Le système solaire : unis par la gravitation

L'observation des planètes

Vous connaissez bien sûr le nom des planètes : les **planètes telluriques** (semblables à la Terre), par ordre de proximité au Soleil : Mercure, Vénus, la Terre, Mars ; et les **planètes géantes**, gazeuses : Jupiter, Sature, Uranus, Neptune. Notez que Pluton n'est plus une planète mais une « planète naine » (voir la fiche « Planètes naines, astéroïdes, comètes » pour des explications). Pourtant, dans le ciel, ce ne sont à première vue que des points brillants parmi d'autres. Quelles caractéristiques les distinguent-elles ?

Pour commencer, la plupart des planètes sont des astres faciles à repérer dans le ciel nocturne. Vénus, Mars et Jupiter peuvent être plus brillantes qu'aucune étoile. On s'en rendra compte en les plaçant dans **l'échelle des magnitudes**. Dans cette échelle logarithmique inversée, un degré de magnitude **en moins** correspond à une luminosité 2,5 fois plus élevée ; alors que Sirius, l'étoile la plus brillante du ciel, a une magnitude de -1,5, Vénus, la plus brillante des planètes, a une magnitude maximale de -4,6 (soit une luminosité $2{,}5^{3} = 15{,}6$ fois plus élevée), tandis le Soleil a une magnitude de -26,7... Et pourtant, comme on l'a vu (fiche « Soleil »), les planètes ne brillent pas par elles-mêmes et ne font que diffuser la lumière solaire ; mais elles sont tellement plus proches que les étoiles… Notez également que l'éclat des planètes varie considérablement, à la différence de l'éclat de la plupart des étoiles.

Toutefois, la principale différence entre étoiles et planètes, relevée depuis la plus haute antiquité, est que les planètes se déplacent, nuit après nuit, par rapport aux étoiles. Leur nom vient d'ailleurs du grec πλανήτης, qui signifie « astre errant ». Les hommes ont tôt remarqué que le trajet des planètes coïncide plus ou moins avec celui du Soleil dans le ciel : autrement dit, les planètes se déplacent sur des trajectoires proches de l'écliptique (voir la fiche « Ecliptique, saisons, années, calendrier »). On a également remarqué que certaines planètes (Mercure, Vénus) sont toujours observées à proximité du Soleil, dont elles ne s'éloignent jamais au-delà d'une distance angulaire donnée : nous verrons plus loin comment l'interpréter. Enfin, les autres planètes peuvent présenter des trajectoires étranges, rebroussant parfois chemin dans leur mouvement apparent par rapport aux étoiles : c'est un **mouvement rétrograde**.

Montage composite : un cliché de Mars a été pris chaque semaine, du 19 août 2007 (Mars est alors à droite) au 3 mai 2008, et les photos ont été superposées par rapport aux étoiles fixes. © Tunç Tezel (TWAN)

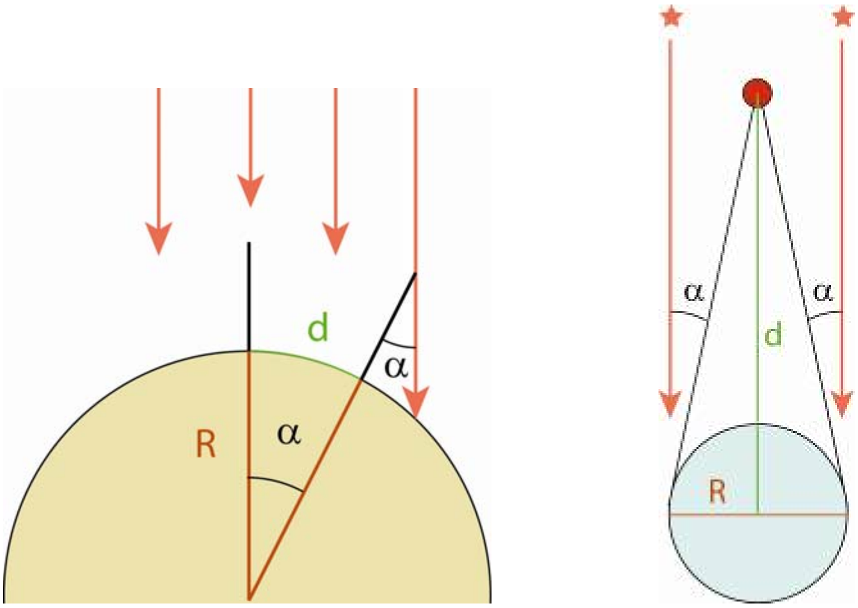
Une dernière différence est apparue avec l'utilisation des premières lunettes astronomiques, puis des télescopes : alors que les étoiles restent des points lumineux, même dans le plus puissant des télescopes, les planètes apparaissent sous la forme de disques plus ou moins complets. Aujourd'hui, une simple paire de jumelles vous révèlera le disque de Jupiter. Deux planètes (Mercure et Vénus) peuvent apparaître sous forme de croissants. Là encore, nous chercherons l'explication.

La mesure des distances dans le système solaire

Plus sur le *site de l'Observatoire de Paris*

Pour comprendre la structure du système solaire, il est bien sûr essentiel de pouvoir mesurer des distances. Le rayon de la Terre est une première donnée essentielle. Il a été mesuré avec une assez bonne précision dès l'Antiquité, par le grec Eratosthène, au III^{e} siècle avant J.C.

A cette époque, la rotondité de la Terre était admise par les savants : on avait constaté que l'ombre de la Terre sur la Lune lors des éclipses de Lune était circulaire, et l'on savait aussi que les navires disparaissaient progressivement sous l'horizon, preuve de la courbure de la surface de la Terre. Eratosthène avait constaté que le jour du solstice d'été, à midi, les objets n'avaient pas d'ombre à Syène (actuelle Assouan, sur le Tropique du Cancer) : le Soleil passait donc au zénith, ce qui n'était pas le cas à Alexandrie, 800 km plus au Nord. Eratosthène mesura donc l'ombre portée d'un bâton à Alexandrie le jour du solstice. Connaissant la distance *d* entre Alexandrie et Syène, et considérant les rayons du Soleil parallèles, Eratosthène calcula le rayon terrestre *R*, avec une erreur d'un centième seulement.



A gauche, mesure du rayon terrestre par Eratosthène ; à droite, mesure de la parallaxe de Mars

Comment, à présent, mesurer la distance qui nous sépare des autres planètes ? La méthode de la parallaxe a été appliquée à Mars par des astronomes français en 1672. Il s'agit de mesurer l'angle de visée de Mars (lors de son passage au plus près de la Terre) par rapport à une même étoile, connue de deux observateurs très éloignés (Paris et Cayenne). L'étoile est suffisamment lointaine pour être considérée à l'infini : quel que soit le lieu de la Terre d'où on l'observe, on la voit toujours dans la même direction. Le demi-angle entre la direction de Mars et cette direction fixe est nommé **parallaxe**. Connaissant la distance entre les observateurs, on remonte à la distance de Mars.

Malheureusement, les parallaxes des objets plus distants dans le système solaire sont très faibles, et l'on ne peut donc appliquer cette méthode. Les autres distances ont été obtenues en appliquant la **troisième loi de Kepler** (voir plus loin), qui lie la période orbitale et la distance au Soleil des planètes (plus précisément le demi-grand axe de leur orbite). La Terre constitue bien sûr une référence, avec une période de révolution d'une année sidérale et une distance au Soleil de **150 millions de kilomètres**. Cette valeur, connue dès le XVIII^{e} siècle, est nommée **unité astronomique (UA)**. C'est l'unité de distance dans le système solaire, elle est à connaitre !

Les lois de Kepler

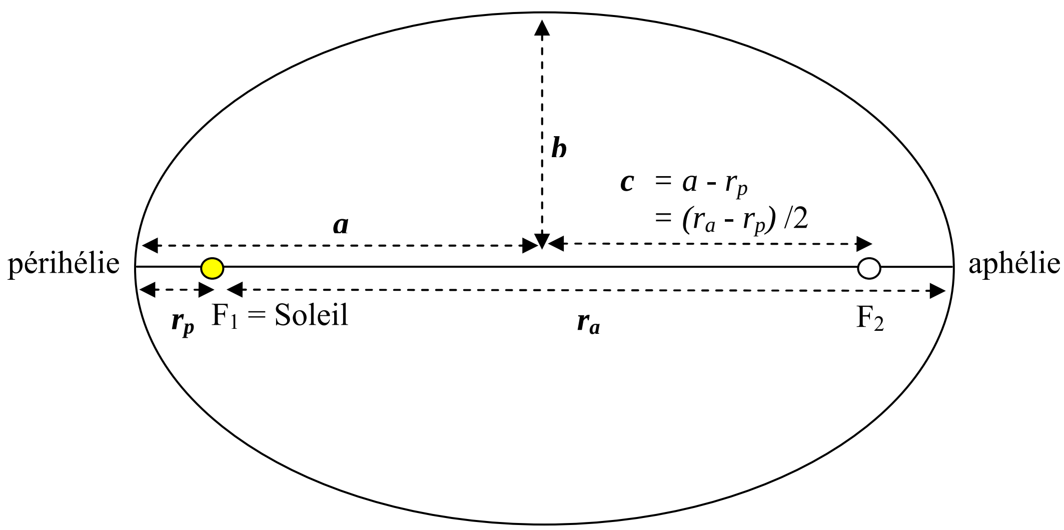
Grâce aux travaux des astronomes et physiciens, de l'antiquité au XVII^{e} siècle, - se distinguent les noms de Ptolémée, Copernic, Brahé, Kepler et Newton -, un modèle héliocentrique du système solaire s'est imposé, où toutes ces observations trouvent une explication. Vous trouverez le récit de cette formidable aventure intellectuelle sur le site de l'observatoire. Contentons-nous de poser les grandes lignes.

On a vu que la Terre tournait autour du Soleil selon une orbite qui n'est pas circulaire mais elliptique (voir la fiche « Ecliptique, saisons, années, calendriers »). C'est vrai également des autres planètes, et d'autres objets comme les comètes. C'est l'une des 3 lois énoncés par Johanes Kepler en 1609 et 1618, et que vous devez connaître :

- Première loi de Kepler : Les planètes décrivent des **orbites elliptiques** dont le Soleil occupe un foyer.

On rappelle ce qu'est une ellipse : étant donnés deux points F_1 et F_2 (les foyers), c'est le lieu des points O tels que OF_1+OF_2 = constante (attachez une ficelle à deux clous sur une planche - les foyers - et tendez la avec un crayon que vous déplacez : vous tracez une ellipse). On peut définir une ellipse par son **demi-grand axe *a*** (la moitié de sa grande largeur) et son demi-petit axe *b* (la moitié de sa petite largeur). En astronomie, le point de l'orbite elliptique le plus proche du Soleil est le **périhélie**, le point le plus éloigné est l'**aphélie** (pour un corps en orbite autour de la Terre, on parlera de **périgée** et d'**apogée**). Ces deux points sont sur la droite passant par les foyers. En ce moment, la Terre passe à l'aphélie en été, et au périhélie en hiver.

L'excentricité *e* est en quelque sorte l'écart de l'ellipse au cercle, elle peut varier de 0 (cercle) à des valeurs proches de 1 (ellipse très allongée). Pour l'orbite terrestre, elle est aujourd'hui de 0,017 mais cette valeur varie au fil des millénaires. **L'excentricité est égale au rapport *c/a***, où *c* est la demi-distance entre les foyers. On peut aussi exprimer l'excentricité en fonction de la distance r_p (distance du Soleil au périhélie) et de la distance r_a (distance du Soleil à l'aphélie) avec $r_p + r_a = 2a$ **:** $\boldsymbol{e = c / a = (a - r_p) / a = (r_a - r_p) / (r_a + r_p)}$ ***à savoir retrouver au besoin !*** Voici une ellipse très excentrique, forte exagération de l'orbite elliptique terrestre, pour bien comprendre ces relations.



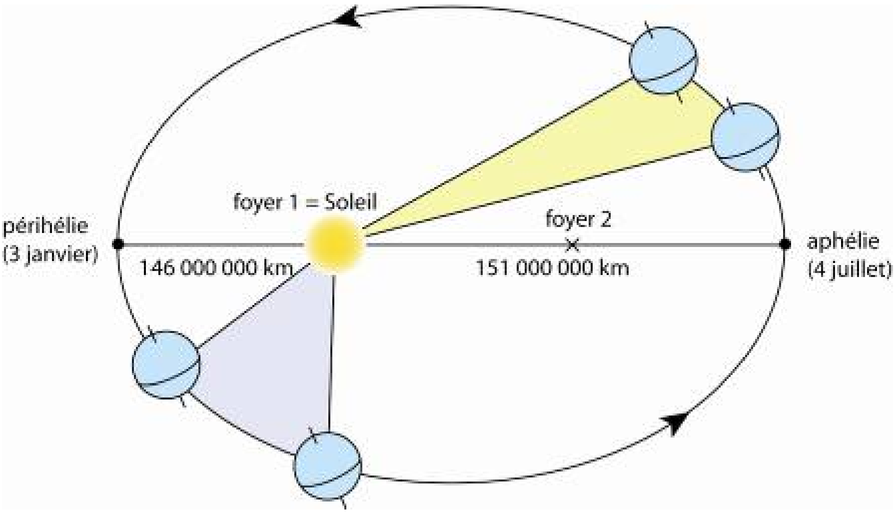
Notez également que **les plans des orbites elliptiques des planètes sont presque confondus** : l'écart maximal par rapport au plan de l'écliptique, mesuré pour le plan de l'orbite de Mercure, est de 7° (voir « La formation du système solaire » pour des explications), ce qui explique que le mouvement apparents des planètes sur la voûte céleste s'effectue près de l'écliptique.

1. Exercice d'application (difficile !): test écrit 2010. *Il y a quelque temps, une rumeur a circulé selon laquelle Mars pourrait apparaître aussi grosse que la Lune depuis la Terre, c'est-à-dire avec un angle de 0,5°. Le demi-grand axe et l'excentricité de l'orbite de la Terre sont a_T = 1 UA et e_T = 0,017 ; ceux de Mars sont a_M = 1,5 AU et e_M = 0,093 ; enfin, le rayon de Mars est R_T = 3393,4 km. Déterminez le diamètre angulaire maximum de Mars et vérifiez si la rumeur est fondée. On donne 1 UA = 1,496 × 10^{11} m (réponse à la fin du document)*

La seconde loi de Kepler est une conséquence de la conservation du moment angulaire (ce qu'ignorait Kepler, bien sûr) :

- La droite imaginaire reliant chaque planète au Soleil (rayon vecteur) balaie des aires égales en des temps égaux.

Par conséquent, la Terre (comme les autres planètes) accélère légèrement sur son orbite quand elle se rapproche du Soleil, et ralentit quand elle s'en éloigne (de sorte que les deux aires mauve et jaune ci-dessous, balayée dans un temps identique, sont égales). Cela est bien plus net pour les comètes dont les orbites sont, contrairement à celles des planètes, très excentriques.



La troisième loi est très importante. Elle énonce que :

- Le rapport entre le carré de la période orbitale (notée p, et exprimée en années terrestres) et le cube du demi-grand axe a de l'orbite est constant, quelle que soit la planète considérée. On a donc la proportionnalité : $\boldsymbol{p^2 \propto a^3}$ **(à savoir !)**

On peut dès lors, connaissant les valeurs de p et a pour une planète, connaitre la valeur de p pour une autre, connaissant a, et vice versa. **En mesurant les périodes de révolution des objets du système solaire, on peut donc calculer leur distance au Soleil !** En pratique, il est commode de calculer p et a en années terrestres et en unités astronomiques, puisque l'on a p_{Terre} = 1 an et a_{Terre} = 1 UA. Cela simplifie la règle de trois !

__2. Exercice d'application (moyen !): test écrit 2010.__ Le périhélie de la comète de Halley est égal à 8,9 $\times 10^{10}$ mètres et sa période est de 76 ans. On donne 1 UA = 1,496$\times 10^{11}$ m. Calculez son excentricité : a) 0,567 ; b) 0,667 ; c) 0,767 ; d) 0,867 ; e) 0,967

__3. Exercice d'application (facile !): test écrit 2011.__ Imaginez qu'une nouvelle planète nommée Pippo soit découverte au-delà de Pluton, avec une période de révolution de 320 années. Quelle serait sa distance moyenne du Soleil en unités astronomiques (UA), en supposant son orbite circulaire ? a) 23,4 UA ; b) 30,7 UA ; c) 46,8 UA ; d) 93,6 UA

Newton, dans le cadre de sa théorie de la gravitation, a généralisé la relation de Kepler et montré qu'elle fait intervenir les masses des deux corps (mais la masse M_p d'une planète étant négligeable devant la masse M_s du Soleil, on peut considérer ce terme comme invariant et retrouver la relation simple de Kepler). $\boldsymbol{p^2 = (4\pi^2 / G(M_p + M_s))\, a^3}$

Vous pouvez vous contenter de retenir que la relation fait intervenir la masse au dénominateur.

A partir de Newton, on peut donc définir **le système solaire comme l'ensemble de l'espace gouverné par l'attraction gravitationnelle du Soleil**. Vous découvrirez dans une autre fiche que ça ne concerne pas que les planètes, mais aussi des corps très au-delà de l'orbite de Neptune (« Planètes naines, astéroïdes et comètes »). Par ailleurs, certaines planètes possèdent des satellites, des corps « capturés » dans leur champ de gravité : là aussi, les lois de Kepler s'appliquent (voir fiche « Planètes »). Enfin, les planètes exercent également une influence (faible) sur leurs voisines : c'est ainsi que des irrégularités dans la trajectoire d'Uranus ont conduit à la découverte, par le calcul, de la planète Neptune.

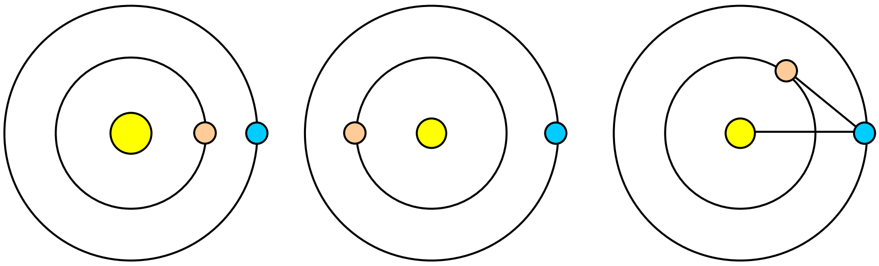
__4. Exercice d'application (facile !): test écrit 2010.__ Si la masse du Soleil doublait, et si les planètes restaient sur la même orbite, trouver la nouvelle période de révolution de la Terre. a) 423 jours ; b) 365 jours ; c) 321 jours ; d) 258 jours ; e) 147 jours ? (réponse à la fin du document)

Conjonction, opposition, élongation maximale, rétrogradation

Considérons à présent les variations de la position relative des planètes. Lorsqu'une planète est alignée avec le Soleil et la Terre, et que la Terre est à l'extrémité de l'alignement, on parle de **conjonction** (voir figure page suivante). Lorsqu'une planète est alignée avec le Soleil et la Terre, et que la Terre se retrouve au milieu, entre le Soleil et la planète, on parle d'**opposition**. Remarquons tout de suite que les planètes se divisent en deux groupes :

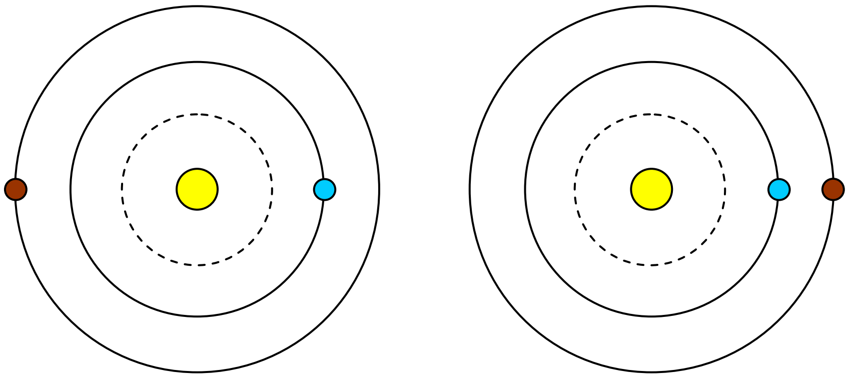
- Les **planètes** dites **inférieures**, dont l'orbite est contenue par l'orbite de la Terre (Mercure, Vénus), ne peuvent jamais se retrouver en opposition. En revanche, elles peuvent se retrouver en **conjonction inférieure**, si elles sont entre le Soleil et la Terre, ou en **conjonction supérieure**, si c'est le Soleil qui est entre la planète et la Terre (dans ce cas, Vénus et Mars peuvent rester visibles car leurs orbites ne sont pas exactement dans le même plan que celle de la Terre, elles ne sont donc pas masquées la plupart du temps par le Soleil).
- Les autres **planètes**, dites **supérieures**, sont celles dont l'orbite contient celle de la Terre (Mars, Jupiter, Saturne, Uranus, Neptune) : elles peuvent être en conjonction (supérieure) ou en opposition (elles franchissent alors le méridien à minuit). On note **élongation** l'angle entre le Soleil, la Terre et la planète visée. Pour les planètes inférieures, cet angle ne peut dépasser une certaine valeur, c'est **l'élongation maximale**.

Planète inférieure (ex. Vénus)

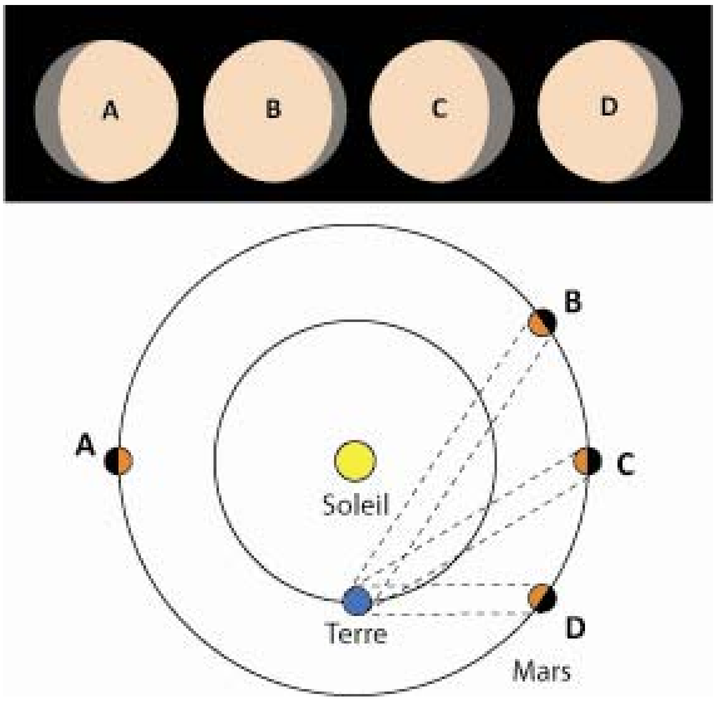


Conjonction inférieure   Conjonction supérieure   Elongation maximale

Planète supérieure (ex. Mars)

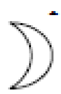


Conjonction   Opposition



L'aspect des planètes inférieures varie selon leur élongation. Lors d'une conjonction supérieure, Mercure ou Vénus apparaîtront sous la forme d'un disque ; lors d'une conjonction inférieure, sous la forme d'un fin croissant ; lors de l'élongation maximale, sous la forme d'un demi-disque. En outre, ces planètes ne seront jamais observées loin du Soleil sur l'écliptique, d'un côté ou de l'autre : c'est ainsi que Vénus est nommée indifféremment étoile du soir ou étoile du matin. Les planètes supérieures, quant à elles, ne peuvent jamais montrer moins qu'un quartier éclairé : on verra toujours plus qu'un demi-disque. En pratique, la variation n'est visible que pour Mars. Les planètes supérieures peuvent se retrouver n'importe où le long de l'écliptique.

5. Exercice d'application (très facile !): test écrit 2009. *Identifiez les planètes qui peuvent présenter cet aspect vues de la Terre :*

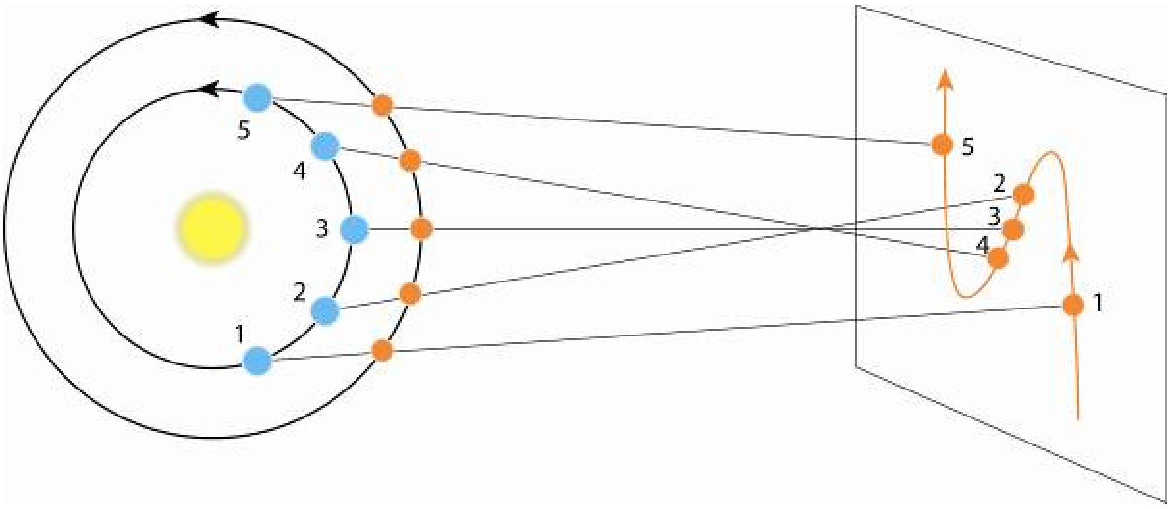


*Sur **Stellarium**, affichez l'écliptique, supprimez le sol et l'atmosphère, passez en monture équatoriale (voir la fiche « Se repérer sur la voûte céleste »), affichez les planètes, sélectionnez Mercure, Mars ou Vénus et centrez la vue sur elle (mais sans zoomer), accélérez le temps (une semaine par seconde) et admirez le ballet des planètes ! Vérifiez que vous observez bien les planètes autour de l'écliptique. Constatez les mouvements bizarres de Mars. Observez les changements de phase et de taille apparente de Vénus, en zoomant pour en observer le disque : à quelle phase correspond la taille maximale ?*

La **période sidérale** est la durée pour que la planète revienne à la même position par rapport aux étoiles. Pour la Terre, c'est l'année sidérale. La **période synodique** est la durée pour que la planète revienne à la même position relative par rapport au Soleil et à la Terre (par exemple, en opposition). Une formule utile à connaître pour la calculer : soit T_T la période sidérale de la Terre, T_{Ps} celle d'une planète supérieure, et S la période synodique ; alors en un jour terrestre, la Terre a tourné de $1/T_T$ tandis que la planète a tourné de $1/T_P$ (elle tourne plus lentement) La différence est la fraction d'un tour complet de la planète supérieure par rapport à la Terre parcourue en un jour, soit 1/S : $\mathbf{1/T_T - 1/T_{Ps} = 1/S}$

Pour une planète inférieure, tournant plus vite que la Terre, la formule devient : $\mathbf{1/T_{Pi} - 1/T_T = 1/S}$

La Terre accomplit une révolution plus rapidement que les planètes supérieures (troisième loi de Kepler) et peut donc les « rattraper » : le mouvement apparent d'une planète supérieure sur la voûte céleste s'inverse alors un temps. Ainsi s'explique le **mouvement rétrograde** de Mars présenté en première page (la Terre est représentée en bleu ci-dessous, Mars en rouge).

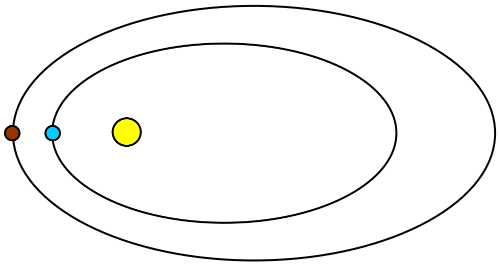


***6. Exercice d'application (moyen): test écrit 2009.** La période synodique pour les planètes supérieures peut être déterminée par le temps écoulé entre deux oppositions successives. Des observations ont permis d'estimer la période synodique de Mars à 779,9 jours. La période de révolution de la Terre (année sidérale) est 365,2564 jours. Quelle est la période de révolution de Mars en jours ?Montrez vos calculs. (réponse à la fin du document)*

***7. Exercice d'application (moyen): test écrit 2011.** La période synodique d'un certain astéroïde est de 8/7 année. Supposez que la vitesse de révolution de la Terre sur son orbite est de 30 km/s. En supposant l'orbite de l'astéroïde circulaire, trouvez : 1) La période de révolution de l'astéroïde (en années). 2) Le rayon de l'orbite de l'astéroïde (en UA). 3) La vitesse de l'astéroïde (en km/s). (répondez en arrondissant votre résultat au nombre entier le plus proche) (réponse à la fin du document)*

Réponses

1. Réponse : *Il faut déjà déterminer dans quelle configuration Mars et la Terre sont les plus proches : c'est lorsque les deux planètes passent en même temps au périhélie, comme le montre la figure ci-dessous.*



On calcule alors la distance au Soleil de Mars, et celle de la Terre. On a :

$\mathbf{e = c / a = (a - r_p) / a}$ d'où $\mathbf{r_p = a\,(1 - e)}$

$r_{p\ Mars} = 1{,}5 \times 0{,}907 = 1{,}3605$ UA

$r_{p\ Terre} = 1 \times 0{,}983 = 0{,}983$ UA

distance minimale Terre-Mars : $d = r_{p\ Mars} - r_{p\ Terre} = 0{,}3775$ UA $= 5\ 6474\ 000$ km

Mars est vu sous un angle α *tel que* $R_{Mars} = d \tan \alpha$. *En appliquant l'approximation* $\tan \alpha = (\sin \alpha / \cos \alpha) \approx \alpha$ *(en radian) pour les petits angles (valable pour* α *plus petit que 5 degrés, on est donc bien ici dans le domaine de validité de cette approximation !), on trouve que le rayon de Mars est vu sous un angle de* $R_{Mars} / d = 3393{,}4 / 5\ 6474\ 000 = 0{,}00006$ *radians = 0,0034 degrés. Jamais Mars n'apparaîtra aussi gros que la Lune !*

2. Réponse : *Le rapport* p^2 / a^3 *est constant pour toutes les corps orbitant autour du Soleil et égal à 1 (quand p est exprimé en années terrestres et a en unités astronomiques). On a donc :*

$a_{comète}^{\ 3} = 76^2$ $a_{comète}$ = racine cubique $(5776) = 17{,}9$ UA $= 26{,}78 \times 10^{11}$ m

L'excentricité est égale à $e = (r_p - a) / a$ *donc*

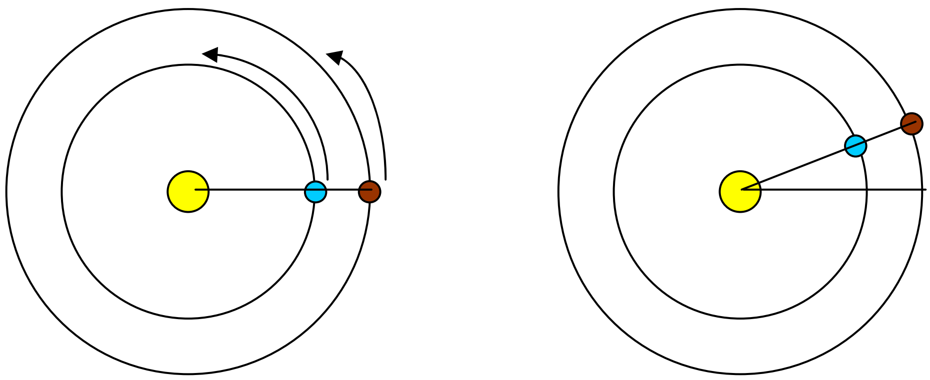
$e_{comète} = (267{,}8 - 8{,}9) / 267{,}8 = 0{,}967$

4. Réponse : *On utilise la relation* $p^2 = (4\pi^2 / G(M_p + M_s))\, a^3$ *Etant donné que le demi-grand axe ne change pas, que la masse du Soleil double et que la masse de la Terre est négligeable devant celle du Soleil, on trouve* $p'^2 = p^2 / 2$ soit $p' = p / 1{,}414 = 258$ jours

6. Réponse : *Au bout d'une période synodique, après une opposition, les deux planètes sont de nouveau alignées avec le Soleil. La Terre tourne plus vite et a donc rattrapé Mars. En 779,9 jours, elle a effectué 2,1352 tours sur son orbite. Mars, de son côté, n'a dû compléter qu'un tour, et a donc dû effectuer 1,1352 tour. Sa période de révolution est donc :*

$p_{Mars} = 779{,}9 / 1{,}1352 = 687{,}0155$ *jours.*

Sinon, vous pouvez aussi calculer $1/T_{Mars} = 1/T_{Terre} - 1/S$



7. Réponse : *La période sidérale de l'astéroïde $T_{astéroïde}$ est supérieure à un an, il est donc sur une orbite extérieure ; En appliquant la formule $1/T_{Terre} - 1/T_{astéroïde} = 1/S$ avec $T_{Terre} = 1$ an, on trouve $1/T_{astéroïde} = 1 - 7/8$ soit* ***$T_{astéroïde}$ = 8 ans.*** *L'application de la troisième loi de Kepler nous donne alors le demi-grand axe a de son orbite (en fait le rayon, puisque l'orbite est supposée circulaire) : $a^3 = p^2 = 64$ soit* ***a = 4 UA = 4 x 150 000 000 km****. La circonférence de l'orbite de l'astéroïde vaut donc $2 \pi a = 3{,}77\ 10^9$ km, et l'astéroïde la parcourt en 8 x 365,36 x 24 x 3600 = 252 467 712 secondes.* ***Sa vitesse est donc de 15 km/s environ****.*