROÏDES

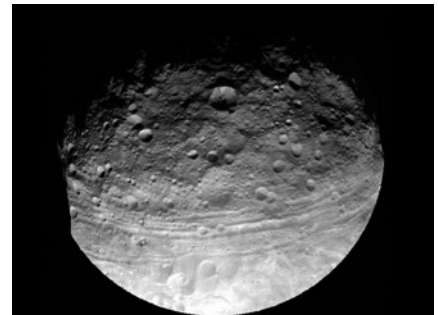
Voici les 14 astéroïdes qui ont été visités par une sonde spatiale. On donne pour chacun son nom, l'année du survol (ou de l'arrivée de la sonde), le nom de la sonde qui l'a photographié et sa plus grande dimension.



Gaspra, 1991, Galileo, 19 km



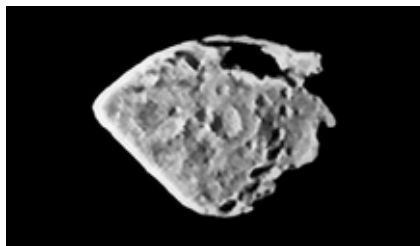
Itokawa, 2005, Hayabusa, 0,6 km



Vesta, 2011, Dawn, 560 km



Ida et Dactyle, 1993, Galileo, 56 km



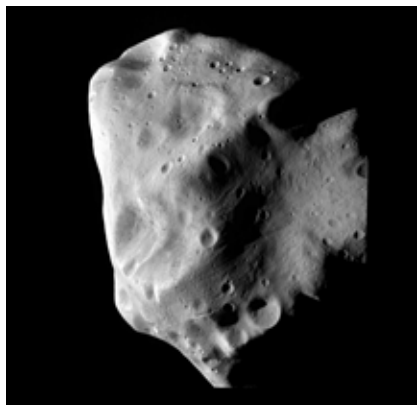
Steins, 2008, Rosetta, 6 km



Toutatis, 2012, Chang'e2, 5 km



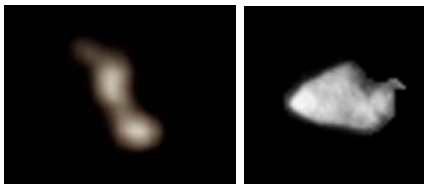
Mathilde, 1997, NEAR Shoemaker, 66 km



Lutèce, 2010, Rosetta, 96 km



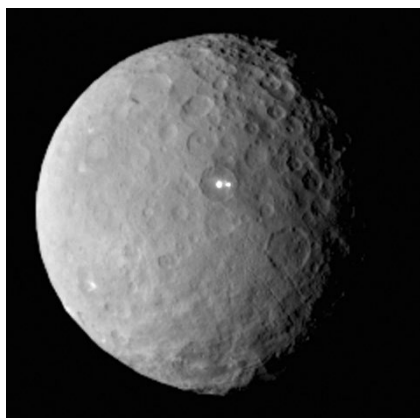
Ryugu, 2018, Hayabusa2, 1 km



Braille, 1999, Deep space 1, 2 km
AnneFranck, 2002, Stardust, 7 km



Éros, 2000, NEAR Shoemaker, 33 km



Cérès, 2015, Dawn, 950 km



Bénou, 2018, OSIRIS-REx, 0,5 km

Crédit, de haut en bas. Col 1 : Gaspra NASA; Ida NASA/JPL/USGS; Mathilde NASA; Braille Ted Stryk, NASA; AnneFranck, NASA; Éros NASA/JPL/JHUAPL. Col. 2 : Itokawa JAXA; Steins et Lutèce ESA MPS for OSIRIS Team MPS/UPD/LAM/IAA/ RSSD/INTA/ UPM/DASP/IDA; Cérès NASA/JPL-Caltech/UCLA/MPS/DLR/IDA. Col. 3 : Vesta, NASA; Toutatis, CNSA; Ryugu, JAXA; Bénou NASA/Goddard/University of Arizona.

Les astéroïdes

Jean-Pierre Martin, physicien, président de la commission cosmologie de la SAF.

De nombreux objets passent dans le ciel au-dessus de nos têtes, les journaux s'en font l'écho. Certains charment nos yeux comme les comètes, d'autres semblent plus inquiétants comme les astéroïdes ou les météorites. Mais que sait-on des astéroïdes ?

Parmi tous les corps créés dans le Système solaire il y a plus de 4 milliards d'années, tous ne sont pas des planètes. Il y a des petits corps (minor planets disent les Américains) comme comètes, astéroïdes, météoroïdes. Quelles sont les différences ?

Les astéroïdes sont des petits corps rocheux orbitant autour du Soleil et provenant principalement de la ceinture d'astéroïdes entre Mars et Jupiter¹.

Les comètes sont des « boules de neige sale » qui brillent en s'approchant du Soleil et forment une queue très lumineuse.

Les météoroïdes sont des restes de comètes ou des fragments d'astéroïdes qui peuvent brûler partiellement en traversant l'atmosphère terrestre (la partie arrivant au sol s'appelle météorite).

Intéressons-nous ici aux astéroïdes.

Premières découvertes

Il y a quelques siècles, les lois de Kepler et Newton expliquaient les orbites des planètes mais on ne savait pas pourquoi telle planète était sur telle orbite.

Deux astronomes allemands (Bode et Titius) au milieu du XVIII^e siècle trouvèrent une explication empirique à la position des planètes, qui semblait marcher approximativement, c'est la fameuse « loi » de Titius-Bode (voir encadré). Il y avait juste un trou entre Mars et Jupiter où aucune planète n'existait. Ce ne fut qu'une curiosité mathématique jusqu'à la découverte d'Uranus, qui collait assez bien avec cette « loi ».

On s'intéressa alors à ce fameux « trou » entre Mars et Jupiter, il devait bien y avoir quelque chose à cet endroit-là. Toutes les lunettes astronomiques furent dirigées vers le ciel et un jour, l'abbé Piazzi en 1801 par hasard alors que tout le monde était à la recherche de la planète manquante entre Mars et Jupiter a découvert depuis Palerme, ce qu'il prit

¹ On réserve habituellement le nom d'astéroïde aux petits corps plus proches du Soleil que Neptune. Les autres petits corps plus éloignés, situés dans la ceinture de Kuiper, sont appelés objets transneptuniens (OTN).

pour cette planète et qu'il nomma Cérès (nom de la déesse romaine de l'agriculture), il crut que c'était la planète manquante.

La loi de Titius Bode

Elle s'écrit $d = 0,4 + 0,3 \times 2^{n-1}$ où d est la distance de la planète au Soleil en unité astronomique (distance Terre-Soleil) ; n vaut $-\infty$ pour Mercure, 1 pour Vénus, 2 pour la Terre, 3 pour Mars, 5 pour Jupiter, 6 pour Saturne et 7 pour Uranus. On n'avait aucun corps pour $n = 4$. La correspondance est assez bonne jusqu'à Uranus, mais elle est plus mauvaise pour Neptune (pour $n = 8$, $d = 39$ au lieu de 30).

C'est le génial mathématicien Gauss qui calcula l'orbite de Cérès (il venait de mettre au point à cette occasion la méthode des moindres carrés). D'autres suivirent : Pallas, Junon, Vesta... Et beaucoup d'autres découvertes encore. C'était une mine de petites planètes. Herschel baptisa ces corps « astéroïdes » (semblables à une étoile), ils s'appelaient avant « planètes télescopiques ». Ils étaient tous situés dans ce qu'on appela la ceinture d'astéroïdes (située à environ 2,7 unités astronomiques du Soleil).

À partir de 1890, les plaques photographiques ont fait faire des progrès à la détection : Wolf, directeur de l'observatoire d'Heidelberg en découvrit plus de 230 grâce à cette méthode. À partir des années 1990, l'électronique et les CCD augmentèrent encore plus le taux de découverte.

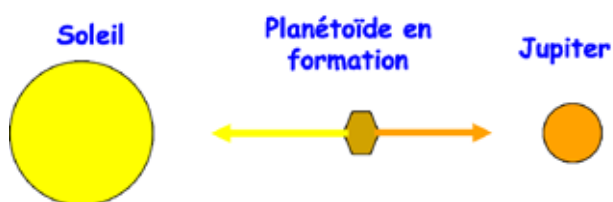
Il y avait effectivement une multitude de petits corps à cet endroit du ciel, mais pas de vraie planète.

Pourquoi n'a-t-on pas trouvé de vraie planète ?

Toute formation de planète est prise entre deux feux :

- l'attraction du Soleil ;
- l'attraction de Jupiter, planète géante.

Toute velléité de formation est vouée à l'échec : il ne peut subsister que des petits morceaux de planétoïdes, les astéroïdes.



La plupart de ces petits corps se trouvent donc situés entre Mars et Jupiter dans une zone que l'on appelle la ceinture principale d'astéroïdes (il existe une autre zone de petits corps plus éloignée dans le Système solaire, la ceinture de Kuiper).

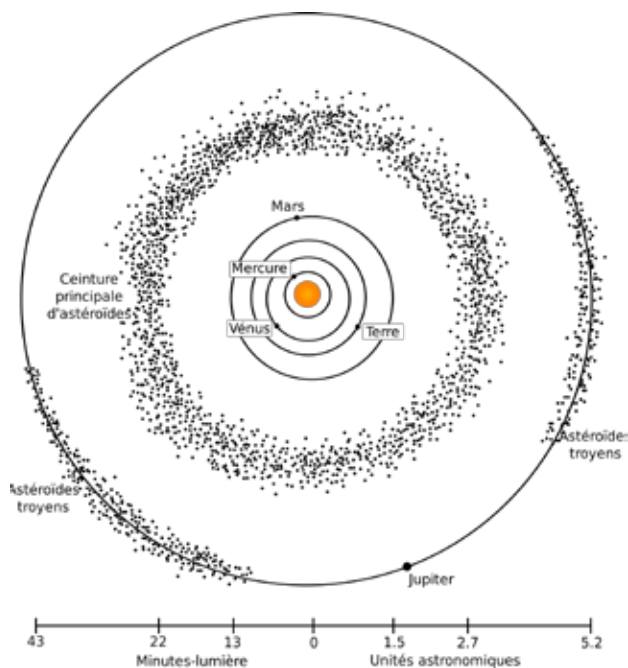


Fig.1. La ceinture principale d'astéroïdes, entre Mars et Jupiter (Wikipedia d'après image NASA).

De quoi sont composés ces petits corps ?

Ce sont les restes de matière qui n'ont jamais pu former une vraie planète, ils sont intéressants à étudier car ce sont de vrais fossiles de la formation de la Terre.

De façon un peu simplifiée, on peut dire que l'étude

spectrographique a permis de déterminer trois grandes familles en fonction de leur composition :

- les astéroïdes de type S (en anglais stony, rocheux) ou silicatés, constitués de pyroxène et d'olivine avec petit noyau de Fe-Ni ;
- les astéroïdes du type M (métalliques), constitués principalement de fer et de nickel, qui proviennent de noyaux d'astéroïdes différenciés ;
- les astéroïdes de type C (pour carbonés) qui sont les plus primitifs.

Quelle taille, quelle forme ?

Le plus grand des astéroïdes est Cérès avec 950 km de diamètre suivi par Vesta (530 km)... Les plus petits sont des grains de poussière.

La masse totale des astéroïdes est évaluée à 4 % de la masse de la Lune ou 0,05 % de la masse de notre Terre.

Ils sont approximativement 1 million d'un diamètre supérieur à 1 km (plus de 700 000 sont nommés) mais l'espace est quasiment vide puisqu'on estime la distance moyenne entre deux astéroïdes à 10 millions de km (25 fois la distance Terre-Lune) !

Ils ont subi de multiples collisions au cours de leur vie et sont criblés de cratères d'impact, ils ont pour la plupart une forme « patateïde » (voir figure 2 page suivante).

Les astéroïdes sont-ils dangereux ?

Parmi cette myriade d'astéroïdes, certains s'approchent de la Terre, ce sont les géocroiseurs (en anglais NEA : Near Earth Asteroids), parmi ceux-ci, certains peuvent être dangereux, ce sont les astéroïdes potentiellement dangereux (PHA), il y en a quelques centaines et on les suit de près !

Parmi tous ces astéroïdes, la catégorie des géocroiseurs représentent une population proche des 100 millions d'objets pour une taille supérieure à 10 m, et près d'un millier de taille kilométrique !

Type d'astéroïde	Caractéristiques	Sous catégories	Abondance
Type C pour carboné	Très sombres (albédo 0,03) comme les chondrites carbonées (CC). Très primitifs, ils peuvent contenir de l'eau. Peuplent surtout les régions externes de la ceinture principale.	B ; F ; G	Très abondant 75 % des astéroïdes. Ex : Mathilde, Cérès, Bénéou.
Type S pour silice ou pierreux	Albédo plus élevé (0,1 à 0,2) riches en métaux : Fe, Ni, Mg. Similaires aux pallasites. Peuplent la région interne de la ceinture.	A ; K ; L ; Q ; R	Rare 17 %. Ex : Itokawa, Gaspra, Éros.
Type M pour métallique	Très brillants, constitués principalement d'alliage Fe-Ni.		Le reste. Ex : Lutèce.

Les différents types d'astéroïdes (classement simplifié).

Les plus dangereux, les PHA, mesurent plus d'une centaine de mètres et croisent l'orbite de la Terre.

Mais il faut relativiser, ils sont répartis de façon très espacée, en fait si vous traversez la ceinture des astéroïdes, vous avez peu de chances d'en rencontrer un. Mais au cours du temps, évidemment cette probabilité augmente, dès que l'on dépasse l'échelle d'une vie humaine.

Un corps de 1 km a une probabilité de nous frapper en moyenne tous les 500 000 ans, un corps de 10 km tous les 10 millions d'années etc. Le dernier impact connu est le Meteor Crater en Arizona par un projectile d'environ 50 m de diamètre il y a 50 000 ans.

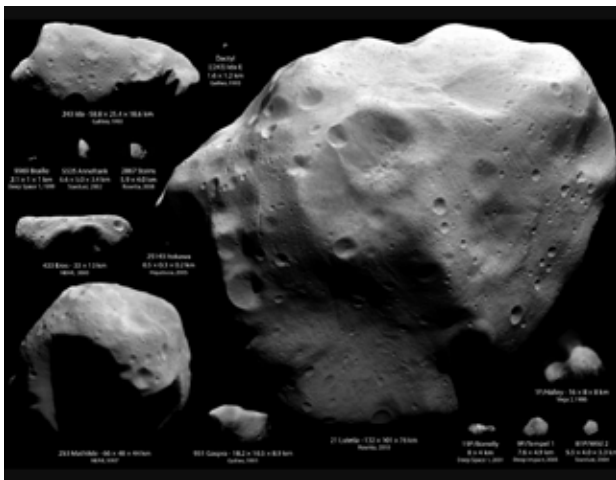


Fig.2. Quelques astéroïdes visités ; dans le coin inférieur droit, ce sont des comètes.
NASA/JPL Montage E. Lakdawalla Planetary Society.

Reste-t-il des traces sur Terre ?

Au cours des millénaires, des astéroïdes ont frappé la Terre, surtout au début de la création du Système solaire il y a 4 milliards d'années mais beaucoup moins maintenant. Il en reste très peu de trace, à cause de l'érosion (air eau) et de la tectonique des plaques qui ont joué un grand rôle sur notre planète et ont effacé presque toutes les traces d'impact avec des astéroïdes, contrairement à la Lune qui les a conservés.



Fig.3. À gauche, le meteor Crater, sur Terre, formé il y a environ 50 000 ans. À droite, le cratère Clavius sur la Lune.
(crédits Wikipedia-LarryBloom / Nasa)

Ces cratères s'appellent des astroblèmes (du grec astron = astre et blema = blessure), pour ne pas être confondus avec les cratères volcaniques.

Un astéroïde a particulièrement marqué la vie terrestre, celui, d'une quinzaine de km de dimension, qui, il y a 65 millions d'années a frappé la zone du Yucatan (à Chicxulub) et a provoqué la disparition de la plus grande partie des espèces vivantes. Comment cela a-t-il été possible ?

Cet énorme astéroïde a provoqué des catastrophes en chaîne :

- nuage de poussières entourant la Terre pendant des dizaines d'années ;
- arrêt de la photosynthèse ;
- hiver nucléaire ;
- disparition de la plupart des espèces vivantes dont les dinosaures.

Des compétiteurs plus sérieux prennent le dessus, dont ce qui va devenir l'homme. La preuve de cet impact a été faite en découvrant une faible couche d'iridium, un métal rare sur Terre, sur toute la surface terrestre au niveau de ce que l'on appelle la couche K/T (crétacé / tertiaire). L'iridium est présent dans les... météorites !

Les missions vers les astéroïdes

Il y a eu de nombreuses missions vers les astéroïdes dont certaines sont toujours en cours. Quelques-unes n'ont fait que passer comme Galileo qui a vu Ida et Gaspra ou Rosetta pour Steins et Lutèce.

Une mission originale et précurseuse a été la sonde NEAR en orbite autour d'Éros pendant un an avant de se « poser » sur celui-ci en 2001.

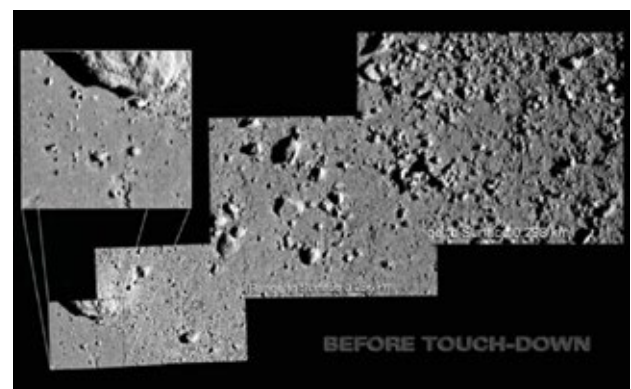


Fig.4. Les premières vraies images du sol d'un astéroïde (Éros photographiée par NEAR en 2001). Image NASA/JHUAPL.

Mais une des missions les plus emblématiques et dont on a peu parlé à l'époque est la mission japonaise Hayabusa de mise en orbite autour de Itokawa, petit astéroïde de 300 m situé à 300 millions de km.

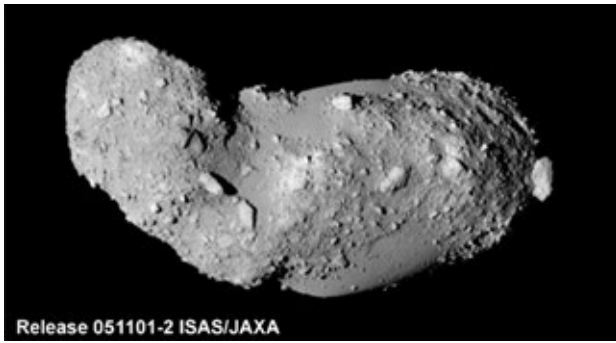


Fig.5. L'astéroïde Itokawa photographié en 2005 par Hayabusa (image JAXA).

Une des caractéristiques de cette mission était la présence à bord de moteurs ioniques. Après approche de l'astéroïde, il était prévu une méthode originale de retour d'échantillons suite à une série de « Touch and Go » comme on dit en aviation.

L'atterrissage s'est passé en larguant un marqueur à basse altitude (100 m), qui servait de signal radar pour un atterrissage en chute libre (faible gravité), ceci afin d'éviter une contamination avec les carburants chimiques. Malgré quelques péripéties, la capsule a pu revenir sur Terre quelques années après. Pour la première fois au monde, elle ramenait des échantillons de cet astéroïde.

La mission DAWN de la NASA, quant à elle, s'est intéressée aux gros astéroïdes de la ceinture principale, à savoir Cérès et Vesta. La sonde propulsée par un moteur ionique, se met d'abord en orbite autour de Vesta avant de changer d'orbite et d'aller en orbite autour de Cérès.

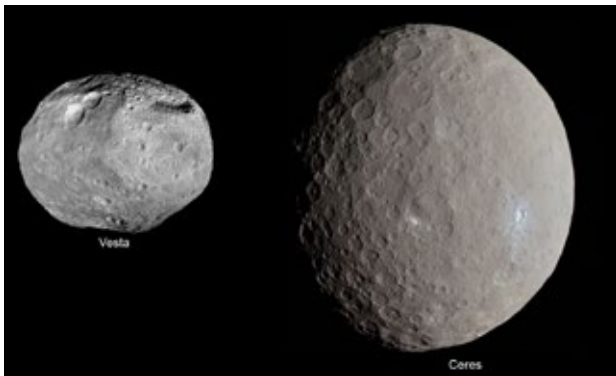


Fig.6. Vesta à gauche, Cérès à droite. NASA/JPL.

Vesta, objet de 525 km de diamètre est différenciée, mais pas tout à fait « rond ». Par contre, Cérès est suffisamment grand (950 km) pour obtenir le titre de planète naine suivant les dernières dénominations de 2006.

Très intrigant sur Cérès, de nombreux points brillants au fond de certains cratères seraient des taches de sels, signes, peut-être de la présence d'un océan salé sous la croûte. Cérès serait géologiquement actif.

Il existe des missions toujours en cours à destination d'astéroïdes.

Hayabusa 2

La JAXA (agence spatiale japonaise) voulait donner une suite à la mission Hayabusa qui s'était déroulée avec succès malgré quelques périodes de suspense intense au retour. Ils ont lancé la continuation de leur précédente mission vers les astéroïdes : Hayabusa deuxième du nom.

La sonde est similaire à sa première version. La cible est toujours un astéroïde de petite taille, cette fois il s'appelle 1999 JU3, ou Ryugu, sa taille est de l'ordre du kilomètre. Son intérêt, c'est un astéroïde primitif, datant de la formation du Système solaire. Il devrait contenir des molécules organiques.

Il est plus petit que le noyau de la comète 67P/Tchourioumov-Guérassimenko, exploré par Philae mais plus dense. Néanmoins la gravité y est très faible. Il est atteint en 2018, la sonde s'y met en orbite à 20 km d'altitude. L'exploration commence. Sa forme de dé bizarroïde surprend ainsi que l'absence de cratères. Après l'envoi réussi de robots au sol, deux prélèvements ont été obtenus et la sonde retourne maintenant vers notre planète pour récupération de la précieuse capsule en décembre 2020.



Fig.7. Ryugu (à gauche) 1 km et Bennu (à droite), 500 m. Images : NASA et JAXA.

OSIRIS-REx

La NASA lance une mission ambitieuse en septembre 2016, OSIRIS-REx (acronyme de Origins, Spectral Interpretation, Resource Identification, Security-Regolith Explorer) en direction d'un petit astéroïde (500 m) avec pour mission d'en ramener un échantillon sur Terre. La cible : 101955 Bennu ou 1999 RQ36. C'est un géocroiseur de type carboné.

La sonde se met en orbite en 2018 et commence à le cartographier. Il a fallu de nombreuses phases

d'approche pour évaluer le terrain de prélèvement, il faut en effet avoir un terrain en partie libre de gros cailloux, or ce n'est pas évident, le sol est très irrégulier. Néanmoins un site est trouvé pour un prélèvement qui était prévu en août 2020 (voir encadré ci-dessous), avant un retour en 2023.

Signalons que, comme pour Rosetta et Hayabusa, la « mise en orbite » autour de si petits corps qui n'ont pour ainsi dire pas de gravité est un exploit de mécanique astronautique afin de « voler » autour !

D'où vient l'eau terrestre ?

On a longtemps pensé que la plupart de l'eau de nos océans provenait des impacts de comètes avec notre planète, cela semblait logique car elles contenaient principalement de l'eau sous forme de glace. Comment peut-on le savoir ? L'eau possède un marqueur, le deutérium (ou hydrogène lourd, composant de l'eau lourde) dont la très faible présence dans les eaux terrestres est connue ; il se trouve que l'eau des comètes est légèrement différente pour la proportion de deutérium. L'eau

contenue dans les astéroïdes serait plus proche de la composition de l'eau terrestre, il semblerait donc que notre eau provienne principalement des astéroïdes. Ce résultat est quand même toujours en débat dans la communauté scientifique.

Conclusion

Les astéroïdes font partie des objets les plus primitifs de notre Système solaire, c'est la raison pour laquelle il faut les étudier. Certains peuvent nous menacer et de nouvelles techniques doivent être mises au point pour les dévier d'une possible rencontre avec notre planète. Il a été décidé au niveau mondial que le 30 juin serait la journée des astéroïdes. Cette date vient du 30 juin 1908, jour de l'évènement de la Tunguska en Sibérie, où un astéroïde énorme (de l'ordre de 50 m) a explosé au-dessus de ce coin désert de Sibérie, situé à 1 000 km au nord de la ville d'Irkoutsk. Cette lueur avait été vue jusqu'en Europe occidentale et détectée par les sismographes.



Les dernières nouvelles d'OSIRIS-REx

Le 20 octobre 2020, la sonde OSIRIS-REx s'est approchée lentement de l'astéroïde Bénou pour effectuer un prélèvement. La fin de la descente s'est effectuée à 10 cm/s. Le bras robotisé a touché la surface de l'astéroïde pendant quelques secondes ; un jet d'azote a alors permis de soulever des particules du sol, récupérées par le bras collecteur.

Mais on s'est aperçu que des fragments s'échappaient du compartiment de collecte et il a fallu transférer l'échantillon dans la capsule au centre de la sonde. L'opération fut délicate, guidée depuis la Terre située à plus de 300 millions de km (les messages mettaient plus de 18 minutes à parvenir à la sonde).

Apparemment, tout s'est bien passé. La sonde OSIRIS-REx quittera les abords de Bénou en mars 2021 avec sa précieuse cargaison de peut-être plus d'un kilogramme de poussières d'astéroïde. Le retour est prévu sur Terre en septembre 2023.



*Une des images de l'arrivée d'OSIRIS-REx sur Bénou, extraite d'un GIF animé disponible sur Wikipedia (article OSIRIS-REx).
Crédit NASA/Goddard/University of Arizona.*

AVEC NOS ÉLÈVES

Comment détourner un astéroïde et, à toutes fins utiles, sauver le monde ?

Floriane Michel, enseignante de physique chimie au lycée La Pléiade (38).

Que faire si un astéroïde dit géocroiseur présentait un véritable danger pour notre planète ? Depuis 2013 un groupe de scientifiques, mais aussi de juristes, de sociologues se réunissent tous les deux ans pour envisager tous les scénarios possibles et les diverses solutions les plus adaptées à chaque cas.

Le premier pas sur la Lune fut l'objet de beaucoup d'émerveillements mais eut également un intérêt moins connu : découvrir que les cratères circulaires de la Lune ne provenaient pas d'une activité volcanique mais bien d'impacts d'astéroïdes, mettant ainsi à jour la vulnérabilité de notre planète bleue. Si depuis cette époque, les scientifiques furent actifs sur le sujet, il faudra attendre plusieurs dizaines d'années et notamment l'observation de la comète Shoemaker-Levy 9 s'enfonçant dans la surface gazeuse de Jupiter pour que les politiques prennent conscience du problème.

Plusieurs échelles de dangerosité des astéroïdes furent alors créées. Leurs caractéristiques telles que la masse ou l'envergure furent alors couplées à la probabilité d'un impact pour classer les risques encourus par la Terre. Une collision avec un astéroïde même de quelques mètres peut provoquer de gros dégâts à l'échelle d'une ville ; au-dessus d'une centaine de mètre d'envergure, les conséquences seront mondiales. Pour se préparer à cette éventualité, un groupe de scientifiques, mais aussi de juristes, sociologues et autres corps de métiers se regroupent tous les deux ans depuis 2013 pour participer à la « Planetary Defense Conference ». Un scénario fictif est alors proposé, comme un jeu de rôle, et les participants du monde entier tentent de se coordonner pour qu'il y ait le moins de dégâts possible. L'objectif est d'anticiper les obstacles techniques mais aussi politiques de la mise en place d'une réaction mondiale coordonnée.

Une déviation le plus tôt possible

La détection des astéroïdes le plus tôt possible est un enjeu majeur de la prévention des impacts. Agir plus tôt permet de réduire l'intensité de la déviation nécessaire à imposer à un astéroïde et de la rendre ainsi techniquement plus accessible.

Pour bien comprendre, il est important d'avoir des ordres de grandeur en tête. Un astéroïde tel

qu'Apophis qui mesure 330 m d'envergure pourrait être dévié suffisamment pour éviter un impact par un satellite d'une tonne (5 fois moins lourd qu'un étage d'Ariane 5). Cependant, cela n'est le cas que si cette déviation est réalisée au moins une dizaine d'années en amont de la catastrophe. En effet, l'idée n'est pas tant de dévier les astéroïdes que de retarder leur passage au point d'impact. Une accélération imposée au corps céleste à l'aphélie de son orbite elliptique autour du Soleil engendrera une petite modification de sa vitesse et de sa trajectoire mais surtout un allongement de sa période. L'astéroïde mettant plus de temps pour parcourir son orbite, il arrivera « en retard » au niveau du point d'impact. Si sa période est modifiée très légèrement mais plusieurs révolutions avant la collision, ce retard sera alors multiplié d'autant, réduisant ainsi la probabilité d'une collision.

À l'inverse, si nous ne disposons que d'une orbite avant la date supposée de l'impact, il faut imposer une modification de la période bien plus conséquente. Apophis a une période orbitale de 0,89 an soit environ un an. Si une modification de sa période orbitale de cent secondes est opérée dix ans en avance, le retard cumulé sera donc multiplié par dix avant l'impact, soit mille secondes de différence, ce qui, à la vitesse de déplacement de la Terre (30 km/s) peut faire une grande différence. Si cette même modification est réalisée seulement deux ans avant l'impact, alors le retard de l'astéroïde ne sera que de 200 secondes. Il faudrait donc que la déviation soit plus forte pour atteindre les mille secondes nécessaires et les contraintes techniques plus grandes.

Dans leur arsenal, les scientifiques possèdent en particulier trois techniques complémentaires qui permettent de dévier un astéroïde, chacune plus ou moins adaptée en fonction de sa taille mais également du temps disponible pour agir.

L'explosion nucléaire

La technique la plus spectaculaire et favorite des films d'action est l'explosion nucléaire. Celle-ci est surtout envisagée pour les astéroïdes de plus d'un kilomètre d'envergure. L'idée première est d'envoyer une charge explosive à la rencontre de l'astéroïde et de le pulvériser en petits morceaux. Un des risques cependant est qu'un ou plusieurs débris soit suffisamment gros pour ne pas être détruit par l'atmosphère et engendrer des dégâts sur Terre. Une variante possible est de faire exploser la charge nucléaire à proximité mais sans toucher l'astéroïde. Le souffle généré par l'explosion pourra alors le dévier suffisamment pour qu'il évite la Terre. L'avancement du savoir sur ce sujet pose cependant question du fait qu'on utilise des charges nucléaires et qu'il serait inconvenant qu'elles tombent dans de mauvaises mains.

Cette technique est également la moins susceptible d'être utilisée à court terme en particulier en raison de l'absence de contrôle sur de nombreux paramètres qui sont difficilement modélisables. De plus, depuis 1998, la NASA a recensé la grande majorité des astéroïdes géocroiseurs de plus d'un kilomètre d'envergure qui seraient susceptibles de couper l'orbite terrestre dans le siècle à venir et sur lesquels cette technique serait la plus efficace. Les astéroïdes de moins d'un kilomètre d'envergure sont ceux qui nous posent le plus de problèmes. En plus d'être plus difficilement détectables, certains peuvent cependant générer des dégâts à l'échelle mondiale. En fonction du temps disponible avant la collision, une des deux techniques suivantes peut être utilisées.

Attracteur gravitationnel

L'objectif de cette technique est d'envoyer un satellite à la rencontre de l'astéroïde. Il se placera alors assez proche de celui-ci (de l'ordre de 200 m environ) et de ce fait, sera lié à lui grâce à la gravité. Les propulseurs du satellite pourront alors générer des impulsions et ainsi lentement dévier l'astéroïde dans la direction voulue.

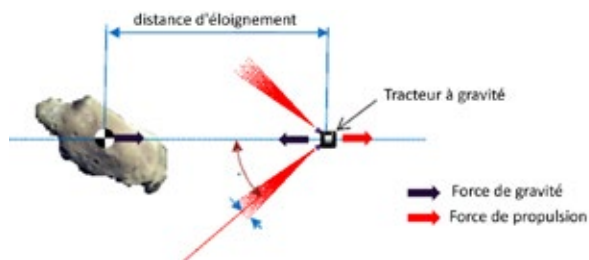


Fig.1. Principe d'un attracteur gravitationnel
(d'après C. Foster, J. Bellerose, D. Mauro, B. Jaroux).

Dans le cas où le satellite est placé devant l'astéroïde, si les gaz sont éjectés dans la direction de celui-ci, ils

le repousseront, ayant ainsi un effet contraire à celui recherché. Il est alors envisagé de diriger les tuyères avec un angle d'une cinquantaine de degrés de façon à éviter l'astéroïde.

L'inconvénient est qu'une partie de la force de propulsion est perdue car elle a une composante perpendiculaire à la direction de la déviation.

Les scientifiques ont alors envisagé de mettre le satellite en orbite autour de l'astéroïde. De cette manière, les gaz ne sont pas projetés sur l'astéroïde.

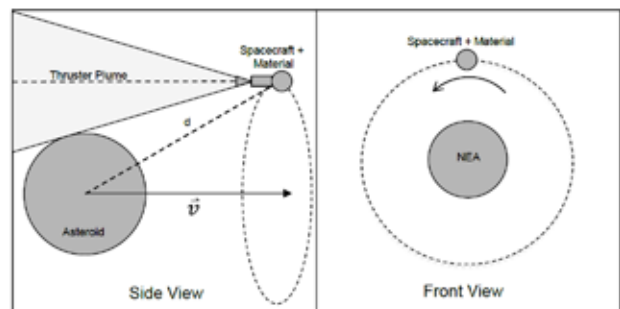


Fig.2. La méthode de tractage en spirale
(crédits : D. D. Mazanek, D. M. Reeves, J. B. Hopkins, D. W. Wade, M. Tantardini, H. Shen).

Un paramètre essentiel à prendre en compte pour que cette technique soit efficace est la masse du satellite. Plus celle-ci est grande, plus elle aura la capacité de tirer « fort » l'astéroïde. Plusieurs approches ont été envisagées pour rendre l'attraction la plus forte possible comme par exemple placer plusieurs satellites sur l'orbite, ou sur plusieurs orbites afin d'obtenir une masse cumulée plus grande. Une autre méthode est que le satellite puisse se poser sur l'astéroïde et y ramasser une ou plusieurs roches.



(Crédit : NASA/AMA, Inc.)

Fig.3. Système de capture en opération.

Un inconvénient cependant est que si la force exercée sur l'astéroïde est plus grande, la force exercée par celui-ci sur le satellite est également plus grande. Le satellite est alors obligé d'utiliser plus de carburant que si sa masse était plus faible pour rester à distance constante de l'astéroïde, ce qui dans certains cas, peut également être contreproductif. Cette technique a donc des avantages pour des astéroïdes de l'ordre de 100 à 300 m d'envergure. Au-delà de 300 m, le temps gagné en augmentant la masse du satellite est faible et donc peu rentable.

Impacteur cinétique

Cette technique consiste à envoyer un satellite, appelé impacteur, s'écraser sur l'astéroïde à une vitesse suffisamment grande (de l'ordre de plusieurs dizaines de milliers de km/h) pour le dévier. Une première mission de reconnaissance est absolument nécessaire pour connaître précisément sa forme et sa composition. Si l'astéroïde a une structure type « éponge », le choc n'aura pas le même effet que s'il s'agit de roches ou de glace. Dans ce dernier cas, les chances de réussites sont d'autant meilleures que l'impact peut également générer des expulsions de roches qui, grâce à la conservation de la quantité de mouvement, pourront jusqu'à doubler voire tripler la déviation de l'astéroïde. Le point d'impact du satellite doit être très bien défini et atteint avec une précision de l'ordre du mètre. Dans le cas contraire, la collision pourrait induire des mouvements de rotation de l'astéroïde sur lui-même et diminuer la déviation souhaitée.

Une mission de ce type appelé Deep Impact a été menée par la NASA en 2005. L'objectif était de lancer un impacteur de 372 kg sur la comète Tempel 1 à une vitesse de 10,2 km/s (avec une énergie équivalente à 4,8 tonnes de TNT) afin de créer un cratère et de pouvoir étudier le cœur de la comète. Il en a résulté une déviation de la comète en modifiant sa vitesse à l'aphélie de 0,000 1 mm/s.

Pour faire des tests, la NASA et l'ESA se sont accordés pour monter une mission double nommée AIDA (Asteroid Impact & Deflection Assessment). Celle-ci sera réalisée grâce à deux satellites, Dart et Hera. Dart, l'impacteur qui ira s'écraser sur l'astéroïde est fabriqué par la NASA. La cible est un astéroïde double, Didymos (800 m de diamètre) et sa petite « lune » surnommé Didymoon (160 m de diamètre). L'objectif est de taper sur la petite lune et d'en modifier la trajectoire autour de son corps central.



Fig.4. Déroulement de l'impact de DART sur Didymoon.

Il a été choisi de réaliser un impact sur un objet plus lent relativement à son corps central qu'un astéroïde autour du Soleil pour que la perturbation soit plus visible et donc plus facilement mesurable. Une variation de 6 mm/s est faible sur un astéroïde qui va à 30 km/s alors qu'elle augmentera la période

de rotation de Didymoon de 7 min soit de 1 %. Ce travail de mesure de l'effet de l'impact de DART sera réalisé par Hera, l'orbiteur fabriqué par l'ESA. Grâce à un radar, ce satellite permettra également d'étudier la structure interne de l'astéroïde. Le lancement de Dart est prévu pour 2022 et celui d'Hera pour 2026.

Bilan

Toutes ces techniques sont complémentaires et leur utilisation dépend de la masse de l'astéroïde, de sa structure et du temps à notre disposition pour le dévier. Sur la figure ci-dessous, il est possible de retrouver les conditions les plus favorables pour chaque technique : l'explosion nucléaire pour les astéroïdes les plus grands, le tracteur gravitationnel pour ceux détectés le plus longtemps en avance...

D'autres méthodes sont à l'étude telles que la modification de l'effet Yarkovsky (force résultante de l'écart entre absorption solaire et émission thermique par rayonnement, il faudrait peindre l'astéroïde en blanc par exemple ?) ou bien la possibilité d'éjecter de la masse des astéroïdes grâce à des satellites posés sur leur surface.

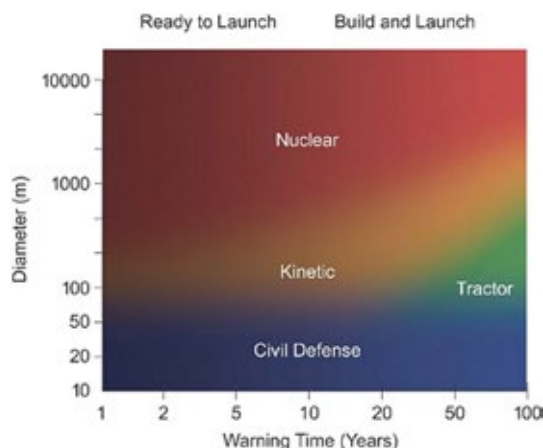


Fig.5. Comparaison entre quatre types de techniques de défense planétaire en fonction du diamètre de l'astéroïde et du temps restant pour réagir (crédit Tim Warchocki).

Un obstacle majeur à l'utilisation d'une des techniques de déviation est cependant diplomatique. En effet, si les calculs montrent qu'un pays va être touché par un impact d'astéroïde, le fait de le dévier peut donc déplacer temporairement ce point d'impact sur d'autres pays. La communication et la coordination entre les habitants de la Terre sont donc essentielles.

Si on peut compter sur les scientifiques pour avancer sur le sujet, la dimension mondiale du problème laisse une grande place à la diplomatie et à la coopération entre les pays que l'on espère plus dynamique et productive que celle autour du changement climatique.

Deux propositions d'activités avec les élèves

L'exercice qui suit est adapté pour des élèves de 1^{re} spécialité physique chimie. On y trouve les notions de variation de vecteur vitesse, de force d'attraction gravitationnelle et la formule simplifiée du principe fondamental de la dynamique.

Un tracteur gravitationnel pour dévier un astéroïde

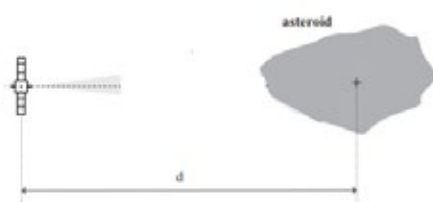
Pour dévier un astéroïde, il a d'abord été imaginé de lui amarrer des propulseurs qui pourraient alors facilement dévier sa trajectoire. Cependant, cette technique nécessite de bien connaître la surface de l'astéroïde et de trouver un moyen d'y fixer les propulseurs, ce qui n'est pas chose aisée. Il a alors été proposé de ne pas poser le propulseur sur l'astéroïde mais d'utiliser la méthode du tracteur gravitationnel.

Document 1

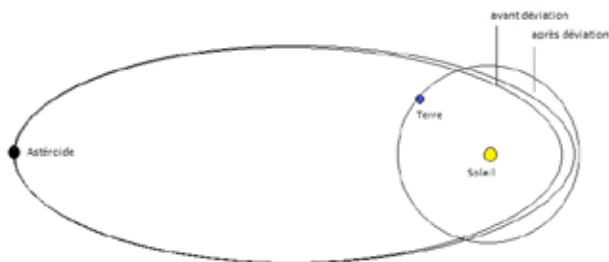
Le tracteur gravitationnel est une méthode qui utilise l'attraction gravitationnelle mutuelle entre le géocroiseur (l'astéroïde) et un engin spatial. Ce dernier se maintient à une distance constante du géocroiseur en utilisant une propulsion électrique. Par sa masse il exerce une force très légère sur l'astéroïde qui dans la durée modifie suffisamment l'orbite. (Source : Wikipédia).

Document 2

Tracteur gravitationnel



Document 3 Exemple de modification de trajectoire pour éviter la collision. Le schéma n'est pas à l'échelle.



Document 4 : un cas concret

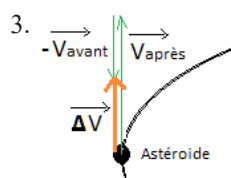
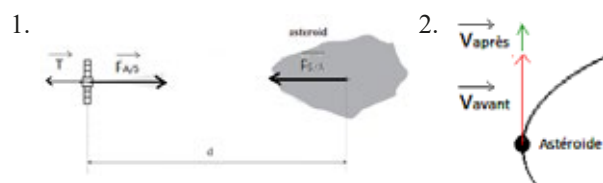
Un cas concret. L'astéroïde Apophis est un astéroïde qui a pendant quelques années préoccupé la communauté scientifique car il avait une probabilité de 2,7 % d'entrer en collision avec la Terre, risque écarté depuis. Il mesure environ 330 m d'envergure et a une masse $M = 4 \times 10^{10}$ kg. Les scientifiques estiment qu'il pourrait suffire d'augmenter la norme du vecteur vitesse d'un astéroïde de ce type de 2×10^{-6} m/s au niveau de l'aphélie pour qu'il évite la Terre. Cette valeur n'est valable que si la menace est détectée plus de 10 ans en avance ; plus on attend, plus la variation de vitesse imposée devra être grande. Un satellite de masse $m = 5$ tonnes pourrait être lancé par Ariane 5 par exemple et se positionner à $d = 240$ m du centre de gravité

de l'astéroïde. Ils seraient alors liés gravitationnellement. Le satellite pourrait alors exercer une force de poussée en évacuant des gaz et ainsi dévier l'astéroïde.

Questions

1. Sur le document 2, tracer la force d'attraction gravitationnelle du satellite sur l'astéroïde et de l'astéroïde sur le satellite sans soucis d'échelle. Tracer la force de poussée appliquée par les gaz sur le satellite.
2. Sur le document 3, en supposant que la direction du vecteur vitesse ne change pas, tracer, sans soucis d'échelle, les vecteurs vitesses de l'astéroïde sans la déviation et après la déviation.
3. Construire alors le vecteur variation de vitesse qu'il faut imposer à l'astéroïde pour modifier son orbite. En déduire dans quelle direction les astronomes doivent placer le satellite « tracteur ».
4. Donner l'expression de la norme de la force qu'applique le satellite sur Apophis.
5. Soit Δt le temps durant lequel il faut appliquer cette force pour obtenir la variation de vitesse voulue. En appliquant le principe fondamental de la dynamique sur Apophis, donner l'expression du temps Δt en fonction de la masse m du satellite, de la norme du vecteur variation de vitesse et de la distance d entre le satellite et l'astéroïde. Ce temps dépend-t-il de la masse de l'astéroïde ?
6. Calculer le temps nécessaire pour dévier Apophis dans les conditions décrites dans le document 4.
7. Donner l'expression de la force qu'applique Apophis sur un satellite à une distance d .
8. Sachant que le débit de carburant utilisé par la sonde est directement proportionnel à cette force, comment évolue ce débit si l'astéroïde est deux fois plus lourd ? Quelles sont alors les conséquences pour une mission de déviation d'un astéroïde ?

Correction



Pour pouvoir dévier l'astéroïde, le satellite doit être positionné dans la direction du vecteur variation du vecteur vitesse.

$$4. F_{s/A} = \frac{G M m}{d^2}$$

$$5. M \frac{\Delta v}{\Delta t} = F_{s/A} = \frac{G M m}{d^2} \text{ donc } \Delta t = \frac{\Delta v \times d^2}{G m} \text{ Ce temps est donc indépendant de la masse de l'astéroïde.}$$

$$6. \Delta t = \frac{\Delta v \times d^2}{G m} = \frac{2 \times 10^{-6} \times 240^2}{6,674 \times 10^{-11} \times 5 \times 10^3} = 3,45 \times 10^5 \text{ s} = 4 \text{ jours}$$

$$7. F_{A/s} = \frac{G M m}{d^2}$$

8. Si la masse de l'astéroïde double, alors la force qu'exerce Apophis sur le satellite double également. Pour se maintenir à 240 m, il lui faudra donc doubler le débit du carburant et donc consommer son carburant deux fois plus vite, ce qui peut inclure de ne pas terminer la déviation. Une autre solution serait d'emmener deux fois plus de carburant avec toutes les contraintes que cela génère.

Ce deuxième exercice est adapté pour des élèves de terminales, spécialité physique-chimie sur la troisième loi de Kepler

Déviation d'un astéroïde

L'astéroïde Apophis est un astéroïde qui a pendant quelques années préoccupé la communauté scientifique car il avait une probabilité de 2,7 % d'entrer en collision avec la Terre, risque écarté depuis.



(Crédit Vikidia/Fraf)

Cependant, il sert souvent de base à des modélisations pour comprendre comment un astéroïde pourrait être dévié s'il devait entrer en collision avec la Terre.

Document 1 Données sur l'astéroïde Apophis

Masse	4×10^{10} kg
Envergure	330 m
Vitesse moyenne	30,728 km/s
Demi grand axe	137,995 Gm

Document 2 Principe général de la déviation d'un astéroïde
Les scientifiques ont inventé plusieurs techniques pour permettre de dévier un astéroïde dont celles-ci :

- la méthode dite du tracteur gravitationnel qui consiste à modifier la vitesse de l'astéroïde en plaçant à son côté un satellite qui va l'attirer par gravitation ;
 - la méthode de l'impacteur cinétique qui consiste à envoyer un satellite taper un astéroïde à grande vitesse.
- Les astronomes pensent alors pouvoir modifier le demi grand axe de l'ellipse de l'orbite de l'astéroïde d'environ 2 000 km. Cette modification augmentera alors la valeur de la période orbitale de l'astéroïde autour du Soleil (troisième loi de Kepler) et engendrera « un retard » de l'astéroïde par rapport au moment de la collision. La Terre aura donc le temps de s'éloigner du point d'impact. Si cette opération est faite suffisamment en avance, « le retard » s'accumulera alors d'année en année, laissant plus de marge à la Terre pour filer.

Document 3 Troisième loi de Kepler

$$\frac{T^2}{a^3} = \frac{4\pi^2}{GM}$$

Avec T la période de révolution de la planète autour du Soleil, a le demi grand axe de l'ellipse, G la constante gravitationnelle, M la masse du Soleil.

Données masse du Soleil : $1,989 \times 10^{30}$ kg

$G = 6,674 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$

Vitesse de la Terre autour du Soleil : 29,78 km/s

Diamètre de la Terre : 12 742 km

Résolution de problème

Dans les conditions décrites dans les documents, combien d'années en amont de la collision faut-il procéder à la déviation de l'astéroïde pour que la Terre se soit éloignée de 10 diamètres terrestres du point de collision ?

Questions plus détaillées

1. Combien de temps faut-il retarder l'astéroïde pour que la Terre puisse s'éloigner de 10 diamètres terrestres ?
2. De combien la période orbitale de l'astéroïde est-elle allongée par an si on modifie la vitesse de l'astéroïde comme indiqué dans le document 2 ?
3. Combien d'années avant l'impact faut-il effectuer la déviation pour atteindre ce « retard » ?

Correction

$$v = \frac{d}{t} \text{ donc } t = \frac{d}{v} = \frac{10 \times 12\,742}{29,78} = 4278 \text{ s}$$

$$\frac{T^2}{a^3} = \frac{4\pi^2}{GM} \text{ donc } T = \sqrt{\frac{a^3 \times 4\pi^2}{GM}} \text{ donc}$$

$$T_{\text{avant déviation}} = \sqrt{\frac{(137,995 \times 10^9)^3 \times 4\pi^2}{6,67430 \times 10^{-11} \times 1,9891 \times 10^{30}}} = 2,79540 \times 10^7 \text{ s}$$

$$T_{\text{après déviation}} = \sqrt{\frac{(137,995 \times 10^9 + 2 \times 10^6)^3 \times 4\pi^2}{6,67430 \times 10^{-11} \times 1,9891 \times 10^{30}}} = 2,79546 \times 10^7 \text{ s}$$

$$T_{\text{après déviation}} - T_{\text{avant déviation}} = 600 \text{ secondes}$$

La période orbitale est donc modifiée d'environ 600 secondes.

$$4\,278/600 = 7,1 \text{ ans.}$$

Il faut donc que la déviation ait lieu 7,1 ans plus tôt pour que l'astéroïde arrive 4 278 secondes en retard et que la Terre se soit donc déplacée de 10 diamètres terrestres plus loin.

Un grand merci à Christophe Bonnal du CNES pour ses explications et relectures !

Quelques sources

https://selenianboondocks.com/wp-content/uploads/2015/05/IAA-PDC-15-04-11_Final.pdf

https://www.arts-et-metiers.asso.fr/manifestation_cr/827_compte_rendu.pdf

<https://www.franceculture.fr/emissions/la-methode-scientifique/la-methode-scientifique-emission-du-mardi-03-mars-2020>

<https://www.franceculture.fr/emissions/la-methode-scientifique/la-methode-scientifique-emission-du-mardi-03-mars-2020>

<https://lejournal.cnrs.fr/articles/comment-devier-un-asteroide-tueur>

<https://hal-insu.archives-ouvertes.fr/insu-01667223/document>

Construction de trajectoires d'astéroïdes

Ghislain Bernard, enseignant de sciences physiques, Draguignan.

Vous trouverez dans cet article de nombreuses idées d'activités autour de l'astéroïde Éros à partir des éphémérides de l'IMCCE. Vous pourrez en particulier tracer son orbite avec le logiciel Regressi ou vérifier les lois de Kepler.

Lors du stage de formation des enseignants inscrit au PAF de l'académie de Nice en 2020 nous avons eu une commande de notre corps d'inspection pour travailler sur le traitement de données numériques avec les élèves. J'ai donc eu l'idée d'utiliser Regressi pour tracer les trajectoires des comètes. Nous pouvons appliquer la même méthode pour tracer la trajectoire des astéroïdes. Nous choisissons ici l'astéroïde (433) Éros. Éros est intéressant à plus d'un titre avec des élèves.

- Lors de la dernière opposition périhélique l'IMCCE a développé un site très intéressant avec de nombreuses informations¹.
- Certes c'est un astéroïde avec une magnitude faible en ce moment et il est difficile de le photographier avec du matériel d'amateur. Mais sa trajectoire tout d'abord est assez elliptique pour raisonner avec les lois de Kepler ; un autre astéroïde intéressant serait (1862) Apollon ($e = 0,560$). C'est par contre une très belle cible avec le télescope scolaire robotisé IRIS de l'OHP². Éros passe à l'opposition en juin 2021, c'est l'occasion de le photographier. Mais cette opposition n'est pas des plus favorables car Éros n'est pas au périhélie... la dernière fois était en 1975... la prochaine en... 2056 ! (voir figure 1 page 26 article de D. Descout).
- L'IMCCE propose un travail de parallaxe avec Éros pour déterminer la valeur de l'unité astronomique³.
- De plus cet astéroïde n'est pas trop gros, et donc il n'est pas de forme sphéroïde. Il tourne sur lui-même et renvoie la lumière de façon différente selon son orientation. (236) Cléopâtre peut être utilisé aussi pour ce travail. Il est donc possible d'enregistrer une courbe de lumière (photométrie) pour étudier sa rotation. Cette courbe de lumière peut être obtenue avec AstroImageJ par exemple⁴.

- Il est possible d'utiliser une imprimante 3D pour imprimer une maquette de cet astéroïde. Vous trouverez le fichier nécessaire sur Thingiverse⁵.

Cet astéroïde a une trajectoire un peu plus elliptique que les plus gros astéroïdes. Cet exercice permettra donc aussi de travailler sur la deuxième loi de Kepler avec Regressi. Cette idée est partie de l'excellent article de Francis Berthomieu sur la trajectoire des comètes⁶. Cet article proposait des maquettes à imprimer. Le but ici est de manipuler Regressi pour construire les trajectoires et de fabriquer les fichiers avec vos élèves.

Ellipse et vitesse

L'astéroïde étudié a une trajectoire elliptique. La « longueur » de l'ellipse vaut $2a$ avec a le demi grand axe. La forme de l'ellipse est définie par l'excentricité ($0 < e < 1$). Si e vaut 1 l'orbite est parabolique. Si e vaut 0 l'orbite est circulaire. Si e est très proche de 0 alors l'orbite est quasi circulaire. Plus e se rapproche de 1, plus l'orbite a une forme elliptique « aplatie et allongée ». L'astéroïde est en orbite autour du Soleil. Celui-ci occupe un des foyers de l'ellipse. Le périhélie P (figure 1) correspond à la distance astéroïde-Soleil minimale et l'aphélie correspond à la distance astéroïde-Soleil maximale.

La vitesse de l'astéroïde le long de son orbite n'est pas constante. Elle est maximale au périhélie P et minimale à l'aphélie. De plus cette orbite est contenue dans un plan P1 (bleu) qui est incliné par rapport au plan de l'écliptique P2 (vert).

Les éléments orbitaux

Wikipédia nous renseigne sur les paramètres orbitaux d'une comète ou d'un astéroïde. La trajectoire de ces objets est repérée dans un repère écliptique centré sur le Soleil, la direction origine étant celle du point vernal γ (position du Soleil vu depuis la Terre à l'équinoxe de mars).

1 <https://eros2019.imcce.fr/index.html>

2 <http://iris.lam.fr/>

3 <https://eros2019.imcce.fr/formulaire.html>. Voir également l'article page 26.

4 <https://www.astro.louisville.edu/software/astroimagej>

5 <https://www.thingiverse.com/thing:3331456>

6 Cahiers Clairaut n° 141 (2013).

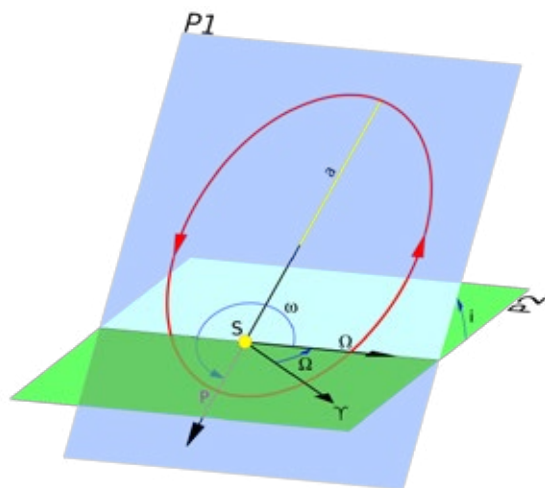


Fig.1. Éléments orbitaux d'une comète ou d'un astéroïde.

- L'intersection du plan de l'orbite et de l'écliptique est fixée par la longitude du nœud ascendant (Ω).
- Dans le plan de l'orbite P1, l'orientation de l'orbite est fixée par un paramètre, l'argument du périhélie ω .
- L'inclinaison du plan de l'orbite P1 sur l'écliptique P2 est noté i .

Dans le plan de l'orbite on repère la position de l'astéroïde avec deux coordonnées polaires : r , la distance au Soleil, et α , l'angle entre le nœud ascendant et l'astéroïde. On voit donc que le nœud ascendant correspond à l'axe des x .

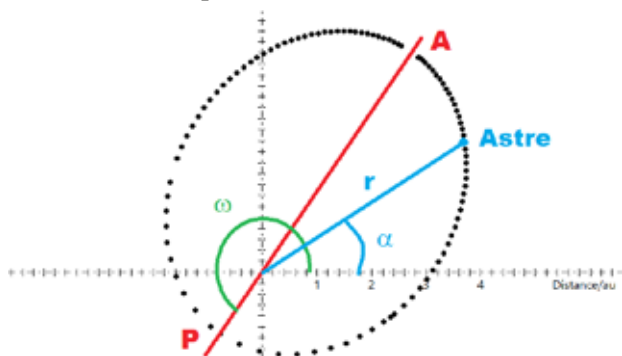


Fig.2. Exemple de trajectoire d'un astre (comète ou astéroïde).
On repère la position de l'astre avec ses coordonnées (r , α).

Tracé de l'orbite d'Éros

Le but de cette activité est d'utiliser les données numériques de l'IMCCE et de les traiter avec Regressi pour faire tracer l'orbite d'un astéroïde aux élèves (orbite rouge sur la figure 1). Ensuite ils tracent avec la même échelle la trajectoire de la Terre sur le plan de l'écliptique puis assemblent les deux plans en respectant l'angle i entre les deux.

Étape 1

La base de données JPL Small Body Browser donne tous les paramètres orbitaux dont ceux qui nous seront utiles ici :

Paramètre	Symb.	Appel. ds JPL	Valeur arrondie
Excentricité	e	e	0,223
Distance au périhélie	q	q	1,133 UA
Demi grand axe	a	a	1,458 UA
Argument du périhélie	ω	péri	178,9°
Longitude du nœud ascendant	Ω	node	304,3°
Inclinaison du plan de l'orbite	i	i	10,8°
Date de passage au périhélie	t_p	t_p	5/11/2020

Avant le tableau, il est possible de cliquer sur show orbit diagram pour visualiser une vue en 3D interactive du Système solaire avec l'astéroïde. On remarque sur le tableau ci-dessus que l'argument du périhélie est très proche de 180°, la ligne des nœuds est donc quasiment confondue avec le grand axe de l'ellipse qui passe par le périhélie et l'aphélie.

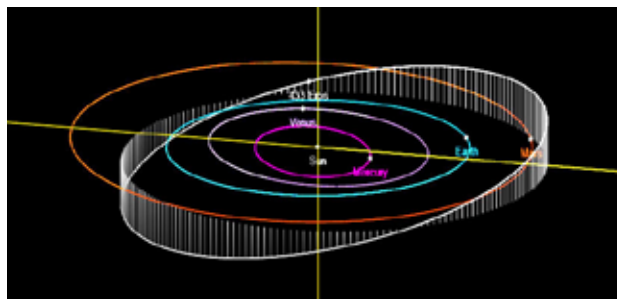


Fig.3. L'orbite d'Éros visualisée par le JPL Small-Body Database Browser.

Étape 2

Nous utilisons ensuite un serveur d'éphémérides Miriade⁷ sur le site de l'IMCCE pour obtenir les données numériques de position de l'astéroïde. Le paramètre important ici est la période qui est de 643 j et la date de passage au périhélie. Nous pouvons renseigner le formulaire pour avoir des points sur un peu moins d'une période à partir de la date de passage au périhélie (nous verrons pourquoi par la suite).

- Target : a:Éros
 - Epoch Number of date : 64 pour 64 points au total
 - Epoch Computation Dates : 10 days pour un point tous les 10 jours. Validate
 - Reference center : Heliocenter Validate
 - Reference plan : Ecliptic
 - Coordinates : spherical (pour commencer)
- Compute Ephemeris

⁷ Le nouveau site de l'IMCCE (<https://ssp.imcce.fr>) permet d'obtenir ces éphémérides à partir d'un questionnaire en français. Son utilisation est décrite dans le n° 168 des Cahiers Clairaut (2019) page 14.

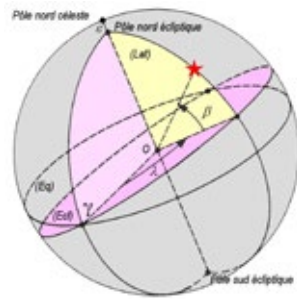
Les coordonnées éclipitiques

Elles repèrent la position de l'astéroïde (étoile rouge sur le schéma) par rapport au plan de l'écliptique et à la direction du point vernal γ .

Fig. 4.

λ : longitude éclipitique, c'est l'angle entre le plan orthogonal à l'écliptique passant par l'astéroïde et le Soleil, et la direction du point vernal γ , mesuré de 0 à 360°.

β : c'est la « hauteur » de l'astéroïde sur l'écliptique, de -90° à +90°.



Le formulaire renvoie un fichier texte en colonnes avec les dates et les coordonnées. Nous allons l'enregistrer au format VOTable (CTRL+S). Son nom est par défaut chez moi Proxy.php.xml.

Étape 3

Ouvrir Regressi puis ouvrir le fichier Votable (bien sélectionner en bas à droite le type VOTable IMCCE.xml. La première colonne Target est inutile, vous pouvez la supprimer ainsi que la colonne H qui est la magnitude.

Trier le tableau dans l'ordre des t croissants (cette étape est très importante pour la suite). Les jours sont croissants avec 10 jours entre chaque ligne.

Pour commencer le travail, nous allons analyser quelques courbes en représentation cartésienne de façon à faire réfléchir les élèves qui doivent avoir la trajectoire dans l'espace dans la tête et faire la correspondance avec le graphique analysé. Ce premier exercice permet de vérifier que les élèves comprennent bien la notion de périhélie et d'aphélie et quelles sont ces deux coordonnées éclipitiques. On en profite aussi pour leur demander la distance au périhélie.

Pour sélectionner les coordonnées : Graphe, Coordonnées. Ne conserver qu'une seule courbe.

On utilise Outils Réticule Libre pour faire les graphiques suivants.

- Distance = f(longitude). Déterminer les longitudes du périhélie et de l'aphélie.

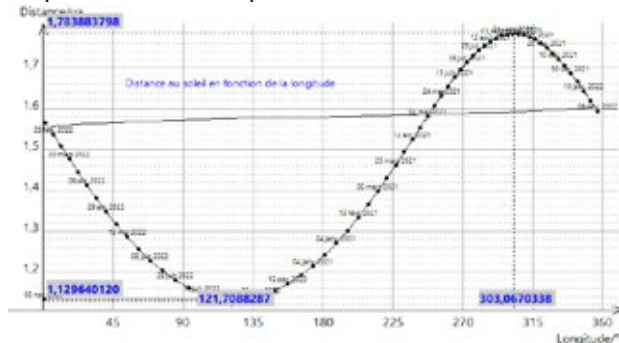


Fig.5. Distance au Soleil en fonction de la longitude. La longitude du périhélie est 122°, celle de l'aphélie 303°.

- Distance = f(latitude). Déterminer la latitude du périhélie et de l'aphélie.

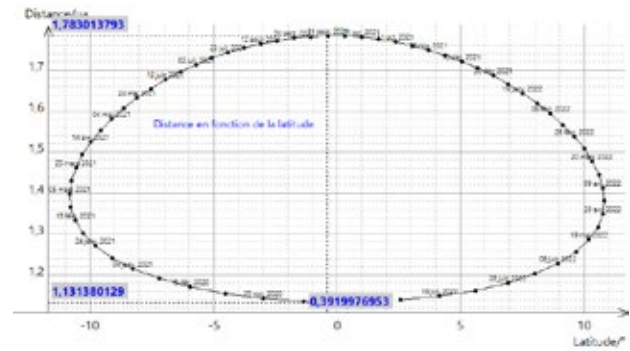


Fig.6. Distance au Soleil en fonction de la latitude.

Sur ce dernier graphique il est un peu plus difficile de déterminer les valeurs.

En analysant les deux graphiques, on peut bien sûr faire remarquer aux élèves que les différences de longitude de P et de A sont séparées de 180°. On remarque aussi que les valeurs de latitude de A et de P sont opposées (aux erreurs de mesure près) car ces deux points sont reliés par une ligne qui passe par le Soleil. On voit aussi qu'au maximum, la latitude de la comète est d'un peu moins de 11°... qui correspond à l'inclinaison $i = 10,8^\circ$ que nous donne le site du JPL (voir tableau page précédente).

Les distances du périhélie (q) et de l'aphélie nous permettent de voir la taille de l'orbite comparée aux dimensions du Système solaire et en particulier de l'orbite de la Terre. Ces valeurs sont à rapprocher de la visualisation 3D vue au-dessus (figure 3).

	Périhélie P	Aphélie A
Longitude (°)	122	303
Latitude (°)	0,4	-0,4
Distance (UA)	1,13	1,78

Maintenant nous allons pouvoir tracer l'orbite en coordonnées polaires⁸. Attention, on peut être tenté de représenter Distance = f(longitude), on obtient alors un graphique qui ne correspond à rien : en effet la longitude est un angle compté dans le plan de l'écliptique... pas dans le plan de l'orbite.

Dans le plan de l'orbite, les coordonnées polaires sont α (angle polaire entre le nœud ascendant et l'astéroïde) et r (distance Soleil astéroïde). Elles permettent de tracer une courbe en coordonnées polaires :

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

L'IMCCE nous fournit la distance r en UA. Mais

⁸ On trouvera une autre manière de tracer ce type de trajectoire dans le n° 168 des Cahiers Clairaut page 17 (Tracer la trajectoire d'une comète)

la longitude n'est pas l'angle α . Il nous faut donc calculer toutes les valeurs de l'angle α angle polaire en inversant la formule ci-dessus. Ce qui donne :

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

- Commencer par entrer e , q et ω en Paramètres expérimentaux dans Regressi avec tous les chiffres significatifs possibles donnés au-dessus par JPL.
- Attention pour créer la grandeur α dans Regressi il y a une petite astuce. Si on calcule directement la valeur de α ci-dessus, la fonction arccos calculera toujours la même valeur de $\alpha - \omega$.
- On pose $\beta = \alpha - \omega$ et comme la première date correspond au passage au périhélie, la distance est croissante ; pour éviter le problème ci-dessus on force un calcul de β négatif si on dépasse l'aphélie.
 $\beta = \text{if}(\text{Distance}[i] > \text{Distance}[i-1], \text{Acos}(((1+e)*q - \text{Distance})/(\text{Distance}*e)), -\text{Acos}(((1+e)*q - \text{Distance})/(\text{Distance}*e)))$
 $\alpha = \beta + \omega$

Il suffit ensuite de tracer le graphe polaire
distance = $f(\alpha)$

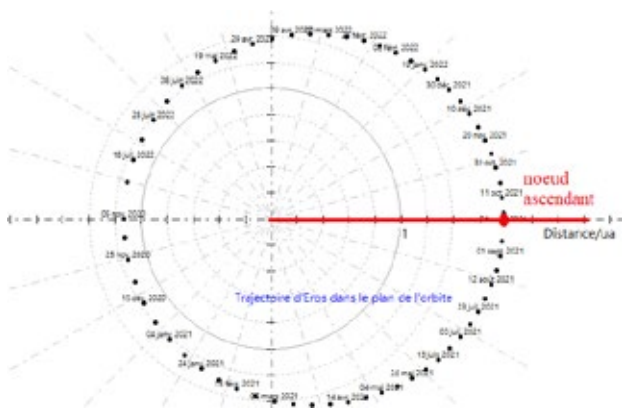


Fig. 7. La trajectoire d'Eros dans le plan de son orbite.

Pour ajouter les dates on ajoute une courbe avec la variable texte sous forme de date. Attention avant d'imprimer il faut trouver une échelle simple commune avec la Terre pour pouvoir assembler des trajectoires imprimées avec la même échelle. Par exemple ici on peut prendre $[-2ua ; +2ua]$ pour les abscisses et pour les ordonnées.

Pour plus de facilité, on ouvre une nouvelle fois Regressi dans une nouvelle « session » et on conserve ouvert le premier fichier.

Nous allons maintenant faire un fichier avec des dates similaires pour l'orbite de la Terre dans le plan de l'écliptique.

Nous commençons par retourner dans le formulaire de Miriade pour générer un fichier VOTable pour la Terre. On choisira 36 dates espacées de 10 jours... Pour traiter l'orbite de la Terre, c'est plus simple : l'orbite de la Terre est Distance = $f(\text{longitude})$ avec la même échelle $[-2ua ; +2ua]$ sur les deux axes.

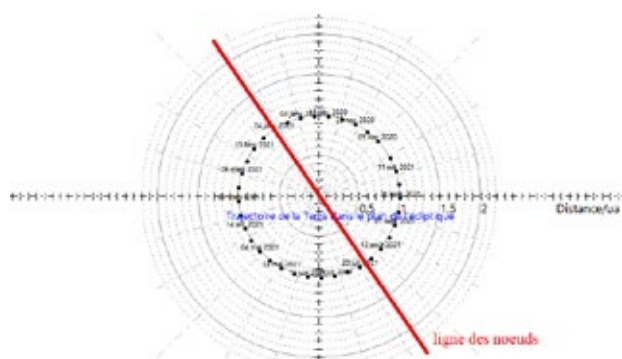


Fig. 8. La trajectoire de la Terre dans le plan de l'écliptique.

On imprime ensuite les deux trajectoires.

Pour assembler les deux plans correctement, on commence par tracer les deux droites rouges (la ligne des noeuds sur le plan de l'écliptique ainsi que le demi axe [Ox) qui est la direction du noeud ascendant sur le plan de l'orbite), puis on découpe les deux demi-droites rouges.

Enfin, on colle un triangle d'angle $i = 10,8^\circ$ entre les deux plans pour les tenir.



Fig. 9a. Orbite d'Eros.

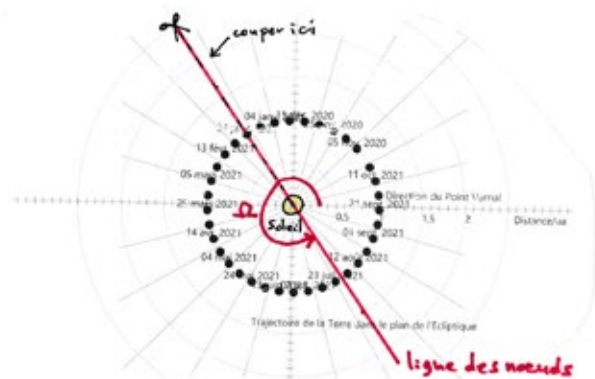


Fig. 9b. Orbite de la Terre.

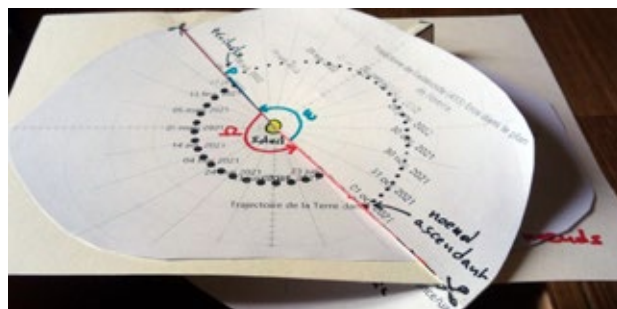


Fig. 9c. La maquette une fois montée.

La deuxième loi de Kepler à partir des données de l'IMCCE

Ce travail peut très bien prendre place dans le cadre du nouveau programme de l'enseignement de spécialité en terminale en physique.

Le calcul de l'aire balayée tous les 10 jours est un peu compliquée en coordonnées polaires au lycée. On peut proposer aux élèves d'utiliser le fichier des coordonnées rectangulaires x,y,z pour calculer les aires balayées par le rayon vecteur Soleil-astéroïde.

On retourne sur le serveur Miriade et, pour Éros, on génère un fichier en coordonnées rectangulaires.

Dans ce nouveau fichier .xml on a 7 variables à exploiter :

- 3 coordonnées X, Y, Z de positions ;
- 3 coordonnées Xp, Yp, Zp de vitesses calculées selon les 3 axes. (On peut aussi renommer ces variable vx, vy, vz pour une meilleure compréhension des élèves) ;
- la distance entre l'observateur (qui est ici posé sur le Soleil) et l'astéroïde, notée « observer distance ». Nous pouvons renommer cette colonne Distance.

On commence par calculer dans la fenêtre *Expression* la vitesse v de l'astéroïde dans le référentiel héliocentrique ainsi que la distance au Soleil.

$$v = \sqrt{Xp^2 + Yp^2 + Zp^2}$$

On trace alors la vitesse en fonction de la distance au Soleil (figure 10).

On voit bien sur le graphique que la vitesse est maximale au périhélie P et minimale à l'aphélie A.

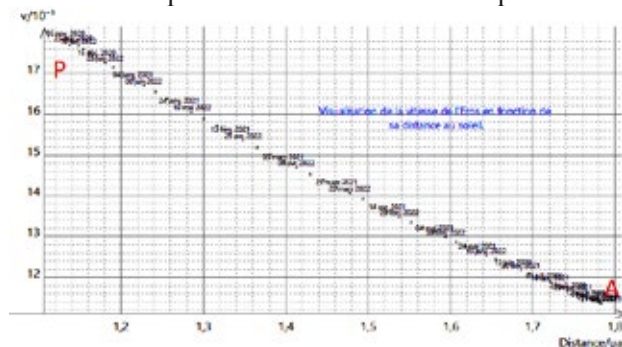


Fig.10. Vitesse d'Éros en fonction de sa distance au Soleil.

Nous allons maintenant faire calculer aux élèves l'aire de tous les secteurs balayés par le rayon vecteur Soleil-astéroïde. On utilise pour cela la formule qui donne la norme du produit vectoriel entre les deux vecteurs successifs.

$$\begin{aligned} dx &= X[i+1] - X[i] \\ dy &= Y[i+1] - Y[i] \\ dz &= Z[i+1] - Z[i] \\ \text{Aire10}[i] &= 1/2 * \sqrt{(Y*dz - Z*dy)^2 + (X*dz - Z*dx)^2 + (X*dy - Y*dx)^2} \end{aligned}$$

On trace ensuite Aire10 = f(t)

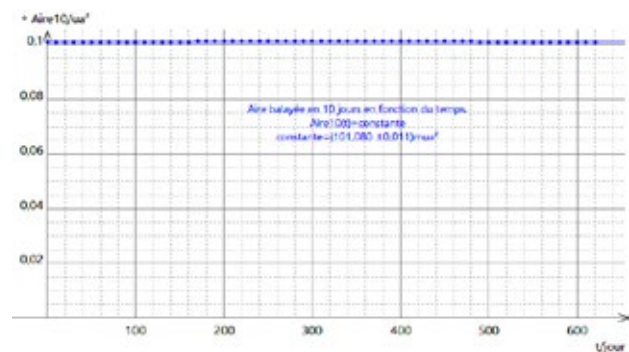


Fig.11. Aire balayée par le rayon vecteur en 10 jours en fonction du temps.

On modélise cette courbe par une constante et on va dans les options de modélisation pour afficher l'écart relatif données-modèle, ici inférieur à 0,1 %. La loi des aires est donc bien vérifiée. C'est une vérification de la deuxième loi de Kepler à partir des données de l'IMCCE.

La troisième loi de Kepler à partir des données sur les astéroïdes

Pour commencer il faut bâtir un tableau avec les données concernant une population d'astéroïdes. Dans cette étude on choisit (au hasard) plusieurs astéroïdes de la ceinture principale, une zone située entre l'orbite de Mars et l'orbite de Jupiter. Bien sûr il serait intéressant d'y ajouter d'autres astéroïdes voire d'utiliser un fichier contenant la totalité des astéroïdes... Ce doit être possible avec le Minor Planet Center... mais je n'ai pas exploré suffisamment.

Astéroïde	Vesta	Eunomie	Cérès	Psyché	Europe
T (années)	3,63	4,30	4,61	4,99	5,458
a (ua)	2,3619	2,646	2,768	2,921	3,100

Astéroïde	Euphrosyne	Lachésis	Sylvia	Hector
T (années)	5,591	5,497	6,521	11,93
a (ua)	3,150	3,115	3,490	5,222

On crée alors un nouveau fichier dans Regressi. On rappelle l'expression de la troisième loi de Kepler :

$$\frac{T^2}{a^3} = \text{constante}$$

Dans la fenêtre *expression* on pourra créer utilement les variables dans les unités du système international.

$$\begin{aligned} T2\text{sur}3 &= T^2/a^3 \\ Ts &= T * 365.25 * 24 * 3600_s \\ am &= a * 149597870700_m \\ \ln Ts &= \ln(Ts) \end{aligned}$$

On obtient le tableau suivant :

T	a	T2sura3	Ts	am	lnTs	lnam
(a)	(ua)		(s)	(m)		
1,00	1,00	1,0000	3,16E+07	1,50E+11	17,27	25,73
3,63	2,36	1,0001	1,15E+08	3,53E+11	18,56	26,59
4,30	2,65	0,9981	1,36E+08	3,96E+11	18,73	26,70
4,61	2,77	1,0021	1,45E+08	4,14E+11	18,80	26,75
4,99	2,92	0,9991	1,57E+08	4,37E+11	18,87	26,80
5,46	3,10	1,0000	1,72E+08	4,64E+11	18,96	26,86
5,50	3,12	0,9997	1,73E+08	4,66E+11	18,97	26,87
5,59	3,15	1,0001	1,76E+08	4,71E+11	18,99	26,88
6,52	3,49	1,0004	2,06E+08	5,22E+11	19,14	26,98
11,93	5,22	0,9995	3,76E+08	7,81E+11	19,75	27,38

La première ligne du tableau correspond à la planète Terre qui a été ajoutée dans le tableau.

Sur cette première ligne, le calcul T2sura3 permet de vérifier dans la troisième colonne que l'on a bien $T^2/a^3 = 1$ (ce qui vérifié facilement pour la Terre avec $T = 1$ an et $a = 1$ ua).

Les colonnes Ts et am permettent de calculer les valeurs de la période en s et celle du demi grand axe en m, les unités du système international.

Le but de la fin de ce travail est de vérifier et d'utiliser la troisième loi de Kepler revue par Newton en utilisant la loi de la gravitation universelle :

$$\frac{T^2}{a^3} = \frac{4\pi^2}{G \cdot M_s}$$

avec G la constante de la gravitation universelle admise actuellement $G = 6,674 \cdot 10^{-11}$ SI et M_s la masse du Soleil en kg.

Nous nous proposons ici de vérifier cette loi et de « peser » le Soleil. On rappelle au passage que peser le Soleil n'a été possible qu'après l'expérience de la balance de torsion d'Henry Cavendish en 1798 qui a permis de calculer la valeur de G.

Henry Cavendish avait trouvé $G = 6,754 \cdot 10^{-11}$ SI, ce qui est très proche de la valeur admise actuellement.

Pour plus de facilité graphique nous prenons le logarithme népérien de l'équation ci-dessus. On obtient facilement

$$\ln(T) = \frac{3}{2} \ln(a) + \frac{1}{2} \ln\left(\frac{4\pi^2}{G \cdot M_s}\right)$$

On peut donc tracer lnTs en fonction de ln am soit le logarithme de T en fonction du logarithme de a.

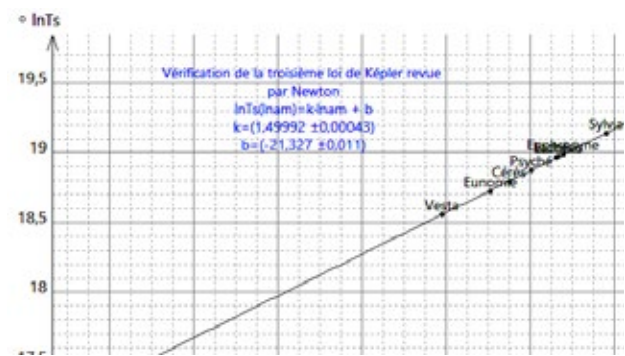


Fig.12. Vérification de la 3^e loi de Kepler.

On voit bien sûr que le modèle affine convient bien et que cette troisième loi est bien vérifiée. En effet le coefficient directeur de cette droite est bien $k = 1,500 = 3/2$.

Nous pouvons maintenant utiliser l'ordonnée à l'origine pour déterminer la masse du Soleil.

$$b = -21,327 = \frac{1}{2} \ln\left(\frac{4\pi^2}{G \cdot M_s}\right)$$

$$\frac{4\pi^2}{G \cdot M_s} = \exp(-2 * 21,327)$$

$$\text{soit } M_s = \frac{4\pi^2}{G \exp(-2 * 21,327)} = 1,98 \cdot 10^{30} \text{ kg}$$

ce qui est une très bonne valeur de la masse du Soleil.

Cette activité nous aura permis à partir d'une base de données d'utiliser le logiciel Regressi pour tracer une trajectoire dans le plan de l'orbite et de vérifier les deuxième et troisième lois de Kepler.

Liens

Wikipédia pour les informations globales sur Éros :

[https://fr.wikipedia.org/wiki/\(433\)_%C3%A8ros](https://fr.wikipedia.org/wiki/(433)_%C3%A8ros)

Jet Propulsion Laboratory (Nasa) pour les paramètres orbitaux en détail :

<https://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb.cgi>

Miriade : le serveur d'éphémérides de l'IMCCE :

<http://vo.imcce.fr/webservices/miriade/?forms>

SSP (Système solaire Portail) de l'IMCCE :

<https://ssp.imcce.fr>

Coordonnées écliptiques sur Wikipédia :

https://fr.wikipedia.org/wiki/Syst%C3%A8me_de_coordonn%C3%A9es_%C3%A9cliptiques

Paramètres orbitaux sur Wikipédia :

https://fr.wikipedia.org/wiki/Orbite#Param%C3%A8tres_orbitaux

Les plus grands astéroïdes de la ceinture principale :

https://fr.wikipedia.org/wiki/Liste_des_plus_grands_ast%C3%A9ro%C3%AFdes_de_la_ceinture_principale

Expérience de Cavendish : https://fr.wikipedia.org/wiki/Exp%C3%A9rience_de_Cavendish

Astéroïdes, astrométrie et science participative

Daniel Descout, Deuil-la-Barre.

Une campagne de science participative (EROS 2019) a été organisée par l'IMCCE et pilotée par l'astronome Pascal Descamps. Cette opération avait pour but de mesurer la parallaxe d'Éros puis de calculer la parallaxe du Soleil et d'en déduire une valeur voisine de l'unité astronomique.

L'astéroïde (433) Éros

L'astéroïde (433) Éros a été découvert en 1898, conjointement par Carl Gustav Witt et Auguste Charlois. Il appartient au groupe des géocroiseurs, dont l'orbite est proche de celle de la Terre. Il possède une orbite quasi elliptique, décrite en 643,2 jours, et sa distance au Soleil varie du périhélie à 1,133 unité astronomique (ua) à l'aphélie à 1,783 ua (excentricité de 0,223). La figure 1 représente la projection de l'orbite d'Éros (en vert) sur le plan de l'écliptique, comparée à l'orbite de la Terre (en bleu). L'inclinaison de l'orbite d'Éros sur ce plan est environ $10,8^\circ$. Les trois autres orbites (traits fins en gris pâle) sont celles des planètes telluriques Mercure, Vénus et Mars. L'astéroïde et la Terre orbitent dans le même sens.

Les caractéristiques orbitales d'Éros l'amènent à se rapprocher de la Terre périodiquement, lors des oppositions qui se succèdent en moyenne tous les 845 jours environ (période synodique de l'astéroïde)¹. Les rapprochements optimaux se produisent quand, lors d'une opposition, Éros est à son périhélie et la Terre à son aphélie. Ces configurations se succèdent tous les 81 ans (Éros boucle 46 orbites pendant cette période). Le dernier rapprochement optimal a eu lieu en 1975, le prochain aura lieu en 2056. Si, de plus, le périhélie coïncide avec un nœud de l'orbite (passage de l'astéroïde dans le plan de l'écliptique), la distance d'Éros à la Terre est un minimum absolu et vaut 0,116 ua (16,9 millions de km).

Au cours de la période de 81 ans, la distance d'Éros à la Terre passe néanmoins par de nombreux minima relatifs, aux alentours des oppositions. Une configuration favorable (rapprochement serré) est survenue le 15/01/2019, avec un minimum de distance Terre - Éros de 0,21 ua, après l'opposition du 07/12/2018. Une campagne de science participative (EROS2019) a été organisée à cette

occasion par l'IMCCE², pilotée par l'astronome Pascal Descamps de l'observatoire de Paris. Le but de la campagne était la mesure de la parallaxe de l'astéroïde. Le résultat de cette mesure permet de calculer la parallaxe du Soleil, et d'en déduire la distance Terre - Soleil. Cette distance calculée doit être voisine de l'unité astronomique (ua), dont la valeur de référence (depuis 2012) est : $1 \text{ ua} = 149\,597\,870\,700 \text{ m}$.

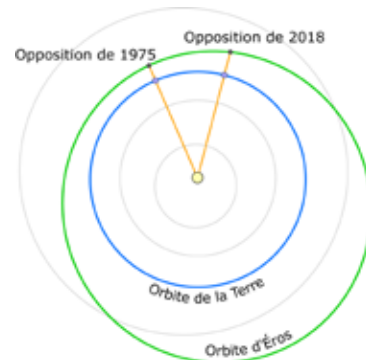


Fig.1. Orbites de la Terre et d'Éros. L'opposition périhélique de 1975 était un peu plus favorable que celle de 2018.

La parallaxe

Dans la vie courante, la vision stéréoscopique permet la perception du relief grâce à la parallaxe associée à la vision binoculaire. Sur le fond du paysage (très éloigné), la perception d'un point lumineux proche P est différente par l'œil droit et par l'œil gauche (figure 2).



Fig.2. Vision stéréoscopique.

L'angle que font entre eux les axes de visée du même point cible par les deux yeux est l'angle de parallaxe. Les centres des deux pupilles définissent la base d'un triangle dont le troisième sommet est le point visé. Lorsque l'éloignement du point visé P

¹ Éros est en opposition lorsque Soleil Terre et Éros sont alignés (figure 1).

² Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Éphémérides.

est inconnu, la connaissance de l'angle de parallaxe et de la longueur de la base suffit pour calculer cet éloignement (méthode de triangulation).

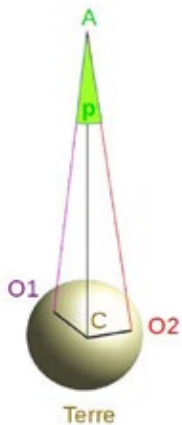


Fig.3. Parallaxe d'un astre A.

En astronomie, cette méthode est utilisée pour déterminer la distance inconnue des objets célestes inaccessibles, comme la Lune et les planètes (fig 3).

Si deux observateurs O_1 et O_2 se placent sur la Terre en deux sites quelconques éloignés l'un de l'autre de plusieurs milliers de kilomètres, et s'ils visent simultanément le même astre A, sur le fond des étoiles dites « fixes » (hors schéma), le triangle de parallaxe est AO_1O_2 . La parallaxe p est l'angle du triangle au sommet A.

La base b est la longueur du côté O_1O_2 du triangle. Connaissant les coordonnées géographiques (latitude et longitude) des points O_1 et O_2 , R (le rayon terrestre), et p , on peut calculer b , puis avec p et un autre angle (par exemple $\widehat{CO_1A}$), calculer la distance inconnue CA .

L'exemple de la mesure de la distance de la Lune est donné dans l'encadré page suivante.

Parallaxe de hauteur et parallaxe horizontale

Le couple d'observateurs (O_1 et O_2) peut être remplacé par un nouveau couple, constitué d'un observateur fictif C placé au centre de la Terre et d'un observateur P à la surface de la Terre (figure 4).

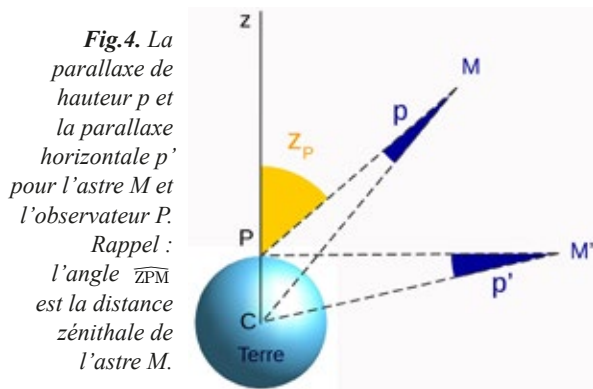


Fig.4. La parallaxe de hauteur p et la parallaxe horizontale p' pour l'astre M et l'observateur P. Rappel : l'angle $\widehat{zPM}$ est la distance zénithale de l'astre M.

Par définition, on appelle parallaxe de hauteur de l'astre M l'angle $\widehat{CMP}$ (noté p). Si l'astre M' est à l'horizon pour l'observateur P (et en l'absence de réfraction atmosphérique), la parallaxe de hauteur devient l'angle $\widehat{CM'P}$ et est nommée parallaxe horizontale de M' . Pour une cible à une distance CM donnée, la parallaxe horizontale est la plus grande des parallaxes de hauteur. Si l'astre M visé est au zénith du lieu P, sa parallaxe de hauteur est nulle.

Dans le cas de la Lune, on trouve :

$$p' = \widehat{CM'P} \approx \sin p' = CP/CM' = R/D.$$

Numériquement :

$$p' = 0,01654 \text{ rad} = 0,947^\circ = 56,8'$$

(avec les données des mesures de Lalande et La Caille de 1751 – voir encadré page suivante).

La parallaxe horizontale d'un astre peut être définie comme l'angle sous lequel un hypothétique observateur situé sur l'astre verrait le rayon CP de la Terre.

Mesure historique de la parallaxe martienne

Avec la méthode de triangulation, deux astronomes du XVII^e siècle, Jean Richer et Jean-Dominique Cassini, ont déterminé la parallaxe p de la planète Mars (astre en A sur la figure 3) lors de l'opposition de septembre 1672. Les sommets de la base du triangle de parallaxe étaient Paris et Cayenne, très éloignés en latitude et en longitude. Les astronomes en ont déduit la parallaxe horizontale de la planète Mars : $p' = 24 \pm 9$ secondes d'arc. En utilisant la troisième loi de Kepler, ils ont calculé ensuite la première évaluation historique satisfaisante de la distance de la Terre au Soleil : 140 ± 30 millions de km (une présentation détaillée de cette mesure se trouve dans un article de Béatrice Sandré édité dans le n° 137 des Cahier Clairaut³).

Pour la planète Mars, l'angle de parallaxe horizontale ($p = 0,000116$ rad) est beaucoup plus faible que pour la Lune, parce que la distance Terre-Mars valait (à l'opposition de 1672) plus de cent fois la distance Terre-Lune.

Pour le Soleil, la parallaxe horizontale de référence vaut 8,794 secondes d'arc.

Pour la parallaxe d'Éros, l'angle à mesurer est du même ordre de grandeur que l'angle de parallaxe de Mars.

Principe de la mesure de la parallaxe de l'astéroïde Éros

La campagne de science participative de 2019 reposait sur des protocoles développés en ligne par l'IMCCE⁴. La visée de l'astéroïde s'est faite quelques semaines après son opposition. Lors de son rapprochement serré, en janvier 2019, sa distance CM à la Terre était alors proche de 0,21 ua, correspondant à une parallaxe horizontale proche de 42 secondes d'arc.

3 Disponible sur le site du Clea (clea-astro.eu) à l'onglet archives des Cahiers Clairaut, année 2012.

4 <https://eros2019.imcce.fr/eros.html> et https://eros2019.imcce.fr/docs/protocole_observation_eros2019.pdf

Mesure historique de la parallaxe et de la distance lunaires

Au XVIII^e siècle, la distance Terre - Lune a été mesurée avec une assez bonne précision par la méthode de la triangulation par les astronomes J. J. Lefrançois de Lalande et Nicolas Louis de la Caille (1751).

Ils ont choisi deux sites aux longitudes voisines (Berlin : 13° 25' E et Le Cap : 18° 28' E) et aux latitudes λ très différentes (respectivement

$\lambda_B = 52^\circ 31' \text{ N}$ et $\lambda_C = 34^\circ 22' \text{ S}$).

En supposant que la différence des longitudes est négligeable, un schéma simplifié de la triangulation peut être établi, dans le plan méridien commun des deux sites, supposés localisés à la même longitude (figure 5) ; sur cette figure, les proportions ne sont pas respectées, et l'angle $\widehat{BLC}$ est exagérément grand).

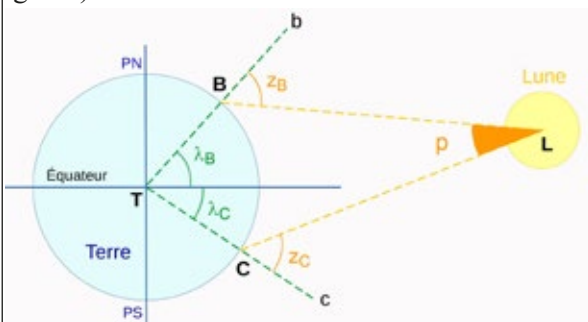


Fig.5. Visées de la Lune depuis Berlin (B) et Le Cap (C). La figure est faite dans le plan du méridien.

Les angles mesurés sont les hauteurs zénithales locales de la Lune, vue de Berlin ($z_B = \widehat{bBL}$) et du Cap ($z_C = \widehat{cCL}$). Les visées sont faites lorsque le centre de la Lune L passe au méridien commun de B et C. Le triangle de parallaxe est BCL. Son plan contient le centre de la Terre T. Sa base est BC. La parallaxe est l'angle $\widehat{BLC}$, noté p.

La parallaxe p étant un angle très petit (pour la Lune, de l'ordre du degré), les distances BL, CL et TL sont du même ordre de grandeur, et sont très supérieures au rayon terrestre (TB ou TC). Pour simplifier, la Terre est supposée sphérique, de rayon $TB = TC = R = 6\,378 \text{ km}$ (rayon équatorial).

La parallaxe p s'exprime simplement en fonction des quatre autres angles nommés sur la figure 5. Pour établir cette relation, on considère le quadrilatère TBLC comme l'assemblage de deux triangles ayant en commun le côté TL (TBL et TCL, figure 6). On nomme p_1 et p_2 les angles $\widehat{TLB}$ et $\widehat{TLC}$:

$$p = p_1 + p_2.$$

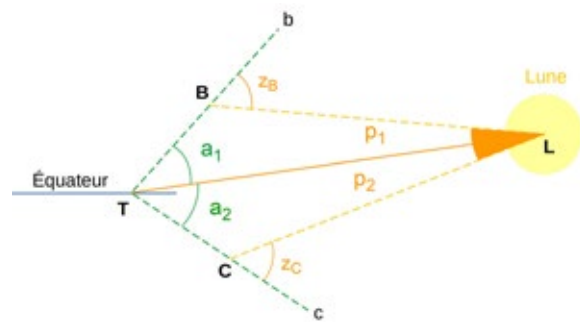


Fig.6. Calcul de la parallaxe p.

On nomme a_1 et a_2 les angles $\widehat{LTB}$ et $\widehat{LTC}$.

Dans le triangle TBL : $z_B = a_1 + p_1$;

dans le triangle TCL : $z_C = a_2 + p_2$;

donc : $p = (z_B + z_C) - (a_1 + a_2)$.

Finalement : $p = (z_B + z_C) - (\lambda_B + \lambda_C)$.

Les mesures de z_B et z_C sont données dans le document du CNES cité en note⁵

$z_B = 53^\circ 31'$ et $z_C = 34^\circ 40'$.

Le calcul donne la parallaxe lunaire :

$p = 1^\circ 18'$, ou $p = 0,0227 \text{ rad}$.

Pour faire le calcul de la distance Terre-Lune ($D = TL$), on applique la loi des sinus dans les triangles TLB et TLC.

Dans le triangle TLB :

$$\frac{\sin p_1}{R} = \frac{\sin \widehat{B}}{D} \text{ ou } \frac{\sin p_1}{R} = \frac{\sin z_B}{D}$$

Dans le triangle TLC :

$$\frac{\sin p_2}{R} = \frac{\sin \widehat{C}}{D} \text{ ou } \frac{\sin p_2}{R} = \frac{\sin z_C}{D}$$

Approximation : les angles p_1 et p_2 sont petits par rapport à un radian (environ 0,01 rad). On fait une erreur très faible en confondant le sinus d'un petit angle avec sa valeur en radian :

$\sin p_1 \approx p_1$ (en rad) et $\sin p_2 \approx p_2$ (en rad).

En sommant les deux relations des sinus, on trouve :

$$p = p_1 + p_2 \approx \sin p_1 + \sin p_2 = \frac{R(\sin z_B + \sin z_C)}{D}$$

La formule qui permet de calculer D en fonction de la parallaxe est :

$$D \approx \frac{R(\sin z_B + \sin z_C)}{p} \text{ avec } p \text{ en radian}$$

Numériquement, $\sin z_B + \sin z_C = 1,3728$

$D/R \approx 60,47$; $D \approx 3,857 \times 10^5 \text{ km}$

5 <http://www.cnes-multimedia.fr/EDUTHEQUE/Universite2014/AC3.pdf> (page 5/21).

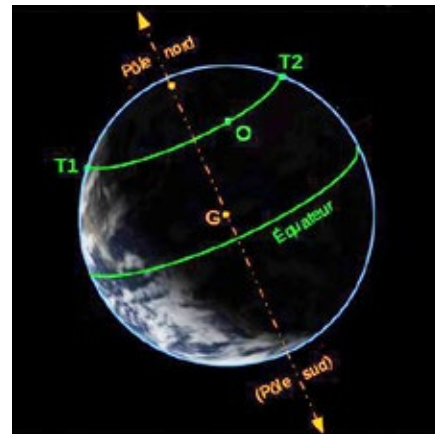
Voir Éros de près et imaginer la Terre vue depuis Éros

A black and white photograph of the asteroid 253 Mathilde. The asteroid is irregularly shaped and covered in numerous craters of various sizes. It is set against a black background, with a bright light source from the upper left creating a strong highlight on its left side and casting the right side into deep shadow.

crédit NASA/JPL/JHUAPL

Vu d'Éros, un observateur terrestre O parcourt un cercle parallèle à l'équateur (en vert). Il mesure les coordonnées topocentriques d'Éros (relatives à son site). L'angle sous lequel la sonde NEAR voit le segment GO est la parallaxe de hauteur en O de l'astéroïde (voir figure 4). Quand O est en T₁ ou

T₂, l'observateur terrestre voit Éros à l'horizon, et la parallaxe qu'il mesure est maximale (parallaxe horizontale d'Éros).



Quand O est en T_1 , pour lui, Éros se lève ; quand O est en T_2 , Éros se couche. Quand l'observateur O est à mi-distance de T_1 et T_2 , Éros est dans le plan méridien de O (il s'agit du plan perpendiculaire à la figure 8 passant par Éros et les pôles terrestres), et la longueur du segment GO vu d'Éros est minimale. La parallaxe de hauteur d'Éros est minimale quand Éros est dans le plan méridien local de O. Dans cette configuration, les mesures de la parallaxe de hauteur d'Éros sont (a priori) les moins précises.

Les mesures

Le site d'observation

A large, white and black telescope is mounted on a silver tripod. The telescope is angled upwards towards the sky. In the foreground, a small, dark-colored dog with a red collar is sitting on the grass. The background shows a sunset or sunrise over a field with some trees and a distant building.

La mission de l'observateur photographe est la détermination des coordonnées topocentriques de l'astéroïde Éros.

Champ céleste couvert par le capteur

CC n° 172 hiver 2020-2021

$D = 100$ mm et de focale $f = 555$ mm. La portion de ciel photographiée est un rectangle de côtés $1,610^\circ$ par $2,422^\circ$. Un extrait de cliché de forme carrée de 1 250 pixels de côté couvre une portion de ciel d'environ $30'$ par $30'$ (un cadre pour la pleine Lune). La portion de ciel vue par un pixel du capteur est un carré de côté $e = 1,45''$.

Identification de l'astéroïde sur les images

L'observateur photographie prend plusieurs clichés de la région du ciel supposée contenir la cible. Comme l'image de celle-ci ne se distingue pas de celle d'une étoile (tache blanche presque ponctuelle), l'identification du point image d'Éros se fait grâce à son déplacement par rapport aux étoiles, perceptible en comparant ou en empilant plusieurs clichés (figure 10). Le logiciel d'empilement des clichés est DeepSkyStacker (version 4.1.1), un logiciel libre⁷.



Fig.10. Superposition de 4 images montrant le déplacement d'Éros par rapport aux étoiles.

Calcul de la vitesse apparente d'Éros par rapport aux étoiles

La série de clichés la plus intéressante (datée du 24/02) est la série numérotée de 7 201 à 7 207, prise de 21 h 43 min 42 s à 22 h 13 min 42 s, à intervalles de 5 minutes, avec les paramètres suivants :

sensibilité $s = 2\,000$ ISO ; temps de pose $t = 15$ s ; ouverture $f/D = 5,55$.

Par exemple, l'empilement des clichés 7 201, 7 203, 7 205 et 7 207 fait apparaître un pointillé de 4 images alignées (figure 10). Comme ces prises de vues sont faites de 10 en 10 minutes, les intervalles entre images sont égaux. La distance focale de l'instrument étant connue, la taille des pixels connue aussi (carrés de côté $3,90\ \mu\text{m}$), la mesure de la distance entre les centres des taches extrêmes (7 201 en haut à droite et 7 207 en bas à gauche) donne la vitesse apparente de l'astéroïde sur le fond des étoiles fixes :

$$V_{ap} = 2,12 \text{ minutes d'arc par heure.}$$

⁷ <http://deepskystacker.free.fr/french/index.html>

Localisation de l'astéroïde Éros sur une carte du ciel

Un extrait au format carré (de 1 250 pixels) de l'empilement de 4 clichés est soumis au logiciel libre Astrometry.net⁸.



Fig.11. Localisation d'Éros avec Astrometry.net

Le logiciel réalise une calibration astrométrique de l'image, c'est-à-dire qu'« il détermine les coordonnées astrométriques J2000 du centre du champ, l'échelle sur le ciel du pixel ainsi que l'orientation des images (position du nord et de l'est) » (citation du protocole 2019 d'observation d'Éros de l'IMCCE, page 7, §4).

Le lien « WorldWideTelescope » donne accès à la carte du ciel interactive de l'AAS (The American Astronomical Society), sur laquelle est incrustée l'image calibrée.

Le logiciel fournit aussi une nouvelle image téléchargeable, dans un fichier nommé « new_image.FITS », avec un en-tête qui contient les paramètres de la calibration astrométrique. Grâce à ce fichier, les mesures astrométriques sont réalisables en utilisant un logiciel professionnel comme Aladin, développé par des astronomes de l'Université de Strasbourg (CNRS).

Astrométrie pratique avec le logiciel Aladin

Ce logiciel utilise des applets Java. Il faut donc éventuellement d'abord télécharger Java. La puissance de traitement de ce logiciel et le nombre élevé de ses fonctions oblige à un temps d'apprentissage notable. Néanmoins, grâce au pilote de l'IMCCE, la tâche est grandement facilitée. Les fonctionnalités du logiciel Aladin sont sur le site <https://projet-plume.org/fr/fiche/aladin>.

Le fichier « new_image.FITS », introduit dans l'environnement Aladin, permet d'y afficher le quadruplet d'images de l'astéroïde. La position

⁸ <http://nova.astrometry.net/upload>

de chaque image du quadruplet est analysée par la méthode du photocentre (figure 12). Cet outil graphique définit une zone circulaire de sélection (teinte rose, rayon réglable) que l'on amène sur l'image à analyser, de manière à envelopper le maximum de pixels blancs. Le bandeau inférieur (bleu) de l'écran affiche alors les coordonnées du centre du cercle, qui sont les coordonnées topocentriques d'Éros.

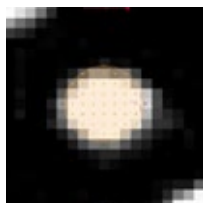


Fig.12. Repérage du photocentre sur le cliché 7 203 pris à 21 h 53 min 42 s.
AD = 06 h 16 min 32,61 s
et DEC = + 08° 25' 34,8".
Le cercle enveloppe de l'image d'Éros
a un diamètre de 7,6 pixels (11,0"
compte tenu de l'échantillonnage).

Les coordonnées topocentriques des 4 taches images analysées avec Aladin (7 201, 7 203, 7 205 et 7 207) sont dans le tableau ci-dessous :

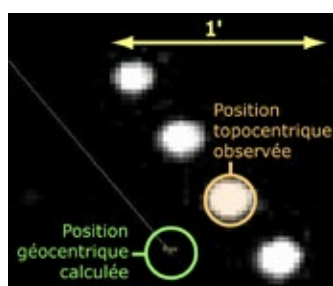
images	heure UTC (24/02/19)	ascension droite (AD)	déclinaison (DEC)
7201	21 h 43 m 42 s	06 h 16 m 31,44 s	08° 25' 47,7"
7203	21 h 53 m 42 s	06 h 16 m 32,61 s	08° 25' 34,8"
7205	22 h 03 m 42 s	06 h 16 m 33,73 s	08° 25' 22,3"
7207	22 h 13 m 42 s	06 h 16 m 34,85 s	08° 25' 09,5"

L'IMCCE a développé un outil nommé Skybot qui permet ensuite de calculer les coordonnées géocentriques d'Éros à l'instant du cliché soumis à calibration. La page écran d'Aladin (extrait en figure 13) montre la position d'Éros telle que vue du centre de la Terre pour l'image 7 203 (rose), à côté du quadruplet d'images.

La parallaxe de hauteur de l'astéroïde est ainsi visualisée à l'écran de l'ordinateur pour l'image 7203. On constate que l'angle à mesurer est du même ordre de grandeur que le diamètre angulaire de la tache image de la cible !

La parallaxe en AD est 0,805 s, soit 12,08" et la parallaxe en DEC est 18,50". On en déduit (théorème de Pythagore) la parallaxe de hauteur d'Éros : 22,0".

Fig. 13.
Positions d'Éros
photographiées
(taches) et
calculée depuis le
centre de la Terre
(cercle vert)..



Calcul des parallaxes horizontales avec le calculateur de l'IMCCE

Le passage de la mesure de la parallaxe de hauteur à la parallaxe horizontale se fait avec le calculateur en ligne de l'IMCCE (<https://Eros2019.imcce.fr/formulaire.html>).

Il faut fournir la date et l'heure du cliché (UTC) puis les coordonnées géographiques du site (longitude et latitude). Ensuite, pour chaque cliché, il faut entrer les coordonnées d'Éros observées (AD et DEC), en conservant tous les chiffres significatifs des données recueillies avec Aladin.

La commande « Calculer » permet d'obtenir les réponses. Pour l'image 7 203, le calculateur trouve 29,358" pour la parallaxe horizontale d'Éros à partir de la parallaxe de hauteur en AD, et 30,062" à partir de la parallaxe de hauteur en DEC (la précision à 5 chiffres significatifs paraît illusoire...).

Calcul de la parallaxe de hauteur du Soleil, de la distance Terre-Soleil, et conclusion

Le calculateur de l'IMCCE fournit aussi les valeurs de la parallaxe de hauteur du Soleil à partir de celles de l'astéroïde Éros (8,266" et 8,464"). La valeur conventionnelle de cette parallaxe du Soleil est rappelée : 8,794".

En recommençant les prises de vues le 25 février (4 clichés) et le 26 février (6 clichés), il a été possible d'améliorer la précision des mesures.

La moyenne des 28 valeurs de la parallaxe horizontale du Soleil est $p_s = 8,69''$ (erreur relative de - 0,012). L'écart-type des 20 valeurs des 25 - 26 février est $s = 0,33''$.

De la parallaxe horizontale du Soleil (de son expression en radian), on déduit la distance Terre-Soleil d_{TS} en utilisant la valeur $R = 6378$ km pour le rayon équatorial terrestre : $d_{TS} = R / p_s$. La valeur moyenne $p_s = 8,69''$ donne :

$$d_{TS} = 151,4 \text{ millions de km.}$$

La valeur de référence pour le 25/02/2019 est $d_{TS} = 148,1$ millions de km (d'après Stellarium). L'erreur relative sur cette distance est 0,022.

L'unité astronomique (ua) est, à l'origine, la valeur moyenne annuelle de la distance d_{TS} ⁹. Cette distance varie au cours de l'année entre $1 - e$ et $1 + e$ (en ua), avec e l'excentricité de l'orbite terrestre ($e = 0,0167$). On peut admettre que l'activité de science participative relatée ici conduit à une bonne évaluation de l'unité astronomique.

Mes remerciements vont à l'astronome Pascal Descamps (OBSPM), qui m'a encouragé à photographier l'astéroïde Éros, et à participer à la campagne de mesures, malgré les capacités limitées de mon matériel.

⁹ Depuis 2012, la nouvelle définition, conventionnelle, de l'unité astronomique est $1 \text{ ua} = 149\,597\,870\,700 \text{ m}$, exactement.

La mission はやぶさ2 (Hayabusa 2)

projet interdisciplinaire japonais et physique-chimie

Alain Ortais, enseignant de japonais et **Thomas Appéré**, enseignant de physique-chimie et docteur en planétologie, lycée St Paul Vannes.

Il existe dans l'enseignement secondaire de nombreux projets interdisciplinaires mais il n'est pas courant d'en trouver un qui allie l'apprentissage du japonais et l'enseignement de physique-chimie. La mission japonaise Hayabusa 2, qui consiste à venir prélever un échantillon de régolithe à la surface de l'astéroïde Ryugu, constitue un cadre qui s'y prête.

La mission japonaise Hayabusa 2 (はやぶさ2) a été lancée en décembre 2014 pour rejoindre l'astéroïde Ryugu (リュウグウ ou 竜宮) en juin 2018. Elle y a mené une campagne d'observations et d'exploration ambitieuse et inédite : largage de deux robots puis de l'atterrisseur franco-allemand MASCOT et prélèvement à deux reprises d'échantillons de régolithe. La sonde est actuellement sur le chemin du retour pour ramener ses précieux échantillons sur Terre le 6 décembre 2020.



La sonde Hayabusa 2, à quelques mètres de l'astéroïde Ryugu, projette son ombre à la surface (crédit : JAXA).

Cet événement est une opportunité pour parler des défis technologiques de l'exploration spatiale au lycée. Par ailleurs, nos élèves ont la chance de pouvoir suivre des cours de japonais dans notre établissement. C'est une occasion rêvée pour aborder les sciences sous l'aspect culturel comme linguistique.

Nous avons donc mis en place cette année un projet interdisciplinaire sur le thème de la mission Hayabusa 2. Ce projet est destiné aux élèves de terminale suivant les cours de japonais et/ou à ceux qui ont choisi la spécialité physique-chimie.

Nous vous présentons l'avancement du projet avec les élèves au terme des sept premières semaines de cours. Dans une première partie, Alain Ortais expose les thématiques retenues par les élèves lors de son cours de japonais. Dans une seconde partie, Thomas Appéré explique quels exercices il a choisi pour étudier différents aspects techniques de la mission Hayabusa 2 en spécialité physique-chimie.

En cours de japonais (Alain Ortais)

L'année dernière j'ai eu la joie d'accueillir mon collègue de science Thomas Appéré, qui avait présenté aux élèves de terminale du cours de japonais la mission Hayabusa 2. En début d'année, à la suggestion de Thomas, j'ai à nouveau proposé aux élèves de terminale d'exercer leurs talents d'expression sur le thème de cette mission.

J'ai suggéré aux élèves quelques pistes de réflexion, tout en veillant à ne pas contrarier d'éventuelles idées originales. J'ai regretté que la description de l'aspect technique et scientifique du projet ne soit pas retenue par mes élèves. Ceci pour rendre hommage à l'initiative de mon collègue, mais aussi parce que, du point de vue linguistique, la description en japonais des successions d'actions et de mouvements dynamiques, présente un intérêt particulier. Toutefois, l'implication des différentes équipes qui se sont constituées spontanément autour de thèmes, parfois inattendus, m'a impressionné et je me propose de vous les présenter ici.

La plupart des thèmes de travail sont attendus et non moins pertinents, deux autres m'ont semblé plus originaux. Parmi les premiers il s'agit de présenter l'agence spatiale japonaise, la JAXA, et ses réalisations mais aussi la mission OSIRIS-REx, cousine américaine de Hayabusa 2. Une autre piste d'inspiration découle du nom de l'astéroïde visé par

Hayabusa 2, Ryûgû (dont les accents marquent les voyelles longues). Nombre de légendes japonaises situent ce « Palais du dragon » au fond de la mer. La plus célèbre d'entre elles est la légende d'Urashima Tarô. Ce personnage y est invité à une vie de plaisir pour avoir sauvé une tortue. Cependant cette aventure s'avère être un voyage dans le temps sans possibilité de retour. Certains élèves proposent un résumé de la légende quand d'autres relèvent les reprises de la célèbre légende dans les grands récits contemporains de la culture populaire japonaise.



*Urashima quitte le Palais du dragon
(auteur inconnu, The Bodleian Library, Oxford).*

Quatre élèves ont choisi de s'exprimer sur la relation qu'entretiennent les Japonais avec la science en relevant que dans ce pays la remise en question de la démarche scientifique et de ses résultats ne rencontre pas le même développement qu'ailleurs. Pour expliquer ceci, la piste de la priorité donnée aux études et la quasi-absence des croyances monothéistes est explorée.

Enfin cinq élèves ont écrit une nouvelle inspirée par la mission. La sonde devient habitée et l'astronaute découvre sur l'astéroïde une microfaune en voie d'extinction. Il parvient à la guérir puis restitue les échantillons. Interrogé sur la raison de ce dénouement, le principal rédacteur m'a déclaré que c'était une leçon à retenir de la destruction de notre environnement terrestre. À défaut de progrès de la science la sagesse n'est-elle pas gagnante ?

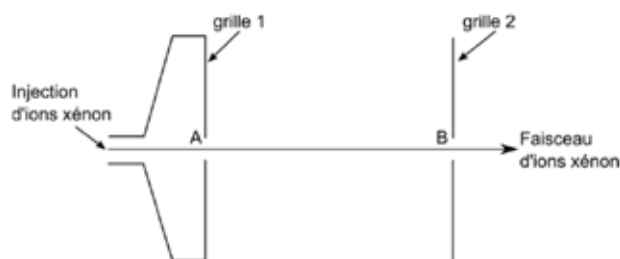
Voici le matériau sur lequel je vais m'appuyer pour animer les multiples compétences acquises jusque-là. À travers la maîtrise de leurs propres rédactions et grâce à l'acquisition d'un vocabulaire commun, je projette de permettre aux différents groupes et individus de dialoguer pour découvrir leurs réalisations respectives. À ce point, nous disposerons peut-être de nouveaux éléments pour nous rapprocher des origines de la vie sur notre planète.

En cours de spécialité physique-chimie (Thomas Appéré)

Le thème « Mouvement et interactions » du programme de terminale spécialité physique-chimie se prête particulièrement bien pour traiter les aspects techniques de la mission Hayabusa 2. J'ai choisi trois exercices en particulier.

La propulsion de la sonde Hayabusa 2

Cet exercice et le suivant s'inspirent fortement du sujet de baccalauréat donné en Polynésie à la session de septembre 2019. Il s'agit ici d'étudier le moteur à propulsion ionique de la sonde Hayabusa 2. Cet exercice s'inscrit dans le chapitre « Mouvement dans un champ uniforme » : des ions xénon Xe^+ sont accélérés sous l'effet d'un champ électrostatique (tension $U_{AB} = 1\,500\text{ V}$) et éjectés à grande vitesse (environ $47\,000\text{ m.s}^{-1}$).



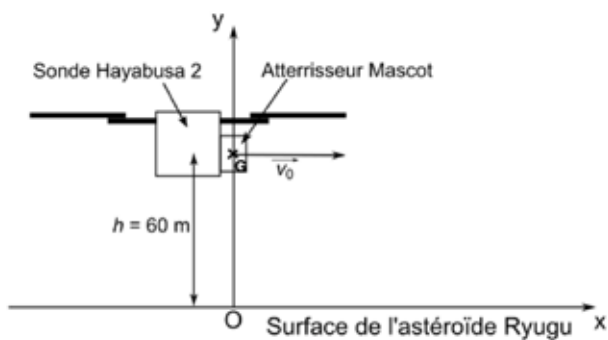
Les élèves représentent le champ électrostatique et la force appliquée sur un ion pour qu'il soit accéléré de la grille 1 à la grille 2. Puis ils recherchent le travail de la force électrique entre les points A et B afin d'obtenir l'expression et la valeur de la vitesse d'un ion xénon au point B.

L'expression de la vitesse de la sonde obtenue par conservation de la quantité de mouvement leur est donnée (cette notion n'est plus au programme). Les élèves déterminent la durée de fonctionnement maximale des moteurs et la comparent à la durée de la mission donnée en introduction de l'exercice.

Largage du module franco-allemand MASCOT

Cet exercice s'inscrit de nouveau dans le chapitre « Mouvement dans un champ uniforme » avec cette fois un champ de pesanteur.

Le but de l'exercice est d'établir les équations horaires du module MASCOT lors de sa descente balistique jusqu'à la surface de l'astéroïde Ryugu. Les élèves déterminent ensuite la vitesse de MASCOT au moment où il touche la surface et la compare à la valeur donnée dans un article de presse.



L'orbite de l'astéroïde Ryugu

Cet exercice entre dans le chapitre « Mouvement dans un champ de gravitation ». Il s'agit d'identifier l'ellipticité de l'orbite de Ryugu et d'appliquer la troisième loi de Kepler pour calculer la période de révolution de l'astéroïde Ryugu connaissant son demi-grand axe.

Notre équipe de physique-chimie suit une progression commune. Ainsi, nous commencerons tous le

chapitre « Mouvement dans un champ uniforme » début novembre 2020. Les élèves de terminale spécialité physique-chimie auront donc tous travaillé sur ces trois exercices avant le retour des échantillons de Ryugu sur Terre. Espérons que cela attisera leur curiosité à l'égard de cette prouesse technologique et des découvertes scientifiques qui seront faites lors de l'analyse des échantillons rapportés.

Conclusion

Ce projet interdisciplinaire suscite déjà un fort enthousiasme chez les élèves en cours de japonais. L'interdisciplinarité ne sera réellement effective que chez les élèves suivant à la fois les cours de japonais et de physique-chimie. Il sera intéressant d'avoir leur ressenti sur la façon d'aborder la mission Hayabusa 2 sous ces différents angles. Nous dresserons le bilan de ce projet dans un prochain article.



*La sonde japonaise Hayabusa 2 -vue d'artiste
(Photo Jaxa).*



L'astéroïde Ryugu (photo Jaxa).

Les astéroïdes dans les productions du Clea

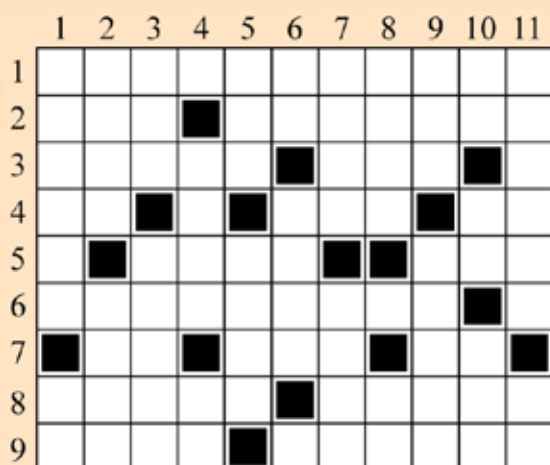
Dans les anciens numéros des Cahiers Clairaut (<http://clea-astro.eu/archives>).

Tous les numéros de plus de 3 ans sont en libre accès sur notre site clea-astro.eu, archives des CC.

- Oumuamua, vitesse cosmique et trajectoires CC 161 (2018).
- L'origine de l'eau CC 149 (2015).
- Origine de l'eau sur Terre CC 149 (2015).
- Même les étoiles se déplacent CC 148 (2014). On y parle de repérer des astéroïdes avec Aladin.
- Herculina est en forme CC 133 (2011).
- Toutatis et le choc possible avec la Terre CC 109 (2005).
- Rencontre avec les astéroïdes CC 86 (1999).

Sur le site du CLEA (<http://clea-astro.eu>), onglet lunap puis astéroïdes.

Mots croisés « astéroïdes »



Horizontalement

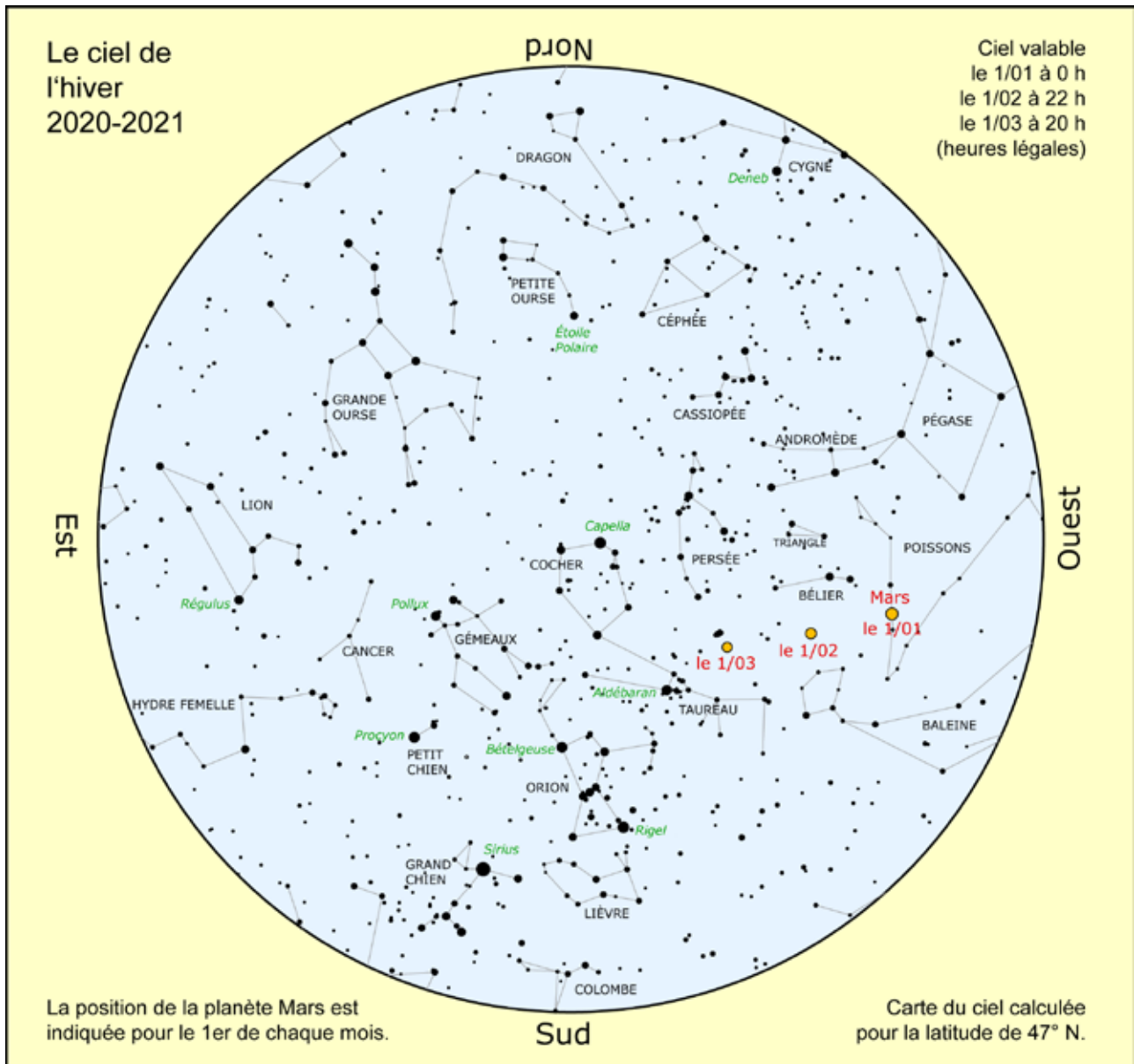
1. Comme un astéroïde dangereux.
2. La photographie (d'astéroïde ?) en est un. On n'en a encore pas récupéré sur un astéroïde mais la première de Mars a été prélevée par Curiosity.
3. Pour aller visiter un astéroïde. Premier astéroïde que l'on a découvert pourvu d'un satellite.
4. Pour rattraper un oubli. Elle a lancé Rosetta. Satellite de Jupiter.
5. Famille d'astéroïdes qui peuvent frôler la Terre. Grand pour Charlemagne ou Petrus.
6. Comme Junon, Vesta ou Apollon.
7. Article espagnol. Consonnes de bases. Élément n° 37, il peut servir à dater les météorites.
8. Sous la croûte de Cérès. Sous la croûte de Cérès ?
9. S. Elle a mis l'observatoire de Jodrell Bank sur la liste du patrimoine mondial.

Verticalement

1. Le premier astéroïde survolé de près par une sonde spatiale (en 1991). Déesse mère.
2. Un astéroïde qui a permis de préciser la mesure de l'unité astronomique au début du 20^e siècle. On en trouve sur Cérès.
3. Comme les astéroïdes de la ceinture de Kuiper. On y représente les étoiles mais pas les astéroïdes.
4. Comme Caroline Herschel ou Vera Rubin. Démonstratif.
5. Elles ont lieu normalement tous les 2 ans à la Villette et le Clea y est présent. Trajectoire de planète pour Copernic.
6. Deux types d'étoiles chaudes. Astéroïde déjà cité ici.
7. Astéroïde de 200 km de diamètre. Comète qui a beaucoup déçu en 2013.
8. Liqueur au Québec et gazouz en Algérie. Avant le CM.
9. Comme Alkaïd dans la Grande Ourse ou Saïph dans Orion. Le premier astéroïde découvert, le 1er jour du 19^e siècle.
10. Premier degré. Sa présence dans les couches géologiques à la limite crétacé-tertiaire plaide en faveur de la chute d'une météorite pour expliquer une importante extinction d'espèces. Se passe ou permet de passer.
11. Le prochain pour des échantillons d'astéroïde est prévu au mois de décembre (Ryugu). Direction du coucher de Pollux.

(solution page 48)

OBSERVATION



Visibilité des planètes

Mercure est visible le soir aux alentours du 20 janvier. À noter, son rapprochement serré avec Jupiter le 11 janvier (à 1,4°), dans les lueurs du couchant.

Vénus est encore visible le matin au tout début de l'hiver. Elle passera derrière le Soleil fin mars.

Mars continue à être observable cet hiver mais elle continue à s'éloigner : son éclat diminue (sa magnitude passant de -0,7 à 1,3) ainsi que son diamètre apparent (qui passe de 12" à 6" contre 23" début octobre).

Jupiter et **Saturne** se trouvent derrière le Soleil fin janvier (les 29 et 24). On les retrouve ensuite dans le ciel du matin mais il faudra attendre le printemps pour bien les observer.

Quelques évènements (heures légales)

21/12 : solstice de décembre à 11 h 02 min.

21/12 (soir) : conjonction serrée Jupiter Saturne (à 6' !).

22/12 : maximum des Ursides (étoiles filantes).

2/01 : la Terre passe au périhélie, au plus près du Soleil, à 147 093 159 km.

10-11/01 : rapprochement Mercure Jupiter Saturne visible à l'horizon sud-ouest peu après le coucher du Soleil.

8/02 : maximum des alpha Centaurides (étoiles filantes surtout intéressantes dans l'hémisphère sud).

20/03 : équinoxe de printemps à 10 h 37 min.

Lune

Pleine Lune : les 30/12, 28/01, 27/02.

Nouvelle Lune : les 13/01, 11/02, 13/03.

AVEC NOS ÉLÈVES

Système de détection de météores et d'aéronefs La radioastronomie à la portée des amateurs

Cédric Willemin, Prêles, Suisse.

Mon intérêt pour l'astrophysique remonte à mon plus jeune âge. Mais, c'est en feuilletant la brochure « Les Cahiers Clairaut », numéro 163, édition automne 2018, que l'idée m'est venue. Un article sur le programme FRIPON (Fireball Recovery and InterPlanetary Observation Network) et Vigie-Ciel, programme qui vise à tapisser l'Europe de détecteur de météores radio et optique, paraissait dans la revue. L'idée de réaliser un travail de maturité¹ en radioastronomie, domaine extrêmement spécifique, m'intéressait particulièrement. De plus, ce travail me permettait de m'aventurer dans un domaine de la physique, et en particulier de l'électronique et de la radiofréquence, qui ne m'était pas très connu².

Introduction

Le radar militaire français GRAVES (Grand Réseau Adapté à la VEille Spatiale) émet des ondes électromagnétiques en permanence sur la fréquence de 143,05 MHz. Les antennes émettrices du réseau GRAVES sont situées entre Dijon et Vesoul, dans le département français de Haute-Saône (figure 1). Les ondes générées par le radar sont réfléchies par tout objet électriquement conducteur, comme par exemple des satellites ou des avions. Le signal réémis par l'objet est réceptionné par un réseau composé d'une centaine d'antennes, situé sur le plateau d'Albion.



Fig.1. Émetteurs du radar GRAVES, situé entre Dijon et Vesoul. Fréquence d'émission à 143,05 MHz.

La détection de météores et d'aéronefs est réalisée selon le même principe. L'antenne émettrice est celle du radar GRAVES et la réception est effectuée au moyen d'une antenne Ground-Plane $3/4 \lambda$ (figure 2), [1] placée sur la toiture de la halle de gymnastique du Gymnase de la rue des Alpes à Bienne. Un tel système est communément qualifié de radar bistatique, car

l'émetteur Tx est significativement éloigné géographiquement du récepteur Rx (figure 3).

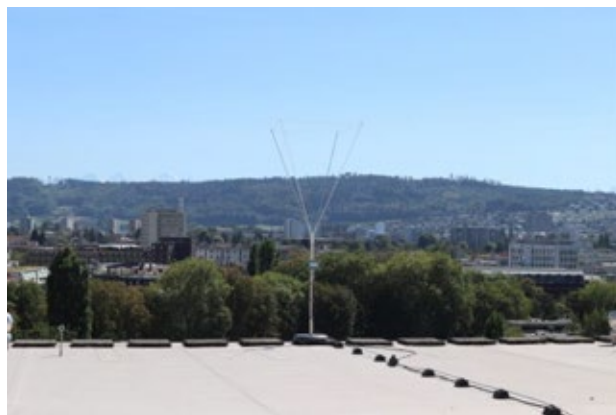


Fig.2. Système de réception placé sur le toit de la Halle de gymnastique du Gymnase des Alpes à Bienne. Un préamplificateur est placé directement sur le mât de l'antenne pour gagner en qualité de signal.

Si l'objet est en mouvement, l'onde réfléchie verra sa fréquence augmenter ou diminuer en fonction de sa vitesse radiale par rapport au radar, mais aussi par rapport au mouvement de l'observateur. Ce phénomène de décalage de fréquence Δf est connu sous la dénomination d'effet Doppler-Fizeau.

$\Delta f = f_{RX} - f_{TX}$ (1) où f_{TX} est la fréquence émise par le radar et f_{RX} la fréquence captée par l'antenne.

Les objets qui réfléchissent l'onde se déplacent à une vitesse relativement élevée dans le cas d'un météore et bien plus faible s'il s'agit d'avions. En ayant connaissance de la trajectoire du météore, il est possible dès lors de localiser son éventuel point d'impact sur notre planète.

¹ En Suisse « la maturité » est un certificat de fin d'études qui atteste une maturité personnelle qui se manifeste par un haut niveau de connaissance et culture générale.

² La version complète de l'article est consultable sur le site du CLEA.

$$\Delta f = \frac{2f_{TX} \cdot \cos\left(\frac{\beta}{2}\right)}{c} \cdot \cos\delta \cdot \|\vec{v}\|$$

La constante c correspond à la vitesse de la lumière, soit environ $c = 3.10^8$ m/s.

L'angle bistatique β (figure 3) n'est pas connu mais peut être estimé ; sa valeur étant relativement faible lorsque le signal provient d'un météore ou d'un satellite et est plus élevé pour un avion.

Malheureusement, la vitesse de l'objet et sa position ne peuvent pas être définies avec une seule station de réception, car l'angle δ (figure 3) est inconnu. Mais il est néanmoins possible de définir la projection de la vitesse sur la bissectrice de l'angle bistatique.

$$\|\vec{w}\| = \cos\delta \cdot \|\vec{v}\|$$

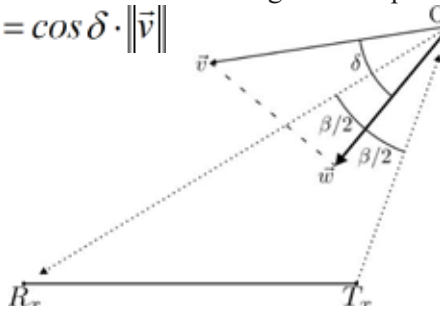


Fig.3. Représentation géométrique du radar bistatique.
L'émetteur T_x est éloigné du récepteur R_x . L'angle β correspond à l'angle bistatique.

Dans les années 1940, une expérience similaire avait déjà été réalisée. Par contre, la technologie de l'époque ne permettait pas d'atteindre les résultats actuels. Le but d'alors était d'écouter l'écho des météores sous forme sonore. Les fichiers audio étaient enregistrés sur des bandes magnétiques, technologie totalement obsolète de nos jours.

Acquisition des données

Un météoroïde (terme désignant un météore lorsqu'il est encore dans l'espace) pénètre dans la mésosphère, couche de l'atmosphère située à une centaine de kilomètres d'altitude, à une vitesse hypersonique. L'onde incidente émise par le radar est réfléchiée par la traînée d'ionisation formée par le météore lors de sa chute dans l'atmosphère (figure 4). L'onde émise par le radar est également réfléchiée par des satellites, avions et autres objets conducteurs.

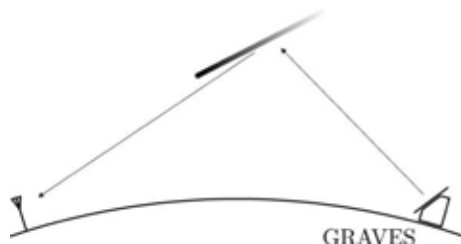


Fig.4. L'onde n'est pas réfléchiée par le météore lui-même, mais par sa traînée

L'onde réfléchiée est captée par le système de réception via l'antenne Ground-Plane $3/4\lambda$. Un préamplificateur et un filtre passe-bande ont été insérés pour offrir plus de sensibilité et de sélectivité (figure 5). Le signal est ensuite transmis à un récepteur USB type Funcube Dongle PRO+.

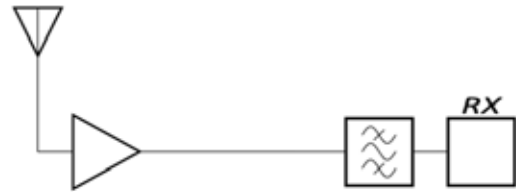


Fig.5. Schéma bloc du système de réception placé sur le toit de la Halle de gymnastique du Gymnase des Alpes de Bienne.

Le logiciel informatique Spectrum Lab V2 permet une visualisation de type chute d'eau (Waterfall) de ce signal ; c'est-à-dire le défilement du temps en ordonnée et le décalage Doppler en abscisse. Les valeurs positives d'abscisse correspondent à une augmentation de fréquence par rapport à la fréquence nominale, alors que les valeurs négatives indiquent une fréquence captée inférieure à celle d'émission du radar (figure 6). Le software présente de nombreux paramètres, comme par exemple la sensibilité de la réception.

- Si le décalage en fréquence est grand et sa durée faible, alors il s'agit d'un objet ayant une vitesse très élevée, comme par exemple un météore.
- Si le décalage est grand et sa durée longue, l'objet se déplace à une vitesse relativement importante. Il s'agira vraisemblablement d'un satellite.
- Si le décalage est faible et la durée longue, alors l'objet se déplace à une basse vitesse comme par exemple celle d'un avion.

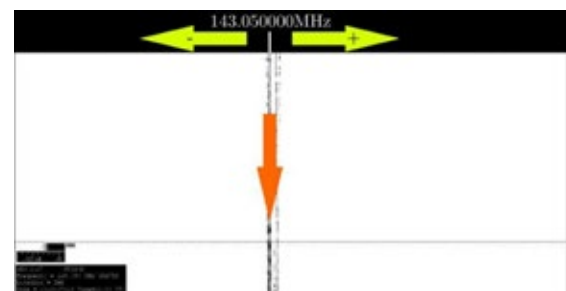


Fig.6. Les signaux sont représentés sur un modèle de type Waterfall. Le décalage en fréquence Δf se mesure en abscisse (flèches jaunes) et le temps s'écoule en ordonnée (flèche orange).

Résultats

Avions : il est facile de les reconnaître, car leur vitesse de croisière et donc l'effet Doppler engendré par celle-ci est relativement faible. De plus, ils sont très nombreux.

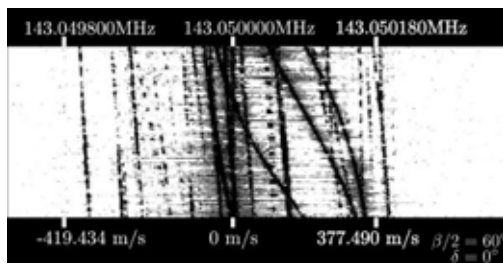


Fig.7. Signature des avions, leurs décalages en fréquence est relativement faible.

Météores : beaucoup de météores pénètrent dans l'atmosphère et une grande partie d'entre eux se consomment intégralement quasiment instantanément. Contrairement aux aéronefs, le météore présente de très fortes variations Doppler sur une très brève durée.

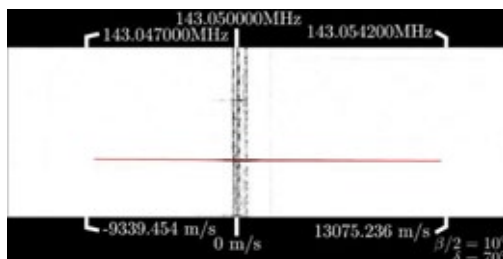


Fig.8. Signature d'un météore, le décalage Doppler est bien plus important que pour celui d'un avion.

Pluies d'étoiles filantes : il est intéressant de compter le nombre de météores détectés lors d'une période durant laquelle une pluie d'étoiles filantes est attendue, comme par exemple lors des Perséides ou lors des Aquarides (cf. figure 9).

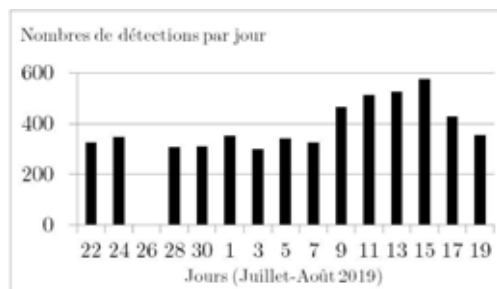


Fig.9. Nombre de météores détectés journalièrement durant les Perséides avec cette instrumentation. Le nombre de météores augmente lors du pic d'activité (11-15 août) à environ 30 détectés par heure.

Le nombre de détectés de météores s'élève à plusieurs dizaines par heures en période de « pluies d'étoiles filantes », contre de l'ordre d'une dizaine par heure en période normale.

Satellites : la position et l'instant de passage de certains satellites comme par exemple l'ISS (Station spatiale internationale) sont des données accessibles au public. Il est possible d'affirmer avec certitude qu'il s'agit de satellites, car leur vitesse est par

exemple d'environ 24 000 km/h, plus élevée que celle des avions, mais bien plus faible que celle des météores.

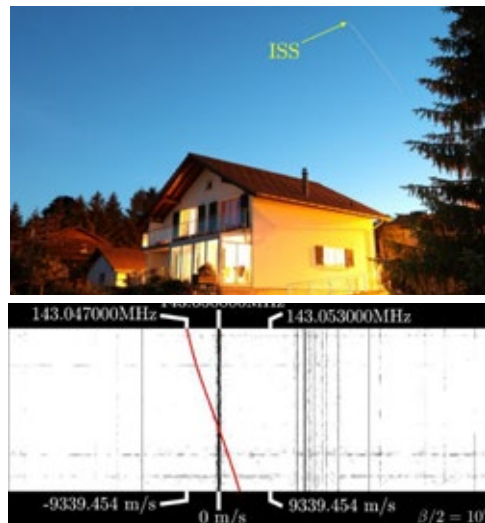


Fig.10. Deux illustrations de l'ISS enregistrées simultanément : optiquement (photographie) et par détection radar bistatique.

Conclusions

Le système de détection basé sur le modèle du radar bistatique est opérationnel par tous les temps, de jour comme de nuit. La plausibilité des résultats a été vérifiée de différentes façons, comme la détection du passage de la Station spatiale internationale (ISS) ou les pluies d'étoiles filantes des Perséides.

L'installation de ce système relativement simple ne nécessite aucune licence de radioamateur, ni d'autorisation particulière.

Pour approfondir les résultats, il serait possible d'opérer par triangulation sur plusieurs sites, permettant ainsi de quantifier raisonnablement la vitesse des objets détectés. Avis aux amateurs !

Remerciements

- Club de radioamateurs HB9XC section Pierre-Pertuis (USKA)
- Gymnase français de Bienne, Monsieur Philippe Drompt

Littérature

- <https://f6crp.pagesperso-orange.fr/ba/graves.htm>
 - <http://www.astrosurf.com/luxorion/meteores-anomalies.htm>
 - Olivier Pilloud (HB9CEM), 2018 - Le Radioamateur, Editions TECHNIP, ISBN 978-2-7108-1184-8
 - https://www.willemin.li/cedric/utiles/Detection_meteores_aeronefs_191022.pdf
- Prêles, le 16 février 2020.

[1] L'antenne Ground-Plane est constituée de quatre brins formant un plan sur la base de l'antenne et les tiges ont une longueur égale aux trois quarts de la longueur d'onde.

Suppression annoncée du changement d'heure saisonnier

David Alberto, Commission Cadres solaires de la SAF.

Les conséquences prévisibles de la suppression du changement d'heure saisonnier selon l'adoption définitive de l'heure d'été ou de celle d'hiver.

En mars 2019, les eurodéputés ont voté la fin du changement d'heure saisonnier [1], avec prise d'effet en 2021.

Plusieurs consultations publiques avaient été lancées, tant au niveau européen [2] qu'au niveau national. En France, la consultation lancée par l'Assemblée nationale (de février à mars 2019) a recueilli plus de 2 millions de réponses, avec pour résultat principal une majorité de Français (84%) souhaitant la fin du changement d'heure [3].

Ces consultations ne posaient pas seulement la question du maintien ou de l'abandon du changement d'heure. Pour les personnes en faveur de l'abandon, il était également demandé si leur préférence se portait sur l'heure « UTC +1 » (actuelle « heure d'hiver » en France) ou sur l'heure « UTC+2 » (actuelle « heure d'été » en France).

Cette dernière question était à la fois logique et très surprenante. Surprenante, car le questionnaire ne renseignait absolument pas le public sur les conséquences de son choix en termes d'heures de lever et de coucher du Soleil... Il semble pourtant évident que, pour accorder une quelconque valeur aux résultats du questionnaire, les répondants doivent avoir un avis éclairé sur la question.

Les résultats de la consultation publique française ont donné l'heure d'été choisie par une majorité de Français, avec 59 % des réponses, contre 37 % en faveur de l'heure d'hiver, et 4 % sans opinion.

Cet article propose d'éclairer la question sur les conséquences de ce choix.

Les heures de lever et de coucher du Soleil peuvent s'obtenir par les calculs suivants [4] :

On détermine d'abord l'angle horaire H_0 en degrés au lever ou au coucher du Soleil, par la formule :

$$\cos H_0 = -\tan(\phi) \times \tan(\delta)$$

où ϕ est la latitude du lieu, et δ la déclinaison du Soleil à la date souhaitée.

Ensuite, l'heure du lever est donnée par :

$$H_L = 12 - \frac{H_0}{15}$$

et celle du coucher par :

$$H_C = 12 + \frac{H_0}{15}$$

Il s'agit ici de l'heure solaire vraie. Elle ne tient pas compte des différences éventuelles de longitude entre l'Est et l'Ouest, ni de l'équation du temps.

Voyons ce que donnent ces calculs pour une latitude de 47° ¹, et pour les déclinaisons extrêmes du Soleil, c'est-à-dire les solstices d'été ($\delta = 23,44^\circ$) et d'hiver ($\delta = -23,44^\circ$) :

heure solaire	latitude 47°	
au 21 décembre	Heure de lever	7 h 51
	Heure de coucher	16 h 09
au 21 juin	Heure de lever	4 h 09
	Heure de coucher	19 h 50

Si l'heure finalement choisie par la France en 2021 est l'heure d'hiver (UTC+1), on ajoute une heure aux résultats précédents :

¹ Latitude approximative du parallèle passant vers Nantes, Nevers et Beaune.

heure UTC +1 (heure d' « hiver »)	latitude 47°	
au 21 décembre	Heure de lever	8 h 51
	Heure de coucher	17 h 09
au 21 juin	Heure de lever	* 5 h 09 *
	Heure de coucher	*20 h 50 *

Si la France opte pour l'heure d'été, on ajoute deux heures :

heure UTC +2 (heure d' « été »)	latitude 47°	
au 21 décembre	Heure de lever	* 9 h 51 *
	Heure de coucher	* 18 h 09 *
au 21 juin	Heure de lever	6 h 09
	Heure de coucher	21 h 50

Quels changements, par rapport à la situation actuelle ? Il suffit de regarder ce que donne le maintien de l'heure d'été lorsqu'on sera en hiver, et le maintien de l'heure d'hiver lorsqu'on sera en été. Ces résultats sont marqués par des astérisques sur les tableaux précédents.

Il résulte que, avec le choix définitif de l'heure d'hiver, au solstice d'été le Soleil se lèverait vers 5 h (contre 6 h actuellement) et se coucherait vers 21 h (contre 22 h actuellement).

On peut considérer que, dans ce cas, la modification de l'heure de lever a peu d'impact pour la majorité des personnes ; en revanche nous perdrons une heure de lumière solaire le soir, ce qui est une conséquence nettement plus visible.

En choisissant au contraire l'heure d'été, les résultats au solstice d'hiver seraient :

heure de lever vers 10 h (au lieu de 9 h), heure de coucher vers 18 h (au lieu de 17 h).

On peut noter qu'il faudrait alors attendre le milieu de matinée pour bénéficier de la lumière solaire. Cette conséquence n'est pas négligeable, et nous ferait connaître des matinées hivernales comme on peut les vivre en Écosse ou au Danemark. En revanche, une heure de lumière serait gagnée le soir.

On peut noter que les modifications évoquées ci-dessus seraient légèrement plus marquées – quelle que soit l'option retenue – au Nord de la France

(Dunkerque : latitude 51°) qu'au Sud (Ajaccio : latitude 42°).

Alors ? Opter pour de longues soirées estivales, quitte à connaître des matins d'hiver où le Soleil se fait attendre ? Ou bien rester au plus près de l'heure solaire pour atténuer les effets extrêmes des saisons ?

Il n'est pas certain que, en connaissance de cause, l'une des options emporte nettement l'avantage. Et pourtant, à la suite de la consultation publique française, l'option de l'heure d'été a été la plus largement plébiscitée. On peut se demander s'il n'y pas eu de mauvaise interprétation de la question : à la question « préférez-vous l'heure d'été ou l'heure d'hiver ? », un avis « non éclairé » pourrait penser qu'on lui demande s'il veut voter pour des journées plus longues ou plus courtes... D'ailleurs lorsque, au moment des changements d'heure, les journaux publient des articles donnant la parole aux personnes lassées de ce système, c'est surtout à l'approche de l'hiver que les protestations sont plus marquées, comme si l'heure d'hiver était rendue responsable de la brièveté de la journée en décembre...

Quoi qu'il en soit, il semble qu'un certain flottement retarde l'avancée du dossier au niveau des institutions européennes. Chaque pays de l'Union est libre de se prononcer pour l'un ou l'autre des choix possibles. Mais des réunions d'harmonisation sont logiquement attendues, les États membres ayant le souci de ne pas entraver les échanges commerciaux avec les pays voisins. Ces réunions ne semblent toujours pas prévues au calendrier.

[1] <http://www2.assemblee-nationale.fr/15/autres-commissions/commission-des-affaires-europeennes/secretariat/a-la-une/2-103-999-participations-a-la-consultation-citoyenne-sur-la-fin-du-changement-d-heure>

[2] <https://www.europarl.europa.eu/news/fr/press-room/20190304IPR30073/vers-la-fin-du-changement-d-heure-en-2021>

[3] <https://www.vie-publique.fr/en-bref/24061-changement-dheure-84-des-citoyens-nen-veulent-plus>

[4] *Les cadrans solaires. Tout comprendre pour les construire*, Denis Savoie. Ed. Belin 2015.

■

L'ASTRONOMIE dans les TIMBRES (5)

Anne-Marie Louis

Des timbres d'hier et d'aujourd'hui, pour une lecture à la loupe de ces images minuscules afin de traquer les erreurs et d'illustrer quelques fragments de l'histoire de l'astronomie.

L'erreur se faufile partout et défie la vigilance. Les deux derniers articles ont vu l'effacement de guillemets, le redressement d'italiques, la suppression de polices (de caractères), et même la disparition d'un mot, à la fin du texte de Danièle Imbault, escamoté par une illustration. Il fallait lire : «... *je pense à l'instrument dont j'ai piloté la conception et la réalisation, que j'ai étalonné et qui est là-haut... tout fondu et **calciné** !* » Afin d'obtenir l'indulgence des lecteurs, voici une nouvelle image de la sonde **VEGA**, à gauche sur un timbre de la belle série consacrée à la **comète de Halley** en 1986 par le Laos et transmise par Philippe Malburet. À droite, une représentation fantaisiste de la sonde Giotto.



De très nombreux timbres furent émis par des dizaines de pays du monde entier à l'occasion du grand retour. Exception : la France, avec un unique timbre pour Wallis-et-Futuna ! Dans le numéro précédent, nous avons évoqué les trop rares représentations de l'**Observatoire de Paris** : après la République Centrafricaine, le voici sur un timbre de République du Niger, et sur un timbre de Sierra Leone, avec un portrait de Kepler ! Remarquez la présence des deux coupoles : la deuxième disparut en 1974.



En 2017 l'Uruguay a émis un superbe bloc sur les **petits corps du Système solaire** : au centre l'image de la **comète 67P/Tchourioumov-Guérassimenko** par la sonde Rosetta en 2014, à droite **Pluton** photographiée en 2015 par New Horizons, et à gauche **Cérès**, astéroïde autour duquel la sonde Dawn s'est satellisée en 2015. Pourquoi le premier astéroïde découvert le 1^{er} janvier 1801 a-t-il reçu le nom de la déesse romaine de l'agriculture ? Guiseppe Piazzi était directeur de l'observatoire de Palerme et Cérès est aussi la protectrice de la Sicile...



Cérès figure sur le tout premier timbre-poste de 20 centimes émis en France le 1^{er} janvier 1849. On célébra en 1999 le 150^e anniversaire de la vignette à l'effigie de la déesse des moissons, avec une belle version décorée d'une pastille holographique évoquant le plus gros astéroïde de la ceinture principale.



5^e partie – Erreurs, confusions et omissions

La plus fameuse erreur de la philatélie concerne la **Semeuse d'Oscar Roty**, qui figure sur de nombreuses pièces de monnaie depuis la fin du XIX^e siècle, et apparut pour la première fois sur un timbre-poste en 1903. Elle sème contre le vent, ce qui est paraît-il contre-productif ; et les ombres sont bizarrement placées du côté du Soleil ! Deux erreurs qui lui ont apporté la célébrité et quelques critiques...



L'erreur fut rectifiée en 1906 pour les timbres suivants mais en 2003 la Poste célébra les 100 ans de la Semeuse en rééditant l'exploit ! Au dos de l'enveloppe, ce commentaire inspiré et prophétique : *« Sa silhouette gracieuse et pleine d'allant représente la République en marche, semeuse d'idées et messagère de paix. »*

Depuis mars 2020 un carnet de timbres intitulé **Un cabinet de curiosités** apporte une touche de science à nos lettres vertes. La magnifique **sphère armillaire** de **J.-B. Delure et J. Pigeon (1705)** est au Château de Versailles.



Le « *cadran solaire* » représenté à droite n'en est pas un. C'est la **rose des vents à seize directions** qui orne la face extérieure du **cadran solaire multiple**

en diptyque Hans Tucher II et III (1590 – Musée du Louvre). Entre 4 faces, l'artiste a choisi le couvercle, en plaçant la devise latine à l'envers ! Une rotation de 180° en facilite la lecture.

En 1982 l'**Allemagne** a émis un timbre pour les 400 ans du **calendrier grégorien**. Cette jolie image est souvent reprise, et n'est jamais identifiée. Il s'agit d'une représentation de **Johann Rasch**, érudit autrichien polyvalent qui publia des ouvrages très divers sur la viticulture, la musique et... le nouveau calendrier, mêlant *règles paysannes, jours perdus* avec astrologie et divination !



Comme sur les drapeaux, souvent cités, les timbres nous montrent des étoiles improbables devant des **croissants** irréalistes, par milliers sur WikiTimbres !



La **France** a émis des timbres très connus représentant l'ensemble des blasons de France. Trouvez l'intrus parmi ces 3 exemplaires !



Le **croissant**, aujourd'hui considéré comme symbole de l'islam, figure sur le blason d'**Alger** (1959) ; il est associé à une étoile à 5 branches sur le blason d'**Oran** (1960). Mais c'est le port de la Lune, large méandre de la Garonne en forme de croissant semi-circulaire qui est évoqué sur le blason de **Bordeaux** ! *Mer d'azur chargée d'un croissant d'argent...* (timbre de 1958).

Trop souvent, des auteurs ont raconté l'histoire de l'astronomie en sautant allègrement de Ptolémée à Copernic, expliquant qu'il ne s'était rien passé pendant 14 siècles : tentons de réparer en images.

Astronomes arabo-musulmans et astronomes ottomans

En 1979, 10 pays ont émis des timbres sur le même modèle, résumant toutes les disciplines étudiées par les savants polyvalents de l'**âge d'or arabo-musulman**. Notez, dans la bande rouge, le livre d'algèbre, les étoiles et bien sûr le croissant de Lune.



Parmi 60 timbres pour à peine 10 savants, il faut choisir les plus pertinents, et vérifier les légendes. Par exemple, sur cette enluminure turque du XII^e siècle (page-titre des *Épîtres des frères de la pureté*, vaste encyclopédie ésotérique pluridisciplinaire) s'agit-il, comme souvent mentionné, du philosophe et savant arabe **al-Kindi** ? Dans le doute, admirons la légende de ce beau timbre du Mali : **Instruisez-vous du berceau au tombeau**.

Le premier de ces grands savants est le persan **al-Khwarizmi** (780-850), astronome, mathématicien, historien, géographe et enseignant. Il est connu comme le fondateur de l'*algèbre* moderne et l'auteur des *Tables indiennes*, les plus anciennes du monde arabe.

Son nom est à l'origine du mot *algorithme*.

À gauche du portrait, une portion d'astrolabe.

Il travaille à Bagdad, à une époque où la recherche de la connaissance est le but de la vie.



Le calife **al-Mamun** de la dynastie des Abbassides a compris l'intérêt de toutes les sciences pour le développement des villes, des communications, de l'économie et de l'islam. Il finance et encourage les traductions de manuscrits scientifiques, les recherches ainsi que leur diffusion en langue arabe : pour cela il réunit les meilleurs savants dans la Maison de la sagesse.

Autre érudit persan, **al-Biruni** (973-1048) publie de nombreux livres notamment en astronomie. Il critique la conception géocentrique de Ptolémée et explique le lever et le coucher des astres par la rotation de la Terre autour de son axe.



AMA09 - À l'occasion de l'année mondiale de l'astronomie, l'**Iran** émit ensemble 4 timbres se rapportant à des périodes différentes. À droite ci-dessous, on retrouve l'étude des phases de la Lune par **al-Biruni**. À gauche, autre époque autre lieu avec cette représentation artistique de l'observatoire de **Maragha** (**Maraqeh** en persan), construit par Hülégü, petit-fils de Gengis-Khan. C'est là que travailla, à partir de 1259, **Nasir al-Din al-Tusi** déjà évoqué à la fin de l'article (2) dans le CC 169 : il étudia le mouvement des planètes et établit ses *Tables ilkhaniennes* d'une grande précision. Il imagina le système planétaire le plus avancé de son temps.



Les deux illustrations du bas figurent côte à côte dans un manuscrit ottoman de 1581, le *Shahinshahname*, livre du Roi des Rois, du sultan Murad III, et représentent des **astronomes ottomans**. À gauche, on voit un énorme astrolabe sphérique manœuvré par quatre hommes. À droite, l'**observatoire d'Istanbul** que le sultan fit construire pour **Taqi al-Din** en 1577. Remarquez les étagères de livres et les nombreux instruments utilisés, sablier, astrolabe, horloge, quadrant, octant, globe terrestre... représentés avec minutie. Un jour Taqi al-Din observa une comète et crut pouvoir prédire une victoire à son souverain. Hélas la prédiction était fausse, et le souverain courroucé fit détruire l'observatoire en 1580.



C'est probablement parce qu'il avait vu les ruines de l'observatoire de **Maragha** dans son enfance que le prince-astronome mongol **Ulugh Beg**, petit-fils de Tamerlan, fit construire sur le même modèle à partir de 1420 l'**observatoire de Samarcande**. En 2014, l'**Iran** émit un magnifique bloc-feuillet.



70 mathématiciens et astronomes travaillèrent à l'observatoire de Samarcande. Ulugh Beg eut pour collaborateurs **Qadi-zadeh Roumi**, son professeur, **al-Kashi** (ou al-Kashani) et **Ali al-Qushji** (ou Quchtchi). Remarquable mathématicien et astronome, **al-Kashi** prit une part importante dans la conception de l'observatoire et de ses instruments. Parmi ses travaux mathématiques on retient son calcul de π avec 16 décimales. Représentation hagiographique avec un astrolabe pour auréole.



Ensemble, les savants calculèrent la position de 1000 étoiles et publièrent en 1437 un **imposant catalogue** et recueil des travaux de l'observatoire, **livre représenté en bas à droite sur le bloc iranien**, les *Tables sultaniennes*, **Zij-e sultani** ou **zij-e gurgani**.

Mais la mort d'Ulugh Beg en 1449 entraîna le déclin de l'observatoire. Ailleurs, depuis déjà trois siècles, les activités scientifiques déclinaient face à l'opposition des religieux conservateurs de l'islam. Des fouilles ont permis de retrouver les assises de l'immense quadrant de 40 mètres de rayon, qu'abrite désormais un bâtiment neuf. **Ali al-Qushji**, sur le timbre **Ali Kuşçu**, le *fauconnier*, mathématicien, physicien et astronome, fut élève et disciple d'Ulugh Beg puis dirigea l'observatoire avant de venir vivre et enseigner à Istanbul où il mourut en 1474. C'est lui qui apporta à Mehmed II une copie des *Tables sultaniennes* qui de là parvinrent en Europe. Il a transmis et diffusé à l'occident le savoir des arabes dont Copernic avait probablement eu connaissance.



AMA09 - La **Turquie** en 2009 lui rend hommage (timbre à droite). Sur l'autre timbre, on voit la galaxie d'Andromède M31, et l'ancienne médersa Cacabey à Kirşehir (au sud-est d'Ankara), école supérieure d'astronomie (1272), dont le minaret était utilisé comme observatoire. Depuis 2006 c'est une mosquée.

Citons deux astronomes andalous : **al-Zarqali**, **Azarchel** ou Arzachel (1029 – 1087) mit au point un nouveau type d'astrolabe, fit des mesures d'une grande précision sur le mouvement des planètes et établit les *Tables tolédanes*. Il est cité par Copernic dans son livre *De Revolutionibus*.



Ibn al-Haytham, **Alhazen** (965-1039) érudit qui publia plus de 200 livres, est considéré comme le père de l'optique. Il s'opposa à la théorie selon laquelle les yeux envoient de la lumière éclairant les

objets. On dit que c'est en observant des rayons provenant de la Lune et se propageant en ligne droite à travers un petit trou dans un mur qu'il établit sa théorie de la propagation de la lumière.



Références - Sitographie

La translittération des noms arabes et persans n'est pas aisée. Par souci de cohérence, la transcription utilisée dans l'article (2) du CC169 a été conservée. Les mêmes noms sont écrits différemment dans le dossier « *La science dans la civilisation arabo-musulmane entre le VIII^e siècle et le XV^e siècle* » de **Pierre Magnien** sur le site du CLEA.

Plusieurs sites intéressants en flashant ce QR code :

<https://tinyurl.com/y45b7d4c>



Il paraît que le Père Noël serait originaire de l'ancienne Myra en Turquie. En voyant ce beau clair de Lune émis au printemps 2020 par la Finlande pour Europa (*Les anciennes routes postales*), il me vient une question : en quelle année pouvons-nous envisager de tenter d'observer la brève **conjonction de la Pleine Lune** avec le traîneau du **Père Noël** sur fond d'aurore boréale ?

FIN



Merci aux *Éditions Jean Farcigny* à Courbevoie pour leur aide précieuse, merci à Brigitte et Pierre pour leurs relectures et conseils, merci à toutes et tous pour vos contributions et vos encouragements.

Souvenir, souvenirs

Daniel Bardin, Marseille.

Dans le cadre d'un atelier scientifique, des élèves du collège Olympe de Gouges à Cadaujac (Gironde) ont réalisé entre autres une table équatoriale, présentée au concours CGénial. Un petit film¹ a été réalisé à cette occasion, Daniel Bardin qui a été l'initiateur de la fabrication de cet objet dès les premières écoles d'été du CLEA revient pour nous sur ce sujet.

Fin août et début septembre 1976, une assemblée générale de L'Union astronomique internationale se réunissait durant huit jours à Grenoble.

La commission « Enseignement de l'Astronomie » de l'UAI, à la demande du président de cette commission, fut chargée de convoquer les astronomes et les enseignants pour débattre du problème de l'enseignement de l'astronomie dans le second degré en France. Cent cinquante enseignants et cinquante astronomes ont déterminé tous les volets de la question. Des conclusions et des propositions écrites furent remises aux organisateurs. Le seul problème qui restait peut se formuler ainsi : les enseignants qui allaient être chargés de cet enseignement n'étaient pas formés

Cependant, les bases de ce qui allait être le CLEA, comme la nécessité d'un organe de liaison et de formation (ce qui fut fait sous la forme des Cahiers Clairaut) étaient lancées.

Rendons au passage hommage à deux personnes parmi d'autres qui étaient présentes ce jour-là : Lucienne Gouguenheim (qui fut la première présidente du CLEA) et Gilbert Walusinski, qui s'occupa de la trésorerie avec rigueur et un humour souriant.

La liste des autres amis est longue.

Les écoles d'été, avec les exposés le matin, et les ateliers l'après-midi (durant une semaine) furent et sont toujours très appréciées. L'ambiance studieuse et détendue à la fois, permit l'éclosion de nombreux échanges ; les objets que construisirent les stagiaires furent emportés par leur réalisateur pour le plus grand plaisir des élèves : sextants, alidades, lunettes, cadrans solaires, accessoires de photographie, de spectroscopie virent le jour à l'aide de bois, de carton de colle, de vis...

Parmi les objets fabriqués figurait une monture équatoriale (équipée d'un boîtier photo) permettant de photographier le ciel en suivant très finement la

rotation apparente des astres.

L'avantage d'un tel dispositif est de fournir des images sans traînée ou dérapage, et d'accumuler l'énergie lumineuse durant la pose. Les lunettes et les télescopes de grande taille sont trop encombrants, trop lourds pour être déplaçables ; il fallait inventer des montures légères et précises permettant ce qu'on attendait d'elles et bien sûr transportables.

C'est un amateur renommé, Pierre Bourge (1921-2013), qui construisit la première monture équatoriale « de voyage ».



Un bricolage inventif permettant d'embarquer des objectifs photos jusqu'à 200 mm de focale et des pauses pouvant atteindre 10 min sans danger.

Les ateliers de l'après-midi virent défiler chaque année, des stagiaires enthousiastes et appliqués qui prenaient leurs premiers clichés « en suivi » dès le soir.

Jean Ripert apporta même un petit labo qui permettait de développer les diapositives qu'on admirait le lendemain.

Des articles ont été publiés très tôt sur cet objet : Cahiers Clairaut n° 9 (été 1980) ; n° 17 (été 1982) et n° 19 (hiver 1982). Ils sont complémentaires, pas trop redondants. On pourra voir aussi le compte-rendu de la première école d'été, entre les pages AP16 et AP24. (Lanslebourg- Mont Cenis).

¹ <https://www.dropbox.com/s/jaxl6tcxxtvxe47/Cgenial2020.mp4?dl=0>

Au fil des années, quelques petits compléments techniques ont été ajoutés à la monture mais le principe et le fonctionnement restent inchangés.

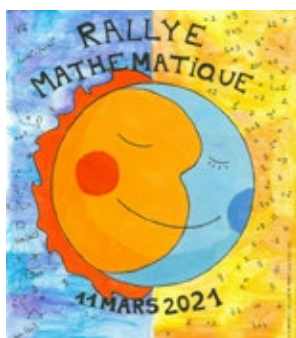


Cet « instrument d'un autre siècle » (le vingtième), reste d'actualité. Il fonctionne sans pile, sa mise en station (réglage de la charnière pour qu'elle vise soigneusement le pôle céleste) est aisée. Maintenant que les capteurs sont numériques, les sujets des

clichés sont nombreux, variés, et constituent des données utilisables par les élèves. Certes, beaucoup de débutants ne jurent que par du matériel actuel : moteur d'entraînement à régulateur, pilotage par caméra annexe, pointage automatique, etc. Cela peut satisfaire certains ; mais de tels outils, remarquables mais pas toujours légers (et chers ! ..) manquent quelque peu de pédagogie élémentaire.

Les années passent ; le CLEA est toujours là, vaillant et très « riche ». L'informatique règle une foule de questions en un clin d'œil ; mais la mélancolie n'étant pas de mise, vous pardonnerez mon regard sur le passé qui fait partie des sourires de la vie ; le présent a, lui aussi, beaucoup d'attraits.

Je n'ai pas pu citer la multitude de collègues et d'amis que j'ai rencontrés dans mes activités en astronomie : ils sont évidemment très nombreux. Qu'ils ne m'en veuillent aucunement ; je les apprécie avec une tendresse certaine. ■



Le rallye mathématique de l'académie de Lyon, fait une belle place à l'astronomie.

Pour sa 16^e édition le rallye mathématique de l'académie de Lyon aura lieu le jeudi 11 mars 2021. Il est ouvert à toutes les classes de troisième et de seconde de l'académie.

En classe entière, les élèves auront à résoudre des problèmes dont certains sont dédiés à l'astronomie !

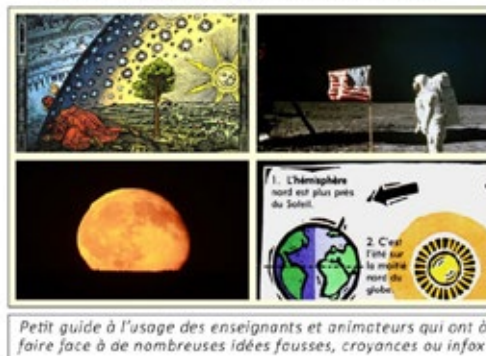
Un prix spécial « astronomie » sera décerné par le planétarium de Vaulx-en-Velin. L'observatoire astronomique de Lyon proposera une conférence et une visite à la classe lauréate. Tandis que le CLEA offrira à l'établissement de la classe gagnante un exemplaire du HS13.



LES FICHES PÉDAGOGIQUES DU CLEA

Croyances et idées fausses en astronomie

Hors série nouvelle formule des Cahiers Clairaut n° 13



Petit guide à l'usage des enseignants et animateurs qui ont à faire face à de nombreuses idées fausses, croyances ou infos

Avec des compléments accessibles en ligne

ISBN 978-2-9557092-3-8

Le hors-série n° 13 des Cahiers Clairaut est sorti. Vous le trouverez sur le site de vente du CLEA. N'hésitez pas à le faire connaître autour de vous !

Solutions des mots croisés de la page 35

Horizontalement

1. Géocroiseur. 2. Art. Carotte. 3. Sonde. Ida (son satellite a été nommé Dactyle). 4. PS. ESA. Io. 5. Amor. Cru. 6. Astéroïde. 7. El. Bss. Rb (rubidium). 8. Glace. Océan. 9. Esse. Unesco.

Verticalement

1. Gaspra (survolé en 1991 par Galileo). Gê. 2. Éros. Sels. 3. OTN (objet trans-neptunien). Atlas. 4. Dame. Ce. 5. RCE (Rencontres du ciel et de l'espace). Orbe. 6. OA. Éros. 7. Iris. Ison. 8. Soda. CE. 9. Eta. Cérés. 10. Ut. Ir (iridium). Bac. 11. Retour.NO.

École d'Été d'Astronomie



Vous souhaitez débiter ou vous perfectionner en astronomie ?

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

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



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

Renseignements et vidéo sur :

<http://clea-astro.eu/aLaUne/EcolesdEtedAstronomie>

Les productions du CLEA

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

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

Fiches pédagogiques

Ce sont des hors-série des Cahiers Clairaut conçus par le Groupe de recherche pédagogique du CLEA : astronomie à l'école, mathématique et astronomie, le Soleil, ...

HS10 Mathématiques et astronomie (2012)

HS11 Les constellations (2014)

HS12 L'astronomie à l'école (2016)

HS13 Croyances et idées fausses en astronomie (2020)

HS14 Le Soleil (2018)

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.

Maquettes

Astrolabes, cartes du ciel, fuseaux horaires, lunoscopes, nocturlabes, zodiaques ou lot des six maquettes.

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

Le formulaire de commande est sur le site.

Le site web

Une information toujours actualisée

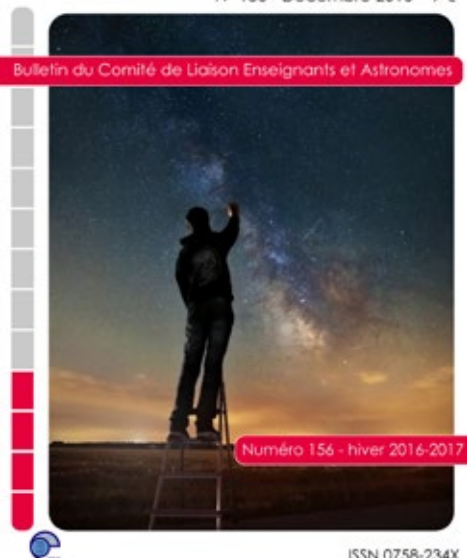
<http://www.clea-astro.eu>



LES CAHIERS CLAIRAUT

LES CAHIERS CLAIRAUT

N° 156 - Décembre 2016 9 €



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 :

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

Siège social :

CLEA

Case courrier 7018

Université Paris Diderot - Paris 7

Bâtiment Sophie Germain

IREM de Paris

8, place Aurélie Nemours

75205 Paris cedex 13

École d'Été d'Astronomie :

daniele-imbault@laposte.net

Cahiers Clairaut :

christianlarcher3@gmail.com

Ventes des productions :

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

Site web :

contact@clea-astro.eu

Adhésion / Abonnement :

Adhésion CLEA pour 2021 : **10 €**

Abonnement CC pour 2021 : **30 €**

Adhésion + abonnement CC : **35 €**

Adhésion + abonnement CC de soutien
(papier et numérique) pour 2021 : **40 €**

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

Directeur de la Publication : Frédéric Pitout

Rédacteur de publication : Christian Larcher

Imprimerie Grapho12, 12200 Villefranche de Rouergue

Premier dépôt légal : 1er trimestre 1979

Numéro CPPAP : 0315 G 89368

Prix au numéro : 9 €



10-31-2779 / Certifié PEFC / pefc-france.org

Revue trimestrielle : numéro 172 hiver 2020-2021