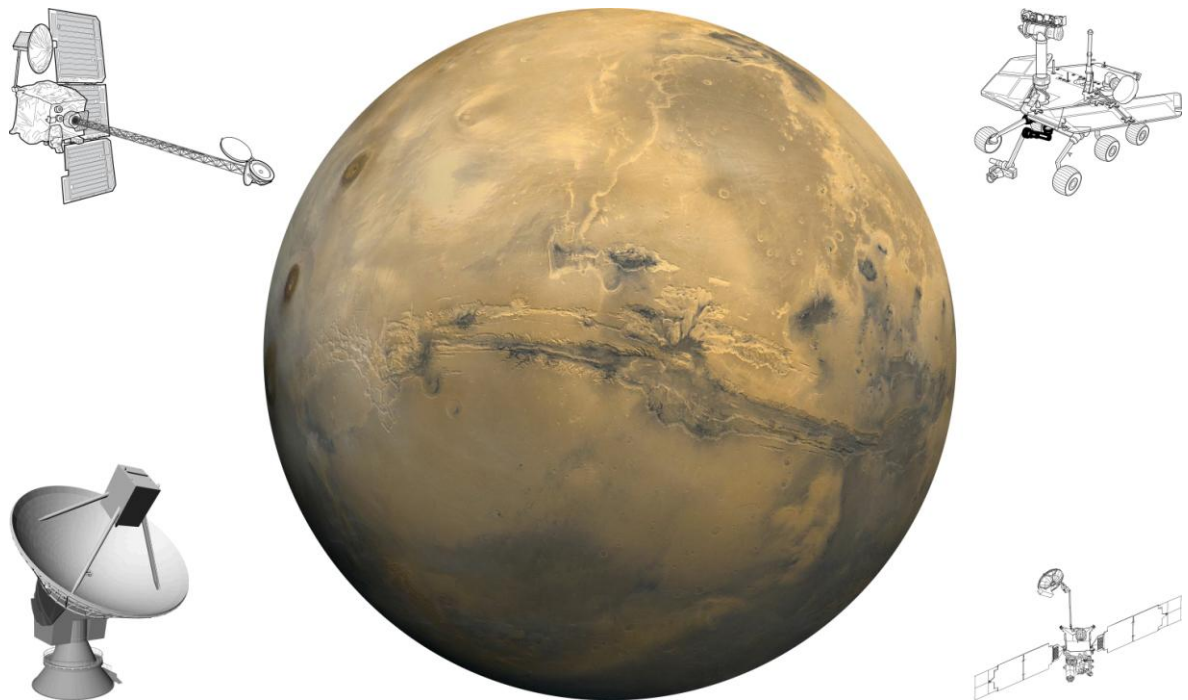




# Explorez Mars (1/4)

Document à destination des enseignants de collège



**Département éducation – formation**

Palais de la découverte  
Avenue Franklin Roosevelt  
75008 Paris  
[www.palais-decouverte.fr](http://www.palais-decouverte.fr)

2016

# Sommaire

## Le système solaire, les planètes et leur visibilité Le cas de Mars

1	Que contient le système solaire ?	3
2	Des tailles et des distances... astronomiques	3
3	Les lois de Kepler	4
	3.1 Première loi de Kepler	5
	3.2 Deuxième loi de Kepler	8
	3.3 Troisième loi de Kepler	9
4	L'orbite de la planète Mars	11
5	Repérer les planètes dans le ciel	13
	5.1 Les mouvements diurne et annuel	13
	5.2 Visibilité des planètes à l'œil nu	13
	5.3 Cas des planètes inférieures	14
	5.4 Cas des planètes supérieures	15
	5.5 Boucles de rétrogradation	15
6	Les aspects de Mars	16
7	Mars en 2016	20

# Le système solaire, les planètes et leur visibilité.

## Le cas de Mars.

### 1 Que contient le système solaire ?

Le **Soleil** est une **étoile**, c'est-à-dire une énorme sphère de gaz dont la surface, très chaude, émet de la lumière. Il représente à lui seul plus de 99,8 % de la masse du système solaire. **Huit planètes** gravitent autour du Soleil, réparties en deux familles : les **planètes telluriques**, proches du Soleil, et les **planètes géantes**, plus éloignées. Les planètes tournent toutes dans le même sens autour du Soleil et à peu près dans le même plan, le plan de l'écliptique. Elles ne nous sont visibles que parce qu'elles réfléchissent la lumière du Soleil. À cet inventaire, il faut ajouter les **satellites naturels** des planètes, les **planètes naines** et des **milliards de petits corps** (astéroïdes, comètes, poussières etc.).

### 2 Des tailles et des distances... astronomiques

Les tailles des corps célestes et surtout les distances dans le système solaire sont sans commune mesure avec ce que l'on rencontre au quotidien. Ainsi, si le Soleil possède un diamètre supérieur au million de kilomètres, la distance qui nous sépare de lui est cent fois plus grande !

Construisons par la pensée un modèle réduit du système solaire dont les dimensions auraient été divisées par **deux milliards**. À cette échelle, **le Soleil aurait la même taille qu'un ballon suisse** (cette grosse boule de caoutchouc gonflée que l'on utilise en kinésithérapie et dans le monde du fitness), c'est-à-dire **70 cm**.

La planète qui en est la plus proche,  **Mercure**, serait un **petit grain** de 2,5 millimètres gravitant en moyenne à **29 mètres** de lui ! **Vénus**, elle, serait un **gros grain** de 6 millimètres tournant à **54 mètres** de l'astre du jour. Notre bonne vieille **Terre** serait un **grain à peine plus gros** (6,4 millimètres) gravitant à la distance respectable de **75 mètres**. Enfin, **Mars** serait un **grain rougeâtre** de **3,4 millimètres** tournant à **110 mètres** de notre étoile. Voilà qui achève ce voyage dans le monde des planètes telluriques. Visons plus grand et plus loin !

La plus grosse et la plus massive des planètes, **Jupiter**, serait **à peine plus large qu'une balle de tennis** (7,1 centimètres) et située à **390 mètres** du Soleil. On trouverait **Saturne** à **710 mètres** de l'astre du jour, sous la forme d'une **boule de 6,0 centimètres** entourée par des **anneaux de 14 centimètres d'envergure**. Leur épaisseur serait si faible qu'elle équivaldrait, à cette échelle, à quelques dizaines d'atomes empilés. À un peu plus de **1 400 mètres** du Soleil, une **bille verdâtre** de **2,6 centimètres** : **Uranus**. Enfin, à près de **2 300 mètres** de notre étoile, une autre **bille**, bleutée, de **2,5 centimètres**, **Neptune**.

À cette échelle, **l'étoile la plus proche du Soleil, Proxima du Centaure**, serait une **balle rouge** de **9,8 centimètres** localisée à... **20 000 km** ! On voit ainsi, de manière flagrante, que l'espace séparant les étoiles est de très loin supérieur à leur dimension.



Bien que son aspect esthétique soit indiscutable, cette vue d'artiste ne respecte ni les distances relatives des planètes au Soleil, ni les tailles relatives des différents corps célestes de la scène. Mettre le système solaire en situation sur une seule page relève de la gageure. Crédit : NASA.

### 3 Les lois de Kepler

Les trois lois de Kepler gouvernent le mouvement des planètes autour du Soleil. Les deux premières furent publiées en 1609 dans *l'Astronomie Nova* et la troisième en 1619 dans *l'Harmonices Mundi*. Pour les établir, Johannes Kepler (1571 – 1630) exploita la masse considérable d'observations des positions planétaires effectuées par l'astronome danois Tycho Brahe (1546 – 1601) dont il fut l'assistant pendant un an et demi. Les preuves qu'apporte Kepler sont essentiellement empiriques et fondées sur l'observation. Il reviendra au génie de Newton d'en fournir la démonstration mathématique quatre-vingts ans plus tard, à partir de ses lois du mouvement et de sa théorie de la gravitation universelle. Rappelons que celle-ci stipule qu'entre deux points  $A$  et  $B$  distants de  $r$  et de masse respective  $m_A$  et  $m_B$ , il existe une force attractive  $F$  dont l'intensité est proportionnelle à la masse des deux corps et inversement proportionnelle au carré de la distance qui les sépare :

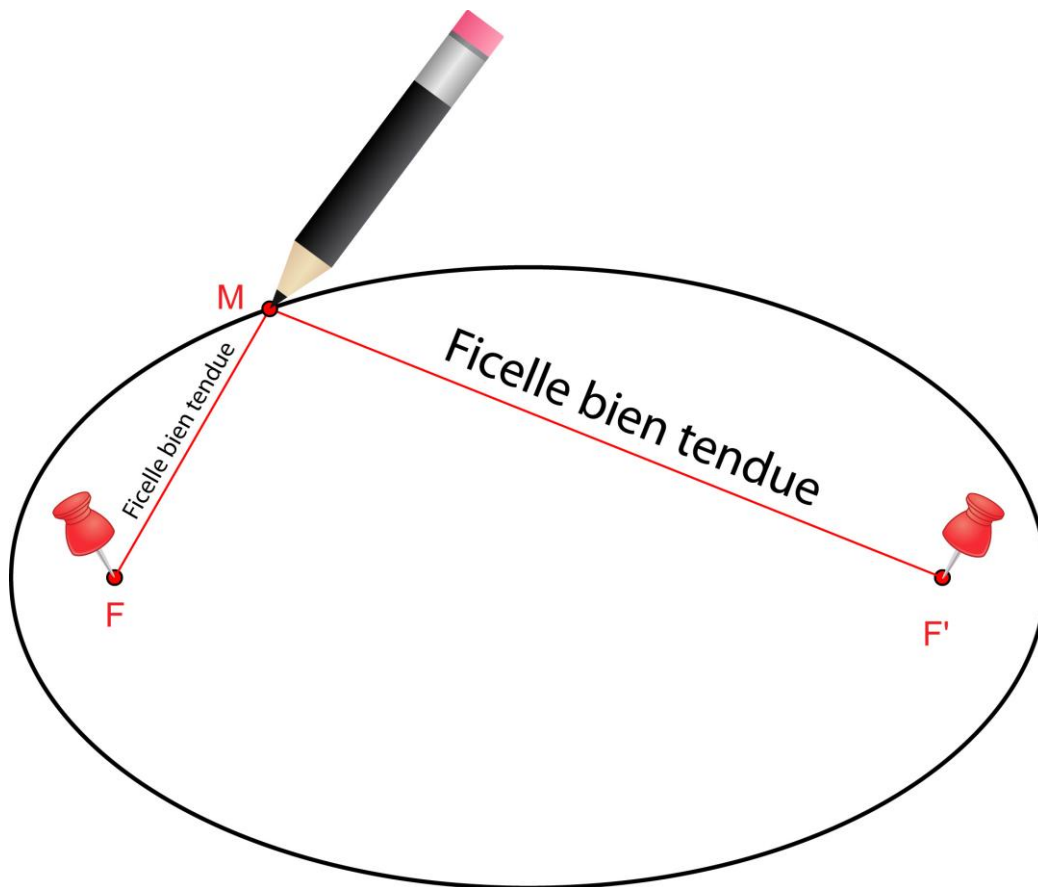
$$F = G \frac{m_A m_B}{r^2}.$$

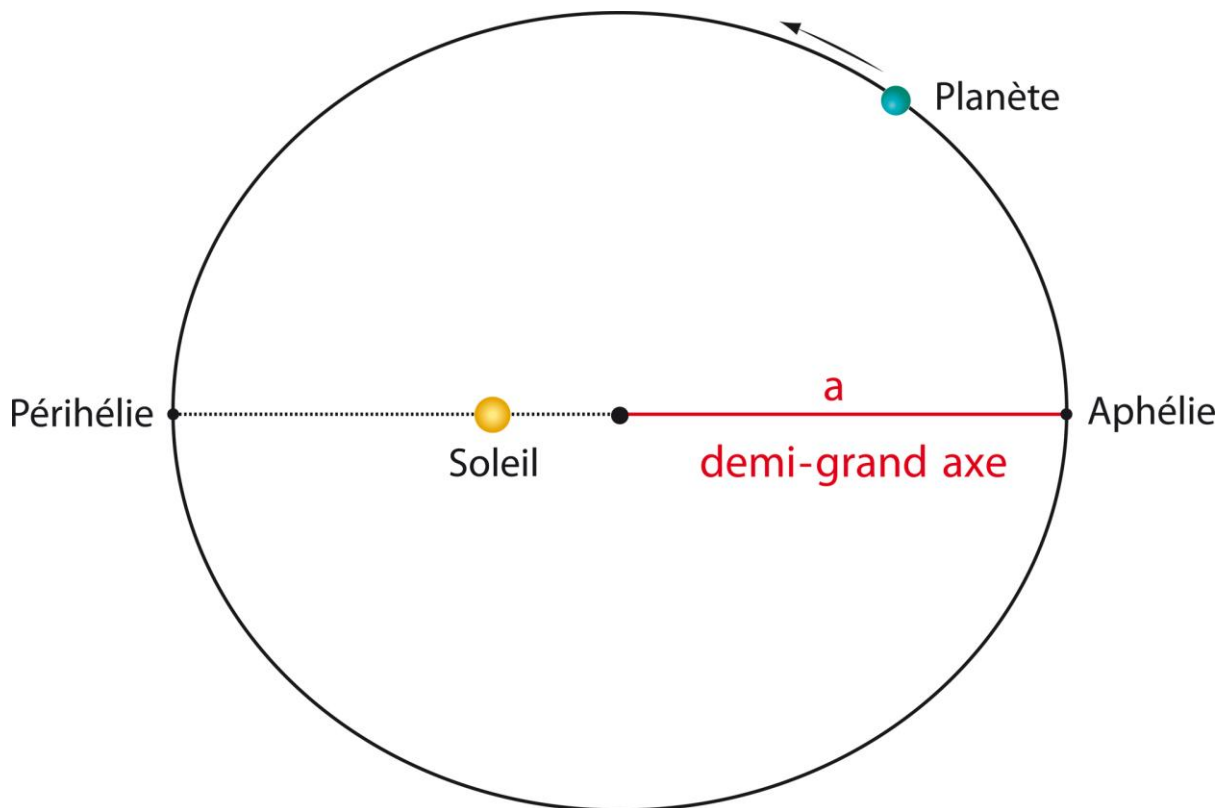
### 3.1 Première loi de Kepler

Les planètes décrivent autour du Soleil des ellipses dont le Soleil occupe l'un des foyers.

Comment introduire le concept d'ellipse ? C'est la forme que l'on perçoit en regardant un cercle en perspective ou la figure formée par l'ombre qu'un disque projette sur une surface plane. Le cercle n'est qu'un cas particulier d'ellipse.

Vous pouvez facilement construire une ellipse en mettant en pratique une définition mathématique de cet objet. Soient  $F$  et  $F'$  deux points distincts du plan. L'ensemble des points  $M$  qui vérifient  $d(M,F) + d(M,F') = 2a$  définit une **ellipse** de **foyers**  $F$  et  $F'$  et de **grand axe**  $2a$ ,  $d$  étant la distance entre les deux points entre parenthèses. Bref, l'ellipse est le lieu des points dont la somme des distances à deux points fixes est constante. Pour être plus clair, si l'on plante deux piquets dans le sol ou deux punaises sur une plaquette de liège (les deux foyers) et que l'on se munit d'une corde ou d'une ficelle non élastique (la somme constante) que l'on attache aux piquets ou aux deux punaises, le trajet que l'on parcourt ou que la pointe d'un feutre parcourt en maintenant la corde ou la ficelle tendue est une ellipse.



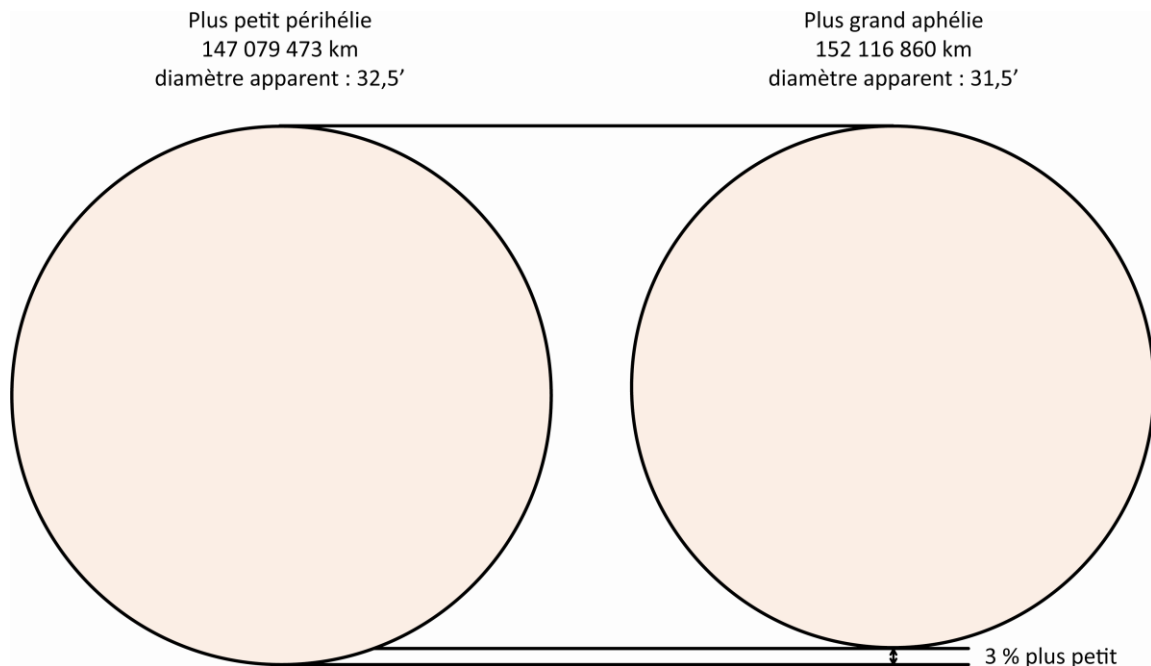


Cette figure théorique est perturbée par l'action gravitationnelle des autres corps du système solaire. Dans le cas de la Terre, les perturbateurs principaux sont la Lune, Jupiter, Vénus et Saturne.

L'aplatissement de l'ellipse est grandement exagéré sur le schéma ci-dessus ; **les trajectoires de la plupart des planètes ne diffèrent que de très peu du cercle**. Prenons le cas de la Terre et dessinons son orbite sous la forme d'un cercle de un mètre de rayon : l'ellipse serait contenue dans l'épaisseur du trait ! A l'œil nu, vous ne feriez pas la différence entre ce cercle et l'ellipse décrite par la Terre. Toutefois, le Soleil n'occuperait pas le centre du cercle de un mètre de rayon, on le trouverait à 1,7 cm de celui-ci. Ainsi, au cours de sa révolution la distance séparant une planète du Soleil varie. C'est actuellement vers le soir du 3 janvier que la Terre est au plus près du Soleil (périhélie), à 147,1 millions de kilomètres et vers le matin du 5 juillet qu'elle en est au plus loin (aphélie), à 152,1 millions de kilomètres. Sur la période 1800 – 2050, les valeurs extrémales du périhélie et de l'aphélie furent atteintes respectivement le 1<sup>er</sup> janvier 1817 (147 079 473 km) et le 2 juillet 1829 (152 116 860 km). Toutes les distances s'entendent depuis le centre de la Terre jusqu'au centre du Soleil.

En tout cas, c'est au début de l'hiver dans notre hémisphère que nous sommes au plus près du Soleil, et au début de l'été que nous en sommes le plus loin ! Les saisons ne trouvent ainsi pas leur cause dans la variation de la distance Terre – Soleil, car il y a un phénomène bien plus important en un lieu donné : la durée d'ensoleillement et l'angle d'incidence des rayons solaires dont l'origine commune est l'inclinaison de l'axe de rotation terrestre d'environ 23° 26'.

Cette variation de la distance qui nous sépare du Soleil se traduit par une variation du diamètre apparent de notre étoile dans le ciel, mais elle est indécélable à l'œil nu. D'ailleurs, et malgré les apparences, l'angle sous lequel nous voyons le Soleil dans le ciel est petit, proche de un demi-degré (0,5° soit 30'). C'est l'angle sous-tendu par une pièce de 1 euro vue depuis une distance de 2,50 m. Le diamètre apparent de l'astre du jour varie ainsi d'environ 3 %, entre 31,5' à l'aphélie et 32,5' au périhélie.



### Rappel sur les angles

Quelques exemples de tailles et de diamètres apparents.

Dans un degré, il y a 60 minutes d'arc (60') et dans une minute d'arc, on compte 60 secondes d'arc (60''). Le pouvoir de résolution de l'œil humain est d'environ 1'. Cela signifie que deux points séparés par moins de 1' seront vus comme un seul et même point.

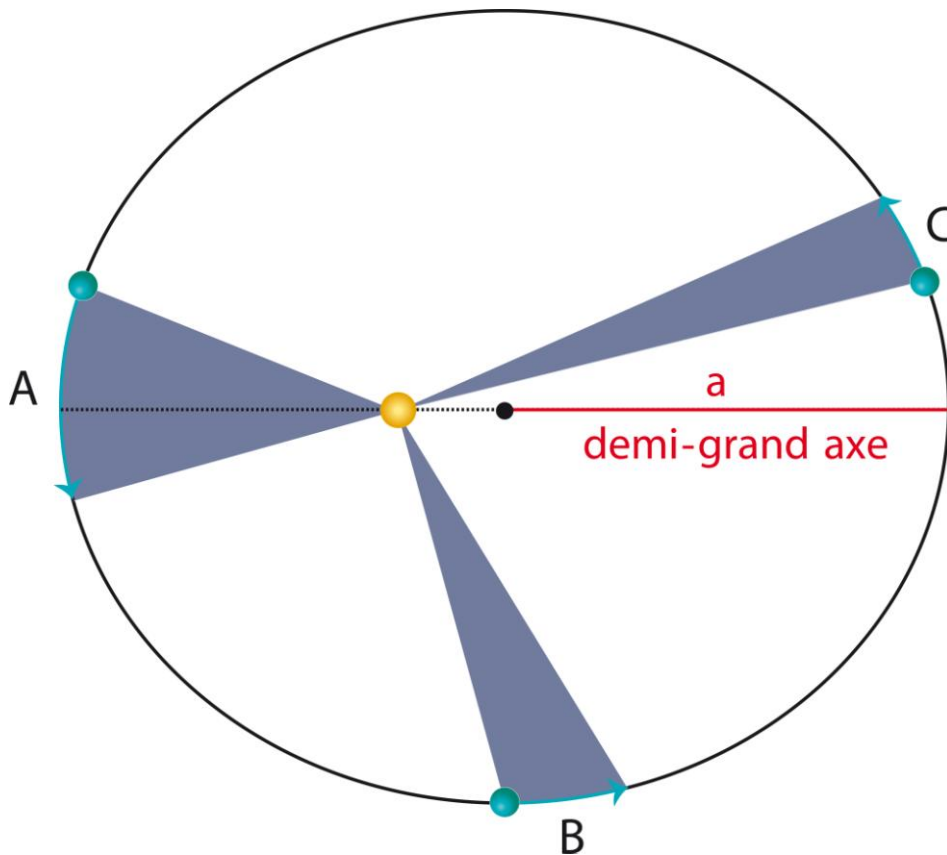
Objet observé	Taille apparente
Distance angulaire entre l'extrémité du petit doigt et celle du pouce (bras tendu, main ouverte et doigts écartés)	Environ 20°
Distance angulaire entre l'extrémité du pouce et celle du poing (bras tendu, main fermée et pouce tendu)	Environ 15°
Taille apparente du poing fermé (bras tendu)	Environ 10°
Largeur apparente de l'index (bras tendu)	Environ 1°, soit 60'
Lune	De 29,3' à 33,5'
Soleil	De 31,5' à 32,5'
Vénus (planète)	De 9,5'' à 65'', soit 1' 5''
Pouvoir de séparation de l'œil humain	Environ 1', soit 60''

Objet observé	Taille apparente
Pouvoir de séparation de l'œil humain	Environ 1', soit 60''
Jupiter (planète)	De 30,5'' à 50''
Mars (planète)	De 3,5'' à 25,1''
Neptune (planète)	De 2,2'' à 2,4''
Pluton (planète naine)	De 0,06'' à 0,11''
Pouvoir de séparation du télescope spatial Hubble	0,05''
Bételgeuse (étoile supergéante rouge)	0,05''
Sirius (étoile la plus brillante du ciel nocturne)	0,006''
Pouvoir de séparation du SVLBI (interféromètre radio)	0,0001''

Le Soleil et la Lune exceptés, les planètes et les étoiles sont donc vus à l'œil nu sous la forme de points. Des points plus ou moins brillants certes, mais cela reste des points.

### 3.2 Deuxième loi de Kepler

Le rayon vecteur reliant une planète au Soleil balaie des aires égales en des intervalles de temps égaux.





Les arcs d'ellipse A, B et C sont décrits dans le même temps puisque les surfaces en violet possèdent la même aire. **Par conséquent, une planète va d'autant plus vite qu'elle est proche du Soleil et bien sûr, d'autant moins vite qu'elle en est éloignée.**

Nous venons de voir que c'est en plein hiver que la Terre est au plus près du Soleil. Elle se déplace donc plus rapidement : l'hiver est la saison la plus courte dans notre hémisphère, ce que confirme le tableau suivant.

Saison	Hiver	Printemps	Été	Automne
Durée moyenne	89 jours 0 h	92 jours 18 h	93 jours 16 h	89 jours 20 h

### 3.3 Troisième loi de Kepler

**Le rapport du cube du demi-grand axe ( $a$ ) et du carré de la période de révolution ( $T$ ) est une constante pour toutes les planètes.**

Mathématiquement, cette troisième loi s'écrit  $\frac{a^3}{T^2} = cste$

Vérifions cette relation sur quelques planètes :

Planète	$a$ (en ua*)	$T$ (en année)	$a^3/T^2$
Vénus	0,723	0,615	1,00
Terre	1,00	1,00	1,00
Jupiter	5,20	11,9	0,993
Neptune	30,1	165	1,00

\* *ua* pour *unité astronomique*, qui est *grosso modo* la distance moyenne Terre – Soleil, soit environ 150 millions de kilomètres.

Plus une planète est loin du Soleil, plus sa période de révolution est longue, non seulement parce que le chemin qu'elle doit parcourir est plus important, mais aussi parce qu'elle va moins vite.

Connaissant la période de révolution d'une planète, on peut déterminer le demi-grand axe de son orbite autour du Soleil. À titre d'exemple, intéressons-nous à Uranus. Elle effectue son tour du Soleil en quelques 84,3 ans. Prenons les conventions du tableau : nous obtiendrons  $a$  en unité astronomique si  $T$  est exprimé en année avec une constante égale à 1.

$$a = T^{\frac{2}{3}} = (84,3)^{\frac{2}{3}} = 19,2 \text{ unités astronomiques.}$$

Le demi-grand axe de l'orbite d'Uranus est donc plus de dix-neuf fois plus grand que celui de la Terre.

#### *Pour aller plus loin*

Déterminons l'expression de la constante dans le cas simple d'un mouvement circulaire uniforme d'une planète autour du Soleil. Cela revient à supposer que la masse  $m$  de la planète est négligeable devant la masse  $M$  du Soleil.

Un corps de masse  $m$  en mouvement circulaire uniforme subit une force centripète valant en norme  $m \frac{v^2}{a}$  où  $v$  est sa vitesse et  $a$  le rayon du cercle parcouru. Ici,  $v = \frac{2\pi a}{T}$  où  $T$  est la période de révolution de la planète. Or, celle-ci est soumise à une force centripète d'origine gravitationnelle, dont la norme vaut  $\frac{GMm}{a^2}$ . L'égalité de ces deux normes se traduit par l'égalité

$$\frac{GMm}{a^2} = m \cdot \frac{\left(\frac{2\pi a}{T}\right)^2}{a} \text{ d'où } \frac{a^3}{T^2} = \frac{GM}{4\pi^2}.$$

On connaît  $a$ ,  $T$  et  $G$ . **On peut ainsi calculer la masse  $M$  du Soleil :**  $M = \frac{4\pi^2 a^3}{GT^2}$ .

Prenons le cas de la Terre. Avec  $a \approx 149,6 \cdot 10^6$  km,  $T = 1$  an et  $G = 6,674 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ , on obtient, en se restreignant à trois chiffres significatifs,  $M = 1,989 \cdot 10^{30}$  kg.

C'est plus de 330 000 fois la masse de la Terre ! Le Soleil est 745 fois plus massif que toutes les planètes réunies. Cela donne le vertige...

On peut également calculer la masse de Mars en étudiant le mouvement de ses deux satellites.

Avec Phobos ( $a = 9\,376$  km et  $T = 7$  h 39,2 min), on obtient  $M_{\text{Mars}} = 6,422 \cdot 10^{23}$  kg.

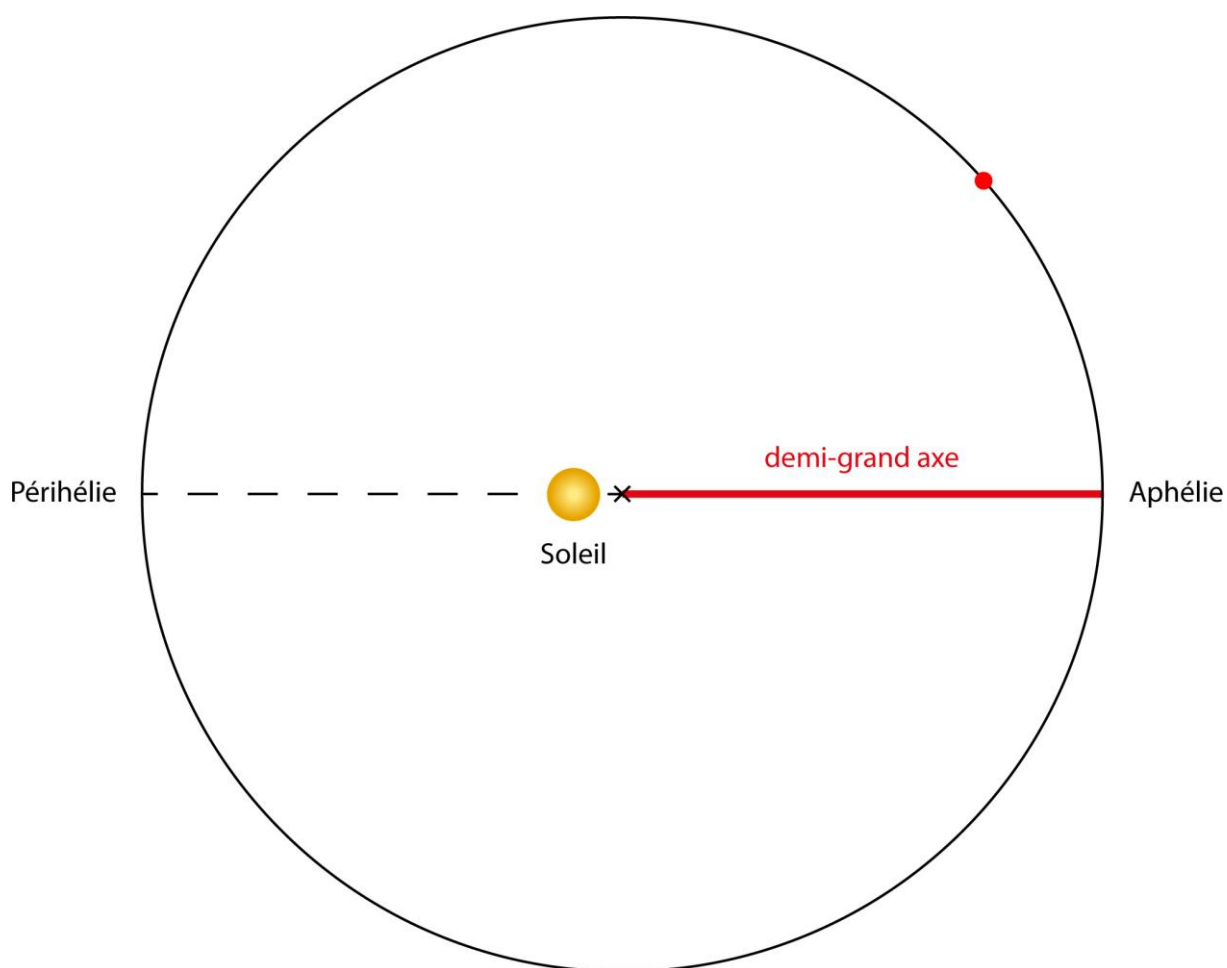
Avec Déimos ( $a = 23\,463$  km et  $T = 30,312$  h),  $M_{\text{Mars}} = 6,417 \cdot 10^{23}$  kg.

**Les deux satellites conduisent à une estimation de la masse de Mars s'élevant à  $6,42 \cdot 10^{23}$  kg, soit près de 11 % de la masse de la Terre.**

## 4 L'orbite de la planète Mars

**Le demi-grand axe de l'orbite martienne se monte à 1,524 unité astronomique (ua), soit 227,9 millions de kilomètres.** Animée d'une vitesse moyenne de 24 km/s, Mars la parcourt en près de 687 jours terrestres de 24 h, ce qui équivaut à 668,6 jours martiens. En effet, la planète Rouge tourne sur elle-même un peu plus lentement que ne le fait la Terre ; son jour dure en moyenne 24 h 39 min 35 s. **Une année sur Mars dure donc un peu moins de deux de nos années.**

L'excentricité de l'orbite martienne, qui mesure son écart au cercle, est près de six fois plus élevée que l'excentricité de l'orbite terrestre. Elle reste toutefois quasiment circulaire, mais le Soleil est nettement excentré comme le montre la figure suivante.

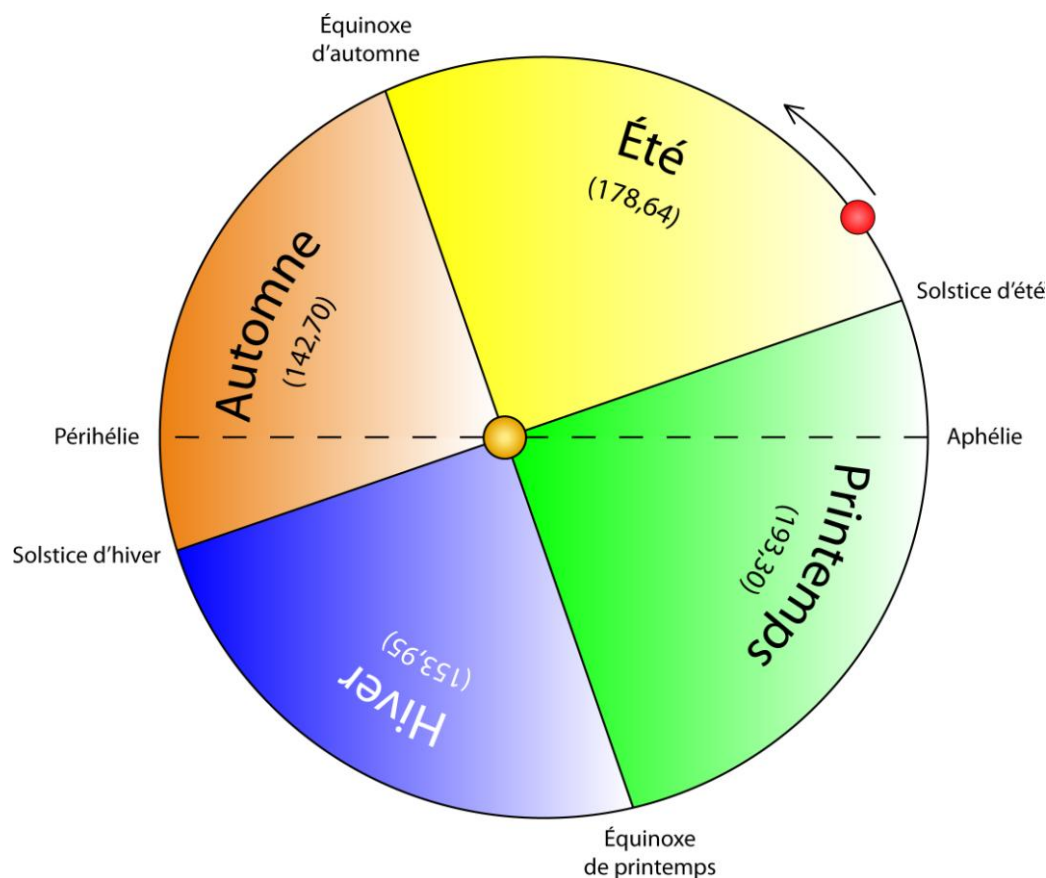


La véritable orbite de la planète Mars autour du Soleil.  
Les dimensions absolue et relative des deux astres ne sont pas respectées.

L'éloignement de Mars au Soleil fluctue entre 206,6 millions de kilomètres (1,381 ua) au périhélie et 249,2 millions de kilomètres (1,666 ua) à l'aphélie. Cette variation, considérable, a une conséquence importante sur la durée des saisons et sur le climat de la planète.

## Des saisons de durée très inégale

Avec un axe de rotation incliné de  $25^{\circ} 12'$  par rapport à la perpendiculaire au plan de son orbite, Mars connaît des saisons, opposées dans les hémisphères nord et sud. En vertu de la deuxième loi de Kepler et de la grande excentricité de son orbite, leur durée est fortement inégale. Dans l'hémisphère nord, l'automne dure moins de 143 jours martiens alors que le printemps s'étale sur plus de 193 jours martiens !



Durées des saisons martiennes dans l'hémisphère nord de la planète, exprimées en jours martiens.

## Des saisons plus marquées que sur Terre

La distance séparant le Soleil de la Terre n'influence pas notre climat car les variations de cette distance restent modestes. Sur Mars, il n'en est pas de même : entre le périhélie et l'aphélie, la quantité d'énergie solaire reçue par la planète chute de 45 % ! On remarque d'ailleurs que les grandes tempêtes de poussière, qui peuvent recouvrir l'ensemble de son globe, ne prennent place que lorsque Mars est proche de son périhélie.

Mars passe au périhélie à la fin de l'automne boréal et à l'aphélie à la fin du printemps boréal. Ainsi, **les hivers sont doux et courts et les étés longs et frais dans l'hémisphère nord**. Inversement, **les hivers sont longs et froids dans l'hémisphère sud, et les étés, courts et chauds**.

Il convient évidemment de relativiser lorsque l'on décrit un « été chaud » sur la planète Rouge... au meilleur de la journée, la température sera légèrement positive (jusqu'à une bonne vingtaine de degrés Celsius) près de l'équateur, mais elle plongera de plusieurs dizaines de degrés au cours de la nuit ! Quant aux hivers froids de l'hémisphère sud, ils n'usurpent pas leur épithète puisque l'on a mesuré des températures aussi basses que  $-150\text{ °C}$  près du pôle... Nous y reviendrons.

## 5 Repérer les planètes dans le ciel

### 5.1 Les mouvements diurne et annuel

La Terre est animée de plusieurs mouvements, les deux principaux étant sa **rotation d'ouest en est autour de l'axe des pôles en une journée**, le second étant **sa révolution autour du Soleil en un an**. Le premier mouvement a pour conséquence le **mouvement diurne**, qui emporte la voûte céleste dans une rotation d'est en ouest autour d'un axe passant près de l'étoile Polaire et fait faire à cette voûte un tour complet en une journée... Soleil y compris. Le second a pour conséquence le **mouvement annuel**, un léger glissement quotidien du Soleil vers l'est, à hauteur de  $1^\circ$  par jour. En un an, la trajectoire du Soleil définit un grand cercle sur la sphère céleste que les astronomes appellent **l'écliptique**.

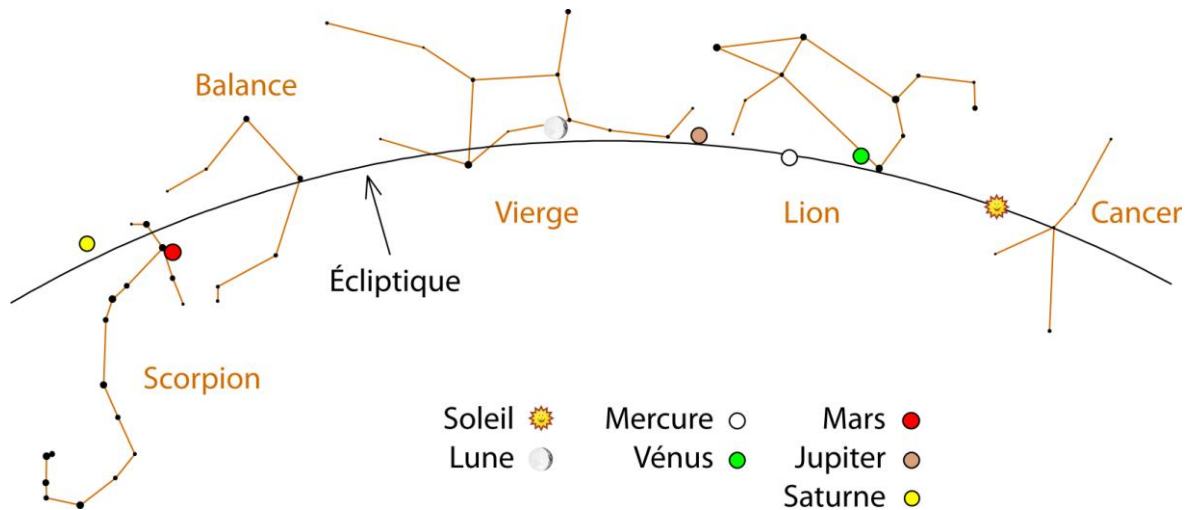
### 5.2 Visibilité des planètes à l'œil nu

**Cinq** des huit **planètes sont visibles** sans difficulté à l'œil nu. Elles font même partie des objets les plus lumineux du ciel nocturne. Il s'agit de Mercure, Vénus, Mars, Jupiter et Saturne.

Dès l'Antiquité, on a fait la différence entre *étoile* et *planète* : les étoiles restent fixes les unes par rapport aux autres au fil des années (elles forment les **constellations**), alors que les planètes se déplacent à travers les champs d'étoiles. D'ailleurs, en ancien grec,  $\pi\lambda\alpha\nu\eta\tau\eta\varsigma\ \alpha\sigma\tau\eta\rho\eta\varsigma$  (*planêtês astêrês*) signifiait « astre errant, astre vagabond ». Certaines planètes sont rapides (Mercure, Vénus) et leur mouvement par rapport aux étoiles est aisément perceptible d'un jour sur l'autre. D'autres planètes comme Jupiter et Saturne sont beaucoup plus lentes. Quelques semaines d'observation suffisent toutefois à prouver leur nature planétaire. La vitesse de déplacement des planètes dépend de leur distance au Soleil, les plus proches étant les plus rapides.

De même, on s'est rapidement aperçu que le Soleil, la Lune et les planètes ne se déplacent pas n'importe où dans le ciel, mais uniquement devant les **constellations du zodiaque**. Sur la sphère céleste, celles-ci forment une bande d'une quinzaine de degrés d'épaisseur centrée sur l'écliptique. Attention à ne pas confondre *constellation du zodiaque* et *signe du zodiaque* ! Il existe 12 signes, ayant tous la même largeur ( $30^\circ$ ), mais 13 constellations du zodiaque, de largeur différente et qui ne coïncident pas avec les signes. À titre d'exemple, au niveau de l'écliptique, la constellation du Scorpion n'a que  $6,5^\circ$  de largeur contre  $45^\circ$  pour la Vierge. La 13<sup>e</sup> constellation du zodiaque se situe entre le Scorpion et la Sagittaire et se nomme *Ophiucus*. Elle est occupée par le Soleil entre le 30 novembre et le 17 décembre.

Ainsi, vues depuis la Terre, les planètes sont toujours plus ou moins alignées, comme le montre le schéma ci-dessous. Il n'y a rien d'étonnant à cela : imaginez les planètes tournant autour du Soleil. Toutes tournent quasiment dans le même plan, plan auquel la Terre appartient. Il porte le nom de *plan de l'écliptique*. L'intersection de ce plan avec la sphère céleste n'est autre que l'écliptique, que nous avons déjà rencontré.



Configuration du ciel le 7 août 2016. Le Soleil, la Lune et les planètes sont quasiment alignés sur l'écliptique.

Une carte du ciel fournit l'aspect du ciel visible à un instant donné pour une latitude donnée et la position des constellations. Comparez ce qui figure sur la carte à ce que voyez là-haut. Si, dans les constellations du zodiaque, apparaît un point au moins assez brillant qui ne figure pas sur la carte, il s'agit certainement une planète. Car on n'indique jamais les planètes sur les cartes du ciel ! La raison en est simple : les planètes se déplaçant devant les constellations, il faudrait presque construire une nouvelle carte chaque jour... Pour vérifier que l'astre que vous soupçonnez être une planète en est bien une, il vous suffit de l'observer nuit après nuit. S'il se déplace par rapport aux étoiles, il s'agit bien d'une planète.



La célèbre carte du ciel du regretté Pierre Bourge (1921 – 2013). Un grand classique.

### 5.3 Cas des planètes inférieures

**Mercure** et **Vénus** sont deux **planètes inférieures**. Cela signifie que leur orbite est englobée par celle de la Terre. Elles sont toujours plus proches du Soleil que ne l'est notre planète. Aussi ne s'écartent-elles jamais beaucoup de la direction de l'astre du jour.

Mercure s'éloignant au maximum entre 18° et 28° en moyenne du Soleil, elle est très souvent noyée dans les lueurs du levant ou du couchant sous nos latitudes. Au mieux, la discrète planète se lève deux heures avant le Soleil ou se couche deux heures après lui.

Vénus, elle, peut s'en éloigner un peu plus, d'environ  $45^\circ$  à  $47^\circ$ , et demeurer visible jusqu'à 4 h après le coucher du Soleil, ou se lever jusqu'à 4 h avant lui. Surnommée *l'étoile du berger*, Vénus est l'astre le plus brillant du ciel après le Soleil et la Lune.

## 5.4 Cas des planètes supérieures

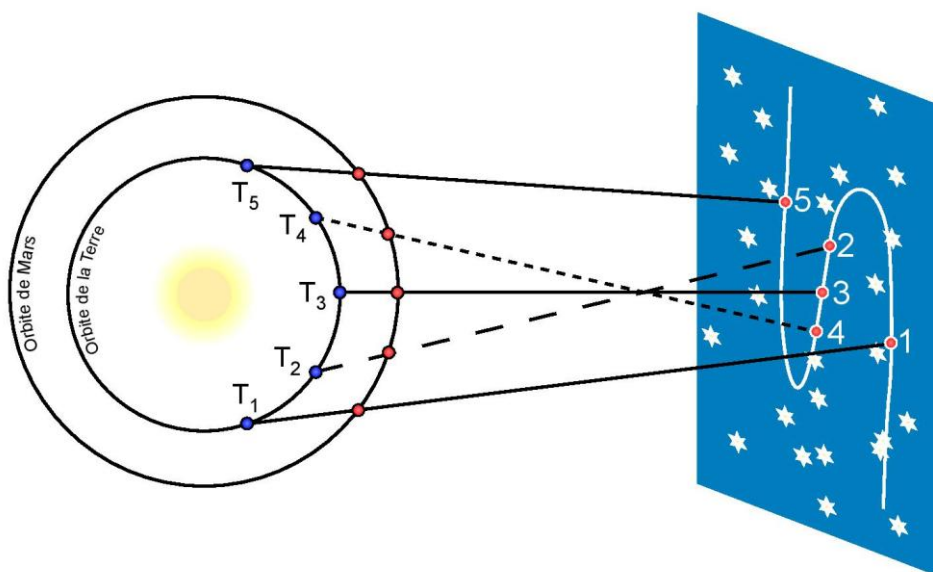
**Mars, Jupiter et Saturne** sont des **planètes supérieures**, car leur orbite englobe celle de la Terre. Contrairement aux planètes Mercure et Vénus, elles peuvent présenter toutes les élongations possibles par rapport au Soleil.

Lorsque la Terre, Le Soleil et une planète supérieure se retrouvent alignés, dans cet ordre, on dit que cette planète est en **conjonction** (avec le Soleil). Elle est alors, bien sûr, totalement inobservable.

Les meilleures conditions d'observation d'une planète supérieure s'opèrent lorsque le Soleil, la Terre et la planète en question sont alignés, dans cet ordre. Cette dernière est alors dite **en opposition**. Dans ces conditions, elle est visible toute la nuit dans notre ciel, se levant au moment où le Soleil se couche. C'est également la période où la planète est la plus brillante, puisque la distance Terre – planète est, à ce moment-là, minimale.

## 5.5 Boucles de rétrogradation

Repérons les planètes par rapport aux étoiles lointaines. Dans notre ciel, si l'on fait abstraction du mouvement diurne, le mouvement général des planètes supérieures (Mars, Jupiter et Saturne) se fait vers l'est, à des vitesses différentes. Toutefois, elles présentent régulièrement un comportement assez étrange : elles ralentissent, s'arrêtent, partent vers l'ouest (elles rétrogradent) puis ralentissent, s'arrêtent à nouveau et reprennent leur course vers l'est. Elles décrivent ainsi des boucles ou des zigzags. Les planètes Mercure et Vénus, elles, exhibent une conduite semblable sauf qu'elles semblent osciller autour de la direction du Soleil. Il est à peine caricatural de dire que le but de l'astronomie dans l'Antiquité et au Moyen Âge a été d'expliquer ces curieux mouvements. Copernic fournit une solution élégante et naturelle en proposant son système héliocentrique.



La boucle ou, comme ici, le zigzag résulte clairement de la composition des mouvements de la Terre et de Mars autour du Soleil. La Terre rattrape Mars et la dépasse. Au cours du dépassement, Mars semble reculer devant l'arrière-plan constitué par les étoiles, de la même façon que sur autoroute, la voiture que vous doublez semble reculer, alors qu'elle et vous allez dans le même sens.

Notons enfin que le mouvement apparent de Mars sur la sphère céleste n'est pas une courbe à une dimension mais à deux dimensions. En effet, le plan dans lequel Mars circule autour du Soleil n'est pas confondu avec le plan de l'écliptique. L'angle entre ces deux plans est petit, proche de  $1,85^\circ$ .

## 6 Les aspects de Mars

**De toutes les planètes, Mars est celle dont la distance à nous varie le plus** : de 55,7 millions de kilomètres lors d'une opposition rapprochée à 401,3 millions de kilomètres lors d'une conjonction éloignée, en fonction des positions de la Terre et de Mars sur leur orbite respective. À l'image de la distance qui nous sépare de la planète Rouge, la magnitude et le diamètre apparent de Mars dans notre ciel est aussi très variable, s'étalant de -2,9 à 1,8 et de 3,5'' à 25,1''.

### Le système des magnitudes

Pour quantifier l'éclat apparent d'un astre, on utilise l'échelle des **magnitudes**. Elle s'inspire des travaux d'Hipparque, un grand astronome grec du II<sup>e</sup> siècle avant notre ère. Celui-ci classait les étoiles en « grandeur ». Les étoiles les plus brillantes étaient de 1<sup>re</sup> grandeur. Celles qui l'étaient un peu moins étaient qualifiées de 2<sup>e</sup> grandeur etc. Les étoiles de 6<sup>e</sup> grandeur étaient à la limite de visibilité. Les astronomes modernes ont repris le système de classement d'Hipparque en y intégrant la transcription mathématique de la perception de l'œil. Le système des magnitudes est beaucoup plus étendu que celui d'Hipparque : des objets très brillants auront une magnitude négative et les magnitudes supérieures à 6 caractériseront les objets nécessitant un instrument d'optique pour être détectés. Gardez à l'esprit que plus la magnitude d'un astre est élevée, moins il est brillant.

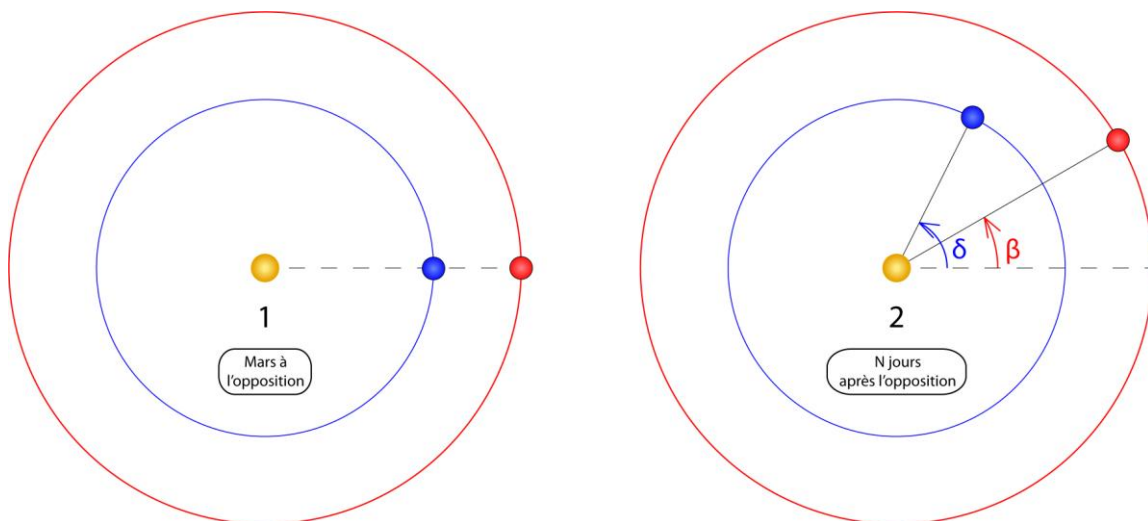
Le tableau suivant recense les magnitudes de quelques astres d'intérêt.

Astre	Magnitude
Le Soleil, vu depuis la Terre	-26,7
Pleine lune	-12,7
Vénus	-4,9 à -3,9
Jupiter	-2,9 à -1,6
Mars	-2,9 à +1,8
Sirius (étoile la plus brillante du ciel nocturne)	-1,5
Canopus (2 <sup>e</sup> étoile la plus brillante du ciel nocturne)	-0,7
Saturne	-0,5 à 1,3
Véga (étoile principale de la constellation de la Lyre)	0,0
Étoile polaire	2,0
Étoiles les plus faibles visibles à Paris	≈ 3
Uranus	5,3 à 5,9
Limite de l'œil, sous un ciel bien sombre	≈ 6,5



Astre	Magnitude
Limite de l'œil, sous un ciel bien sombre	≈ 6,5
Neptune	7,8 à 7,9
Avec une paire de jumelles de 50 mm de diamètre	≈ 9 – 10
Avec un télescope de 200 mm de diamètre	≈ 13 – 14
Pluton (planète naine)	13,6 à 16,0
Limite photographique d'un télescope de 600 mm de diamètre, avec 30 minutes de pose	≈ 22
Limite photographique du télescope spatial Hubble (miroir de 2,4 m de diamètre)	≈ 30

C'est pendant les quelques mois entourant la date de l'opposition que Mars est la plus intéressante et la plus facile à observer. D'ailleurs, **combien de temps s'écoule-t-il, en moyenne, entre deux oppositions martiennes ?** Une illustration nous aidera à répondre à cette question.



Comme nous ne cherchons qu'une moyenne, nous pouvons assimiler les orbites terrestre et martienne à des cercles centrés sur le Soleil, décrits à vitesse constante.

1. Partons de la configuration donnée par la figure de gauche, où Mars est à l'opposition. Le Soleil, la Terre et Mars sont alignés, dans cet ordre.
2.  $N$  jours plus tard, la configuration des deux planètes sera celle donnée par la figure de droite. La Terre aura pris un peu d'avance sur sa voisine. De point de vue du Soleil, l'angle entre les deux planètes sera  $\delta - \beta$ . **La prochaine opposition prendra place lorsque cet angle vaudra  $360^\circ$** , puisque le Soleil, la Terre et Mars seront à nouveau alignés, dans cet ordre.
3. La Terre effectue un tour complet du Soleil ( $360^\circ$ ) en  $T_{\text{Terre}}$ , c'est-à-dire un an. En  $N$  jours, elle aura donc tourné de  $\delta = 360^\circ \frac{N}{T_{\text{Terre}}}$ . Le même raisonnement nous amène à conclure qu'en  $N$  jours, Mars aura tourné de  $\beta = 360^\circ \frac{N}{T_{\text{Mars}}}$ , avec  $T_{\text{Mars}}$  la période de révolution de Mars autour du Soleil.

4. Le retour à l'opposition implique  $\delta - \beta = 360^\circ$ . Or, d'après 3, nous venons de montrer que

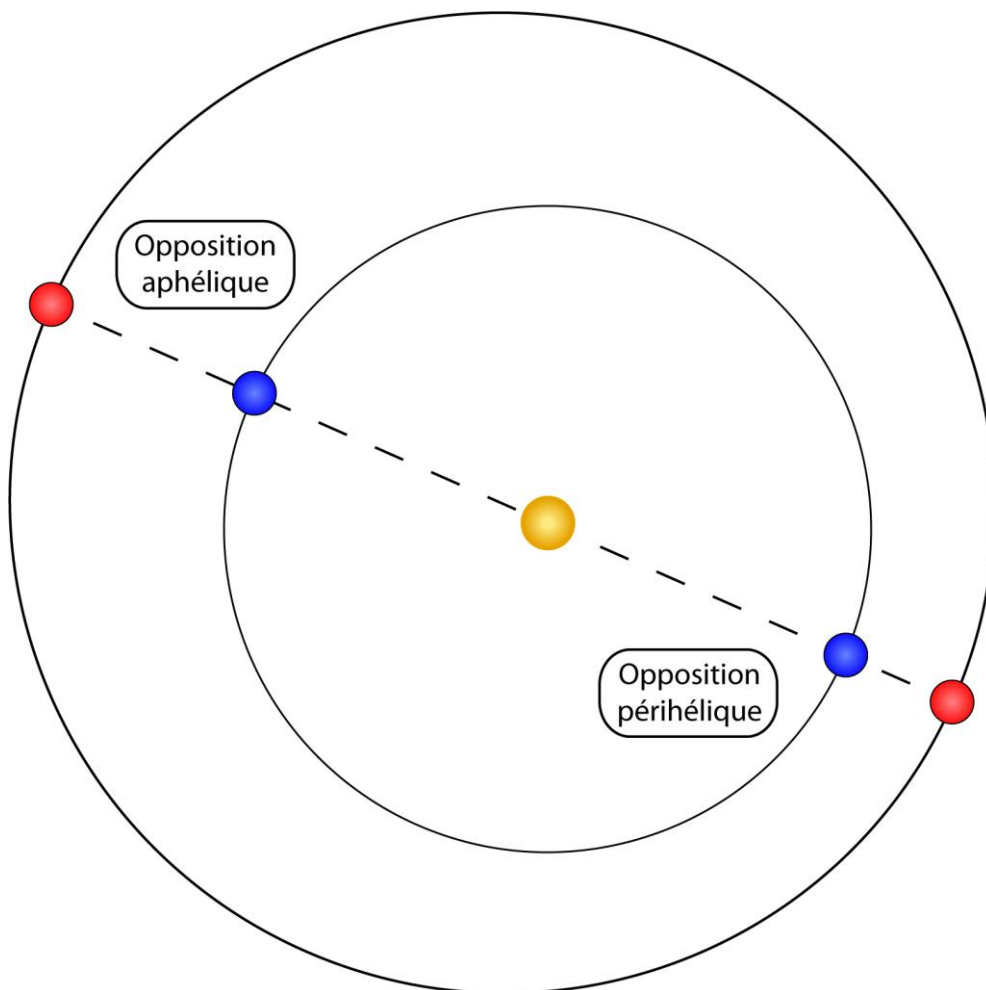
$$\delta - \beta = 360^\circ \times \frac{N}{T_{\text{Terre}}} - 360^\circ \times \frac{N}{T_{\text{Mars}}} = 360^\circ \times N \times \left( \frac{1}{T_{\text{Terre}}} - \frac{1}{T_{\text{Mars}}} \right).$$

5. On a donc  $360^\circ = 360^\circ \times N_{\text{prochaine\_opposition}} \times \left( \frac{1}{T_{\text{Terre}}} - \frac{1}{T_{\text{Mars}}} \right)$ .

6. Après simplification, on obtient  $N_{\text{prochaine\_opposition}} = \frac{T_{\text{Mars}} \times T_{\text{Terre}}}{T_{\text{Mars}} - T_{\text{Terre}}}$ .

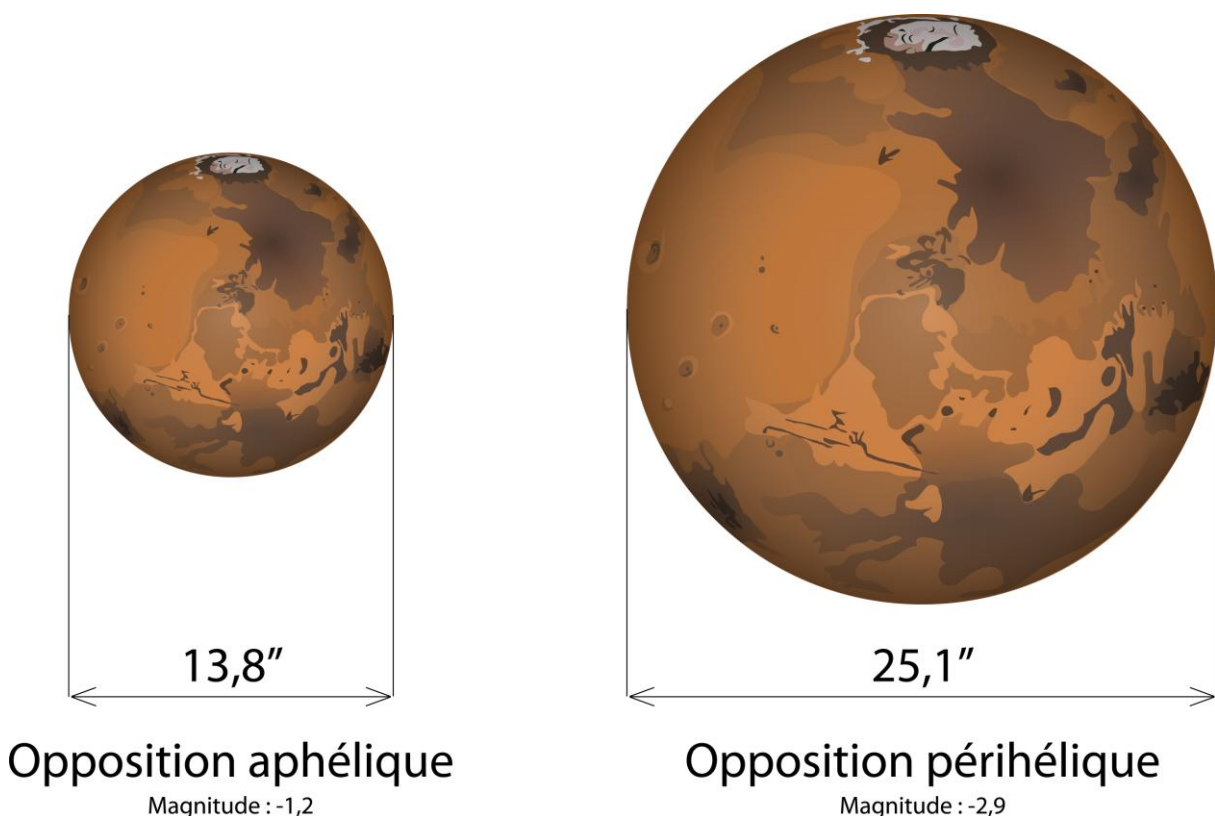
Avec  $T_{\text{Terre}} \approx 365,25$  jours et  $T_{\text{Mars}} \approx 687$  jours,  $N_{\text{prochaine\_opposition}} \approx 780$  jours. Ainsi, **le temps moyen séparant deux oppositions successives de Mars** (ce que l'on appelle sa révolution synodique) s'élève à **780 jours**, soit près de deux ans et deux mois. Lorsque l'on prend en compte les véritables orbites de la Terre et de Mars autour du Soleil, on s'aperçoit que le temps entre deux oppositions successives varie d'une opposition à l'autre. À titre d'exemple, sur la période 1993 – 2037 qui couvre 21 oppositions, ce temps varie entre 764 jours et 809 jours.

Pour compliquer – ou pimenter – l'affaire, la magnitude de Mars à l'opposition n'est pas constante en raison de l'excentricité élevée de son orbite. Considérez la figure suivante.



**Les oppositions aphéliques** prennent place, grosso modo, **entre la mi-janvier et la mi-mars**. Mars se trouve alors à une centaine de millions de kilomètres de nous. Brillant dans notre ciel avec une magnitude comprise entre -1,2 à -1,4, elle rivalise d'éclat avec l'étoile la plus lumineuse du ciel nocturne, Sirius. Son diamètre apparent s'élève à 14" – 15". Les oppositions aphéliques sont bien sûr les oppositions les moins favorables à l'observation détaillée du globe martien au télescope. Cela dit, sous nos latitudes, la relative faiblesse de l'éclat et du diamètre apparent de la planète est partiellement compensée par le fait qu'elle monte assez haut dans notre ciel : Mars culmine, au minimum, à une quarantaine de degrés au-dessus de l'horizon sud en France métropolitaine.

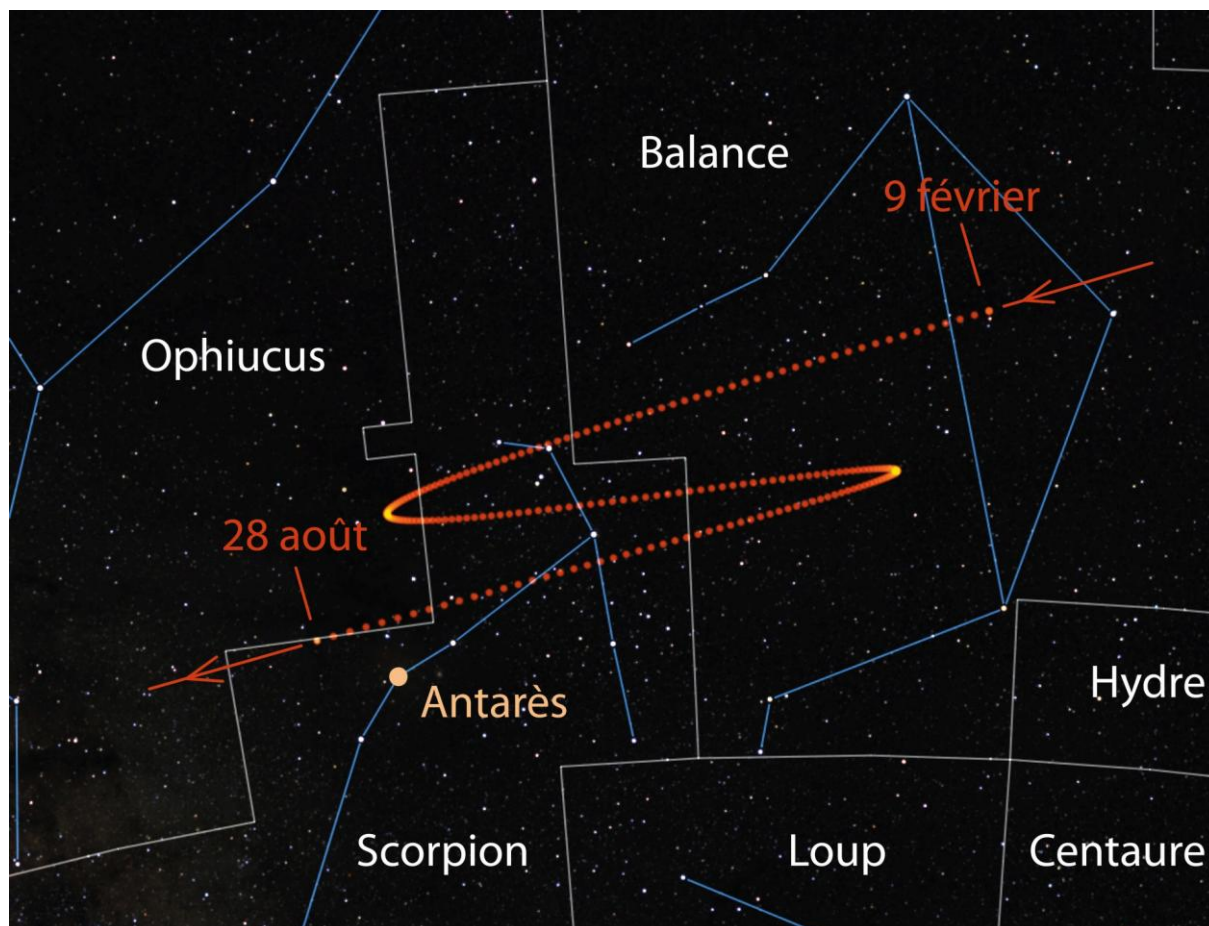
**Les oppositions périhéliques** s'établissent, elles, grosso modo, **entre la mi-juillet et début octobre**. Mars se trouve alors à une soixantaine de millions de kilomètres de nous. Brillant dans notre ciel avec une magnitude comprise entre -2,6 à -2,9, elle est bien plus brillante que Sirius. Son éclat orangé et plus précisément caramel est spectaculaire. Son diamètre apparent s'élève à 23" – 25". Les oppositions périhéliques de Mars sont les oppositions les plus favorables à l'observation détaillée de son globe au télescope. Les calottes polaires de la planète se dévoilent même à faible grossissement, sous la forme de petits points blancs. Le revers de la médaille est que, sous nos latitudes, Mars demeure assez basse dans notre ciel : elle culmine, au maximum, à une trentaine de degrés au-dessus de l'horizon sud en France métropolitaine. La dernière opposition périhélique eut lieu le 28 août 2003 dans la constellation du Verseau (magnitude -2,9). La prochaine prendra place le 27 juillet 2018 dans la constellation du Capricorne (magnitude -2,8). Quinze à dix-sept années séparent deux oppositions périhéliques consécutives.



## 7 Mars en 2016

Mars sera visible à l'œil nu toute l'année. Son mouvement sera **prograde** (vers l'est) **jusqu'au 17 avril**, **rétrograde** (vers l'ouest) **jusqu'au 30 juin**, puis à nouveau **prograde jusqu'à la fin de l'année**. Sa période de rétrogradation durera donc 74 jours en 2016.

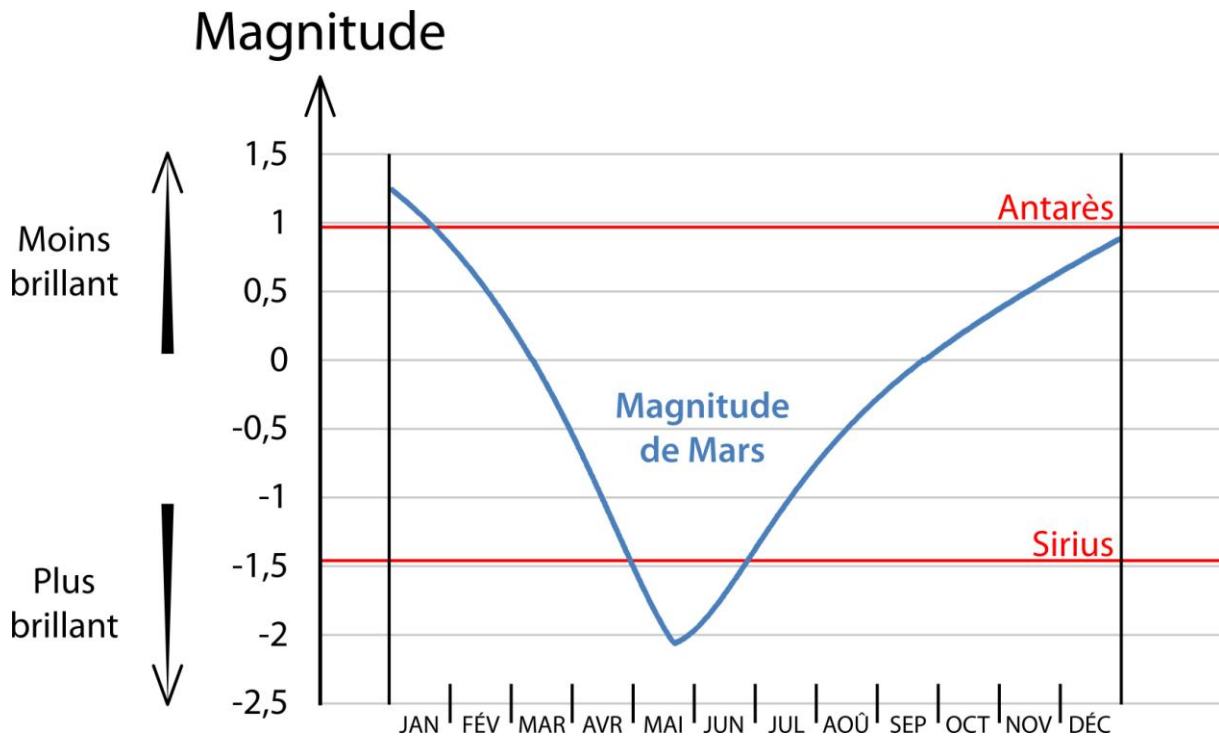
Mars débutera l'année dans la constellation de la Vierge, qu'elle quittera le 17 janvier pour entrer dans la Balance. Le 13 mars, nous la retrouverons dans le Scorpion puis, à partir du 3 avril, dans Ophiucus. C'est dans cette constellation qu'elle entamera sa boucle de rétrogradation et commencera donc à rebrousser chemin. Mars regagnera le Scorpion le 30 avril et y **passera à l'opposition le 22 mai à 12 h 17**, à un peu plus de 76 millions de kilomètres de la Terre. Poursuivant son chemin vers l'ouest, elle rejoindra la Balance le 28 mai, où elle achèvera sa rétrogradation. Elle reprendra alors sa route vers l'est, entrant dans le Scorpion le 2 août et dans Ophiucus le 21 août... où elle ne demeurera d'ailleurs que six jours avant de repasser dans le Scorpion, en raison de la forme bicornue de cette dernière constellation. Tout rentrera dans l'ordre le 2 septembre avec un retour dans Ophiucus. Suivront alors une entrée dans le Sagittaire le 22 septembre, dans le Capricorne le 8 novembre et dans le Verseau le 15 décembre.



Déplacement quotidien de Mars à travers les constellations du zodiaque durant la période d'ouverture de l'exposition « Explorez Mars » (9 février - 28 août 2016). Est-ce un hasard si le 22 mai, date de passage de Mars à l'opposition, se trouve presque exactement à mi-chemin entre ses dates d'ouverture et de clôture ?

Durant la seconde quinzaine du mois d'août, Mars passera au nord de l'étoile la plus brillante de la constellation du Scorpion, la rougeoyante Antarès. Il s'agit d'une supergéante rouge d'une magnitude variant entre 0,6 et 1,6 qui, si elle se trouvait à la place du Soleil, engloutirait toutes les planètes jusqu'à Mars ! Son nom provient du grec ancien Ἀντάρης signifiant "égal à Mars" en raison de la couleur similaire que présentent l'étoile et la planète.

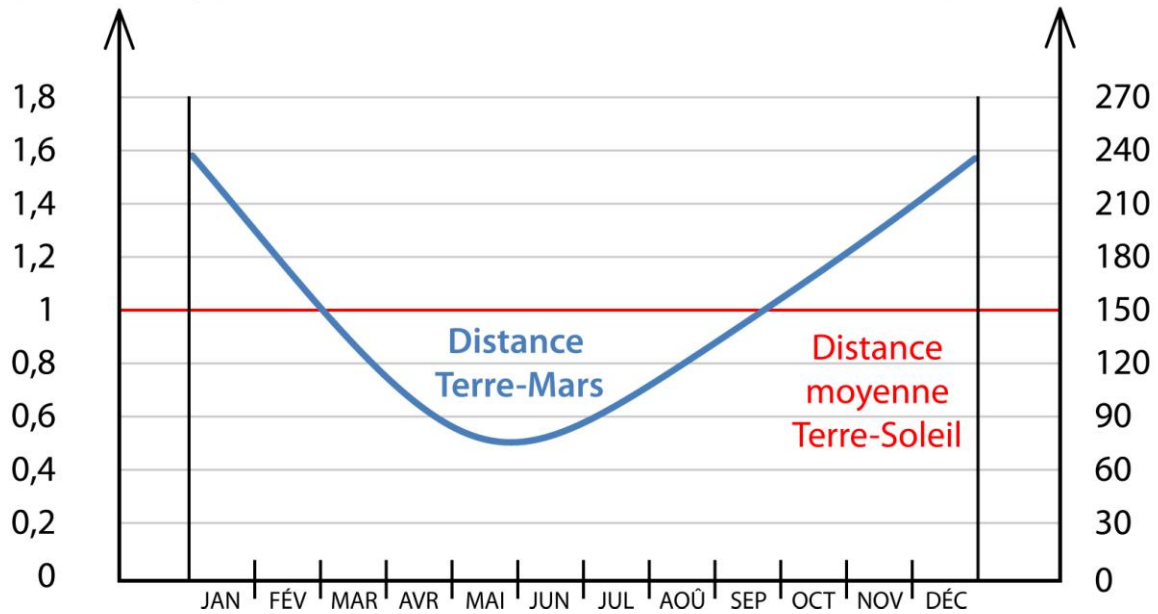
Les trois illustrations qui suivent révèlent l'évolution de la magnitude de Mars, de sa distance à la Terre et de son diamètre apparent tout au long de l'année 2016.



La magnitude minimale (-2,1) sera atteinte quasiment au moment de l'opposition, le matin du 23 mai. Le diamètre apparent de Mars sera alors de 18,4''.

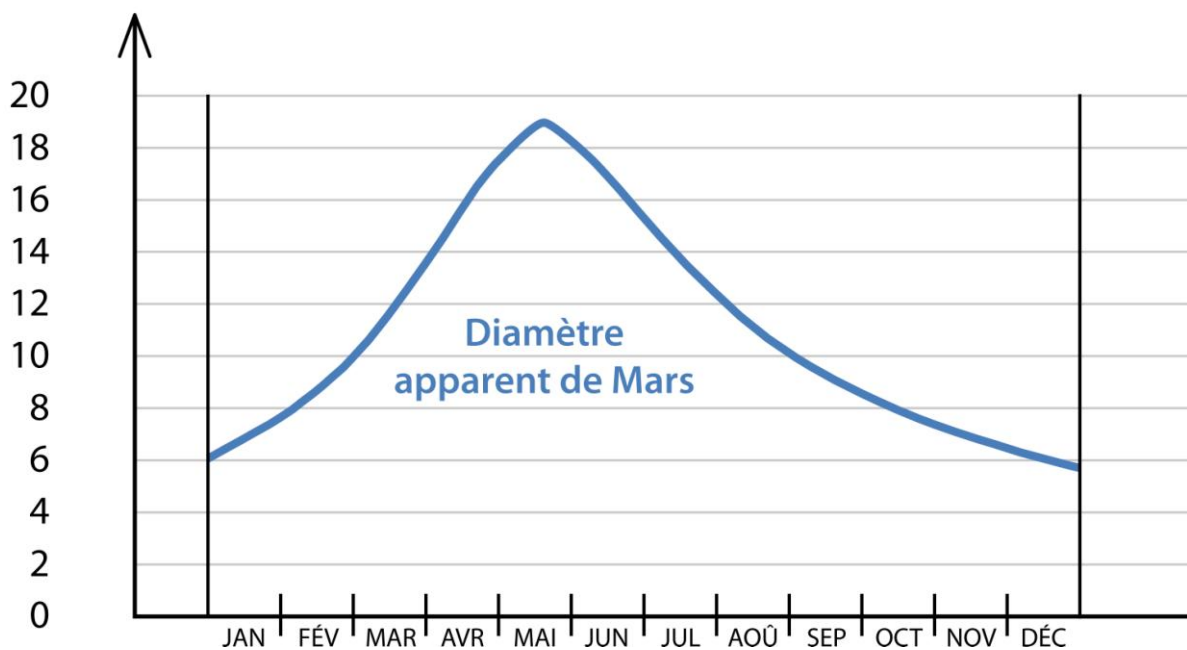


**Distance à la Terre**  
(en unité astronomique)



Il est intéressant de noter que la distance Terre – Mars n’atteindra pas son minimum à l’opposition, mais plus de 8 jours plus tard, dans la nuit du 30 au 31 mai. La cause de cet écart réside principalement dans l’excentricité de l’orbite martienne. Si les trajectoires de la Terre et de Mars autour du Soleil étaient parfaitement circulaires et centrées sur lui, la distance minimale entre les deux planètes prendrait place exactement à l’opposition.

**Diamètre apparent**  
(en secondes d’arc)



Le diamètre apparent de Mars atteindra également son maximum dans la nuit du 30 au 31 mai. Il s'élèvera alors 18,6''.

Il nous reste à comprendre un dernier point : pourquoi Mars ne sera-t-elle pas au maximum de son éclat à l'instant où son diamètre apparent sera, lui, maximal (et sa distance à la Terre, minimale) ? Il faut ici faire intervenir un effet appelé *effet d'opposition*, qui désigne la brusque diminution de la réflectivité d'un astre lorsqu'il s'éloigne du point d'opposition. Il concerne surtout les objets dénués d'atmosphère dense et couverts de régolithe – une couche superficielle de grains de poussière, très poreuse, produite à la suite de la pulvérisation de leur surface par l'impact de météorites. C'est la raison pour laquelle la Lune, lorsqu'elle est pleine, est plus de deux fois plus brillante que lorsqu'elle est en premier ou en dernier quartier, bien que sa surface visible depuis la Terre soit exactement deux fois plus grande. L'effet d'opposition est plus faible sur Mars que sur la Lune mais il existe, et il suffit à expliquer, pour l'éclat maximal de la planète Rouge, l'écart d'une semaine entre l'opposition et le passage au plus près de la Terre.