

A PROPOS DE COMETES

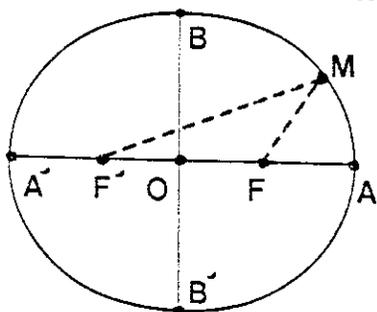
Les comètes sont des petits astres du système solaire formés, semble-t-il, d'un mélange de glaces et de grains de matière solide. Lorsqu'un noyau cométaire se rapproche du Soleil, les composants volatils se subliment et entraînent avec eux les poussières solides. Une atmosphère passagère se forme, à l'aspect de chevelure diffuse, qui s'étire dans le sens opposé à celui du Soleil en formant une ou plusieurs queues qui, depuis la Terre, peuvent paraître spectaculaires.

De toutes les comètes, la plus célèbre est sans doute la comète de Halley qui, tous les 76 ans, revient dans le système solaire interne. Elle repassera au périhélie le 9 février 1986. En mars de la même année, lorsqu'elle traversera le plan orbital de la Terre, quatre sondes spatiales automatiques survoleront sa chevelure. Cette "première" devrait nous permettre d'obtenir des images du noyau, d'identifier les processus physico-chimiques se développant dans la chevelure, de déterminer la composition des poussières, et d'étudier l'interaction entre la comète et le vent solaire.

La proximité de ces missions spatiales, qui seront complétées par un vaste effort d'observation au sol des comètes en général et de la comète de Halley en particulier, font qu'on parle beaucoup des comètes actuellement. Nous aurons sans doute l'occasion de reparler ici de la comète de Halley. Mais, dès à présent, on peut remarquer que les comètes peuvent fournir aux enseignants divers thèmes d'exercices élémentaires sur les ellipses, les lois de Képler, les magnitudes, etc...

1. QUELQUES RAPPELS DE GEOMETRIE TRES ELEMENTAIRE...

Les sections coniques sont des intersections entre cônes à section droite et plans. Si un plan coupe complètement la surface d'un cône, l'intersection est une ellipse ou, éventuellement, un cercle. Sinon, l'intersection peut être une parabole ou une hyperbole.



Une ellipse peut tout simplement être définie comme l'ensemble des points M dont la distance à deux points fixes FF' appelés foyers est une constante. Les géomètres ont coutume de désigner par a la longueur du demi-grand axe passant par FF' (OA), par b la longueur du demi-petit axe perpendiculaire à FF' (OB), par c la demi distance entre les foyers (OF), et par e ou excentricité le rapport c/a .

Question 1 : Tracer une ellipse, à l'aide d'une ficelle non élastique fixée à ses deux extrémités. On pourra prendre une ficelle longue de 15 cm et deux foyers distants de 14,5 cm pour obtenir une représentation approximative de l'orbite de la comète de Halley.

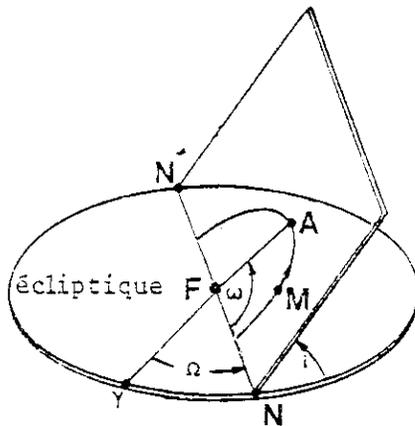
Question 2 : Déterminer, pour une ellipse quelconque, c en fonction de a et b en appliquant la définition aux points A et B.

Question 3 : Expliciter e en fonction de a et b . Quelle est la valeur de e lorsque l'ellipse est un cercle ?

2. LES LOIS DE KEPLER ET LE MOUVEMENT DES COMETES

D'après les lois de Képler, les orbites décrites par les corps du système solaire sont des ellipses dont le Soleil occupe l'un des foyers F. Les aires balayées par le rayon vecteur FM pendant des temps égaux sont égales. Le rapport a^3/T^2 du cube du demi-grand axe au carré de la période de révolution sidérale est une constante.

En première approximation, un noyau cométaire décrit une ellipse autour du Soleil. Dans l'espace, cette ellipse, qui n'est pas en général dans le plan de l'orbite terrestre (écliptique), est définie par 5 paramètres, plus un 6ème paramètre qui situe la comète dans le temps :



- Ω longitude du noeud ascendant N (intersection entre l'écliptique et le plan orbital cométaire), mesurée à partir de la direction du point vernal γ ($F\gamma$, FN)
- i inclinaison du plan orbital sur l'écliptique
- ω distance angulaire entre le noeud ascendant et le point le plus proche du Soleil ou périhélie (FN , FM), appelée argument du périhélie
- e , excentricité de l'orbite
- q distance au périhélie ($FA = a(1 - e)$)
- T instant de passage au périhélie

Question 4 : Quelle est la valeur de la constante a^3/T^2 dans le système solaire ? On fera le calcul pour la Terre, dont le demi-grand axe est, par définition, égal à une unité astronomique (u.a) et dont la période de révolution orbitale est égale à une année.

Question 5 : La distance moyenne de la comète de Halley au Soleil (a) est égale à 17,8 u.a. En déduire sa période de révolution sidérale. Elle est passée au périhélie en 1910,3. Quand y repassera-t-elle, en première approximation ? Son excentricité est égale à 0,967. Calculer sa plus petite distance au Soleil FA (au périhélie) et sa plus grande distance au Soleil FA' (à l'aphélie).

Question 6 : La comète Encke a une période sidérale de 3,3 ans. C'est d'ailleurs la plus petite période cométaire connue. Quelle est, en unités astronomiques, la distance moyenne a de cette comète au Soleil ? Son excentricité est égale à 0,85. En déduire la distance c du centre de son orbite au Soleil.

Question 7 : Dans "Hector Servadac", Jules Verne décrit une comète imaginaire dont la période de révolution est de 2 ans alors que sa distance au Soleil à l'aphélie est de 820 millions de km. Que peut-on en penser ?

3. LE MOUVEMENT REEL DES COMETES

Des points matériels s'attirent en raison inverse du carré de leur distance et proportionnellement à leur masse. Dans l'hypothèse où l'un des deux points est fixe, on démontre... et c'est là un des grands classiques de la mécanique... que la courbe décrite par l'autre point M est contenue dans un plan et a pour équation, en coordonnées polaires r (distance FM), ϑ (angle entre un axe fixe passant par F et FM)

$$r = \frac{de}{1 + e \cos \vartheta}$$

On peut établir que c'est là l'équation d'une conique d'excentricité e dont la directrice est à une distance $d = b^2/c$ de F. La conique est une ellipse et l'énergie est négative si $e < 1$; c'est une parabole et l'énergie est nulle si $e = 1$; enfin c'est une hyperbole et l'énergie est positive si $e > 1$.

Ainsi, s'il n'existait dans l'univers qu'un Soleil et une comète (de masse négligeable par rapport à celle du Soleil), la gravitation universelle impliquerait que la comète décrit une conique autour du Soleil immobile. Mais (heureusement pour nous d'ailleurs), il y a aussi des planètes dans le système solaire. Les orbites cométaires sont donc perturbées par l'action gravitationnelle des planètes massives, et évoluent dans le temps.

D'autres perturbations gravitationnelles jouent sur les comètes. Il semble qu'il existe un vaste nuage de comètes appelé nuage de Oort, en attente entre 40 000 et 150 000 u.a. du Soleil. Si le système solaire était isolé, ce réservoir de comète serait stable, et aucune comète ne serait jamais observable depuis la Terre. Mais, sous l'influence de perturbations engendrées par les étoiles proches, les orbites de ces objets situés aux confins du système solaire sont susceptibles de se modifier. Alors, la distance de leur périhélie au Soleil peut décroître, et ces objets glacés, qui sont restés inchangés depuis l'origine du système solaire, peuvent venir nous apporter un témoignage sur la composition primitive de notre système...

En fait, il semble bien que des centaines de milliards de comètes peuplent le système solaire. Et une infime partie seulement d'entre elles ont pu être observées depuis la Terre. Moins de 800 comètes distinctes sont actuellement connues et répertoriées. Une centaine d'entre elles circulent sur des ellipses faiblement allongées et ont des périodes inférieures à 20 ans ; leurs orbites semblent résulter de la capture par Jupiter de comètes qui se déplaçaient antérieurement sur des orbites plus allongées. La plupart des comètes évoluent sur des orbites elliptiques très allongées, ou même sur des orbites faiblement hyperboliques provenant d'ellipses ayant subi des perturbations gravitationnelles.

Il est encore d'autres perturbations qui influent sur le mouvement des comètes lors de leur passage au périhélie. Sous l'effet du rayonnement solaire, des jets de gaz et de poussières s'échappent du noyau ; ils induisent par réaction une force dans la direction opposée. Mais les comètes, (tout comme les planètes d'ailleurs), tournent en permanence autour de leur axe de rotation. La composition de la force de réaction avec la rotation propre fait gagner de l'énergie à la comète si la rotation est directe, et lui en fait perdre si elle est rétrograde. Ainsi s'expliquent les perturbations non gravitationnelles par lesquelles des comètes repassent un peu plus tard ou un peu plus tôt au périhélie que ne le prévoient les calculs gravitationnels.

Question 8 : Une ellipse est l'ensemble des points M dont la distance r à un point fixe F est égale à la distance à une droite fixe D, multipliée par une constante a inférieure à 1. En déduire son équation en polaires en fonction de $\theta = (\text{Fx}, \text{FM})$; on supposera que D est perpendiculaire à Fx et la distance de F à D sera appelée d.

Question 9 : Etablir l'expression de d en fonction des demi-grand axe a et demi-petit axe b.

Question 10 : Quelle serait la période de révolution d'un noyau cométaire du nuage de Oort, situé par exemple à 100 000 u.a. du Soleil en moyenne ? Comparer cette distance à celle de l'étoile la plus proche du Soleil, α Centauri.

Question 11 : Comment distinguer une comète sans queue d'une nébuleuse ? Comment mettre en évidence le fait qu'une comète n'est pas, ainsi que le croyaient les anciens, située dans l'atmosphère terrestre ?

4. LA MAGNITUDE DES COMETES

Lorsqu'une comète est très éloignée du Soleil, son éclat provient uniquement de la lumière solaire réfléchi sur le noyau. La luminance totale J varie donc, en fonction de la distance r au Soleil et Δ à l'observateur terrestre selon une loi de la forme $J = J_0/r^2\Delta^2$

Lorsque la comète se rapproche du Soleil (typiquement, lorsqu'elle est à moins de 1 ou 2 u.a.), elle développe une chevelure et une queue qui deviennent très lumineuses sous l'effet de la diffusion du rayonnement solaire sur les poussières et surtout de sa fluorescence sur les gaz émis. On estime alors que la luminance varie selon une loi de la forme $J = J_0/r^n\Delta^2$

Le paramètre n est en général compris entre 2 et 8, avec une valeur moyenne de 4. Il semble que n soit plus élevé (ce qui signifie que la magnitude évolue plus rapidement) pour une comète à courte période que pour une comète à orbite quasi-parabolique. Pour une même comète, n n'est pas rigoureusement constant dans le temps. On observe parfois des asymétries lors du passage au périhélie ou encore des sursauts de magnitude associés à des fragmentations du noyau.

En terme de magnitude, avec $m - m_0 = 2,5 \log J/J_0$, la loi précitée s'écrit $m \sim m_0 + 2,5 \log r + 5 \log \Delta$

Il est donc possible d'estimer, de façon approximative, la valeur que prendra la magnitude d'une comète.

Question 12 : Un jour donné, une comète est à 0,389 u.a. de la Terre et à 0,806 u.a. du Soleil. La magnitude apparente est égale à 3 et le paramètre n est estimé égal à 4. Quelle serait la valeur de sa magnitude, si elle était à 1 u.a. de la Terre et à 1 u.a. du Soleil ?

Question 13 : Six jours plus tard, la même comète est à 1 u.a. de la Terre et à 0,912 u.a. du Soleil; quelle est alors sa magnitude apparente ?

Question 14 : Peut-on déterminer avec précision la longueur d'une queue cométaire ? Une comète périodique demeure-t-elle inchangée à chacun de ses retours vers le Soleil ?

Question 15 : Nous récapitulons ici les caractéristiques orbitales actuelles de la comète de Halley, ainsi que l'ordre de grandeur de sa magnitude

$$\Omega = 58,153^\circ$$

$$i = 162,238^\circ$$

$$\omega = 111,853^\circ$$

$$e = 0,967$$

$$q = 0,587 \text{ u.a.}$$

Passage au périhélie 09.02.1986

$$m = 5 + 5 \log \Delta + 13,1 \log r \text{ avant périhélie}$$

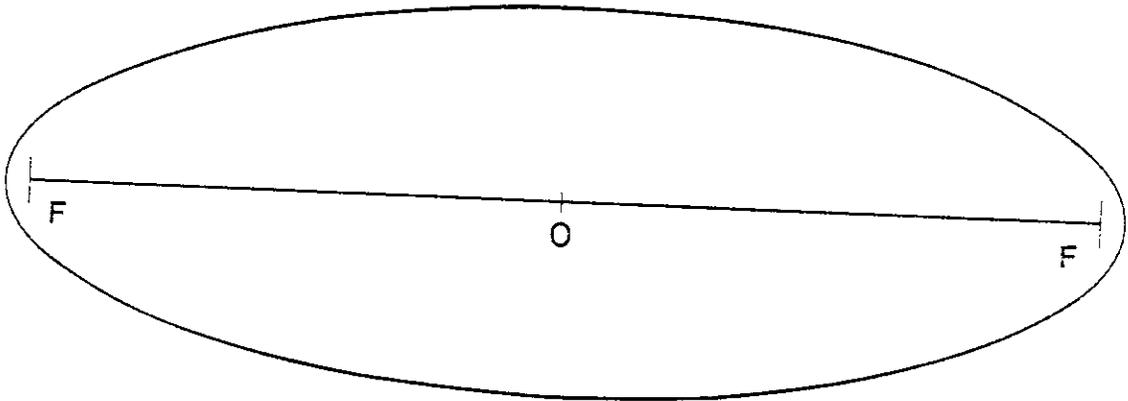
$$m = 7,5 + 5 \log \Delta + 10 \log r \text{ après périhélie}$$

Représenter la comète dans l'espace. Quand son orbite coupe-t-elle l'écliptique ? Le 13 mars 1986, la comète sera survolée par la sonde européenne Giotto, qui aura quitté la Terre en juillet 1985. Elle sera alors à 0,89 u.a. du Soleil et à 0,98 u.a. de la Terre. Pourquoi cette époque de survol a-t-elle été choisie ? Quelle sera alors, depuis la Terre, la magnitude apparente de la comète ?

5. REPONSE AUX QUESTIONS

Question 1 :

Ci-dessous, dessin à l'échelle de l'orbite de la comète de Halley



Question 2

$$F'A + FA = \text{constante} = 2a$$

$$F'B + FB = \text{constante} = 2a = 2 \frac{FB}{\cos \theta}$$

$$FB^2 = a^2 = b^2 + c^2 \quad c = \sqrt{a^2 - b^2}$$

Question 3

$$e = c/a = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a} = \sqrt{1 - b^2/a^2}$$

$$0 \leq e < 1 \quad e = 0 \quad \text{l'ellipse est un cercle}$$

Question 4

$$a^3/T^2 = 1$$

Question 5

$$T = a^{3/2} = 75,1 \text{ ans}$$

Date de retour au périhélie, en négligeant les perturbations gravitationnelles ou non gravitationnelles = 1985,4

$$FA = a - c = a(1-e) = 0,59 \text{ u.a.}$$

$$FA' = a + c = a(1+e) = 35,01 \text{ u.a.}$$

Question 6

$$a = T^{2/3} = 2,22 \text{ u.a.}$$
$$c = ea = 1,38 \text{ u.a.}$$

Question 7

$$a = T^{2/3} = 1,59 \text{ u.a.}$$
$$FA' = a(1-e) = 5,47 \text{ u.a.}$$
$$e = 2,44$$

La comète n'est pas périodique !

Question 8

$$r = MF = eMH$$
$$r = e(d - r \cos \theta)$$
$$r = de / (1 + \cos \theta)$$

Question 9

$$r_A = de / (1 - e) = a(1 - e)$$
$$d^A = (1 - e^2) a / e = (1 - c^2/a^2) a^2/c = b^2/c$$

Question 10

$T = a^{3/2} = 31,6$ millions d'années
 $100\,000 \text{ u.a.} \sim 1,5 \times 10^{13} \text{ km}$
 α Centauri est à environ 4,22 années lumières
1 année lumière $\sim 9,46 \times 10^{12} \text{ km}$
La distance de α Centauri est de l'ordre de 2,7 fois la distance du noyau cométaire au Soleil.

Question 11

La comète présente un déplacement par rapport aux étoiles perceptibles en quelques heures. Des mesures de parallaxe mettent en évidence le fait qu'une comète n'est pas un phénomène atmosphérique.

Question 12

A 1 u.a. de la Terre et du Soleil, la magnitude est égale à m_0

$$3 = m_0 + 10 \log 0,806 + 5 \log 0,389$$
$$m_0 = 6,0$$

Question 13

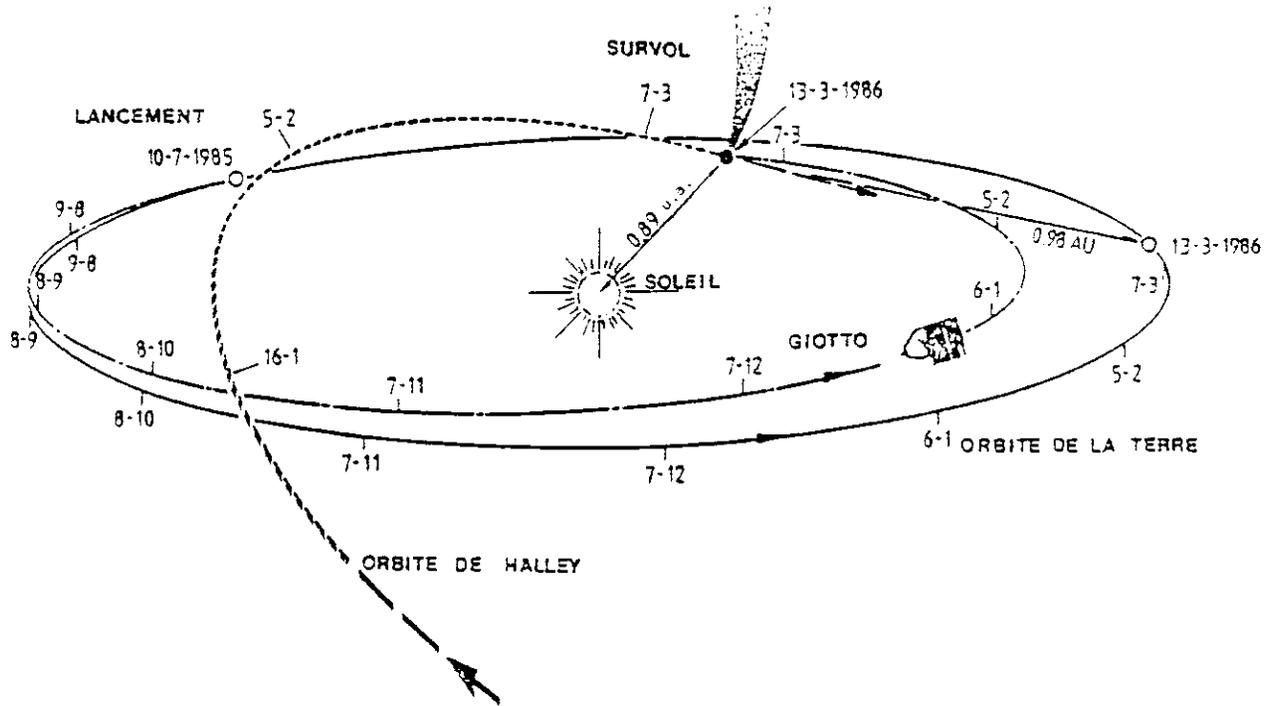
$$m = 6,0 + 10 \log 0,912 + 5 \log 0,397 = 3,6$$

Question 14

La queue s'amenuise progressivement. A chacun de ses retours, des gaz s'échappent de la comète entraînant avec eux des poussières, et le noyau se tarit en devenant moins actif.

Question 15

La figure ci-dessous présente l'orbite de la Comète de Halley, ainsi que la trajectoire de la sonde Giotto. On remarque que la comète a une orbite rétrograde par rapport à la Terre ($i > 90^\circ$), et que donc les vitesses relatives des sondes spatiales et de la comète seront considérables (de l'ordre de 70 km.s^{-1}). La comète traverse l'écliptique au début du mois de novembre 1985 (noeud ascendant) et en mars 1986 (noeud descendant). C'est alors que les sondes spatiales la survoleront, afin de minimiser l'énergie au lancement, tout en restant à proximité du passage au périhélie. Le 13 mars 1986, la magnitude apparente sera voisine de 5 ; mais, avec $\alpha = 20 \text{ h } 3,9 \text{ mn}$ et $\delta = -21^\circ 21'$, les conditions d'observations seront plus que médiocres dans l'hémisphère nord. A la fin novembre 1985, la magnitude apparente sera de l'ordre de 6 et, avec $\alpha = 1 \text{ h } 17 \text{ mn}$, $\delta = +14^\circ 32'$, la comète sera relativement bien observable sous nos latitudes.



Références bibliographiques

J. Dufay - Les comètes - PUF, Que sais-je, 1966
 P. Véron et J.C. Ribes - Les comètes de l'antiquité à l'ère spatiale, Hachette, 1979
 M. Festou et P. Lamy - Les comètes "La Recherche", 118 p. 46, 1981
 C. Bertaud - "L'Astronomie" (SAF) n° spécial comètes, 95, mai 1981
 A.C. Levasseur-Regourd - Les comètes, Tome II de l'Encyclopédie du Bureau des Longitudes, 2ème édition, 1984

Annie-Chantal Levasseur Regourd
 (Service d'Aéronomie du CNRS)

 LE PARADOXE DE L'EXPANSION

C'est vers 1930 que Hubble a mis en évidence le phénomène du décalage vers le rouge des spectres des galaxies lointaines, et ceci d'autant plus marqué que ces galaxies sont plus éloignées. Si on explique ce phénomène par un effet Doppler, il faut en conclure que ceci se traduit par un mouvement de fuite, tout se passant comme si nous occupions une position centrale dans l'univers.

Imaginons que le système solaire soit en expansion et plus particulièrement le système Terre-Lune (distance Terre-Lune $d_0 = 380\ 000$ km). Pour fixer les idées, nous allons donner à la Lune une vitesse d'expansion de $380\ 000$ km/h, c'est-à-dire que toutes les heures la distance Terre-Lune augmente brutalement de la distance initiale d_0 . Si t est la durée écoulée depuis l'instant initial, la distance Terre-lune est égale à : $d = d_0 + d_0 (t - 1) = d_0 t$

Imaginons une sonde voyageant vers la Lune à la vitesse constante de $38\ 000$ km/h.

Va-t-elle atteindre la Lune? Et si oui, au bout de combien d'années ?

Jean-Paul Parisot

(réponse page 28)