

Mars ... sur orbite - Deuxième acte (séance de 3 heures)

par Francis Berthomieu - Lycée Jean Moulin - Place de la Paix - 83300 Draguignan

Note de la Rédaction: Nous rappelons aux lecteurs intéressés que les différents logiciels dont il est fait mention ici ("Copernic", "Kepler",...) font parti d'un ensemble intitulé INFOLABO, réalisé par l'auteur. On peut obtenir auprès de lui une disquette de démonstration, sur simple demande.

Les élèves sont accueillis dans la salle informatique du Lycée. Les ordinateurs sont équipés d'un logiciel de traitement de données expérimentales, bien connu des professeurs de sciences physiques (REGRESSI).

Activité 1.

Un fichier de données est déjà en place: il contient les coordonnées de la planète Mars relevées par les élèves lors de la séance antérieure, assorties de quelques calculs que REGRESSI a bien voulu fournir en quelques fractions de seconde, et que les élèves admettent sans difficultés...

Ils ont sous les yeux, un tableau des données suivantes:

date, ascension droite de Mars, déclinaison de Mars, ascension droite corrigée (on a ajouté 360° lorsque Mars a effectué un nouveau "tour du ciel"), mais aussi longitude écliptique géocentrique et latitude écliptique géocentrique...

Le logiciel permet de tracer à la demande n'importe laquelle des courbes donnant l'un des paramètres connus en fonction d'un autre. On peut ainsi laisser naviguer "à vue" des élèves souvent bien plus familiarisés que nous à l'utilisation d'un ordinateur et d'un tel logiciel. Un bon nombre de tentatives seront sans intérêt, mais une bonne canalisation des initiatives mènera inévitablement aux graphes les plus intéressants:

Le graphe n°1 fait apparaître en abscisse l'ascension droite (convertie en degrés) de Mars et en ordonnée sa déclinaison, pour la période allant de 1990 à 1993... On y voit se superposer les boucles étudiées dans le premier acte... Leur forme est inversée, par rapport aux tracés manuels, mais une utilisation rapide du "parapluie astronomique" (On peut s'en procurer un à la Cité des Sciences de la Villette ou le fabriquer selon les recettes du C.L.E.A.), ou d'une carte du ciel, permet de comprendre que si l'on parcourt l'équateur céleste dans le sens direct, on se dirige bien sûr... de droite à gauche alors que notre axe est gradué de gauche à droite...

Un coup de zoom sur les zones intéressantes (graphe n°2) est alors effectué, pour mieux convaincre les sceptiques:

L'utilisation de l'ascension droite "corrigée", c'est à dire augmentée de 360° après le premier "tour du ciel", permet de séparer les deux boucles: Une allure globale vaguement "sinusoïdale" est alors généralement proposée, et la recherche (presque instantanée avec REGRESSI) du modèle sinusoïdal le plus proche des points "expérimentaux" mène à une "amplitude" tellement proche de 23° qu'il y a souvent un élève suffisamment au fait de la géographie pour se souvenir que c'est un angle fort proche de celui dont le plan équatorial terrestre est incliné par rapport au plan de l'écliptique... Quelques explications permettent, saladier de plastique transparent et stylo feutre en main, de faire comprendre ce que sont l'équateur céleste et l'écliptique, et de les visualiser en les traçant... puis en les repérant sur le parapluie astronomique!

On peut aussi retrouver l'écliptique sur les cartes de la zone du Taureau et celle des Gémeaux, et s'interroger sur son aspect rigoureusement... rectiligne! Coiffés du saladier, les élèves comprennent très facilement qu'un grand cercle, tracé sur une sphère, et observé depuis son centre, apparaît nécessairement à l'observateur comme... une droite!

Le calcul qui a permis de passer des coordonnées équatoriales aux coordonnées écliptiques n'est pas développé: On peut se contenter d'expliquer qu'une rotation de $23,5^\circ$ de la sphère des étoiles autour d'un grand axe dirigé vers le point vernal permettrait d'amener l'écliptique là où se trouvait auparavant l'équateur... Ce changement de référentiel provoque bien entendu un changement des coordonnées des étoiles ou de Mars: l'ascension droite des coordonnées équatoriales se voit remplacée par la longitude écliptique; la déclinaison équatoriale cède la vedette à la latitude écliptique (écart angulaire, mesuré sur un méridien, entre l'étoile et l'écliptique... c'est en dire en simplifiant, sa "distance" à l'écliptique)... Le changement de coordonnées est confié au logiciel...

Le graphe n°3 représente ainsi le mouvement de Mars en coordonnées écliptiques:

Attention, l'abscisse évolue de -100° à -500° alors que l'ordonnée évolue, pour la période étudiée entre -2° et $+4^\circ$.

Autant dire que Mars se déplace SUR l'écliptique, en ne s'en écartant que fort peu...

Un nouveau graphique intéressant est alors instantanément disponible: celui qui donne l'écart de Mars avec l'écliptique... au cours du temps, mesuré en jours: graphe n°4.

Il est alors possible de mesurer à l'aide d'un curseur, et directement sur le graphe, la "périodicité" du passage de Mars sur le plan de l'écliptique, en allant dans un sens (montant par exemple, ou descendant si l'on préfère...). Si l'on est convaincu que le mouvement de Mars est périodique, et sa trajectoire immuable, il est raisonnable de penser que le temps séparant deux tels événements est sa "vraie" période (période sidérale). Les mesures en donnent un bon ordre de grandeur de T_M : on trouve entre 680 et 690 jours.

Un dernier calcul du logiciel permet de dériver la longitude écliptique géocentrique de Mars par rapport au temps: nous dirons, avec des élèves de première, que l'on calcule la vitesse angulaire apparente de Mars le long de la ligne écliptique...

Le graphe n°5 donne cette vitesse angulaire au cours du temps.

On y distingue bien les vitesses négatives correspondant aux "rétrogradations" étudiées, et l'on peut dater les instants où cette vitesse négative est la plus grande (en valeur absolue): on peut alors faire réfléchir les élèves à la signification de cet extremum: c'est l'instant précis de l'opposition. Une analogie quotidiennement vécue par les élèves est un bon support: la vitesse angulaire apparente du véhicule que l'on dépasse sur l'autoroute semble négative et maximale lorsqu'on atteint sa hauteur, c'est à dire lorsqu'on en est le plus proche... C'est ici exactement le même phénomène.

La mesure au curseur fait apparaître un écart temporel de 780 jours (appelé par les spécialistes période synodique de Mars).

Le petit calcul classique permettant de relier période héliocentriques de la Terre ($T_T = 365,25$ jours) et de Mars (T_M) à la période synodique de Mars ($T_S = 780$ jours) peut alors être vérifié. Il fait appel aux connaissances acquises en étudiant la stroboscopie et s'exprime par la relation:

$$\frac{1}{T_M} = \frac{1}{T_T} - \frac{1}{T_S}$$

On en tire $T_M = 687$ jours...

Nous avons obtenu ainsi les données nécessaires à la construction de l'orbite de Mars par la méthode de KEPLER. Chacun comprend aisément que Mars se trouve au même endroit de son orbite tous les 687 jours, mais que le point de vue du Terrien que nous sommes n'est pas le même: la Terre, elle, n'est pas au même endroit de son orbite au bout de 687 jours... Mars nous semble alors disposée différemment sur le fond du ciel supposé immuable...

Activité 2.

On peut alors fournir un tableau des longitudes HELIOCENTRIQUES de la Terre et des longitudes GEOCENTRIQUES de Mars et construire à partir de quelques couples de mesures (dates séparées par 687 jours) quelques points de la trajectoire de Mars.

Nos élèves n'étant pas toujours extrêmement doués pour les constructions géométriques "à main levée", et l'usage du rapporteur étant chaque jour plus problématique, on s'expose cependant à des résultats aussi aléatoires que peu significatifs.

Il m'a paru plus convaincant et plus ludique d'écrire un logiciel qui permet d'effectuer avec précision ces constructions: KEPLER.

Un "longitudomètre" permet de placer la Terre convenablement sur son orbite, puis de viser, toujours en longitude, et avec une importante précision dans la mesure de l'angle visualisé sur l'écran, la direction de la planète Mars à la même date t . Les mêmes constructions pour l'instant $t + 687j$ permettent le positionnement d'un point de l'orbite. En répétant au moins trois fois cette manoeuvre (il faut environ 5 minutes à un manipulateur non expérimenté et nul ne rechignera s'il doit traiter quatre ou cinq couples de mesures), on est capable, grâce au "traceur de cercles circonscrits", et en pointant successivement à l'aide du curseur de la souris, trois des points obtenus, de tracer une trajectoire circulaire et d'en découvrir le centre, séparé de façon significative du centre de l'orbite terrestre... La discussion sur l'ellipticité des orbites est alors ouverte...

Nota:

Si l'on fait effectuer ces constructions avec des données contemporaines puis avec celles dont disposait KEPLER, on découvre, assez facilement que l'orbite de Mars a tourné par rapport au point vernal... à moins que ce ne soit le point vernal qui se soit déplacé par rapport à notre système solaire... et ce, en 400 ans environ... Porte ouverte, avec des élèves enthousiastes et motivés à une étude qualitative, voire même quantitative (?) de la précession des équinoxes...

Une deuxième heure s'est donc écoulée...

Activité 3

Il faut maintenant rassurer les curieux: Pourquoi Mars s'écarte-t-elle de la ligne écliptique, au cours de son mouvement.

Les livres disent que c'est à cause de l'inclinaison du plan de sa trajectoire par rapport au plan de l'écliptique...

Le document 3 permet de construire "en relief" la maquette du système Terre-Mars-Constellations...

Le rectangle portant l'inscription "orbite de la Terre" doit être assemblé de façon à former un petit cylindre, qui s'adapte parfaitement au tracé de l'orbite de la Terre par la méthode de Kepler: le bord circulaire supérieur du cylindre matérialise l'orbite de la Terre, et le plan de l'écliptique.

Le découpage de la figure comportant l'inscription "orbite de Mars", puis son assemblage en cylindre, permet de matérialiser une orbite "inclivée" par rapport à celle de la Terre.

Le parapluie astronomique peut alors coiffer le tout, de façon à ce que le point gamma soit correctement situé...

On peut alors retrouver sans difficulté l'orientation correcte de l'inclinaison de la trajectoire de Mars, pour que les observations effectuées sur les diapositives soient correctement expliquées... On situe alors correctement le "noeud ascendant" de l'orbite de Mars...

DOCUMENT: Quelques chiffres sur le mouvement de la planète MARS

années 1585 à 1593	écart j	longitude écliptique géocentrique du Soleil		long. hél. de Terre	longitude écliptique géocentrique de Mars			
		°	'	° déc	°	'	° déc	
2/17/85	687	339	23	339.4	159.4	135	12	135.2
1/5/87		295	21	295.4	115.4	182	8	182.1
9/19/91	687	185	47	185.8	5.8	284	18	284.3
8/6/93		143	26	143.4	323.4	346	56	346.9
12/7/93	687	265	53	265.9	85.9	3	4	3.1
10/25/95		221	42	221.7	41.7	49	42	49.7
3/28/87	687	16	50	16.8	196.8	168	12	168.2
2/12/89		333	42	333.7	153.7	218	48	218.8
3/10/85	687	359	41	359.7	179.7	131	48	131.8
1/26/87		316	6	316.1	126.1	184	42	184.7

document 1

dates des photos	jours	Longitude écliptique héliocentrique de la Terre et de Mars		Vitesses angulaires Terre Mars (degrés par jour)	
		°	'	°	'
9/15/90	0	-8.1		23.5	
9/25/90	10	1.7		29.5	0.980
10/9/90	24	15.4		37.6	0.979
10/21/90	36	27.3		44.5	0.992
11/7/90	53	44.3		54.0	1.000
11/27/90	73	64.5		64.9	1.010
12/14/90	90	81.7		73.8	1.012
1/1/91	108	100.1		83.0	1.022
1/15/91	122	114.3		89.9	1.014
1/29/91	136	128.6		96.7	1.021
2/17/91	155	147.8		105.8	1.011
3/3/91	169	161.9		112.3	1.007
3/13/91	179	171.9		116.9	1.000
3/30/91	196	188.8		124.6	0.994
4/5/91	202	194.7		127.3	0.983
6/22/91	280	270.1		161.6	0.967

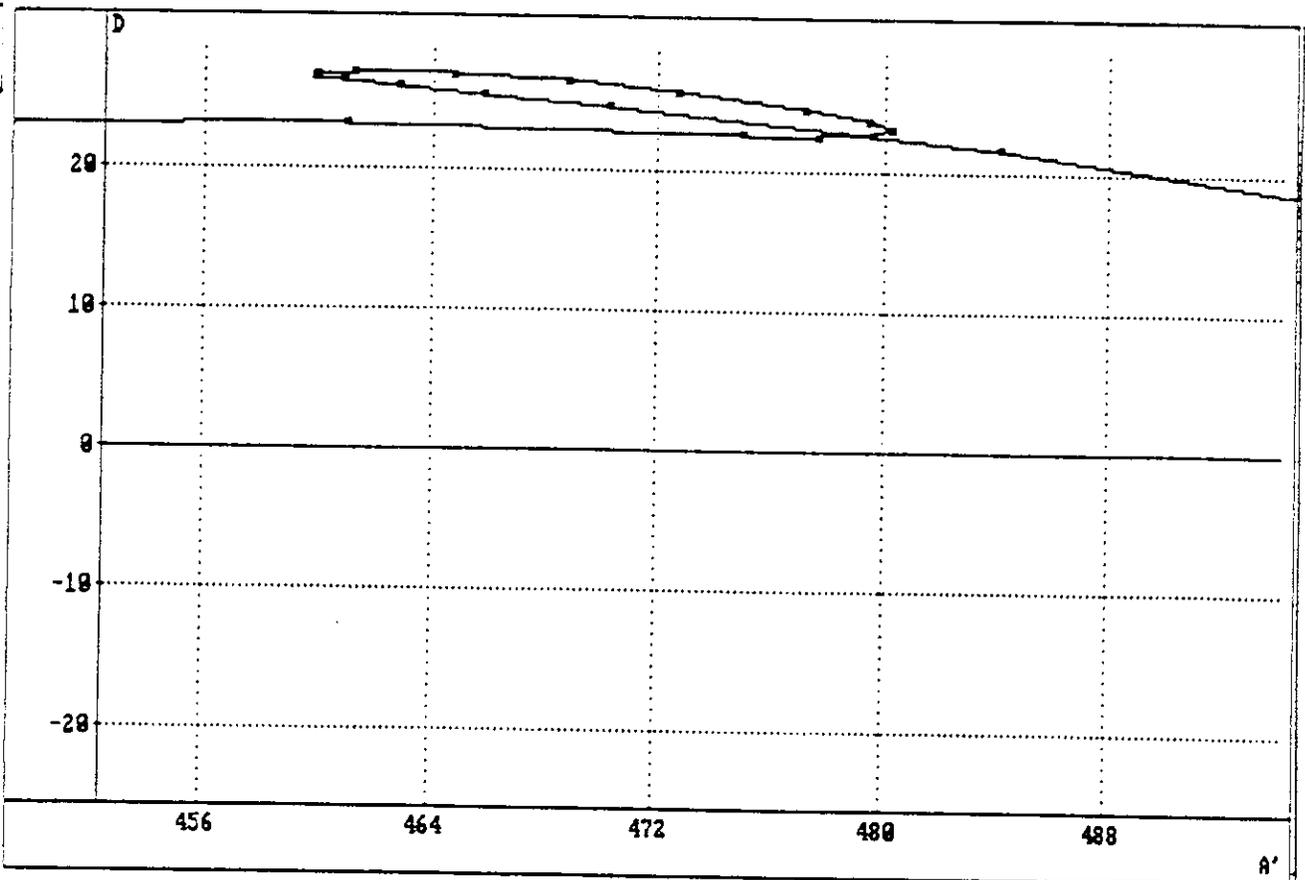
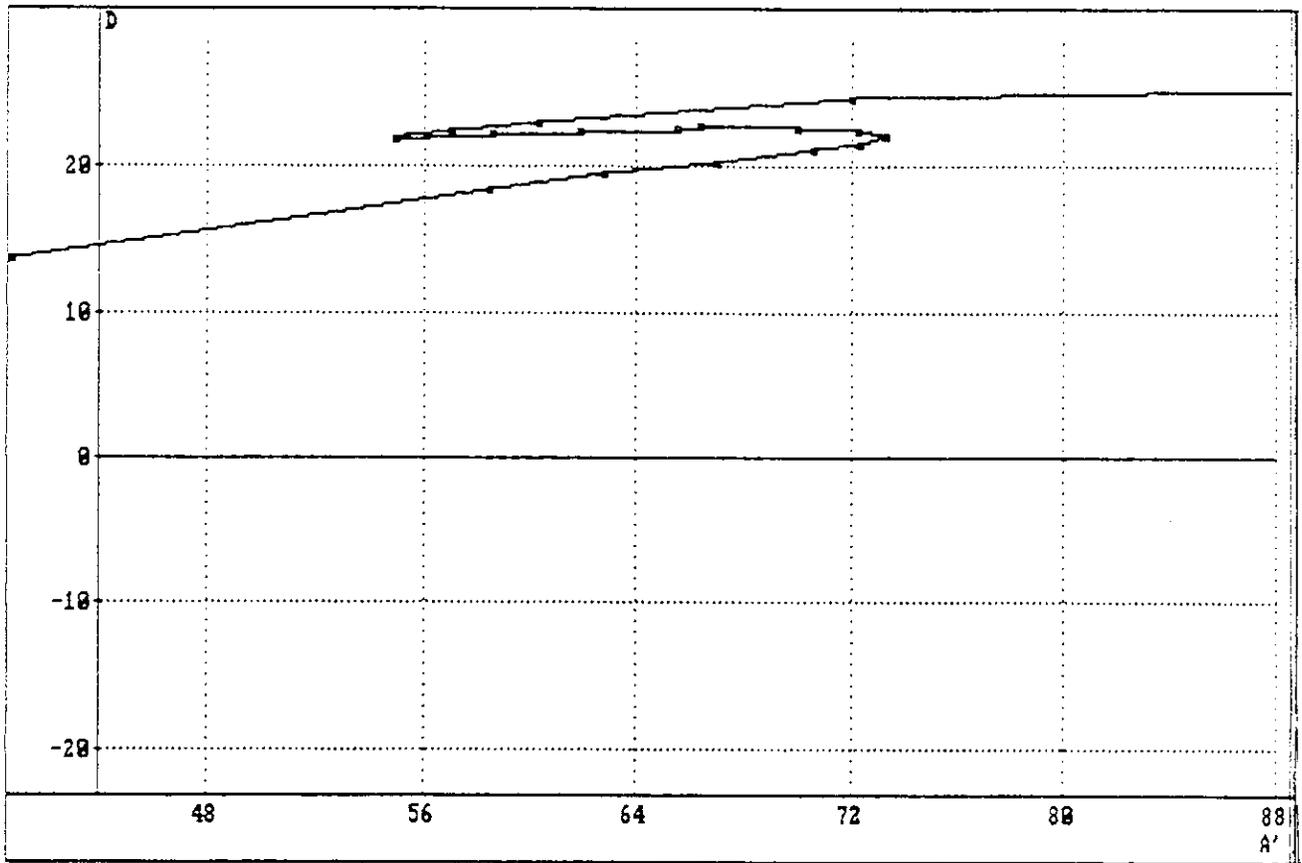
document 2

Les zones encadrées peuvent être remplies par les élèves... ou par un ordinateur muni d'un tableur... À chacun ses goûts!



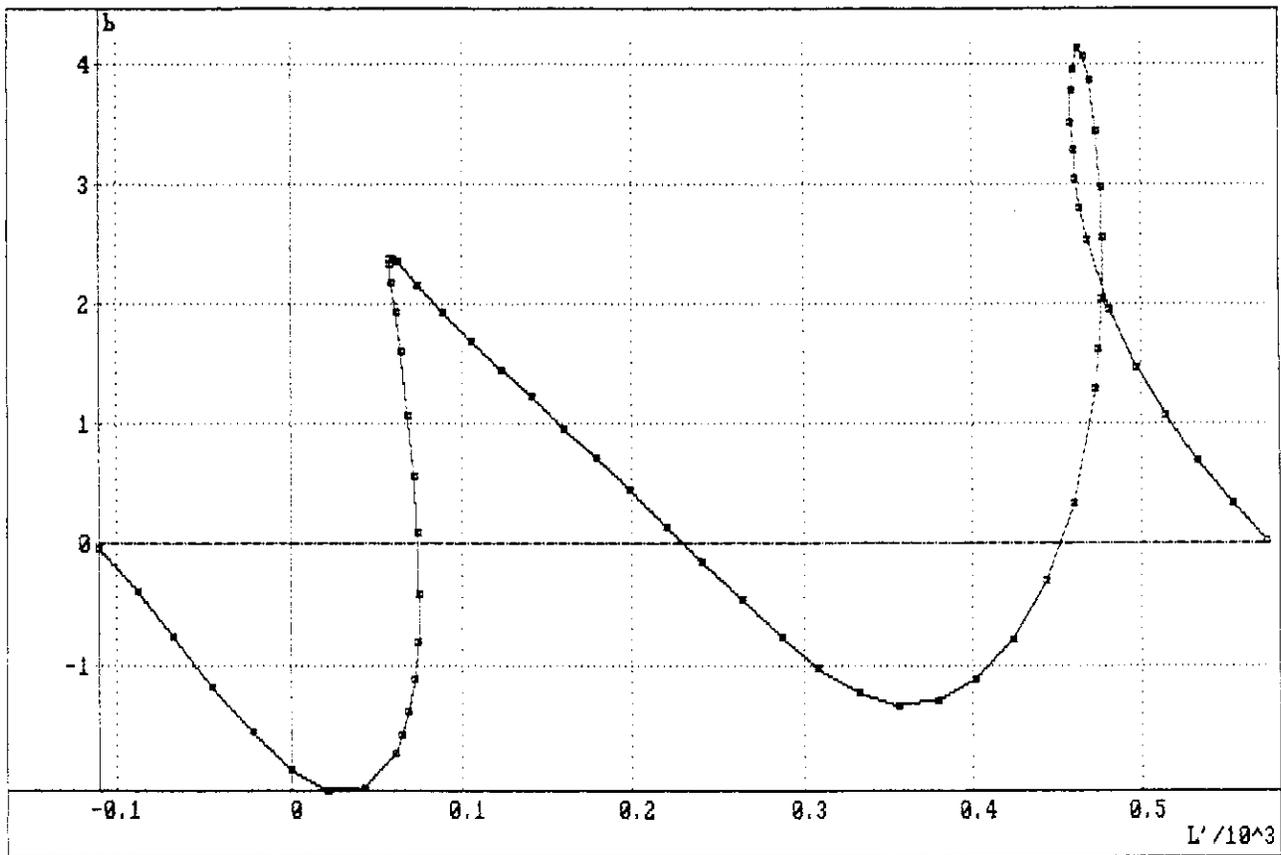
DOCUMENT: PLANETES... Astres errants!

Graphes N°2

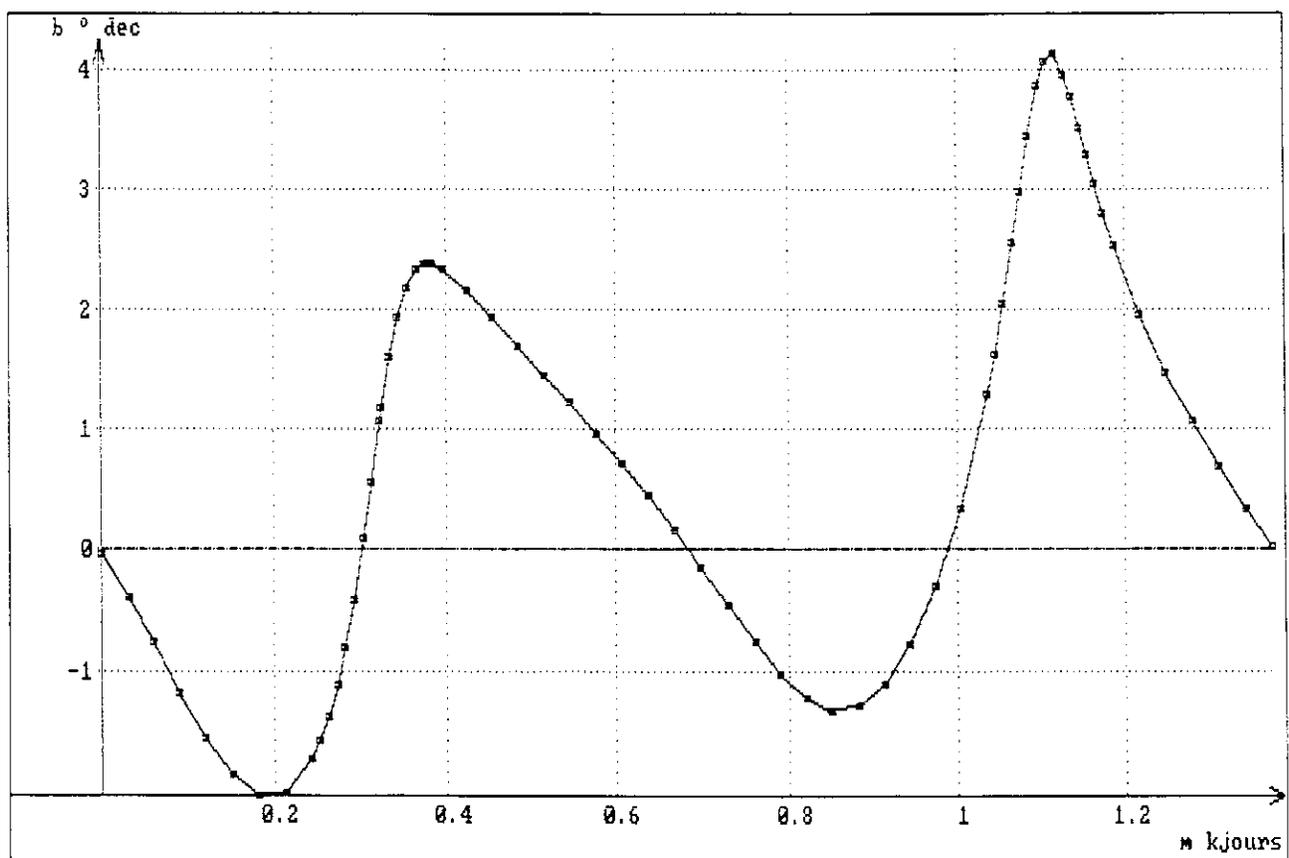


DOCUMENT : PLANETES... Astres errants!

③



④



DOCUMENT : PLANETES... Astres errants!

5

