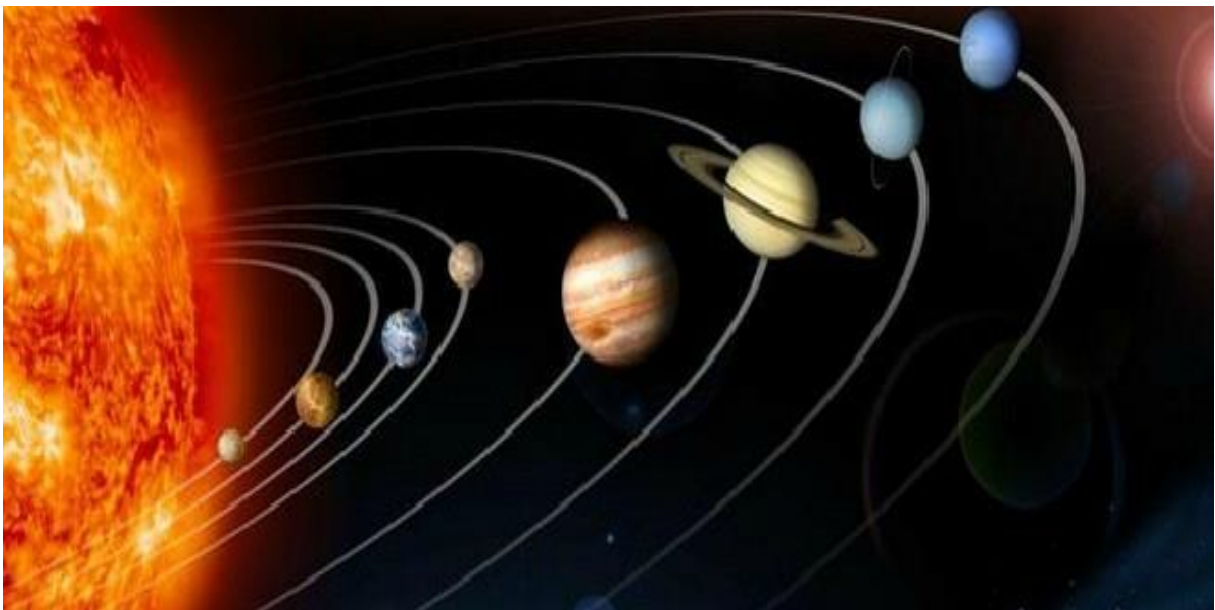


Mini-projet de Physique : La comète de Halley

Des lois de Kepler à la Gravitation universelle de Newton



GANNA Malek-Mahmoud & ATAKOUI Yann Loïc

Aero 1PR1

Mars-Avril 2020

Sommaire :

I-Introduction et objectifs

II- Les lois de Kepler

- A. 1ère Loi de Kepler : la loi des orbites (1609)
- B. 2ème Loi de Kepler : la loi des aires (1609)
- C. 3ème Loi de Kepler : la loi des périodes (1619)

III. Loi de la Gravitation Universelle

- A. Force attractive en $1/r^2$
- B. Conservation du moment cinétique
- C. Conservation de l'énergie mécanique

IV- Conclusion

V- Annexes

I-Introduction et objectifs :

Ce Mini-Projet se base sur l'étude du mouvement de la comète de Halley, qui orbite autour du Soleil, et passe de manière cyclique à proximité de la Terre, d'où elle est observable tous les 75 ans environ.

Cette comète, "découverte" par Edmond Halley, qui prédit le prochain passage du corps, et qui lui donne son nom, est en réalité observable depuis la nuit des temps par des peuples anciens, mais qui associent chacun de ses passages à des comètes différentes. En raison de tout cet arrière-plan, c'est aujourd'hui la comète la plus célèbre de l'univers.

L'objectif de ce Mini-Projet est de vérifier les 3 lois de Kepler sur le mouvement des corps célestes, et d'établir l'expression de la loi de Gravitation Universelle de Newton.

II- Les lois de Kepler :

A. 1ère Loi de Kepler : la loi des orbites (1609)

- 1) Voir annexes pour le tableau complet mais pour l'étude on va prendre un extrait du tableau (une quinzaine de points).

date	x (u.a)	y (u.a)
01/01/1950	-35,14	0,3
01/01/1955	-34,36	1,25
01/01/1960	-32,89	2,16
01/01/1965	-30,53	3,03
01/01/1970	-27	3,76
01/01/1972	-25,25	4
01/01/1974	-23,3	4,29
01/01/1976	-21,1	4,44
01/01/1978	-18,52	4,6
01/01/1980	-15,52	4,62
01/01/1982	-11,9	4,34
01/01/1983	-9,73	4,12
01/01/1984	-7,25	3,76
01/06/1984	-6,1	3,55

- 2) A) $F_1(0 ; 0)$; $F_2(-34,5 ; 0)$

B)

MF1	MF2	MF1+MF2	Demi-Grand Axe (a) €
35,1412806	0,49203658	35,6333172	17,81665858
34,3827297	1,30942736	35,692157	17,84607852
32,960851	2,85047364	35,8113247	17,90566233
30,6799902	5,19512271	35,8751129	17,93755647
27,2605503	8,61394799	35,8744982	17,93724912
25,5648685	10,3077641	35,8726325	17,93631627
23,6916462	12,2272892	35,9189354	17,95946768
21,5620871	14,3539576	35,9160447	17,95802237
19,0827252	16,8692887	35,9520138	17,97600692
16,1930479	19,7771914	35,9702393	17,98511965
12,6667123	23,258506	35,9252183	17,96260913
10,5663286	25,3569478	35,9232764	17,96163818
8,16701292	27,755857	35,92287	17,96143498
7,05779711	28,8691011	35,9268982	17,96344912

- C) $MF1 + MF2 = \text{constante} = 2.a \approx 35,8$

Donc la trajectoire de la comète est bien une ellipse avec $a \approx 17,9$ (demi-grand axe)

D)

Demi-Grand Axe (a) e		p
17,81665858	0,97029979	1,04260103
17,84607852	0,96870021	1,09967364
17,90566233	0,96547671	1,21498367
17,93755647	0,96376003	1,27655491
17,93724912	0,96377655	1,27596209
17,93631627	0,96382667	1,27416269
17,95946768	0,96258421	1,31879316
17,95802237	0,96266168	1,31600856
17,97600692	0,96169856	1,35064303
17,98511965	0,96121129	1,36817953
17,96260913	0,96241587	1,32484486
17,96163818	0,96246789	1,32297453
17,96143498	0,96247878	1,32258309
17,96344912	0,96237086	1,32646285

Donc $e \approx 0,96402944$ et $p \approx 1,26688467$

3)

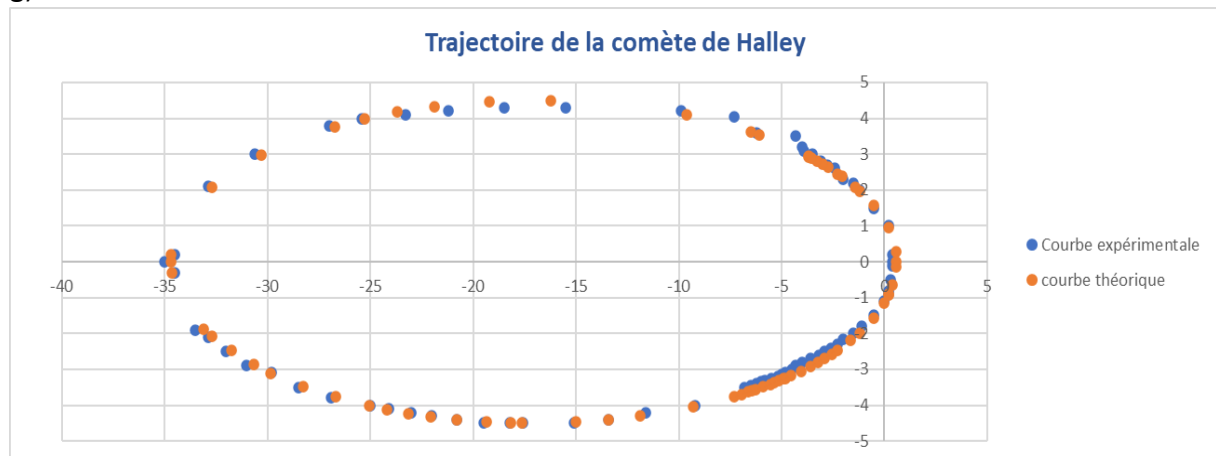
r	cos teta	sin teta	teta	r(teta)	écart au ^2	Xth	Yth	Somme des écarts	770,285752
35,1412806	-0,99996356	0,00853697	3,13305558	22,0671046	170,934078	-22,0663004	0,18838617		
34,3827297	-0,99933892	0,03635546	3,10522918	21,8531381	156,990665	-21,8386914	0,79448092		
32,960851	-0,99785045	0,06553229	3,07601337	21,3596162	134,58865	-21,3137026	1,39974453		
30,6799902	-0,99511114	0,09876144	3,04266995	20,5072983	103,483662	-20,4070409	2,0253303		
27,2605503	-0,99044222	0,13792825	3,00322329	19,201382	64,9501933	-19,0178595	2,64841302		
25,5648685	-0,98768355	0,15646472	2,98448239	18,5051035	49,8402819	-18,2771863	2,89539584		
23,6916462	-0,98346902	0,18107648	2,95951173	17,5337569	37,9196006	-17,2439067	3,17495106		
21,5620871	-0,97856946	0,20591699	2,93419197	16,5253396	25,3688251	-16,1711927	3,40284814		
19,0827252	-0,97051128	0,24105572	2,89813915	15,0972848	15,8837353	-14,6520851	3,6392868		
16,1930479	-0,958436	0,28530762	2,85226528	13,3663971	7,98995458	-12,8108362	3,81353499		
12,6667123	-0,9394703	0,34263035	2,79187736	11,3267825	1,79541184	-10,6411758	3,88089939		
10,5663286	-0,92084965	0,38991784	2,74105029	9,85094746	0,51177018	-9,07124153	3,84106013		
8,16701292	-0,88771746	0,46038864	2,6631597	7,9969439	0,02892347	-7,09902676	3,68170215		
7,05779711	-0,86429234	0,50298981	2,61453809	7,05779711	1,2332E-19	-6,1	3,55		

A l'aide du solveur, on a obtenu :

e	0,9400617
p	1,32342076

Cela confirme bien les expressions de e et de p.

g)



B. 2ème Loi de Kepler : la loi des aires (1609)

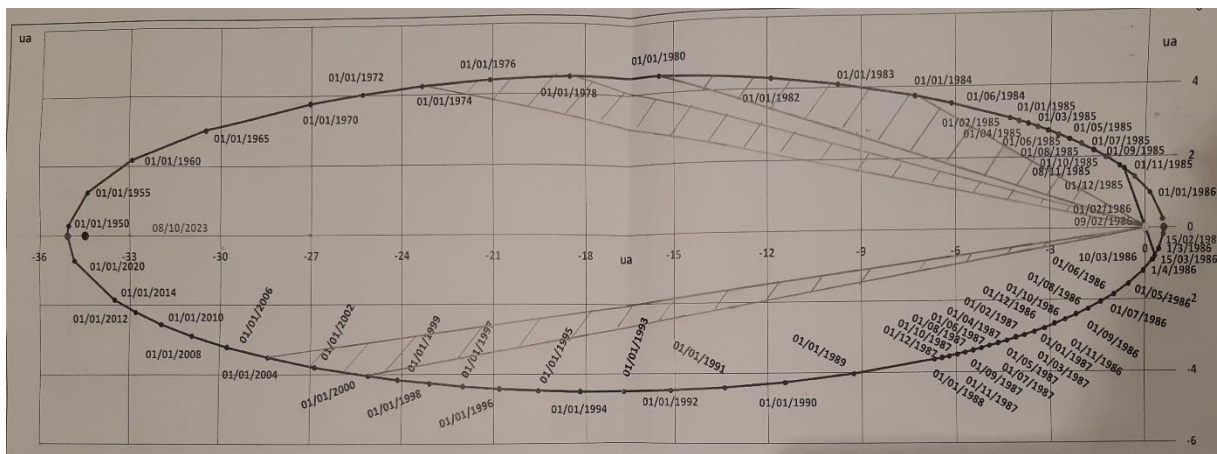
Dates	Base(u.a)	Hauteur(u.a)	Aire(u.a^2)	Vitesse aréolaire(u.a^2/an)
01/01/1974	4,75	5,6	13,3	3,325
01/01/1978				
01/01/1980				
01/01/1984	8,04	3,09	12,4218	3,10545
01/01/2000	3,3	8,1	13,365	3,34125
01/01/2004				

La constante des aires :

$$C = 2 * ((3,325 + 3,10545 + 3,34125) / 3) = 6,514 \text{ ua}^2/\text{an}$$

Sachant que l'aire d'une ellipse est donnée par $S = \pi ab$ avec a (le demi-grand axe) et b (le demi-petit axe), on peut donc retrouver la période de la comète :

$$\text{Période } T = \frac{\text{Aire}}{\text{Vitesse Aréolaire}} = \frac{\pi * 17,9 * 4,5}{3,257} \approx 77,7 \text{ ans}$$



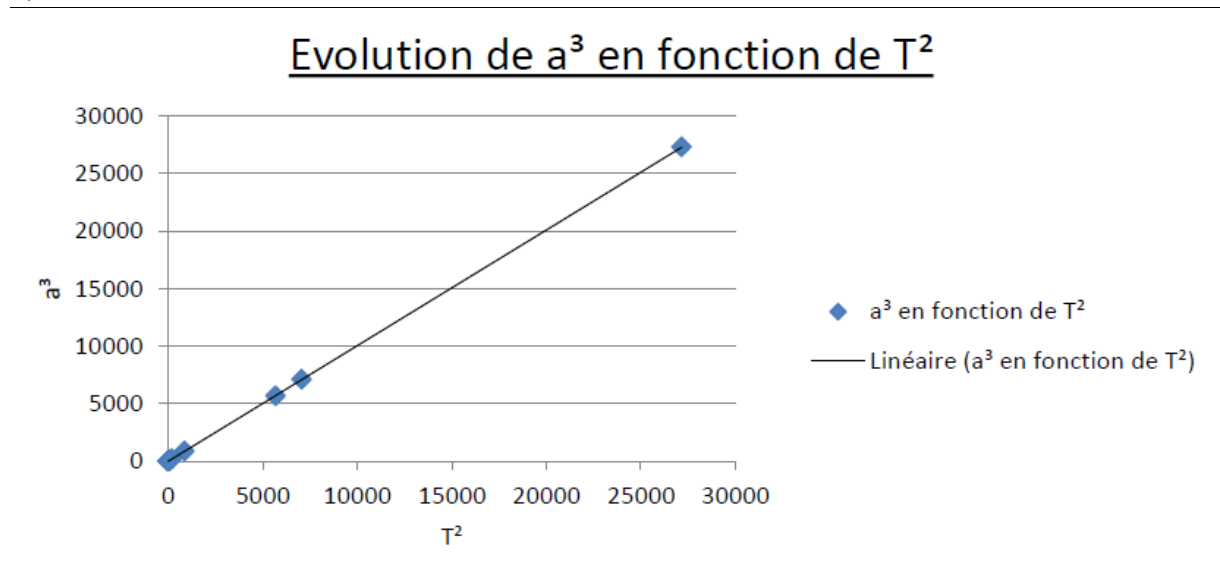
C. 3ème Loi de Kepler : la loi des périodes (1619)

1)

Astre	a	T	a^3	T^2	a^3/T^2
Mercure	0,3871	0,2408	0,05800555	0,05798464	1,00036053
Vénus	0,7233	0,6152	0,37840372	0,37847104	0,99982212
Terre	1	1	1	1	1
Mars	1,5237	1,8808	3,53751592	3,53740864	1,00003033
Jupiter	5,2026	11,862	140,819017	140,707044	1,00079579
Saturne	9,5547	29,457	872,270463	867,714849	1,00525013
Uranus	19,218	84,02	7097,81323	7059,3604	1,00544707
Neptune	30,109	164,77	27295,3706	27149,1529	1,00538572
Halley	17,8341	76	5672,22687	5776	0,98203374
Encke	2,2145	3,3	10,8599307	10,89	0,99723882
Biela	3,5253	6,62	43,8115121	43,8244	0,99970592
Tuttle	5,7016	13,5	185,348996	182,25	1,01700409
Tempel 1	3,1238	5,51	30,4824354	30,3601	1,00402948
Tempel 2	3,0684	5,47	28,8892271	29,9209	0,96551999
Arrest	3,495	6,51	42,6915124	42,3801	1,00734808
Pons-Winnecke	3,424	6,37	40,142209	40,5769	0,98928723
Faye	3,835	7,52	56,4022079	56,5504	0,99737947
Brorsen	3,1	5,46	29,791	29,8116	0,99930899

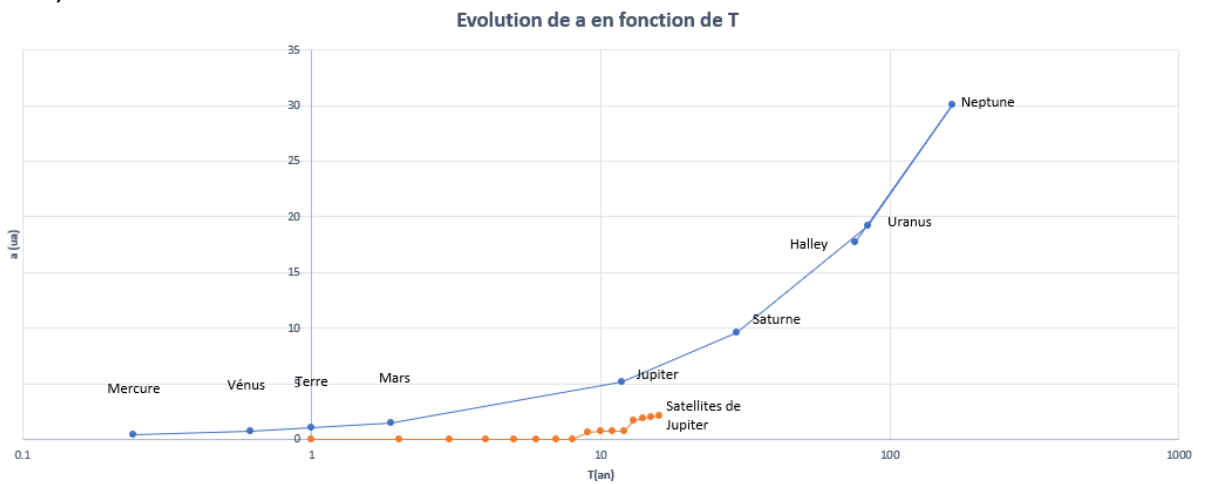
Grace au tableau précédent, nous venons de vérifier la troisième loi de Kepler car nous constatons que le rapport $\frac{a^3}{T^2}$ est toujours environ égal à une constante (=1).

2)



Nous pouvons en conclure que ce rapport est linéaire, ainsi la constante est unique et est égale à 1.

3) Et 4)



5) La 3^{ème} loi de Kepler est vérifiée.

III. Loi de la Gravitation Universelle

A. Force attractive en $1/r^2$

1) 2) et 3)

Pour passer des u.a en km, on multiplie par $1,495 \cdot 10^8$ et en 1 journée, il y a 86400s.

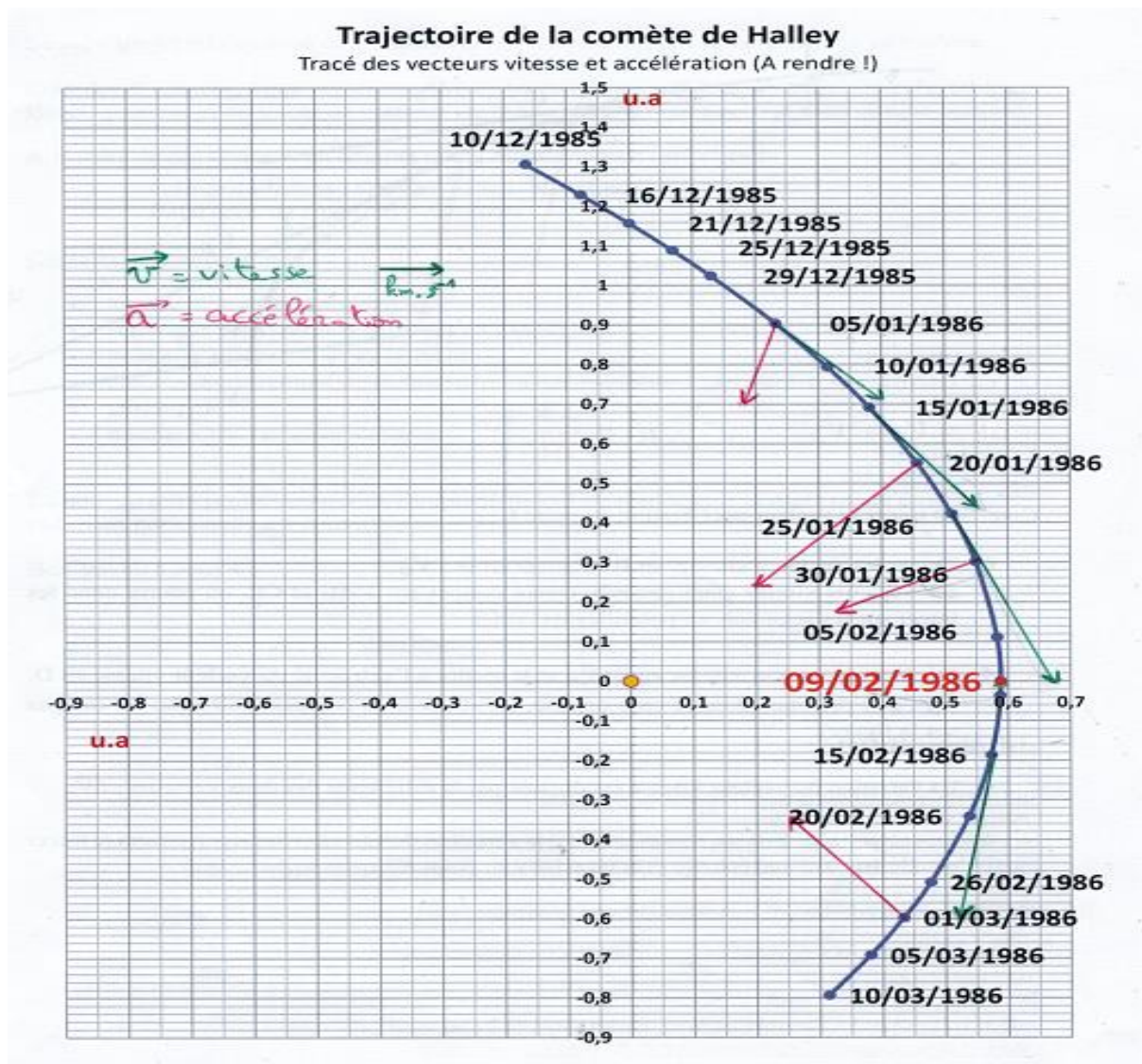
Date	x(u.a)	y(u.a)	vx	vy	ax	ay	v (u.a)	v (km/s)	a (u.a)	a (km.s ⁻²)
10/12/1985	-0,16	1,3								
16/12/1985	-0,08	1,23	0,01333333	-0,01166667			0,01771691	30,6559954		
21/12/1985	0	1,16	0,016	-0,014	0,00053333	-0,000466667	0,02126029	36,7871944	0,00070868	1,226239814
25/12/1985	0,06	1,09	0,015	-0,0175	-0,00025	-0,000875	0,02304886	39,8819993	0,00091001	1,574618675
29/12/1985	0,13	1,03	0,0175	-0,015	0,000625	0,000625	0,02304886	39,8819993	0,00088388	1,529404858
05/01/1986	0,23	0,9	0,01428571	-0,01857143	-0,00045918	-0,000510204	0,02343031	40,5420356	0,00068641	1,187710692
10/01/1986	0,31	0,79	0,016	-0,022	0,00034286	-0,000685714	0,02720294	47,0699037	0,00076665	1,326556201
15/01/1986	0,37	0,69	0,012	-0,02	-0,0008	0,0004	0,02332381	40,3577458	0,00089443	1,547648901
20/01/1986	0,46	0,55	0,018	-0,028	0,0012	-0,0016	0,03328663	57,5966641	0,002	3,460648148
25/01/1986	0,51	0,42	0,01	-0,026	-0,0016	0,0004	0,02785678	48,2012511	0,00164924	2,85372357
30/01/1986	0,55	0,3	0,008	-0,024	-0,0004	0,0004	0,02529822	43,7741213	0,00056569	0,978819109
05/02/1986	0,58	0,11	0,005	-0,03166667	-0,0006	-0,001533333	0,03205897	55,4724135	0,00164655	2,849056807
09/02/1986	0,59	0	0,0025	-0,0275	-0,000625	0,001041667	0,0276134	47,7801352	0,00121478	2,101965925
15/02/1986	0,57	-0,19	-0,00333333	-0,03166667	-0,00097222	-0,000694444	0,03184162	55,096325	0,00119477	2,067334792
20/02/1986	0,54	-0,34	-0,006	-0,03	-0,00053333	0,000333333	0,03059412	52,9377373	0,00062893	1,088256311
26/02/1986	0,48	-0,51	-0,01	-0,02833333	-0,00066667	0,000277778	0,03004626	51,9897681	0,00072222	1,249678498
01/03/1986	0,43	-0,6	-0,01666667	-0,03	-0,00222222	-0,000555556	0,03431877	59,382589	0,00229061	3,963504958
05/03/1986	0,38	-0,69	-0,0125	-0,0225	0,00104167	0,001875	0,02573908	44,5369417	0,00214492	3,711411811
10/03/1986	0,31	-0,79	-0,014	-0,02	-0,0003	0,0005	0,02441311	42,2425941	0,0005831	1,008943644

4) Pour trouver la date qui montre que la comète est au périhélie, on doit calculer la distance des points potentiels représentant la distance la plus courte par rapport au soleil. Et après par lecture graphique on déterminera la vitesse de la comète au périhélie.

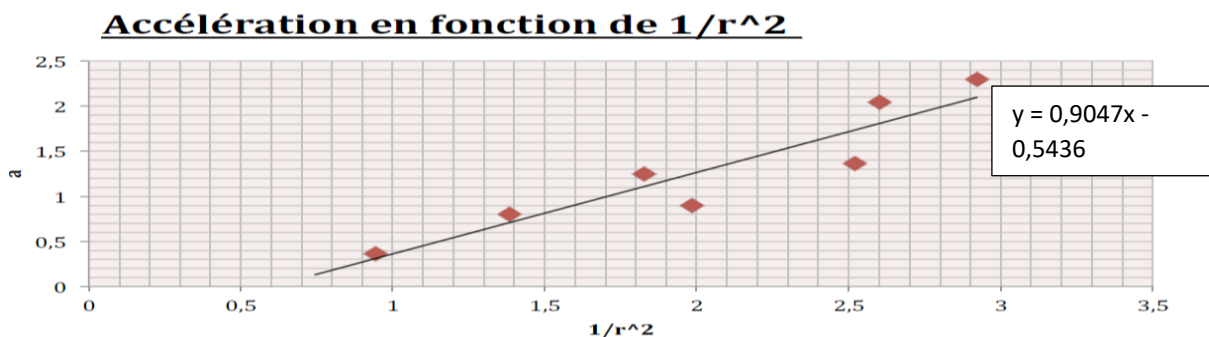
C'est le 09 février 1986 car la distance est de 0,59 u.a, donc la lecture s'effectuera sur la case du 15 février 1986, la vitesse au périhélie est de 0,03184162 u.a (C'est la vitesse maximale).

5) On a par définition : $\vec{a} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$ et $\vec{F} = m\vec{a}$

Nous constatons, d'après les tracés, que les vecteurs $\Delta \vec{v}$ sont dirigés vers le point focal de l'ellipse et ainsi vers le soleil. Tous les vecteurs étant dirigés vers le soleil sont des vecteurs centraux. Or l'accélération est colinéaire au vecteur $\Delta \vec{v}$ et ainsi la force F est colinéaire aux vecteurs $\Delta \vec{v}$ donc la force F qui s'exerce sur la comète est une force centrale.



6) On sait que la force exercée est inversement proportionnelle au vecteur r , ainsi lorsque la comète s'éloigne du soleil la force exercée diminue. La force dépendant de l'accélération car la masse de la comète étant constante, on en déduit que plus la comète s'éloigne du soleil, plus l'accélération diminue et ainsi la vitesse de la comète diminue.



7) La force subie par la comète est donc une force centrale attractive.

8) $M_s = (-F \cdot r^2) / (G \cdot m)$

$M_s = 1,994 \cdot 10^{30} \text{ kg}$ (Valeur expérimentale)

$M_s = 1,989 \cdot 10^{30} \text{ kg}$ (Valeur théorique)

On calcule l'incertitude relative :

$$\frac{|1,994 \cdot 10^{30} - 1,989 \cdot 10^{30}|}{1,989 \cdot 10^{30}} = 0,25\%$$

B. Conservation du moment cinétique

1) Le moment d'une force se traduit par : $\vec{M}_F = \vec{r} \wedge \vec{F}$

Nous avons montré précédemment que F était une force centrale. Donc \vec{r} et \vec{F} sont colinéaires. Nous savons que le produit vectoriel de deux vecteurs colinéaires est égal au vecteur nul.

Donc : $\vec{M}_F = \vec{r} \wedge \vec{F} = \vec{0}$

2) D'après le théorème du moment cinétique, on pose : $d\vec{L}/dt = \vec{M}_{F/0}$

Or, $\vec{M}_{F/0} = \vec{0}$ ainsi $d\vec{L}/dt = \vec{0}$

Donc $\vec{L} = \text{cste}$ (le vecteur moment cinétique est constant)

3) On sait que la vitesse aréolaire s'écrit de cette façon : $ds/dt = (\frac{1}{2}) ||\vec{r} \wedge \vec{v}||$

De plus, le moment cinétique est défini par : $\vec{L} = \vec{r} \wedge m\vec{v}$

D'où : $\vec{L} = m * r^2 * \dot{\theta} * \vec{u}_z$

Et $ds/dt = (\frac{1}{2}) * (\vec{r} \wedge \vec{v}) = (\frac{1}{2}) * r^2 * \dot{\theta}$

On a alors : $2 * ds/dt = ||\vec{L}/m||$

On pose C qui représente la constante des aires et elle est équivalente à dire que :

$$C = r^2 * \dot{\theta} dt$$

Ainsi :

$$C = ||\vec{L}/m|| = 2 ds/dt = 2 * 3,257 = 6,514 \text{ ua}^2/\text{an}$$

4) La vitesse de la comète à l'aphélie de la trajectoire va être égale à la vitesse minimale.

C. Conservation de l'énergie mécanique

1) On a $E_m = (1/2) mv^2 - G \cdot M_m/r$

On sait $F = - dE_p/dr$

Et : $F = G m c \times m_s / r^2$

Donc $E_p = - G m c \times m_s / r$

$E_m = E_c + E_p$

$$\Rightarrow E_m = (1/2) m c v^2 - G \cdot m c \times m_s / r$$

$$\Leftrightarrow E_m / m c = (\frac{1}{2}) v^2 - G m_s / r$$

$$\Leftrightarrow E_m / m c = E_c / m c + E_p / m c$$

Donc l'énergie mécanique de la comète est conservée.

2) On admet que la seule force qui s'applique sur la comète est l'attraction du Soleil (F) lorsqu'elle est proche de celui-ci.

L'interaction gravitationnelle est une force conservative, on a donc la relation suivante :

$$F = -\frac{dEp}{dr}$$

$$\rightarrow dEp = -\frac{GMm}{r^2} dr$$

$$\rightarrow Ep = \int_0^{+\infty} -\frac{GMm}{r^2} dr \rightarrow Ep = GMm \int_0^{+\infty} -\frac{1}{r^2} dr \rightarrow Ep = GMm \left[\frac{1}{r} \right]_0^{+\infty}$$

$$\rightarrow Ep = -\frac{GMm}{r}$$

Or :

$$Em = Ec + Ep = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{GMm}{r}$$

$$\rightarrow \frac{Em}{m} = \frac{1}{2}v^2 - \frac{GM}{r}$$

V : vitesse de la comète

M : masse du Soleil= $1.989 \cdot 10^{30}$ kg

m= masse de la comète (masse du noyau = $1014 \cdot 10^{11}$ kg d'après internet)

r= distance entre le soleil (F1) et la comète

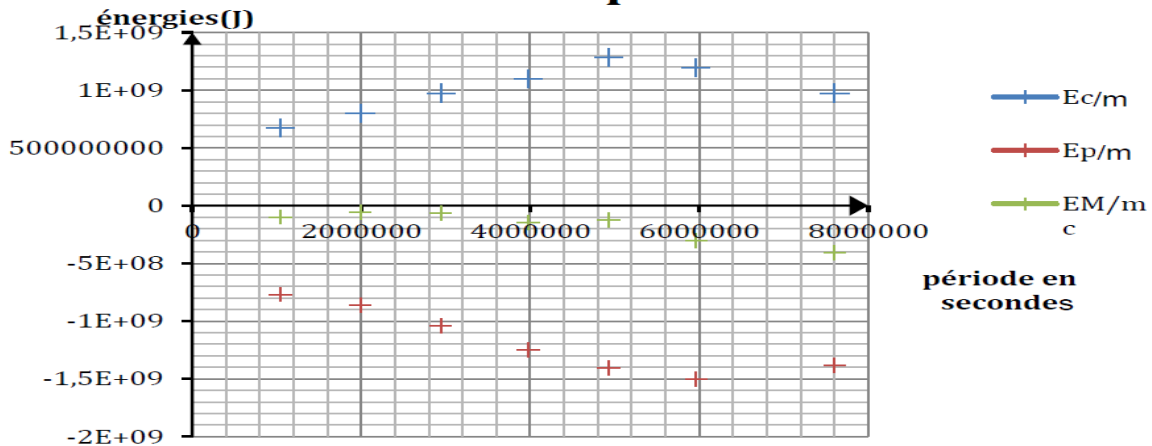
G= constante gravitationnelle = $6,67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$

3)

Dates	Ec/m	Ep/m	Em/m
25/12/85	0,00012	-1,8E+31	-1,8E+31
05/01/86	8,96E-05	-2,083E+31	-2,083E+31
15/01/86	0,00007	-2,468E+31	-2,468E+31
25/01/86	5,4360E-05	-2,9383E+31	-2,9383E+31
05/02/86	1,348,3E-05	-3,283E+31	-3,283E+31
15/02/86	3,2163E+31	-3,21639E+31	-3,21639E+31

4)

Graphique représentant les énergies en fonction de période



- 5) Le signe de l'énergie totale est négatif. On peut en déduire que la comète a une trajectoire bornée. Dans ce cas, la trajectoire est une ellipse dont le centre attracteur occupe l'un des foyers.

IV- Conclusion

Finalement, on a pu démontrer les trois lois de Kepler ainsi que la loi de la gravitation universelle de Newton avec la conservation du moment cinétique et de l'énergie mécanique. Ce Mini-Projet nous a permis alors de mettre en évidence la loi des orbites et la loi des aires ainsi que celle des périodes.

V-Annexes :

Historique de la Mécanique Céleste :

A. Avant Kepler

La mécanique céleste, est une branche de la mécanique, qui s'occupe d'étudier le mouvement des corps dans l'espace (satellites, planètes, astéroïdes, corps divers...). Ses origines remontent au XV^{ème} siècle, avec ses précurseurs, comme Nicolas Copernic, qui sera le 1^{er} à s'opposer contre l'Eglise, et parler de la théorie de l'héliocentrisme, et nier celle du géocentrisme, en disant que la Terre, n'est pas le centre de l'univers, et qu'elle tourne autour du Soleil.

Pour en arriver à la mécanique céleste, il faut cependant partir de certains fondements de la mécanique "simple" (qui s'occupe du mouvement des corps en général).

La mécanique céleste, est tout d'abord une mécanique qui laisse place à l'observation (au lieu de principes établis et non démontrés). C'est en ce sens, que Tycho Brahe, sera le 1^{er} à rompre avec l'astronomie traditionnelle, et les sciences en général. Grand passionné des travaux de Copernic, il ne se résout cependant pas à abandonner le modèle géocentrique. Il va alors combiner les 2 systèmes, pour donner le système héliogéocentrique. Cela marque cependant, avec les travaux de Copernic, une des 1^{ères} bases de la mécanique céleste. Vers 1580, il s'installe sur l'île de Ven où, jusqu'à sa mort en 1601, il va travailler grâce aux instruments qu'il conçoit ou améliore, à l'observation des corps célestes. Il recueille un grand

nombre d'informations, précises. Il fait des observations de la planète Mars, qui vont servir de base, ainsi que ses autres travaux à un certain Johannes Kepler, qui va l'assister dans son travail durant la dernière année de sa vie. Les découvertes de Brahe, seront par la suite ruinées par les travaux de Kepler, de Galilée, et de Newton.

B. Les travaux de Kepler et Galilée

Avant Kepler, et grâce à Brahe, on a alors une première idée du mouvement des planètes autour du Soleil. En effet, on pense que le mouvement des planètes décrit des épicycles (cercles) autour du grand Cercle formé par le mouvement supposé du Soleil autour de la Terre.

A l'aide des travaux de son mentor, Kepler, va mener des recherches, qui sont en réalité plus des observations, qui décrivent le mouvement des planètes autour du Soleil, et, il va alors établir les 3 lois de Kepler.

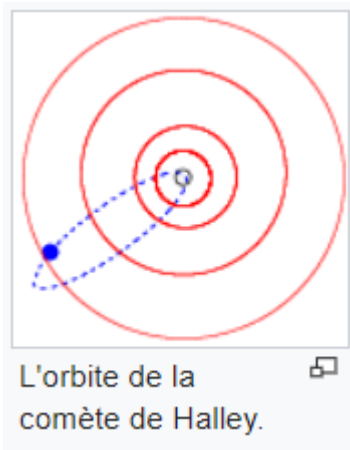
La première loi de Kepler est la loi des orbites :

Les planètes du système solaire décrivent des trajectoires elliptiques, dont le Soleil occupe l'un des foyers (centre).

Cette loi, ne s'applique au début qu'aux planètes qui gravitent autour du Soleil. Mais plus tard, elle s'étend de manière plus générale aux objets célestes gravitant autour du Soleil, ceux-ci décrivent alors des trajectoires qui sont des coniques dont le Soleil est un foyer.

Cette loi est d'autant plus vraie, puisqu'elle s'applique également à la comète de Halley que l'on étudie.

Ainsi ; la première loi de Kepler, vient rompre totalement avec les principes établis. La trajectoire des planètes n'est alors plus circulaire, mais elliptique. Et, on passe à la conception de Copernic, dans laquelle l'univers n'est pas géocentrique, mais que les différentes planètes tournent autour du Soleil, dans un système héliocentrique.



La seconde loi de Kepler, est la loi des aires. Elle dit que le rayon-vecteur qui relie le centre de la planète au Soleil, à des périodes égales, balaie des aires égales. De cette deuxième loi, on peut donc en déduire, que le corps attiré (la comète dans le mini-projet) exerce une force constamment dirigée vers le Soleil. Kepler, dira cependant, qu'il est certain que le Soleil, exerce aussi une force sur l'astre attiré.

De cette seconde loi, on peut tirer une équation, qui nous permet de déterminer la position de la planète à partir de l'aire balayée. En effet la deuxième loi de Kepler implique que la

planète accélère en approchant du Soleil et ralentit quand elle s'éloigne. La vitesse de la planète n'est pas constante, mais sa vitesse aréolaire est la même.

Enfin, la 3ème loi de Kepler, est la loi des périodes : Pour toutes les planètes du système solaire, le rapport entre le carré de la période de révolution T , et le cube de la longueur du demi grand-axe est égal à une même constante.

$$T^2/a^3 = k \text{ (k est une constante)}$$

Ainsi, les 3 lois de Kepler, obtenues grâce à ses observations, permettent donc de faire une étude plutôt précise du mouvement des planètes autour du Soleil.

De plus, en parallèle des travaux de Kepler, Galilée, va lui aussi faire des recherches, sur la chute des corps, il étudia la mécanique et la dynamique des corps en mouvement. Il démontra dans un premier temps que l'accélération des corps en mouvement dans le champ de pesanteur terrestre était la même à tout point situé à la surface de la Terre. Cette accélération établit donc une loi d'inertie : « tout corps non soumis à une force extérieure est animé d'un mouvement rectiligne uniforme ». Il définit alors ainsi le référentiel dit Galiléen. Ce référentiel, est le référentiel dans lequel sont étudiés la plupart des mouvements de la mécanique (classique, newtonienne et céleste). Galilée, va aussi développer la lunette astronomique, qui va aussi permettre de faciliter les observations spatiales, et permettre dans une certaine mesure, de valider les théories faites par Kepler à travers ses 3 lois.

C. Après Kepler, les travaux de Newton

Vient ensuite Isaac Newton. Considéré comme le fondateur de la mécanique classique, c'est grâce à lui, que les 3 lois de Kepler, ont finalement pu être validées. En effet, il s'appuie sur les travaux de ses prédécesseurs, Kepler et Galilée, d'abord pour fonder la mécanique classique, dont l'étude se fait dans un référentiel galiléen. Et ensuite, il est le 1^{er}, à définir la fameuse force que le Soleil exerce sur les planètes dont Kepler parlait. A partir de la 3ème loi de Kepler, et de sa loi de la gravitation universelle, il va définir alors la Force de Gravitation Universelle, qui vient totalement affirmer les travaux faits jusque-là, et apporter les éléments manquants à la mécanique céleste. Il fut le premier à comprendre que la pomme qui tombe d'un arbre et la Lune qui tourne autour de la Terre (ou tout autre corps dans l'espace soumis à une force extérieure) obéissent en réalité aux mêmes lois et que leurs mouvements ont la même origine, et sont de natures identiques.

Cette force, dont parlait déjà Kepler, et qu'exprime Newton s'écrit : $F = G m m' / r^2$ où G est la constante gravitationnelle.

Ainsi, en reliant cette force à la 3ème loi de Kepler, et à la 2nde loi de Newton on obtient que, la 3ème loi de Kepler peut s'écrire :

$$\frac{T^2}{a^3} = \frac{4\pi^2}{G(M + m)}$$

M est la masse de l'étoile, m la masse de la planète, et G la constante de gravitation.

Il montre aussi qu'avec une loi d'attraction en $1/r^2$, on obtient des orbites elliptiques, et confirme alors la 1ère loi de Kepler.

Newton, bien que ne travaillant pas à proprement dit sur la mécanique céleste, va permettre grâce à ses travaux en mécanique classique, et ses 3 lois de Newton, à confirmer les lois basées

sur des observations de Kepler. Il va ainsi permettre l'accréditation complète de la mécanique céleste.

La mécanique céleste est alors l'application de la mécanique newtonienne et des principes fondamentaux de la mécanique aux corps du système solaire. C'est ensuite Laplace, au 18^{ème} siècle, qui mettra en place les fondements de la mécanique céleste et qui va quasiment tout expliquer, notamment le mouvement des planètes et des satellites et l'aplatissement des planètes.

En première approximation, la mécanique newtonienne explique donc parfaitement les mouvements dans le système solaire.

Tableau des valeurs relevées :

Dates	MF ₁ =r (u.a)	MF ₂ (u.a)	MF ₁ +MF ₂ (u.a)
01/01/50	34	0,6	34,6
01/01/55	33,3	1,7	35
01/01/60	32,1	2,6	34,7
01/01/65	29,8	4,9	34,7
01/01/70	26,8	8,2	35
01/01/72	25	9,8	34,8
01/01/74	23,2	11,7	34,9
01/01/76	21	13,9	34,9
01/01/78	18,6	16,2	34,8
01/01/80	15,7	19,2	34,9
01/01/82	12,4	22,5	34,9
01/01/83	10,4	24,4	34,8
01/06/84	6,9	27,7	34,6
01/01/85	5,2	29,4	34,6
01/02/85	5	29,6	34,6
01/03/85	4,6	29,9	34,5
01/04/85	4,3	30,2	34,5
01/05/85	4	30,5	34,5
01/06/85	3,7	30,8	34,5
01/07/85	3,3	31,2	34,5
01/08/85	3	31,6	34,6
01/09/85	2,6	31,9	34,5
01/10/85	2,3	32,3	34,6
01/11/85	1,9	32,7	34,6
01/12/85	1,5	33	34,5
01/01/86	1	33,6	34,6
01/02/86	0,6	34	34,6
09/02/86	0,6	34	34,6
15/02/86	0,6	34	34,6
01/03/86	0,7	33,8	34,5
10/03/86	0,9	33,7	34,6
15/03/86	1	33,6	34,6
01/04/86	1,2	33,4	34,6
01/05/86	1,6	32,9	34,5
01/06/86	2	32,5	34,5
01/07/86	2,4	32,1	34,5
01/08/86	2,8	31,7	34,5
01/09/86	3,2	31,4	34,6
01/10/86	3,5	31,1	34,6
01/11/86	3,8	30,7	34,5
01/12/86	4,2	30,4	34,6
01/01/87	4,5	30,1	34,6
01/02/87	4,7	29,9	34,6
01/03/87	5	29,6	34,6

01/04/87	5,3	29,3	34,6
01/05/87	5,5	29	34,5
01/06/87	5,8	28,8	34,6
01/07/87	6	28,5	34,5
01/08/87	6,3	28,2	34,5
01/09/87	6,5	28	34,5
01/10/87	6,7	27,8	34,5
01/11/87	7	27,6	34,6
01/12/87	7,2	27,3	34,5
01/01/88	7,4	27,1	34,5
01/01/89	9,8	24,8	34,6
01/01/90	11,9	22,7	34,6
01/01/91	13,8	21	34,8
01/01/92	15,4	19,3	34,7
01/01/93	16,9	17,8	34,7
01/01/94	18,3	16,4	34,7
01/01/95	19,6	15,2	34,8
01/01/96	20,8	14	34,8
01/01/97	21,9	12,9	34,8
01/01/98	22,9	11,8	34,7
01/01/99	23,8	10,6	34,4
01/01/00	24,7	9,7	34,4
01/01/02	26,4	8,4	34,8
01/01/04	27,8	6,9	34,7
01/01/06	29,1	5,6	34,7
01/01/08	30,2	4,4	34,6
01/01/10	31,2	3,5	34,7
01/01/12	31,9	2,7	34,6
01/01/14	32,6	2,1	34,7
01/01/20	33,9	0,8	34,7
01/01/23	34,1	0,7	34,8

Bibliographie :

<http://pgi.pagesperso-orange.fr/gdecomete.htm> (Histoire de la comète de Halley) http://pdssbn.astro.umd.edu/volume/hal_0019/ephem/ephem.txt
http://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb.cgi?ID=c00001_0;orb=1;cov=0;log=0;cad=0#orb
(simulation java de la comète de Halley) <http://artemmis.univ-mrs.fr/im2/mecaspa/index.htm> (Mécanique spatiale)
<http://www.minorplanetcenter.org/iau/MPEph/MPEph.html> (Éphémérides)
<http://cometography.com/> http://lal.univ-lille1.fr/Documents_pedagogiques/OrbiteParPoVo.html
<http://www.imcce.fr/fr/ephemerides/donnees/comets/index>