

# Mars sur orbite... suite et fin (?)

## Résumé des chapitres précédents.

Deux ans de pratique de l'astronomie dans le cadre idéal de l'Option Sciences Expérimentales en 1<sup>o</sup> S ont conforté une double conviction :

1 - ce thème est un remarquable moyen de motivation.

2 - les difficultés mathématiques, bien réelles, peuvent être contournées, grâce à l'informatique, sans nuire à la rigueur scientifique.

Reconnaissant que certains aspects des actes 1 et 2 de ce petit « feuilleton » étaient encore d'un maniement délicat, j'ai apporté pour la dernière année scolaire quelques modifications dans ma présentation de l'étude du mouvement de la planète Mars. Dans un esprit rigoureusement conforme aux nouveaux programmes de Terminale S, j'ai souhaité ajouter la contrainte d'une démarche à la fois historique et scientifique. [1]

## Observer pour décrire...

« Donner à voir n'est pas faire observer » s'écriait récemment un philosophe lors d'un colloque sur l'utilisation des images numériques dans l'enseignement des sciences ! Donnons à VOIR, sans commentaires, les constellations de la voûte céleste (la projection des diapositives CLEA est un passage obligé) puis faisons les OBSERVER plus finement à de petits groupes d'élèves réunis autour de l'écran d'un ordinateur: Chacun alors apprendra, à son rythme, à repérer et reconnaître les étoiles qui constituent la constellation du Taureau, puis à distinguer la planète Mars parmi les étoiles « fixes ». Il sera alors possible à chacun, en prenant le temps qui lui est nécessaire, de se convaincre qu'il s'agit bien d'un « astre errant », et de DECRIRE, comme savaient le faire les Chaldéens, plus d'un millénaire avant notre ère, l'allure de son mouvement sur le fond des étoiles qui forment les constellations. [2]

## Décrire pour mesurer...

Cette appropriation des faits débouchera sur une description verbale, puis sur une première formalisation. La « sphère des fixes » peut être présentée, d'une façon très simple, par analogie avec la sphère terrestre, à un détail près : nous l'observons « de l'intérieur » ! La méthode de repérage des étoiles s'impose alors, par analogie avec le repérage géographique. Il sera indispensable de définir équateur céleste et écliptique : ce sont deux grands cercles particuliers de la sphère des fixes, axés, l'un sur l'axe de la Terre (celui du mouvement diurne du ciel), l'autre sur l'axe de l'orbite terrestre (celui de la trajectoire annuelle du Soleil). Les grands cercles qui les coupent perpendiculairement constituent deux familles. Ceux définis par rapport à l'équateur se recoupent tous aux pôles Nord et Sud du ciel; ceux définis par rapport à l'écliptique se recoupent tous aux pôles écliptiques... Il est aisé de remarquer qu'ils constituent dans les deux cas des lignes analogues aux méridiens terrestres. On comprend alors que l'on peut repérer un point de la voûte céleste comme on repère un point de la surface terrestre, par deux angles (analogues à la longitude et à la latitude terrestres d'un lieu). On peut alors se livrer à de véritables mesures que la fée informatique rend possibles... en un petit quart d'heure !

De la même façon que l'on pouvait repérer Mars en projetant les diapositives sur la carte du ciel, on pourra ici, en repérant d'abord d'un « clic » de la « souris » les étoiles repère Aldébaran et Atlas (des Pléiades), puis la planète Mars, assister au report automatique de cette dernière sur une carte du ciel convenablement graduée. Notons que la carte affichée à l'écran comporte les graduations du ciel en coordonnées équatoriales OU écliptiques mais que le choix des unes ou des autres incombe à l'élève... Ses relevés de positions le convaincront sans peine de la pertinence du choix des coordonnées écliptiques pour le problème étudié ! Faut-il souligner que nous avons ainsi « shunté » le délicat problème de la conversion de coordonnées, faisant appel à la trop délicate trigonométrie sphérique ? La précision atteinte est satisfaisante : un peu de soin permet d'atteindre le dixième de degré. Soyons bien assurés que l'on ne fit pas mieux jusqu'à Tycho BRAHE, qui fut sans doute le premier à concevoir des

instruments capables d'apprécier la minute d'arc ! Il ne reste plus qu'à MESURER sur l'écran de l'ordinateur, avec tout le soin nécessaire, les coordonnées (longitude et latitude écliptiques géocentriques) des positions successives de la planète Mars aux dates des différentes photos. [3]

Il est alors facile de transcrire les résultats (date, longitude, latitude) dans un tableur. REGRESSI me paraît parfaitement adapté à cet usage. On traduit par des graphes le mouvement de la planète. Leur analyse raisonnée permettra de conclure qu'il faut plutôt se consacrer aux variations de la longitude écliptique de Mars qu'à celles de sa latitude. Celle-ci est en effet suffisamment proche de zéro (elle atteint difficilement 2°) pour que l'on puisse dire, en première approximation, que Mars se déplace pratiquement dans le plan de l'écliptique, ou, plus rigoureusement, que l'on se limite à étudier le mouvement de sa projection sur le plan de l'écliptique... (Notons qu'une étude de l'inclinaison de l'orbite de Mars sur le plan de l'écliptique peut aussi être menée sans difficultés majeures à partir des résultats).

## Mesurer pour modéliser...

Nous pouvons assister maintenant à la rencontre historique de deux grands esprits, PTOLEMEE et COPERNIC, concepteurs de modèles, qui, en dépit de tout ce que l'on peut entendre parfois, sont cinématiquement équivalents.

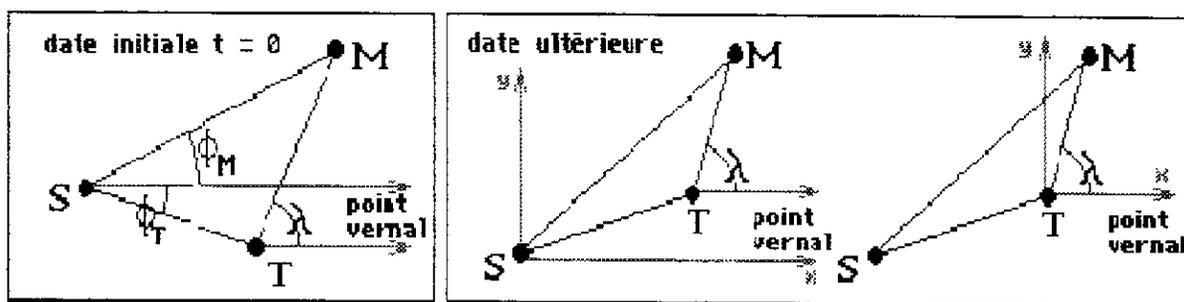
« Un schéma animé vaut mieux qu'un long discours » ...[4]

Sur l'écran de l'ordinateur, l'élève OBSERVE deux triangles en mouvement. Il constate leur égalité et leur déformation simultanée. Il note que deux des trois côtés ont une longueur constante... alors que celle du troisième côté varie. Il remarque enfin que l'un des sommets est immobile pour chacun des deux triangles... mais que ce n'est pas le même. Le professeur se tait....

Une discussion entre les groupes peut s'ouvrir, et un « clic » libère le tracé des trajectoires des 6 sommets des triangles ! Il faut savoir alors détecter dans les regards qui s'allument la joie d'avoir COMPRIS sans explications un phénomène difficile: le Soleil « S », la Terre « T » et Mars « M » s'incrustent mentalement sur l'image animée... et la compréhension en termes de « référentiels » de la rétrogradation d'une planète est pratiquement déclenchée !

N'oublions pas cependant que nous sommes en cours de physique et que la modélisation est en général une affaire de nombres... D'ailleurs qu'y-a-t-il « derrière » les images qui nous ont aidés ?

La distance TS (Terre - Soleil) sera notée  $R_T$ . La distance MS (Mars - Soleil) sera notée  $R_M$ . Ces deux distances restent fixes.  $T_T$  et  $T_M$  sont respectivement les périodes des mouvements de rotation uniformes des segments ST et SM, qui relie respectivement Soleil et Terre ou Soleil et Mars.



Introduisons un peu de calcul vectoriel !

Pour PTOLEMEE:

$\vec{TM} = \vec{TS} + \vec{SM}$  (TS est le rayon de « l'épicycle » et SM celui du « déférent »).

Pour COPERNIC :

SM et  $\vec{ST}$  tournent autour de S à vitesses angulaires constantes mais  $\vec{TM} = \vec{SM} - \vec{ST}$ .

Pour tous deux, avec des angles exprimés en degrés, les coordonnées des vecteurs  $\vec{SM}$  et  $\vec{ST}$  sont:

pour  $\vec{SM}$   $x_M = R_M \cdot \cos(360 \cdot t / T_M + \phi_M)$   $y_M = R_M \cdot \sin(360 \cdot t / T_M + \phi_M)$

pour  $\vec{ST}$   $x_T = R_T \cdot \cos(360 \cdot t / T_T + \phi_T)$   $y_T = R_T \cdot \sin(360 \cdot t / T_T + \phi_T)$

Déduire alors les coordonnées de Mars dans un repère géocentrique convenable est un jeu d'enfant :

$$x = R_M \cdot \cos(360 \cdot t / T_M + \phi_M) - R_T \cdot \cos(360 \cdot t / T_T + \phi_T)$$

$$y = R_M \cdot \sin(360 \cdot t / T_M + \phi_M) - R_T \cdot \sin(360 \cdot t / T_T + \phi_T)$$

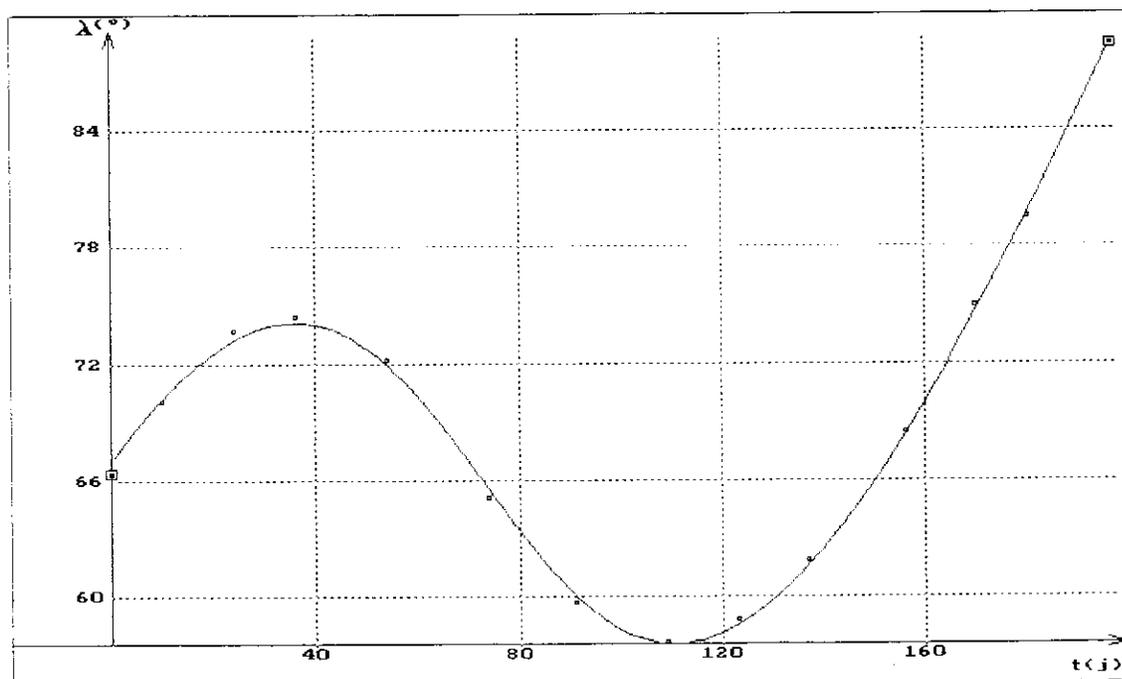
Quant à l'angle  $\lambda$  que fait TM avec l'axe des abscisses (dirigé vers le point vernal, cela va de soi...)

$$\tan \lambda = y/x \quad \text{et} \quad \lambda = \text{Arctan}(y/x)$$

$R_T$  est connu (1 UA),  $T_T$  l'est aussi (365,25 jours),  $T_M$  est de l'ordre de deux ans puisque deux rétrogradations successives sont ainsi séparées dans le temps. Quant à  $\phi_M$  et  $\phi_T$ , ils sont assez faciles à estimer (pour les puristes ce sont les longitudes écliptiques héliocentriques de la Terre et de Mars à la date prise comme origine des temps, en l'occurrence celle de la première photo). On peut ici raisonnablement les *estimer* respectivement à  $-10^\circ$  (la première photo date du 15 Septembre, soit quelques jours avant l'équinoxe d'automne, qui correspondra à  $0^\circ$ !) et à  $30^\circ$ .

Le fabuleux logiciel de modélisation qu'est REGRESSI permet alors de chercher les valeurs qui permettent la meilleure corrélation de nos mesures et du modèle. Mesures et modèle optimisé apparaissent sur la figure ci dessous. Ce graphe permet de se convaincre de la validité des hypothèses de PTOLEMEE et COPERNIC (la précision moyenne est de l'ordre de 0,5%!).

Les valeurs trouvées pour  $R_M$  (1,56 UA) et pour  $T_M$  (715 jours) peuvent être analysées et discutées.



Il est intéressant de noter que nous avons rarement l'occasion en TP de sciences physiques d'obtenir une aussi bonne adéquation du modèle aux mesures !

Comment ne pas admirer dès lors l'esprit critique et la persévérance de KEPLER associés à son absolue confiance dans les mesures de son maître Tycho BRAHE ? C'est parce que ce modèle ne le satisfaisait pas qu'il se lança dans ses longues recherches : la voie menant aux orbites elliptiques et aux trois lois qui le rendent célèbre était ouverte...

[1] J'ai été amené à mettre au point un logiciel « INF'ASTRO » que je tiens à disposition de tous ceux qui souhaitent tester cette méthode, contre 20 F en timbres poste pour frais de duplication et d'expédition.

[2] L'application « MARS » d'« INF'ASTRO » permet d'afficher à l'écran les images numérisées des diapositives de Daniel TOUSSAINT (« Rétrogradation de Mars »).

[3] « RETROGRADATION » permet l'intégralité de cette série de mesures.

[4] « PTOLEMEE » anime sous vos yeux diverses planètes fictives, en « mouvements uniformes », qu'elles soient intérieures ou extérieures. Elles obéissent cependant à la 3<sup>e</sup> loi de KEPLER...

Francis BERTHOMIEU  
 Place de l'église  
 83111 AMPUS