Les lunes d'un petit Martien

Chantal Lecoutre, Sylvie Thiault

Le 18 février dernier, le rover Perseverance s'est posé sur Mars. De nombreuses photos et vidéos font la une de l'actualité spatiale et scientifique. C'est l'occasion de proposer à nos élèves une activité pour comprendre ce qu'un observateur placé à la surface de Mars verrait dans son ciel.

Mars possède deux satellites naturels aux comportements surprenants, PHOBOS (la peur) et DÉIMOS (la terreur). Du fait de leur petitesse et de leur proximité avec Mars ils ne furent découverts qu'en 1887 par Asaph Hall. Lors des oppositions de Mars leur magnitude apparente (pour un observateur sur Terre) est estimée à 11,3 pour Phobos et 12,4 pour Déimos.

En utilisant les données physiques mesurées depuis la Terre ou les sondes spatiales, nous allons essayer de reconstituer et de comprendre ce que voit un « petit Martien ». Cette activité est adaptée d'un « atelier du mercredi » qui avait été proposé et animé par Philippe Merlin à l'observatoire de Lyon.

Dans une première partie nous nous intéresserons au diamètre apparent et à la magnitude des satellites vus de Mars ainsi qu'aux possibilités d'éclipses totales sur la planète.

Dans une deuxième partie, avec le logiciel GeoGebra, nous modéliserons les mouvements des satellites sur leurs orbites vus de Mars afin de comprendre ce que voit notre « petit Martien » et ce que voyait le héros de *Seul sur Mars* : « Je navigue donc grâce à Phobos, qui traverse le ciel d'ouest en est et tourne si vite autour de la planète qu'il se lève et se couche deux fois par jour » (Andy Weir, l'auteur du roman *Seul sur Mars*).

Données

- Unité astronomique : 1 ua = 149 600 000 km.
- Rayon du Soleil : R_H = 696 000 km.

	TERRE	MARS
Rayon	R_T = 6 370 km	R_M = 3 390 km
Demi-grand axe	a_T = 1 ua	a_M = 1,52 ua
Période de révolution sidérale	P_T = 365,26 jours	P_M = 686,99 jours
Période de rotation	p_T = 1 jour	p_M = 1,03 j (24,6 h)
Longitude écliptique à t = 0*	$lg0_T$ = 100,5°	$lg0_M$ = 65,7°

* On a choisi t = 0 le 01/01/2021 à 0 h

	PHOBOS	DÉIMOS
Demi-grand axe	a_1 = 9 380 km	a_2 = 23 460 km
Dimensions	en km (18 ; 22 ; 27)	en km (11 ; 12 ; 15)
Période de révolution	P_1 = 0,32 jour	P_2 = 1,26 jour

Première partie

Diamètres apparents des satellites

Il est intéressant de connaître les diamètres apparents de Phobos et Déimos vus de Mars pour les comparer au diamètre apparent de la Lune vue de la Terre.

Nous allons calculer l'angle maximum α sous lequel on voit chaque satellite, sous sa plus grande dimension, dim_{max}, en supposant qu'il passe à la verticale du lieu d'observation.

Sur la figure 1, M désigne le centre de la planète Mars.

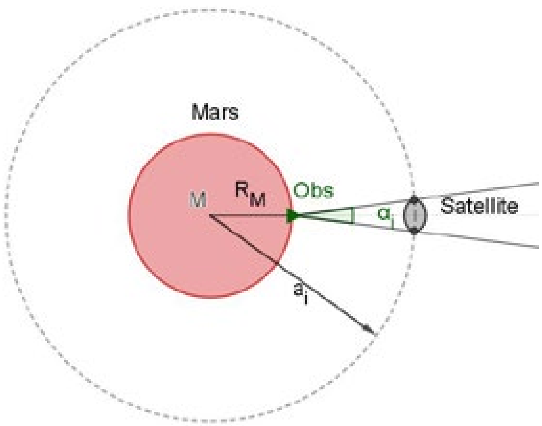

Fig.1. Calcul du diamètre apparent d'un satellite de Mars.

$$\tan\frac{\alpha_i}{2} = \frac{\text{dimension max du satellite}}{2(a_i - R_M)}$$

formule que l'on peut simplifier ainsi, les angles étant petits :

$$\alpha_i = \frac{\text{dimension max du satellite}}{a_i - R_M} \times \frac{180}{\pi}$$

On obtient pour Phobos $\alpha_1 \approx$ 15,5'
pour Déimos $\alpha_2 \approx$ 2,6'

En comparant au diamètre apparent de la Lune vue de la Terre qui est de 30 minutes d'arc, on s'aperçoit que, pour un Martien, le diamètre apparent de Phobos est d'environ la moitié de celui de la Lune alors que celui de Déimos est beaucoup plus petit.

Les photos ci-dessous montrent les tailles respectives de Déimos et Phobos vus depuis Mars (photographiés par le robot Curiosity) et de la Lune vue depuis la Terre (figure 2).

Fig.2. *À gauche, Phobos et Déimos photographiés par Curiosity depuis la surface de Mars.*
À droite, la Lune vue depuis la Terre, à la même échelle.
(Crédit : NASA/JPL-Caltech/Malin Space Science Systems/ Texas A&M Univ).

Est-il possible pour un observateur martien d'assister à une éclipse totale de Soleil ?

Pour qu'une éclipse totale ait lieu à la surface de Mars il faut tout d'abord que la planète, son satellite et le Soleil soient alignés comme sur la figure ci-dessous (figure3).

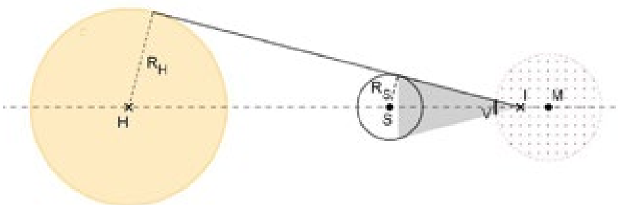

Fig.3*. Situation d'éclipse de Soleil.*

Pour simplifier, nous considérerons que le satellite est une sphère de rayon R_S (plus grande dimension).

S désigne le centre du satellite et I le sommet du cône d'ombre.

V est le point d'intersection de (SI) avec la surface de Mars, où est placé notre observateur.

Il y a éclipse totale quand le sommet du cône d'ombre est plus éloigné de S que l'observateur :

SI > SV.

En appliquant le théorème de Thalès on obtient :

$$\frac{SI}{HI} = \frac{R_S}{R_H}$$

et en estimant que HI est très peu différent de a_M :

$$\frac{SI}{a_M} = \frac{R_S}{R_H} \text{ et } SI = a_M \times \frac{R_S}{R_H}$$

Attention aux unités ! a_M est donné en unité astronomique, ne pas oublier de multiplier par la valeur de l'ua en km.

Pour le calcul de SV, a_S désigne le demi-grand axe de l'orbite du satellite. On trouve :

	Phobos	Déimos
SI = distance (satellite - sommet du cône d'ombre) en km	4 410	2 450
SV = $a_S - r_M$ (distance satellite-surface de Mars) en km	5 990	20 070

Conclusion : pour les deux satellites on trouve SI < SV donc le sommet du cône d'ombre n'atteint pas la surface de Mars. Il ne peut y avoir d'éclipse totale de Soleil à la surface de Mars.

Lorsque les satellites passent entre le Soleil et sa planète notre « petit Martien » observe simplement des transits.

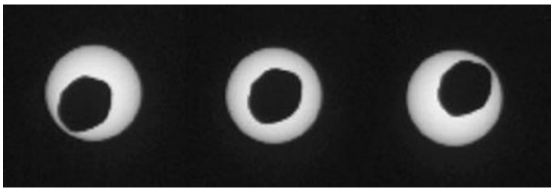

Fig.4. *Passage de Phobos devant le Soleil photographiée par Curiosity le 20 août 2013 (une image toutes les 3 s).*
On trouve une animation de ce passage sur le site https://apod.nasa.gov/apod/ap190410.html.
Crédit NASA/JPL-Caltech/Malin Space Science Systems/Texas A&M Univ.

Une autre solution consiste à calculer le diamètre apparent du Soleil vu depuis Mars. On trouve 21', plus que les 16' de Phobos, qui ne peut donc éclipser le Soleil.

Magnitude des satellites vus de Mars

Mars est au plus près de la Terre quand elle est à l'opposition c'est à dire quand la Terre est entre le Soleil et Mars. La distance Terre - Mars est alors TM = $a_M - a_T$. Elle est en moyenne de 0,524 ua.

Dans cette configuration les magnitudes de Phobos et de Déimos vus de la Terre sont respectivement de 11,3 et 12,4. Nous allons calculer les magnitudes lorsque les deux satellites sont vus de la surface de Mars et qu'ils passent au zénith.

La **luminosité** apparente L d'un astre est inversement proportionnelle au carré de sa distance.

Donc la luminosité du satellite S vu de Mars est :

$L_M = \frac{k}{(a_S - R_M)^2}$ où a_S est le demi-grand axe du satellite et k une constante (voir figure 5).

La luminosité du satellite S vu de la Terre est

$$L_T = \frac{k}{TS^2} \text{ donc } \frac{L_M}{L_T} = \frac{TS^2}{(a_S - R_M)^2}.$$

Mais TS et TM étant très proches (figure 5) on a :

$$\frac{L_M}{L_T} = \frac{TM^2}{(a_S - R_M)^2} \qquad (1)$$

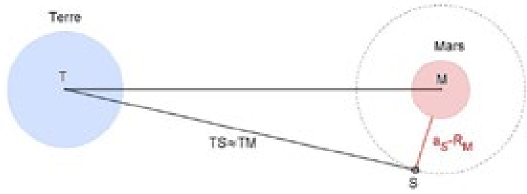

Fig.5. *La distance observateur-satellite vaut TS (environ TM) pour un Terrien et $a_S - R_M$ pour un Martien.*

La magnitude apparente M est définie par :

M = –2,5 log L + Constante.

En partant de l'égalité (1), prenons les log et multiplions par 2,5 :

$$-2{,}5\log(L_T) + 2{,}5\log(L_M) = 5\log\left(\frac{TM}{a_S - R_M}\right)$$

En désignant par m_M la magnitude du satellite vue de Mars et par m_T la magnitude du satellite vue de la Terre :

$$m_T - m_M = 5\log\left(\frac{TM}{a_S - R_M}\right)$$

ou encore $m_M = m_T - 5\log\left(\frac{TM}{a_S - R_M}\right)$

attention aux unités ! TM est donné en unité astronomique et R_M en km !

On obtient :

magnitude de Phobos vue de Mars –9,3
magnitude de Déimos vue de Mars –5,6

On peut alors comparer à Vénus qui, à son maximum d'éclat, a une magnitude de –4,6 vue de la Terre et à la pleine Lune qui a une magnitude de –12,6.

Remarque : nos calculs ne sont cependant qu'approximatifs.

Deuxième partie : modélisation des mouvements avec GeoGebra

Nous vous proposons ici de modéliser les mouvements apparents des satellites Phobos et Déimos dans le ciel martien à l'aide du logiciel GeoGebra.

Les commandes GeogGebra sont indiquées en caractère gras.

« Les calculs d'éphémérides de position de Mars ont été réalisés par le service de calcul des éphémérides de l'IMCCE à travers son portail Système solaire (https://ssp.imcce.fr) ».

1. Préparation fichier de travail satmars0.ggb

Avec les élèves il peut être préférable de démarrer avec un fichier comportant tous les outils nécessaires.

Commençons par ouvrir une nouvelle feuille GeoGebra et dans Affichage choisissons Tableur.

Vous récupérerez depuis votre tableur favori une liste de dates à coller en A2. Ici on a choisi 1095 dates pour couvrir 3 ans à partir du 1er janvier 2021.

Sur le site https://ssp.imcce.fr en suivant la démarche décrite dans le CC 168 page 16 (article en libre accès sur notre site clea-astro.eu, « archives des Cahiers Clairaut » année 2019), vous récupérerez la liste des longitudes écliptiques de Mars correspondantes à coller en B2. Attention, ici le centre du repère est : héliocentre !

En sélectionnant les 1095 dates et par clic droit, on crée une liste qu'on nommera « dates ».

Dans la barre de saisie, on tape :

npt=Longueur[dates]

Dans la barre de saisie,toujours, on tape toutes les données nécessaires dont les valeurs sont données en tête de cet article: **ua, R_H, R_T ,R_M , a_T, a_M, a_1, a_2, P_T, P_M, p_M, P_1, P_2 lg0_M**.

Dans la barre de saisie, on tape : **lg0_M=B2**

On crée un curseur **tps** qui, pour l'instant, varie de 0 à **npt-1** avec un incrément de 1.

Dans propriétés, on choisit d'afficher **tps**, et dans position : position absolue.

On crée un texte *(icône du curseur puis menu déroulant)* en tapant dans champ vide :

Elément[dates,tps-1]

Pour passer d'un point de vue héliocentré à un point de vue centré sur Mars, on crée un booléen **a** en tapant dans la fenêtre de saisie : **a=false**

Par clic droit dans propriétés on remplit la légende en tapant **Héliocentrisme/Martiocentrisme ?** puis on coche « afficher l'objet », « afficher l'étiquette » et on fixe.

On crée un texte «Héliocentrisme» et un texte «Martiocentrisme».
Pour chacun de ces textes, par clic droit propriétés/avancé on renseigne la condition pour l'afficher.

(**a=true** pour héliocentrisme, **a=false** pour martiocentrisme)

On ajuste leur place à l'écran et dans propriétés / position on coche : position absolue.

2. Construction du système Soleil, Terre, Mars

On fera l'hypothèse que les planètes ont des orbites circulaires.

Les deux planètes seront repérées en coordonnées polaires : (demi-grand axe ; longitude écliptique).

Nous utiliserons ici comme unité le rayon martien.

On crée le point représentant le centre du Soleil H'=(0,0) de couleur jaune et de dimension 6.

Créer le demi-grand axe de la Terre a'_T, le demi-grand axe de Mars a'_M, l'orbite de la Terre c'_T, l'orbite de Mars c'_M :

a'_T = a_T*ua/R_M
a'_M = a_M*ua/R_M
c'_T = Cercle(H',a'_T)
c'_M = Cercle(H',a'_M)

Maintenant plaçons sur leur orbite les points Terre T' et Mars M' en fonction de leur longitude écliptique (figure 6).

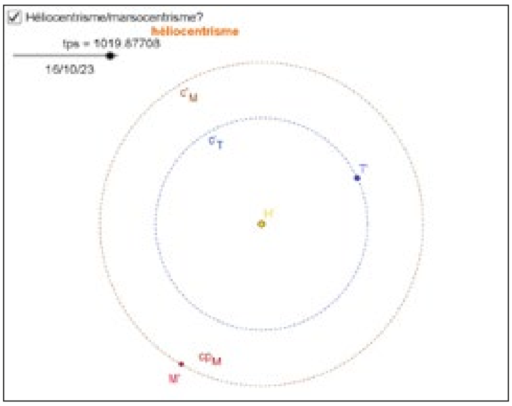

Fig.6. Orbites de la Terre et de Mars.

Dans la fenêtre Algèbre sont données les longitudes écliptiques au temps tps = 0, notées $lg0_T$ et $lg0_M$.

On a aussi les périodes de révolution des deux planètes PT et PM.

Au bout d'un temps **tps** (en jours), la Terre a tourné sur son orbite de 360/PT*tps et Mars a tourné sur son orbite de 360/PM*tps. Leurs longitudes écliptiques respectives au temps **tps** sont :

lg_T = 360/P_T*tps + lg0_T
lg_M = 360/P_M*tps + lg0_M
On place les points T' et M':
T' = (a'_T ; lg_T°)
M' = (a'_M ; lg_M°)

Attention, le séparateur est ici un « ; » ! Pour l'angle ne pas oublier le « ° » des degrés !

On peut alors faire défiler le temps à l'aide du curseur **tps** et observer les mouvements de Mars et la Terre autour du Soleil.

Pour l'observation des satellites depuis la surface de Mars il va falloir se placer dans un repère centré sur Mars.

Mettre Mars à l'origine revient à appliquer une translation de vecteur $\overrightarrow{M'H'}$.

H', T', M', c'_T, c'_M ne seront affichés qu'en héliocentrisme. Pour cela, pour chacun de ces objets, aller dans Propriétés, Avancé, et mettre la valeur logique a.

En martiocentrisme seront affichés H, T, M, cT, cM tels que :

H = Si[a,H',Translation[H',Vecteur[M',H']]]
T = Si[a, T', Translation[T',Vecteur[M', H']]]
M = Si[a, M', Translation[M',Vecteur[M', H']]]
c_T = Si[a, c'_T, Translation[c'_T,Vecteur[M', H']]]
c_M = Si[a, c'_M, Translation[c'_M,Vecteur[M', H']]]

H' étant au centre du repère héliocentrique, ces commandes peuvent être simplifiées.

H = Si[a, H', H'-M']
T = Si[a, T', T'-M']
M = Si[a, M', H']
c_T = Si[a, c'_T, Translation[c'_T,-M']]
c_M = Si[a, c'_M, Translation[c'_M,-M']]

En jouant sur la boite héliocentrisme / géocentrisme et sur le zoom on visualise les mouvements dans les deux référentiels. On peut activer la trace du point T (figure 7).

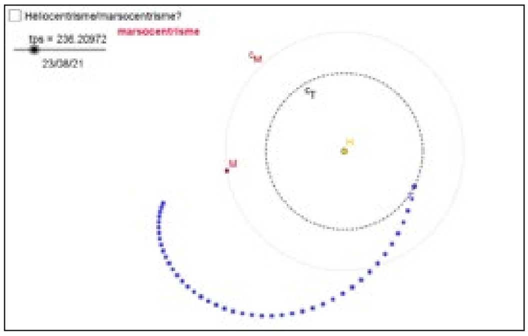

Fig.7. La Terre vue de Mars.

SAUVEGARDEZ ! et maintenant intéressons-nous aux satellites…

3. Les satellites sur leurs orbites

Cacher c_T et c_M, ou dans style choisir un trait pointillé fin. Phobos sera le satellite 1 et Déimos le satellite 2.

On se place maintenant dans le référentiel martiocentrique... Zoomer sur le point M. Beaucoup !

On crée la planète Mars :

cercle nommé cp_M, centre M, rayon unité, couleur brun, opacité 50%: cp_M = Cercle(M,1)

On crée ensuite les orbites c_1 et c_2 des satellites, centre M, rayon les demi-grands axes a_1/R_M et a_2/R_M car l'unité est toujours le rayon martien :

c_1 = Cercle(M,a_1/R_M)
c_2 = Cercle(M,a_2/R_M)

On place les satellites S1 et S2 sur leur orbite autour de Mars : nous n'avons pas leur position à l'origine du temps, nous prendrons ces valeurs égales à zéro (ce n'est qu'une simulation).

P1 et P2 étant les périodes de révolution respectives des satellites sur leur orbite.

S_1 = (a_1/R_M;(360/P_1*tps)°)+M
S_2 = (a_2/R_M;(360/P_2*tps)°)+M

On choisira deux couleurs différentes pour les représenter (figure 8).

Reste maintenant à faire varier le curseur de temps **tps** et à observer les mouvements du système.

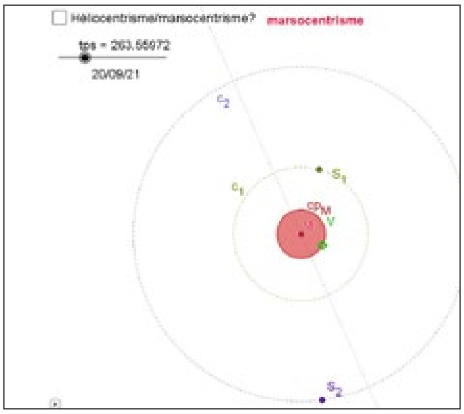

Fig.8. Avec les satellites en orbites fenêtre graphique 1.

4. Que voit un observateur martien ?

On place sur l'équateur martien un point V vert, représentant le « petit Martien », tournant avec Mars, de période de rotation sidérale p_M :

V = (1;(360/p_M*tps)°)+M

On trace v_V demi-droite [MV) verticale du lieu, puis la droite projection du plan horizontal sur le plan de vue et tangente au cercle Mars cp_M en V :

v_V = DemiDroite[M,V](ou outil demidroite)
h_V = Tangente[V,cp_M] (ou outil tangente)

On ouvre maintenant (dans Affichage) la fenêtre graphique2.

Pour simplifier, le mouvement apparent du Soleil sera représenté par un demi-cercle de rayon unité (couleur orange) passant par le zénith. L'axe (x'x) sera l'axe Est-Ouest (figure 9).

On crée le ciel dans la barre de saisie :

Ciel = DemiCercle[(-1,0),(1,0)]

On crée trois objets texte « zénith », « Est » et « Ouest » en les fixant en place.

Le Soleil, Phobos et Déimos seront chacun représentés, lorsqu'ils sont au-dessus de l'horizon, par un point en coordonnées polaires de distance 1 et d'angle son angle horaire en prenant 0° au zénith.

AH_H = –Angle[V,M,H]

Attention ! signe – car l'angle horaire est compté dans le sens rétrograde.

De même :

AH_1 = -Angle[V+Vecteur[M,V],V,S_1]
AH_2 = -Angle[V+Vecteur[M,V],V,S_2]

On crée une valeur logique **fsol** qui sera «vrai» si le Soleil est au-dessus de l'horizon et «faux» sinon.

fsol = Si[cos(AH_H)>0,true,false].

On crée alors le Soleil puis Phobos et Déimos.

Soleil = Si[fsol, (1 ; -AH_H+pi/2]
Phobos = Si[cos(AH_1)>0, (1 ; -AH_1+pi/2)]
Deimos = Si[cos(AH_2)>0, (1 ; -AH_2+pi/2)]

On va alors modifier le curseur de temps **tps** pour observer dans le ciel de Mars, le mouvement apparent de ses satellites et celui du Soleil.

On crée dans la barre de saisie les listes incn et incd :

incn={''jour",''heure",''minute"}
incd={1, 1/24, 1/1440}

On crée le curseur **inc** variant de 1 à 3 avec un incrément de 1. Et à côté du curseur **inc**, on crée le texte **Elément(incn,inc)** dans « champ vide ».

On choisit de ne pas afficher l'étiquette de **inc**. En faisant varier **inc**, il s'affiche successivement jour, heure, minute.

On choisit d'afficher **tps** dans la fenêtre graphique 2 *(clic droit, avancé, cocher graphique 2)*. On remplace son incrément par **Elément(incd, inc)** .

On peut alors jouer sur le curseur **inc** pour faire apparaître le texte « minute » et animer **tps**.

Observons alors les mouvements apparents de Déimos, Phobos et du Soleil dans le ciel de notre martien.

Le Soleil se lève en direction de l'est, se couche en direction de l'ouest. Pas de quoi faire perdre ses repères à un Terrien débarqué sur Mars.

Mais pour Phobos, le lever se fait en direction de l'ouest et le coucher en direction de l'est.

Quand on observe ensuite que Déimos s'est levé en direction de l'est et vient croiser la trajectoire apparente de Phobos, il y a matière à réflexion…

Le lecteur aura compris que la réponse se trouve dans la comparaison des périodes de révolution des deux satellites et de la période de rotation de Mars.

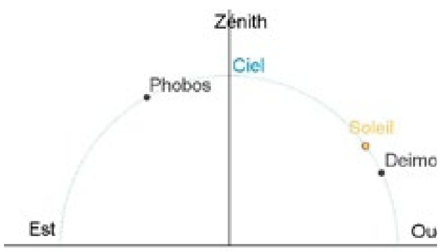

Fig.9. Modélisation des mouvements apparents des satellites et du Soleil au-dessus de l'horizon.

■