

AVEC NOS (GRANDS) ELEVES

Ces comètes qui nous font tourner la tête

Pierre Le Fur,
Professeur en PSI (Physique et Science de l'Ingénieur)
à Institut Supérieur de l'Électronique et du Numérique de Toulon

Résumé : *Les exceptionnelles images rapportées par la sonde SOHO vont nous permettre d'appréhender concrètement comment les comètes se déplacent dans la région circumsolaire. Avec l'appui d'un montage en carton, le « cométoscope », nous allons matérialiser en 3 dimensions leurs déplacements. Enfin nous confronterons nos résultats avec le modèle informatisé de la NASA.*

Cette année 2007 a débuté par le passage de l'extraordinaire comète Mac Naught (C 2006 P1), d'abord visible à l'œil nu de l'hémisphère nord et suivie depuis les cieux de l'hémisphère sud (voir : <http://www.eso.org/outreach/press-rel/pr-2007/images/phot-05c-07-fullres.jpg>).

De telles rencontres avec ces astres chevelus ne sont pas très fréquentes pour l'observateur démuné d'instruments optiques.

à 79m). Intrigué par le mouvement de ces astres, Tycho a pu montrer qu'ils se déplacent au-delà de l'orbite lunaire et ne sont pas un phénomène atmosphérique (« sublunaire ») comme on le pensait à l'époque.

Le site "gallica"

Image provenant du site de la bibliothèque de France : <http://gallica.bnf.fr>

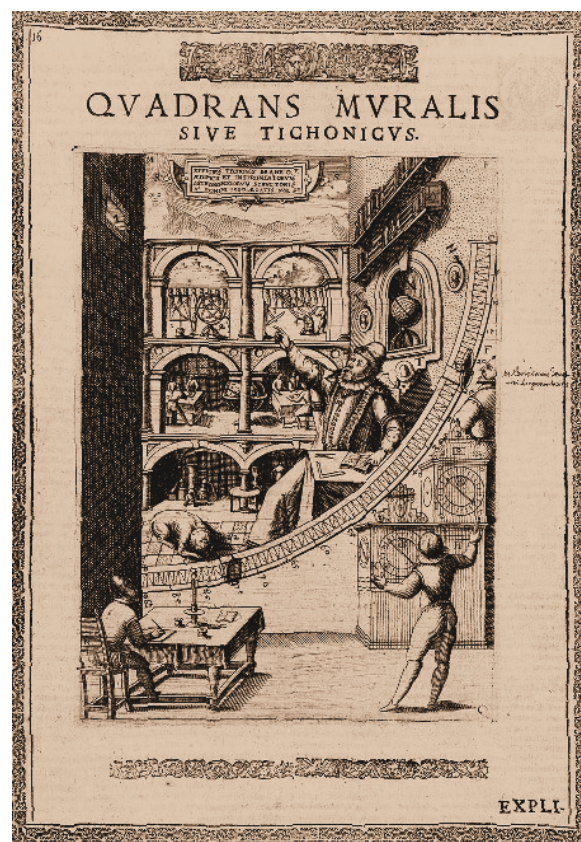
Aller dans « Recherche »:

Puis choisir l' « Auteur » Tycho Brahé, enfin sélectionner seulement « images ».

La réponse 2 est une planche d'images extraites de l'ouvrage : « Astronomiae Instauratae Mechanica » datant de 1602 (Nuremberg).

NB : les textes et illustrations de nombreux ouvrages originaux sont accessibles ainsi en ligne directe : Galilée, Newton...etc....

Au XVIème siècle, en particulier, aucune lunette ou télescope n'existait ; et pourtant de prodigieux observateurs comme Tycho Brahé (Danois, 1546-1601) suivaient le mouvement des plus brillantes comètes sur les cartes célestes à l'aide de « quarts de cercle » et autres instruments de mesure angulaire. Tycho travaillait avec l'étonnante précision d'une minute d'arc soit environ $1/30^{\text{ème}}$ du diamètre apparent de la lune (ou une pièce de 1€



Grand quadrant mural de Tycho à Uraniborg, Île de Huene au Danemark.

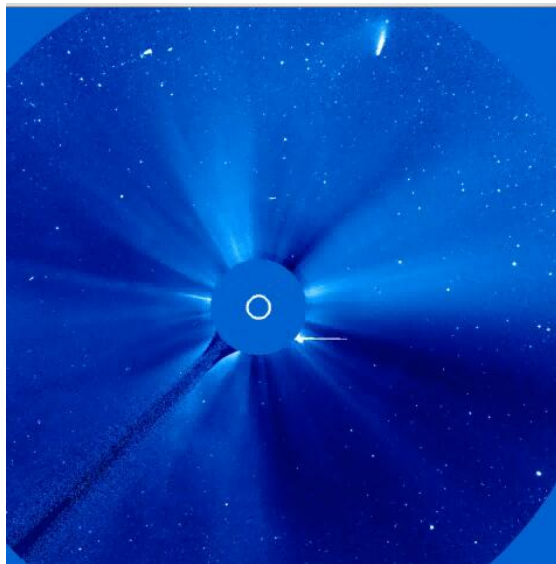
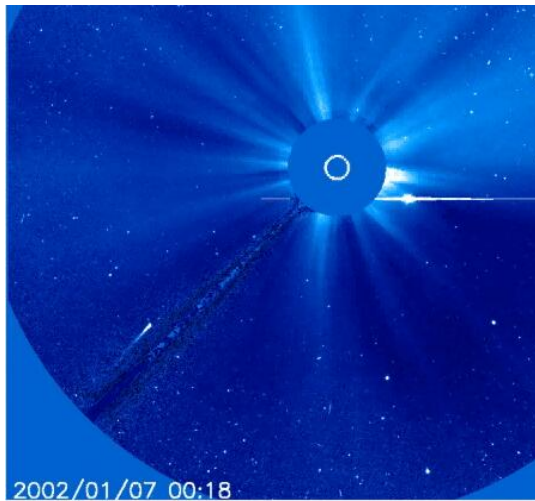
Ah ! si Tycho avait vu cela !

Pouvons-nous observer ces comètes pendant une séance de cours, avec nos élèves ? Bien sûr, Internet sera notre « porte des étoiles ».

Essayons :

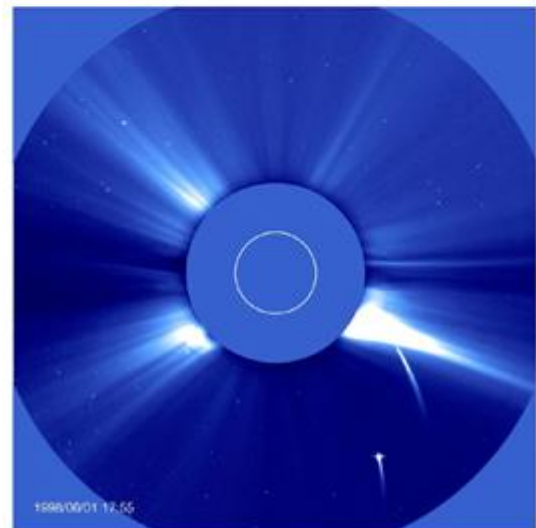
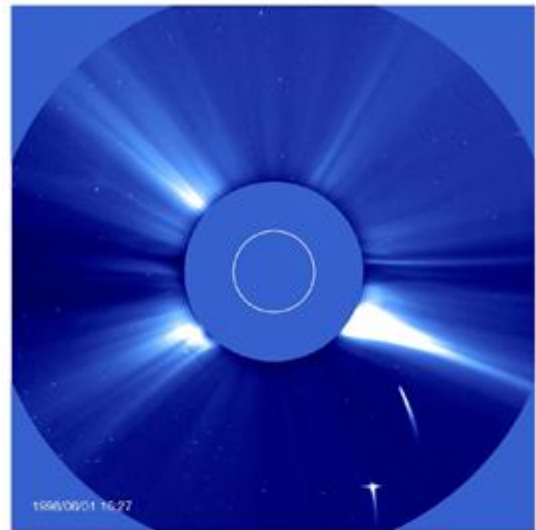
<http://sohowww.nascom.nasa.gov/bestofsoho/Movies/movies2.html>

Sélectionnons « comets » et commençons par "exclusive views of comet P96/Machholz swinging past the sun", en aspirant le film à 2 Mo par exemple. Un spectacle fabuleux se déroule sous nos yeux : celui d'une comète qui file et "enroule" sa trajectoire autour du soleil occulté par un disque noir.



Le limbe solaire apparaît surligné d'un cercle blanc. Admirons l'évolution de la queue cométaire durant ce court ballet spatial. Remarquons la planète Vénus passant proche du soleil (en perspective) et une belle éruption coronale.

Bien d'autres spectacles sont offerts comme celui de deux comètes passant auprès du soleil lors d'une course effrénée.



Passage simultané de deux comètes le 1^{er} juin 1998 près du soleil.

Images provenant du site de la sonde SOLar and Heliospheric Observatory de l'ESA/NASA :

<http://sohowww.nascom.nasa.gov/bestofsoho/images/large/2comets.jpg>

Voir également le film :

« two sun-grazing comets racing toward the sun. »
<http://sohowww.nascom.nasa.gov/bestofsoho/Movies/movies2.html#comets>

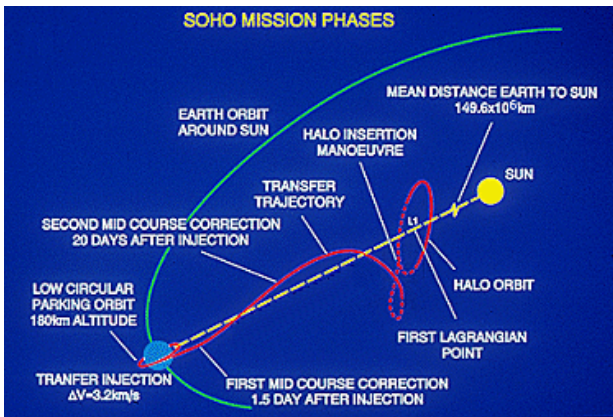
On observe le mouvement des deux objets en l'espace de 88 min. En supposant ces comètes proches du soleil, une échelle des distances parcourues est donnée par le diamètre du cercle solaire représenté en blanc : 1 390 000 km. Les vitesses apparentes ainsi estimées sont de l'ordre de 50 à 100 km.s⁻¹, relativement à l'observateur.

Nous avons une illustration concrète de l'incroyable outil d'exploration et de vulgarisation que constitue l'électronique embarquée à bord de la sonde associée à l'informatique et les réseaux Internet. De tels films accessibles à tous (le plus souvent en direct) étaient inimaginables il y a seulement 20 ans... Qu'en auraient pensé Tycho et les autres savants des siècles passés ?

L'extraordinaire sonde SOHO

Sa position - D'où proviennent ces images ? D'une sonde de l'ESA/NASA lancée le 2 décembre 1995 depuis Cap Canaveral par une fusée Atlas II, sonde prévue pour fonctionner jusqu'en décembre 2009 !

Elle orbite autour du point de Lagrange L_1 situé entre la Terre et le Soleil, là où forces de gravitation solaire, terrestre et force d'inertie d'entraînement s'annulent pour expliquer l'immobilité par rapport à l'axe Terre/Soleil d'un objet placé exactement en L_1 (en négligeant l'influence gravitationnelle lunaire). On rappelle que ce point correspond à un équilibre instable (dans le référentiel Soleil-Terre) et impose à la sonde une correction dynamique permanente permettant de rester à proximité de ce point [1], [2]. Elle se traduit par une orbite autour de L_1 .



On aperçoit le soleil (à droite) ; la Terre et la sonde SOHO orbitant autour de L_1 . Voir l'animation sur le site <http://orbits.esa.int/orbits/science/app/soho.htm>

Position de L_1 donnée par l'équation à notations évidentes :

$$\frac{GM_S}{(SL_1)^2} - \frac{GM_T}{(TL_1)^2} - [\Omega_{T/S}]^2 TL_1 = 0$$

donne $TL_1 \approx 1,5$ millions km

Sur les films téléchargés, on remarque le défilement apparent des étoiles par rapport au référentiel SOHO-soleil. Son origine principale provient de la

rotation de cet axe par rapport au référentiel héliocentrique galiléen appelé référentiel de Copernic (mouvement de la Terre autour du Soleil). Le mouvement de la sonde autour de L_1 n'ayant qu'une influence beaucoup plus faible. En observant les films des jets coronaux, comme <http://sohowww.nascom.nasa.gov/bestofsoho/Movies/movies2.html#flares> , correspondant à un laps de temps de quelques semaines, on observe en direct la marche apparente du Soleil sur un chemin proche de l'écliptique.

Ses instruments - Le site :

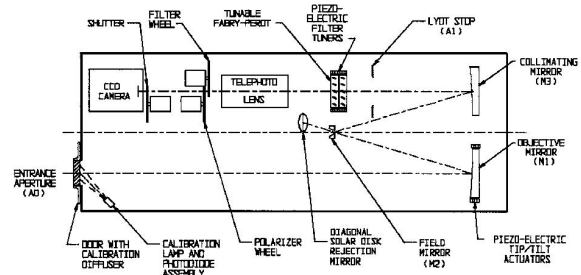
<http://sci.esa.int/science-e/www/object/index.cfm?fobjectid=33379>

nous donne une vue d'ensemble des 12 instruments embarqués dans cette sonde de 1850 kg. Les images cométaires proviennent du coronographe LASCOC (Large Angle and Spectrometric Coronagraph).

Sur le lien

http://lasco-www.nrl.navy.mil/index.php?p=content/handbook/hndbk_4 ,

il nous est précisé que celui-ci est subdivisé en trois sous-instruments (C1, C2 et C3) permettant d'observer de 1,1 à 32 rayons solaires du centre du Soleil ; le disque de ce dernier étant occulté, la lumière solaire directe ne parvient pas sur le détecteur. Il est possible d'observer des astres peu lumineux ou des phénomènes ténus (couronne solaire) autour du disque solaire.



lasco-www.nrl.navy.mil/content/handbook/images/fig4-1.gif
LASCOC C1 (ESA-NASA)

L'ouverture d'entrée AO (4,7cm de diamètre) permet à l'énergie solaire de venir frapper (M1) qui forme l'image du soleil et de la couronne sur le « field mirror » (M2). Celui-ci est percé en son centre afin que l'image du disque solaire ne soit pas réfléchi ; seul le champ périphérique donne une image par le biais de (M3) sur la caméra CCD via un filtrage interférométrique. L'ouverture d'entrée AO (4,7cm de diamètre) permet à l'énergie solaire

de venir frapper (M1) qui forme l'image du Soleil et de la couronne sur le « field mirror » (M2), celui-ci est percé en son centre afin que l'image du disque solaire ne soit pas réfléchi; seul le champ périphérique donne une image par le biais de (M3) sur la caméra CCD via un filtrage interférométrique.

C1, C2, C3 diffèrent par la largeur du champ observable, qui croît respectivement de 1,1 rayons solaires à 32 rayons solaires. La description de C1 montre un coronographe original, fonctionnant par réflexion; C2 et C3 sont au contraire des réflecteurs de conception presque identique au coronographe "classique" de Lyot (1887-1952). Revenons sur Terre et cherchons à interpréter les images vidéo transmises par cette sonde fantastique.

Le « cométoscope »

On se propose de réaliser un montage carton permettant de visualiser le mouvement réel en 3 dimensions de comètes observées par SOHO. Nous essaierons ainsi d'appréhender l'orientation spatiale de leurs trajectoires et leur mouvement réel.

A la découverte des coordonnées polaires

Utilisons une approche déjà imaginée par Newton (1642-1727) qui remarqua que les orbites cométaires s'écartent très peu d'une parabole dans leur partie proche du Soleil; on parlerait en mathématiques de parabole osculatrice à la trajectoire au périhélie (point de passage au plus près du Soleil).

Proposons de tracer un arc de parabole sur papier à l'aide de coordonnées polaires. Pour cela découvrons et utilisons l'équation polaire d'une

$$\text{parabole } r = \frac{p}{1 + \cos \theta}$$

A l'aide d'un rapporteur et d'une règle traçons, sur un carton fort, l'arc pour θ compris entre -90° et $+90^\circ$. On fixera p à la valeur 10 cm.

theta (°)	-90	-70	-50	-30	-10	10	30	50	70	90
r (cm)	10,0	7,5	6,1	5,4	5,0	5,0	5,4	6,1	7,5	10,0

Découpons le carton en suivant le tracé, puis créons un espace vide ou « chemin » en décalant les deux parties du carton découpé que l'on relie par deux languettes collées (fig.1).

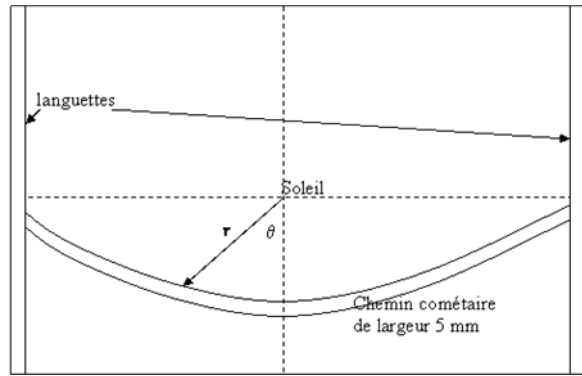


Figure 1 : carton rigide figurant le plan de la trajectoire cométaire ; dans lequel un chemin cométaire a été découpé.

Préparons deux languettes cartonnées de 13x3 cm, rainurées dans leur grand axe par une fente de 3mmx6cm. (fig. 2)

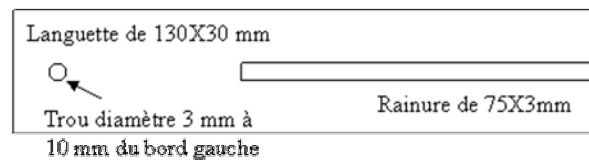
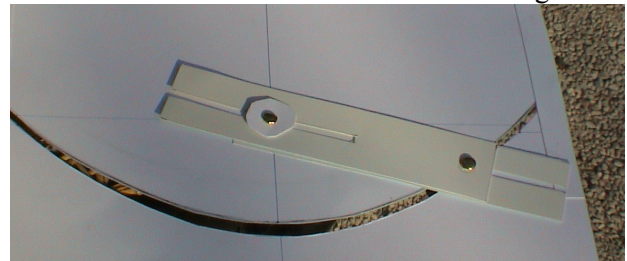


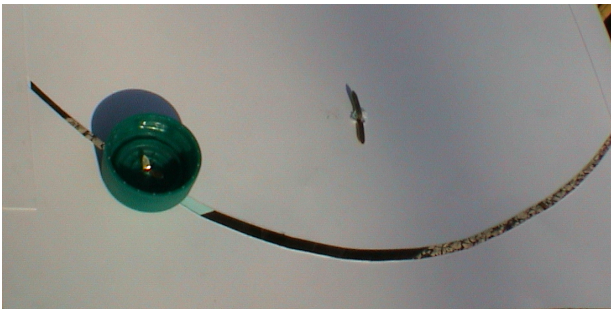
Figure 2 : 2 languettes identiques de carton semi-rigide figurant le rayon vecteur soleil-comète.

On assemble tête-bêche ces deux languettes, puis on place le trou de l'une au niveau du soleil du carton rigide, le trou de l'autre étant sur le chemin cométaire. Deux attaches parisiennes placées au niveau des trous permettent d'articuler l'ensemble des trois cartons : l'une figure le Soleil, l'autre le noyau cométaire.

La version définitive (voir photo ci-dessous) comporte un bouchon de bouteille plastique, placé sous le carton, solidaire de l'attache-tête de comète- qui devient ainsi aisément manipulable. Un disque de carton placé juste sous l'attache-soleil- fait office de rondelle de maintien des languettes.



Cométoscope vue de dessus

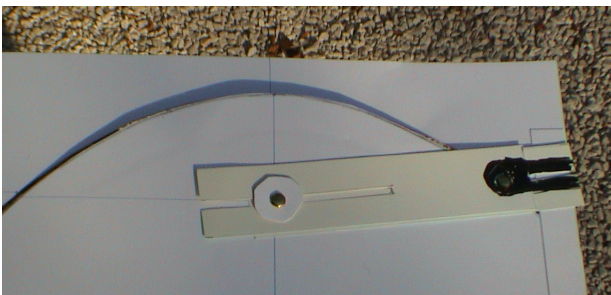
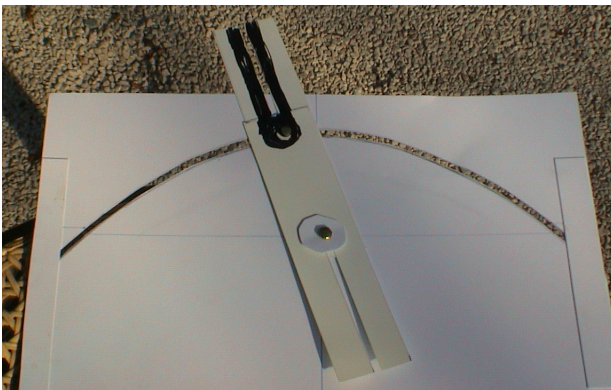


Vue de dessous

Nous sommes maintenant fin prêts pour comprendre les observations des mouvements cométaires.

Hommage à Apian

Représentons la comète sur notre « cométoscope » : un coup de crayon noir autour de l'attache sur la surface de la languette supérieure figure la tête. Deux longs filets de crayon noir le long de la rainure inférieure (placée sur le carton-plan orbital) représentent la queue.



Déplaçons la tête, et remarquons l'évolution de la queue qui s'agrandit à mesure que la comète s'approche du périhélie tout en restant à l'opposé du soleil par rapport au noyau.

Nous venons de modéliser la vieille découverte de Apian (1495-1552) sur le développement et le mouvement de la queue de la grande comète de 1531 (appelée comète de Halley par la suite). La queue peut donc précéder la comète dans son mouvement.



Voir en bas les positions successives du soleil et de la grande comète de 1531

Image provenant du site de la bibliothèque de France : <http://gallica.bnf.fr>

Aller dans « Recherche » :

Puis choisir l' « Auteur » Apianus, enfin sélectionner 6 « illustrations de Astronomicum Caesarum 1540 ». Image 61/67

Quelques applications

Revenons aux observations de SOHO. Visionnons à nouveau le film du passage de la comète Machholz (cf. §I). A l'aide du « cométoscope » proposons une orientation du plan orbital et de l'axe Soleil/Périhélie pour modéliser l'observation filmée : le plan orbital est-il perpendiculaire à la direction observateur (SOHO) – Soleil ? La trajectoire passe-t-elle entre l'observateur et le Soleil ou au-delà du Soleil ? Peut-on rendre compte du retournement de la queue ? D'autres mouvements de comètes peuvent ainsi être visualisés en 3 dimensions.

Remarquons que le modèle d'une queue orientée exactement à l'opposé du Soleil apparaît comme extrêmement simplificateur.

Forme de la queue de poussières

De plus, l'observation attentive de la queue conduit à remarquer la présence de deux composantes inégales constituées respectivement de plasma ou de poussières.



<http://sohowww.nascom.nasa.gov/bestofsoho/Movies/movies2.html#comets>

Comète Hyakutake le 30/4/96 observée à l'aide de C3 : une fine queue de plasma se détache sur la droite de la partie plus large, dite queue de poussière. On constate que la queue de plasma est plus proche de l'axe soleil-noyau que l'autre.

Intéressons-nous à la queue de poussières, la plus déviée par rapport au rayon vecteur Soleil-comète. La théorie de Bredikhin [3] postule qu'une particule de poussière de taille micrométrique est soumise à l'attraction solaire et à une force répulsive de pression de radiation.

Une fois éjectée du noyau cométaire à la vitesse V_0 , de direction opposée au Soleil, la particule peut avoir un mouvement parabolique ou hyperbolique dans le référentiel de Copernic.

Traçons une ligne d'émission particulaire (ou syndyname) sur un papier, à partir d'un mouvement typique de particules toutes éjectées à la même vitesse. Traçons à main levée sur un *papier calque* une allure de trajectoire de particule de poussières (fig. 3) associée à des *positions successives de la particule* au cours du temps. Par souci de simplification, ce mouvement est supposé commun aux particules émises, à un décalage spatial près, lié à la position du point d'émission, c'est-à-dire de la tête cométaire (référentiel de Copernic).

Sur un *papier* traçons une allure de trajectoire cométaire avec des *positions successives de la tête* indicées de (A) à (E). (Référentiel de Copernic). A l'instant t_E où la comète est en (E), une particule est émise ; une autre, émise précédemment lorsque la comète était en (D) est arrivée en (d) à cet instant t_E ; une autre encore, éjectée alors que la comète passait en (C) atteint (d) à ce même instant. Etc....

La courbe reliant les positions des poussières à t_E constitue cette ligne d'émission.

On peut s'intéresser à l'influence du rapport entre vitesse cométaire et vitesse particulaire sur la forme de la queue.

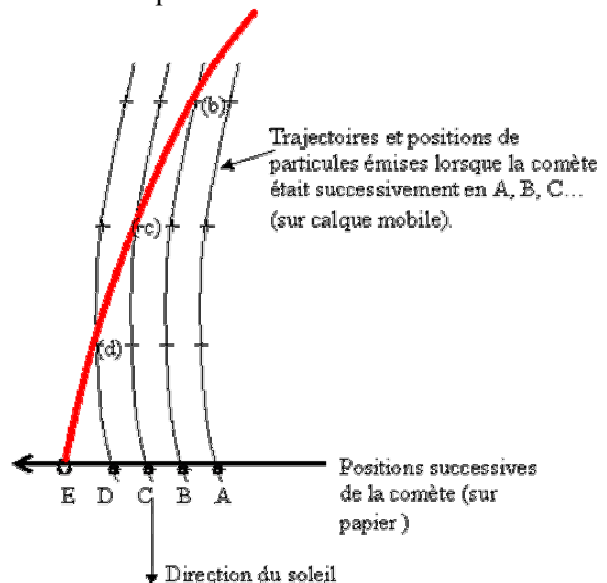


Figure 3 : tracé d'une syndyname par translation successive du calque mobile représentant la trajectoire d'une particule et pointage des positions particulières.

Nous interprétons de cette manière la courbure des chevelures cométaires observées.

Revenons au ballet des comètes. Internet va une fois de plus nous permettre d'améliorer notre compréhension de ces mouvements.

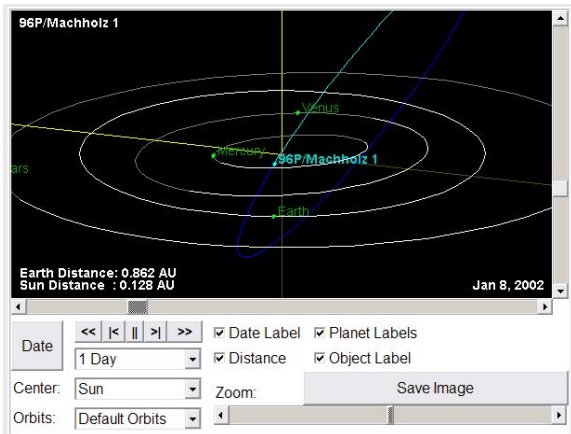
Du carton au logiciel de la NASA Les "Near Earth Objects"

La Nasa a mis sur pied un programme de surveillance des objets susceptibles de se rapprocher dangereusement de la Terre, voire de percuter celle-ci. Dans ce cadre (« Near Earth Objects ») elle a ouvert un site internet permettant de visualiser en 3 dimensions les orbites de ces objets, dont les comètes périodiques : <http://neo.jpl.nasa.gov/>. Choisir « orbit diagrams ».

Quelques exemples de manipulations

Dans le cadre bleu « object number, designation or name », introduisons les noms des comètes dont on veut visualiser la trajectoire.

Commençons par la comète Machholz, écrivons dans le cadre: 96 P un diagramme 3D s'affiche. Puis à l'aide de « date », indiquons celle du film provenant de SOHO, soit le 7/1/2002.



<http://neo.jpl.nasa.gov/>

La modélisation « 3D » du système solaire et des orbites d'astéroïdes ou de comètes (comme 96 P Machholz) telle qu'elle apparaît sur le site NEO de la NASA.

En combinant l'utilisation du cométopscope et de ce logiciel, on peut reconstituer dans l'espace le passage de cette comète. On aura pris soin de maintenir l'axe Terre-Soleil dans une direction perpendiculaire à l'écran.

Hommage à Kepler, Newton et Halley

On peut développer plusieurs études à partir de ce logiciel, en injectant différentes comètes : Halley, Mac Naught ou 2006 P1, Hyakutake ou C1996 B2, 2P/Encke...

On peut également retrouver les lois de Képler, en particulier le rapport période T et demi grand axe a . En accélérant le mouvement, on mesure T , l'intervalle de temps entre deux passages successifs au périhélie, et on obtient $a = (r_{\max} + r_{\min})/2$. On montre que :

$$\frac{T^2}{a^3} = cste$$

Puis à l'aide de la loi de Newton, on mesure la masse du Soleil... On pourra s'inspirer d'un article antérieur sur les satellites artificiels [5].

De même, le schéma ci-dessous (fig.4) présentant les caractéristiques d'une orbite cométaire prend tout son sens après cette approche « expérimentale ».

Remarquons que l'axe Terre-Soleil tourne dans le plan de l'écliptique par rapport à la direction du point vernal γ . Il n'y a coïncidence qu'à l'équinoxe de printemps.

N : nœud ascendant (la comète passe de l'hémisphère sud éclipstique à l'hémisphère nord)

P : périhélie

T , période.

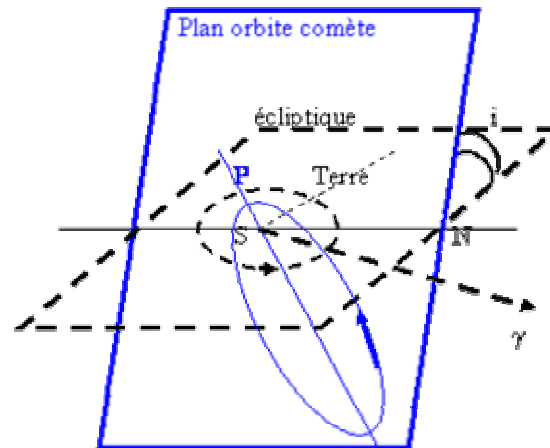
$\omega = \widehat{NSP}$, argument de latitude du périhélie.

$\Omega = \widehat{\gamma SN}$, longitude du nœud ascendant.

i , inclinaison du plan de l'orbite sur l'écliptique.

$q = SP$, distance au périhélie.

e , excentricité.



http://neo.jpl.nasa.gov/cgi-bin/neo_elem?type=NEC

Figure 4 : Elément d'orbites de comètes périodiques.

NASA, fais-moi peur !

Afin de terminer ce voyage sur une impression forte, repartons sur le portail « orbit diagrams ». Introduisons « Apollo », choisissons la date du 8 mai 2007... Mais il y a plus dangereux, à vous de chercher !

Jouer avec « Adonis » vous détendra en pensant à Tintin et Milou.

Merci à la NASA, l'ESA et la Bibliothèque Nationale de France.

Bibliographie :

- [1] Éléments d'astronomie fondamentale par M. Danloux-Dumesnils, p 280-283, chez A. Blanchard, 1985.
- [2] Texte concours d'entrée aux Mines d'Albi 98; bulletin concours 1998 p 523, UPS.
- [3] Les comètes par Jean Dufay, col. « Que sais-je ? », p 86-91, PUF 1966.
- [4] Astronomicum caesarum par Apianus, Ingolstadt, in folio, 1540. voir site BNF
- [5] Le TP NASA par P. Le Fur, bull. Un. Prof. Phys. Chim., octobre 2003, vol 97, n°857 (1), p 1341-1348.

■