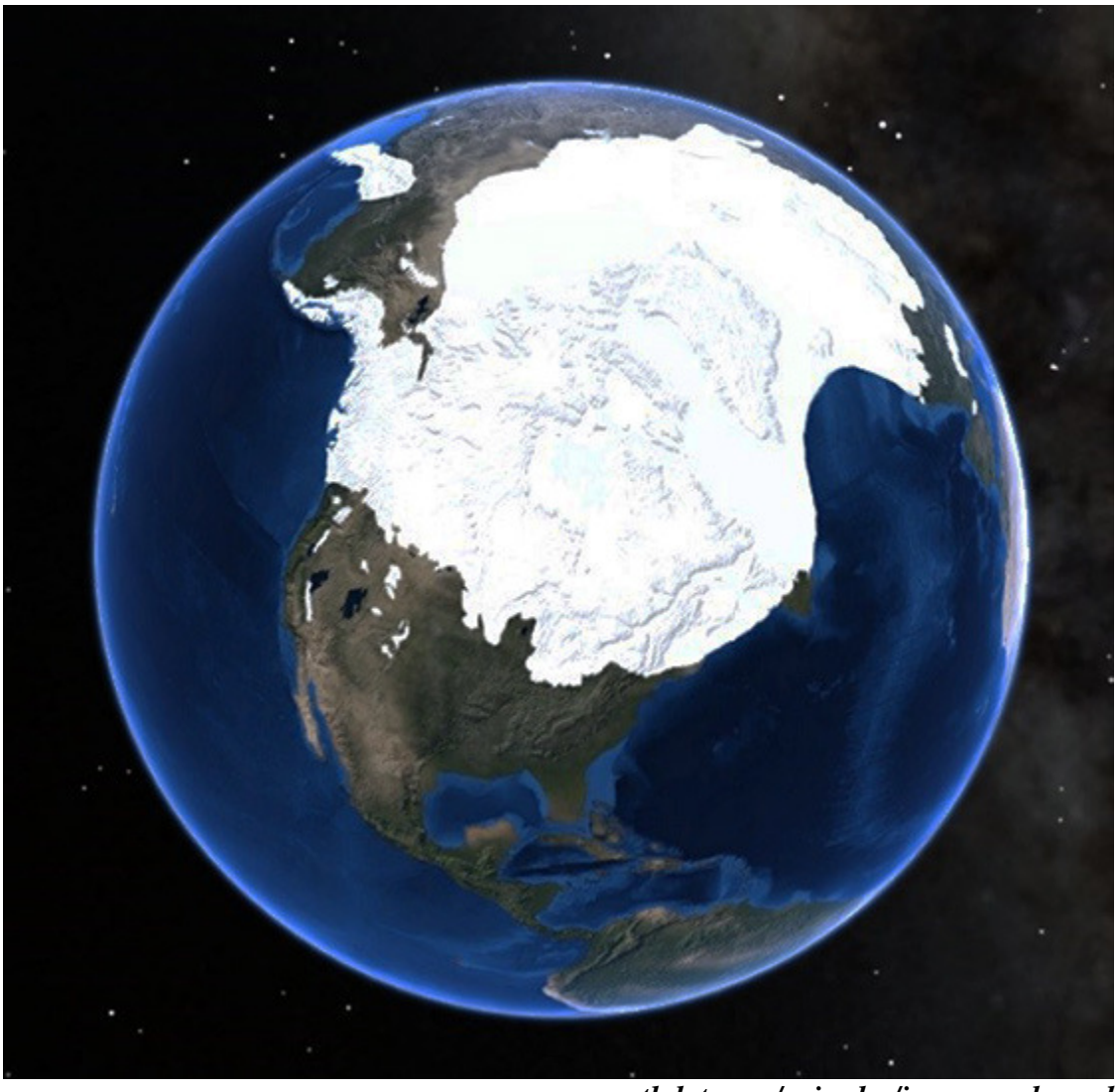
3 LE SYSTÈME TERRE-SOLEIL

Pourquoi y a-t-il des périodes glaciaires sur Terre ?

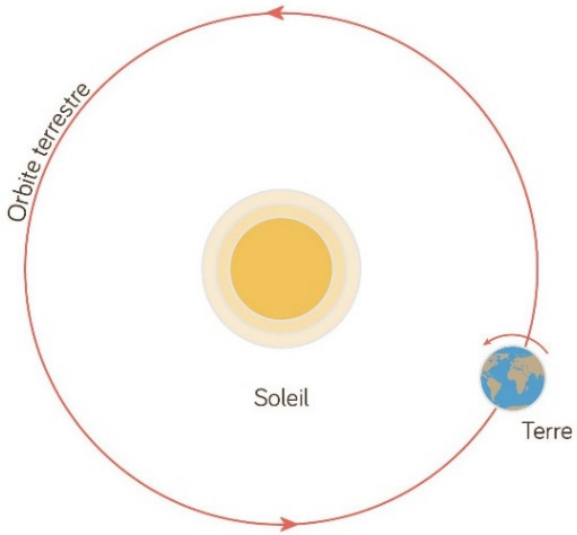


www.earthdate.org/episodes/ice-age-rebound

Découvrez la réponse à cette question dans ce chapitre.

On sait que la Terre tourne autour du Soleil. Pour bien comprendre ce mouvement et le décrire correctement, on doit étudier la physique du mouvement orbital.

Ce mouvement est déterminé par les lois de Newton et la loi de la gravitation. On va donc examiner ces lois.



www.schoolmouv.fr/cours/la-terre-une-planete-qui-abrite-la-vie/fiche-de-cours

3.1 LES DEUX PREMIÈRES LOIS DE NEWTON

La première loi de Newton

La première loi de Newton dit :

Première loi de Newton ou loi de l'inertie

Si la force externe nette sur un objet est nulle alors
la vitesse de l'objet est constante (grandeur et direction).

La force qui s'exerce sur l'objet doit être faite par un autre objet, d'où le nom de *force externe*. La force ne peut pas provenir de l'objet lui-même. L'objet ne peut donc modifier lui-même son mouvement. C'est ce qu'on veut dire par inertie, d'où l'autre nom de *loi de l'inertie* donné à la cette loi.

Quelques observations qui illustrent la 1re loi de Newton

On peut constater que la vitesse reste la même quand on réussit à éliminer les forces qui agissent sur l'objet. La station spatiale est évidemment un excellent endroit pour faire ce genre de démonstration parce que les objets peuvent se déplacer sans devoir glisser sur une autre surface et sans tomber vers le plancher de la station. Il ne reste alors qu'une petite force de friction de l'air qui s'oppose au mouvement. On s'approche d'une situation où les forces sont nulles. On peut alors observer le mouvement d'un objet sur lequel il n'y a pas de force.
https://www.youtube.com/watch?v=gtw6UcHYqHg
https://www.youtube.com/watch?v=pRnslxr3eKc

On peut aussi voir que les objets en mouvement continuent à la même vitesse en l'absence de force en examinant ce qui se produit lors d'un accident de voiture. Quand la voiture se déplace à vitesse constante, il n'y a pas de force nette sur vous. Il n'est pas nécessaire qu'une force vous pousse pour que vous puissiez avancer. D'ailleurs, vous ne sentez pas qu'une force vous pousse quand vous avancez en voiture à vitesse constante. Les forces exercées par le siège (qui sont là pour annuler la gravitation) sont exactement les mêmes que quand la voiture est arrêtée, la sensation est exactement la même. Vous sentez des forces supplémentaires uniquement quand la vitesse de l'automobile change. Dans ce cas, il faut qu'il y ait des forces sur vous pour que vous puissiez accélérer avec votre auto. Voyons maintenant ce qui arrive si vous foncez dans un mur sans porter une ceinture de sécurité. Dès que l'auto entre en contact avec le mur, une force s'exerce sur l'auto pour la ralentir. Si vous n'avez pas de ceinture de sécurité, vous n'avez rien qui vous retient au siège et aucune force ne peut s'exercer sur vous. Vous continuez donc votre mouvement à vitesse constante pendant que l'auto s'arrête. Résultat : vous foncez dans le volant et le parebrise. Regardez bien la personne continuer avec sa vitesse initiale pendant la collision dans ce vidéo (première moitié du vidéo).
https://www.youtube.com/watch?v=d7iYZPp2zYY

Erreur de 1re loi de Newton

Il y a vraiment encore beaucoup de gens qui commettent des erreurs de 1re loi de Newton et pensent qu'une force doit être présente quand on objet se déplace à vitesse constante.

Parfois, les gens vont dire qu'un objet en mouvement continue son mouvement en ligne droite parce que la force d'inertie agit sur l'objet. C'est vrai que l'inertie fait en sorte que l'objet continue son mouvement, mais il n'y a pas de force d'inertie. L'objet garde la même vitesse sans qu'aucune force n'agisse sur lui.

Erreur fréquente : penser qu'il existe une force d'inertie

On retrouve souvent des erreurs de 1re loi de Newton dans les films de science-fiction. Dans l'espace, il n'y a pas de friction et, s'il n'y a pas de planète ou d'étoile tout près pour faire une force de gravitation, la seule force s'exerçant sur le vaisseau est celle du moteur. On voit parfois une scène dans laquelle le moteur se brise et le vaisseau s'arrête. C'est bien sûr une erreur de physique puisque si le moteur arrête, il n'y a plus de force et ainsi, le vaisseau devrait continuer à vitesse constante ! D'ailleurs, pourquoi avait-on besoin de faire fonctionner le moteur ? On n'avait qu'à le faire fonctionner au départ pour donner une vitesse au vaisseau, laisser ensuite le vaisseau aller à vitesse constante sans moteurs pour finalement arrêter le vaisseau en utilisant un moteur qui va ralentir le vaisseau. C'est d'ailleurs comme ça, en gros, qu'on a procédé pour envoyer des astronautes sur la Lune. Si on laisse fonctionner le moteur du vaisseau tout le temps, le vaisseau va accélérer sans cesse. On peut bien le faire, mais le vaisseau va aller pas mal vite à l'arrivée et il ne pourra

pas s'arrêter facilement. Si le voyage a duré deux semaines, on ne pourra pas accélérer pendant deux semaines et ralentir en deux minutes ; imaginer l'accélération que ça prendrait ! Si on veut absolument utiliser le moteur, il faudrait plutôt accélérer pendant une semaine et ensuite ralentir pendant une semaine.

Il y a également une grosse erreur de première loi de Newton dans cette scène de *Gravity*
https://physique.merici.ca/mecanique/Gravity.wmv
Tout va bien pour les 39 premières secondes de cet extrait. À la fin de ces 39 secondes, George Clooney tient le bout d'une corde et il a une vitesse constante (qui est la même que celle de Sandra Bullock). C'est alors que les choses se gâtent et qu'il y a de gros problèmes de première loi de Newton. Dans le film, George doit tenir continuellement la corde pour maintenir sa vitesse. En réalité, la corde n'est pas utile puisqu'une fois que George a la même vitesse que Sandra, aucune force n'est nécessaire pour qu'il se déplace à vitesse constante. Quand George lâche la corde, il devrait continuer toujours à la même vitesse et rester à la même distance de Sandra. Pourtant, dans le film, George commence à s'éloigner de Sandra comme s'il fallait une force pour pouvoir continuer à vitesse constante. (S'ils étaient dans l'atmosphère, la scène serait correcte parce que la force faite par la corde devrait être là pour compenser la force de friction de l'air. Mais comme il n'y a pas d'air dans l'espace, la physique dans cette scène est complètement erronée.)

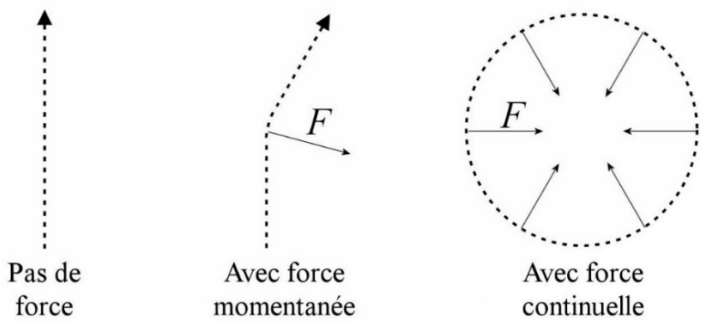
La deuxième loi de Newton

La deuxième loi de Newton vient préciser la grandeur de la force quand l'accélération n'est pas constante. C'est la fameuse loi $F = ma$. Comme on ne fera pas de calcul ici, il n'est pas nécessaire de développer davantage cette idée.

Disons simplement que plus la masse d'un objet est petite, plus l'accélération de l'objet sera grande. Les forces ont beaucoup d'effet sur les petites masses et peu d'effets sur grandes masses.

3.2 LE MOUVEMENT CIRCULAIRE

Selon la première loi de Newton, un objet continue toujours son mouvement à vitesse constante en ligne droite (figure de gauche) s'il n'y a pas de forces qui agissent sur l'objet.



Si la trajectoire change, c'est qu'une force fait dévier l'objet. Dans la figure du centre, une force a agi pendant un bref instant vers la droite pour dévier l'objet vers la droite. Dans le mouvement circulaire (à droite), la force fait continuellement dévier l'objet. Cela signifie que dans un mouvement circulaire, il doit toujours y avoir une force sur l'objet en rotation et cette force doit être dirigée vers le centre du cercle.

Cette force vers le centre est la *force centripète* (et non pas la force centrifuge, qui n'existe pas). On peut montrer que cette force doit avoir les caractéristiques suivantes.

Dans un mouvement circulaire uniforme, la force totale sur un objet dit être dirigée vers le centre du cercle et avoir la grandeur $\frac{4\pi^2 mr}{T^2}$.

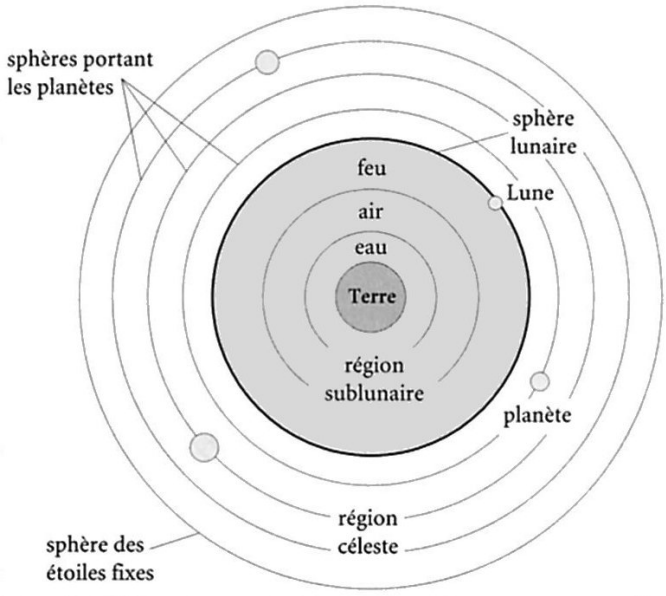
Dans cette formule, r est le rayon du mouvement circulaire, m est la masse de l'objet qui tourne et T est la période, c'est-à-dire le temps qu'il fait pour faire un tour complet.

3.3 LA GRAVITATION ET LES ORBITES CIRCULAIRES

Étudions maintenant le mouvement des objets en orbite autour d'une planète ou d'une étoile. On va premièrement voir comment l'étude de ce mouvement a permis de découvrir la loi de la gravitation. Ensuite, on trouvera des formules de vitesse et de période des objets en orbite.

Anciennes théories

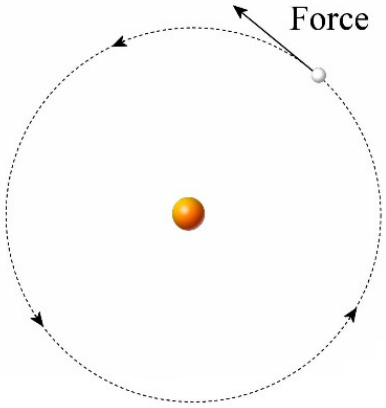
Voici comment Aristote expliquait la gravitation. Les quatre éléments des Grecs ont chacun une place naturelle dans l'univers. En partant du centre de l'univers, on retrouve la terre, puis l'eau, puis l'air et finalement le feu. Selon cette théorie, une pierre retombe au sol quand on la soulève dans l'air ou dans l'eau parce que la pierre, principalement composée de l'élément terre, tombe pour retourner à sa place naturelle. De la même façon, le feu dans l'air monte pour retourner à sa place naturelle, qui est au-dessus de l'air.



Y. Gingras, P Keating, C. Limoges, Du scribe au savant, Éditions du boréal, 1998

Il y avait ensuite les planètes qui tournent autour de la Terre. Cela signifie qu'il y a une séparation nette entre 2 parties de cet univers. Dans le monde sublunaire, le mouvement naturel des objets consiste à monter ou descendre selon leur composition. Dans les cieux, le mouvement naturel des planètes est un mouvement circulaire autour du centre. Il y a donc 2 régions dans lesquelles les lois de la physique sont bien différentes.

On voulait également expliquer comment les planètes pouvaient se déplacer sur leur orbite. Comme on associait la force à la vitesse à cette époque, on pensait que la force totale agissant sur la planète devait être dans la direction de la vitesse de la planète. Pendant longtemps, on a donc cherché cette force qui poussait les planètes sur leur orbite. On imagina même à une certaine époque que cette force était faite par les anges !

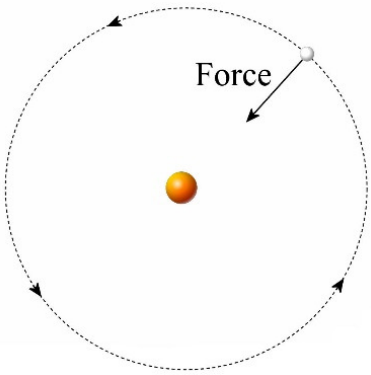


L'attraction

Avec la découverte de la loi de l'inertie (début du 17^{e} siècle), on commence à comprendre que les objets doivent plutôt se déplacer en **ligne droite** si rien n'altère leur mouvement. Si les planètes font un mouvement circulaire plutôt qu'un mouvement en ligne droite, alors il doit y avoir une force qui fait constamment changer la direction du mouvement de la planète.

En fait, il faut près d'un siècle pour arriver à une analyse correcte du mouvement des planètes en orbite. Tout commence avec la découverte de la formule de la force centripète. Huygens découvre en 1659 la formule donnant la force exercée par une corde qui retient un objet en rotation. C'est la première formulation de la formule de la force centripète. Toutefois, Huygens ne pense jamais à utiliser ses découvertes pour étudier le mouvement des planètes en orbite.

Après la publication des travaux de Huygens en 1673, certains, tels que Robert Hooke, Edmund Halley et Christopher Wren, utilisent les découvertes de Huygens pour étudier le mouvement des planètes. Ils comprennent, aux alentours de 1680, que la force sur l'objet en orbite doit être dirigée vers le centre. On commence à comprendre que le Soleil attire les planètes dans le Système solaire.



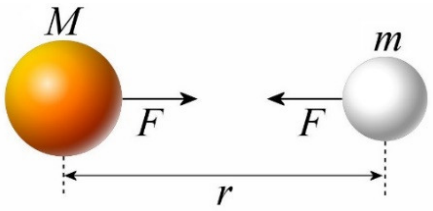
À l'époque, on ne connait pas les distances entre les planètes et le Soleil, mais on connait les distances relatives. Cela veut dire, par exemple, qu'on ne sait pas la distance entre Jupiter et le Soleil, mais on sait que Jupiter est 5,2 fois plus loin du Soleil que la Terre. À partir des temps de rotations des planètes autour du Soleil et des distances relatives des planètes, Halley et Wren arrivent même à la conclusion que la force faite par le Soleil doit diminuer avec le carré de la distance. Ainsi, si deux

planètes A et B identiques sont attirées par le Soleil, la force sur la planète A est 4 fois plus petite si elle est 2 fois plus loin du Soleil que la planète B.

Limités par leurs connaissances en mathématiques, Halley, Wren et Hooke n'arrivent toutefois pas à calculer les caractéristiques des orbites à partir de la force exercée par le Soleil. C'est pourquoi Halley demande à Newton, en 1684, quelle serait la forme des orbites des planètes si la force de gravitation variait avec $1/r^2$. Cette demande lance Newton, qui ne s'était pas vraiment intéressé à la mécanique depuis la fin des années 1660, dans une étude très poussée des orbites de planètes. C'est cette étude qui l'amène à refaire complètement la mécanique en associant la force à l'accélération et qui culmine en 1687 avec la publication du livre de Newton qui révolutionne la physique à tout jamais.

C'est pendant cette période que Newton découvre la loi de la gravitation. Selon cette loi, tous les objets s'attirent mutuellement et la grandeur de cette force entre 2 sphères est donnée par

$$F = \frac{GMm}{r^2}$$



Dans cette formule, G est la constante gravitationnelle M et m sont les masses des deux sphères qui s'attirent mutuellement et r est la distance entre les centres des sphères.

Le résultat est clair. Il n'y a pas que le Soleil qui attire les planètes. Tous les objets de l'univers ayant une masse attirent tous les autres objets de l'univers ayant une masse. C'est l'attraction gravitationnelle universelle. Il fallait quand même beaucoup d'audace pour affirmer que toutes les masses s'attirent parce qu'il n'est pas du tout évident que tous les objets s'attirent entre eux. Une banane ne semble pas du tout attirée par une pomme placée tout près, mais c'est pourtant ce qu'affirme la loi de la gravitation. Évidemment, on comprenait que l'attraction était trop faible pour être perçue et il a fallu attendre près d'un siècle avant que quelqu'un (Henry Cavendish) ne parvienne à mesurer cette faible attraction entre des objets de quelques kilogrammes.

En fait, l'idée de l'attraction gravitationnelle n'était pas tout à fait nouvelle. Gilles Personne de Roberval (1644) et Robert Hooke (1665) avaient déjà formulé l'idée que tous les objets de l'univers s'attirent mutuellement (mais sans donner une formule de la force).

La loi de la gravitation de Newton permet de faire une grande unification. Dans le système d'Aristote, il y avait une gravitation près de la Terre faite par les positions naturelles des 4 éléments à l'intérieur de l'orbite de la Lune (qu'on appelait la *région sublunaire*) alors qu'il n'y avait pas de gravitation au-delà de l'orbite de la Lune (qu'on appelait *les cieux*). Il y avait une séparation entre ces 2 régions. La physique n'était pas la même dans ces 2 régions. Avec Newton, il n'y a plus cette séparation entre le monde sublunaire et les cieux. La force de gravitation agit sur les objets près de la surface de la Terre et sur la Lune en suivant exactement les mêmes lois.

Ainsi, selon cette loi, le Soleil attire la Terre et la Terre attire le Soleil. Toujours selon les lois de Newton, les forces sur la Terre et sur le Soleil sont de même grandeur. Toutefois cette force a beaucoup moins d'effet sur le Soleil, car sa masse est beaucoup plus grande que celle de la Terre.

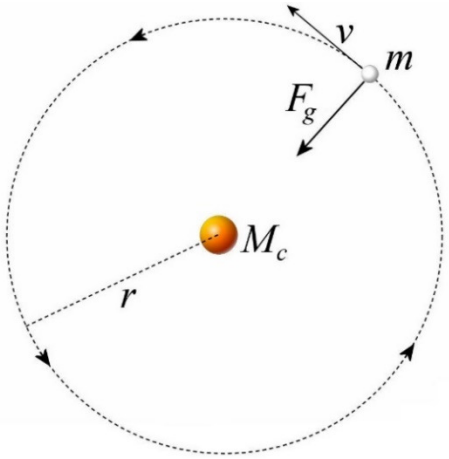
Erreur fréquente : Pensez que quand deux objets s'attirent par gravitation, l'objet moins massif fait une force moins grande sur l'autre

Intuitivement, les gens se doutent que la Terre exerce une force sur la Lune et que la Lune exerce aussi une force sur la Terre. Cependant, plusieurs diront que la Terre fait une force beaucoup plus importante sur la Lune que la Lune fait sur la Terre parce qu'elle est plus massive. Admirer les réponses des gens dans ce vidéo (en anglais).
https://www.youtube.com/watch?v=8bTdMmNZm2M
Évidemment, tout cela est faux ; les forces doivent être de mêmes grandeurs. L'effet sur la Lune semble plus important simplement parce que la masse de la Lune est plus petite.

Les orbites circulaires

Selon la loi de la gravitation et les lois de Newton, l'attraction du Soleil sur la Terre fait constamment dévier la trajectoire de la Terre.

Il y a alors une première possibilité : la force gravitationnelle du Soleil pourrait servir de force centripète et la trajectoire d'un astre en orbite autour d'une masse centrale (beaucoup plus massif que l'objet en orbite) pourrait être un cercle parfait.



En égalant la force gravitationnelle de la masse centrale à la force centripète sur l'objet en orbite, on peut calculer la vitesse de l'objet en orbite et le temps qu'il lui fait pour faire le tour de la masse centrale.

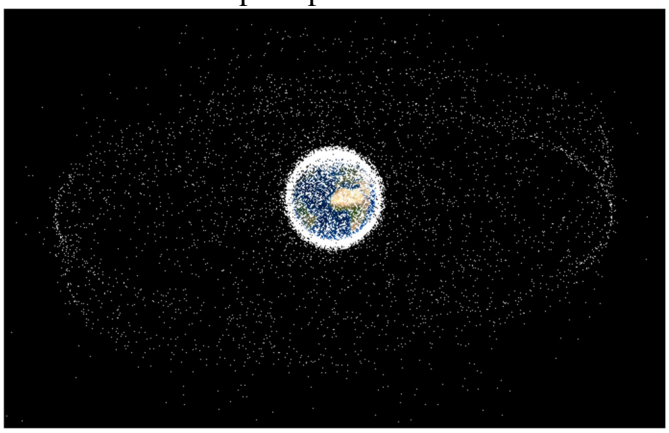
Ces formules indiquent qu'il faut une vitesse très précise quand on est à une certaine distance de la masse centrale pour suivre une orbite circulaire. Plus on s'éloigne de la masse centrale, plus la vitesse diminue et plus le temps nécessaire pour faire le tour de l'orbite augmente.

Prenons deux exemples pour illustrer. La plupart des satellites sont juste au-dessus de l'atmosphère. On pourrait prendre, par exemple, un satellite qui est 200 km au-dessus de la surface de la Terre. Comme la Terre a un rayon de 6378 km, ce satellite est à 6570 km du centre de la Terre. Avec cette distance, on peut calculer que ce satellite doit se déplacer à 28 040 km/h et qu'il doit faire le tour de la Terre en 88 minutes et 20 secondes. Tous les

satellites situés à 200 km d'altitude doivent se déplacer à cette vitesse et doivent avoir la même période.

Comme 2e exemple, prenons les satellites *géostationnaires*. Ces satellites sont des satellites qui sont juste à la bonne distance de la Terre pour que la période soit de 24 heures (en fait 23 h 56 min 4 s). Le satellite va donc tourner autour de la Terre exactement au même rythme que la Terre tourne sur elle-même et il restera ainsi toujours au-dessus du même endroit sur Terre. Autrement dit, le satellite verra toujours le même côté de la Terre. Ces satellites sont importants, car on peut facilement trouver leurs positions parce qu'ils sont toujours dans la même direction dans le ciel. Une fois qu'on a ajusté notre antenne pour qu'elle pointe vers ce satellite, elle est toujours dans la bonne direction. Si le satellite tournait plus ou moins vite, il faudrait constamment changer la direction de l'antenne pour recevoir le signal. Ce petit video vous expliquera une version animée de cette explication.
https://www.youtube.com/watch?v=sj7zsGkpZxg
Sachant que la période est de 24 heures, on peut trouver le rayon de l'orbite de ces satellites. Ces satellites doivent être à 42 225 km du centre de la Terre. Comme la Terre a un rayon de 6378 km, ils sont donc à 35 866 km de la surface de la Terre. On peut aussi calculer qu'ils se déplacent à 11 060 km/h. Tous les satellites géostationnaires doivent se déplacer à une vitesse de 11 060 km/h et être à 42 225 km du centre de la Terre.

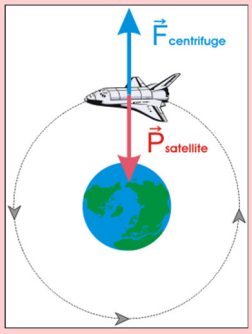
Il y a en fait 2 endroits très occupés autour de la Terre pour placer des satellites. On les place souvent tout près de la Terre (ce qui est moins cher) ou on les place en orbite géostationnaire. La figure de droite montrant les satellites autour de la Terre illustre bien cela. La plupart sont très près ou sur une orbite correspondante à la distance pour que les satellites aient une période de 24 heures.



maps.esri.com/rc/sat2/index.html

Erreur fréquente : Penser qu'en orbite, il y a équilibre entre la gravitation et la force centrifuge.

Il arrive très souvent qu'on affirme qu'il y a équilibre entre la force centrifuge et la force gravitationnelle sur les objets en orbite. On vous montre alors une image telle que l'image de droite.



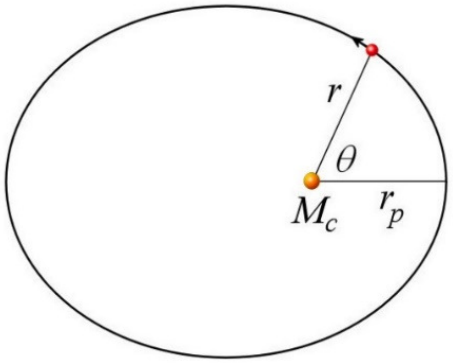
On sait que cela ne peut pas être correct puisque la force centrifuge n'existe pas. De plus, si ces deux forces s'annulaient vraiment, la somme des forces serait nulle et l'objet aurait une trajectoire en ligne droite. On ne peut avoir une trajectoire circulaire si la somme des forces est nulle puisque cela serait en contradiction évidente avec la première loi de Newton.

xp.hauduroy.free.fr/Mise_en_orbite.html

3.4 LES ORBITES ELLIPTIQUES

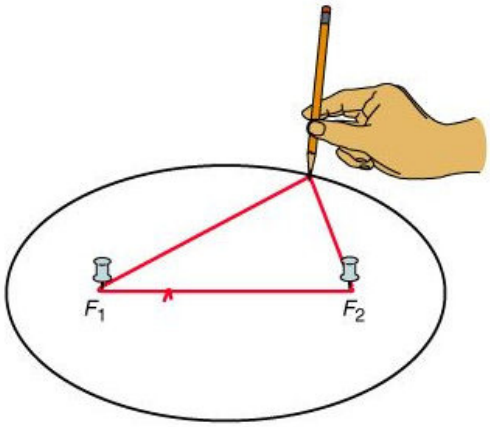
Il est très rare que la vitesse soit exactement celle qu'on doit avoir pour obtenir une orbite circulaire. Il faut donc continuer notre investigation pour connaitre la véritable trajectoire de la Terre autour du Soleil.

Selon la gravitation, le mouvement d'un objet autour d'une masse centrale peut-être un cercle, mais ce n'est pas la seule possibilité. L'orbite circulaire n'est qu'un cas particulier qui a très peu de chance de se réaliser puisque l'objet en orbite doit avoir une vitesse très précise lorsqu'il est une certaine distance de la masse centrale pour que l'orbite soit circulaire. Si la vitesse n'est pas exactement celle qu'il faut pour obtenir une orbite circulaire, on aura une orbite elliptique. Quand une planète suit une orbite elliptique, la distance entre l'objet en orbite et la masse centrale varie. L'image de droite montre une telle orbite.

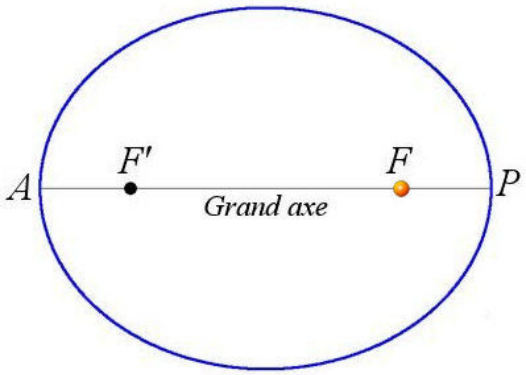


L'ellipse

L'ellipse ressemble à un ovale, mais elle est particulière. Pour tracer une ellipse, il suffit de tenir un anneau de corde avec deux punaises plantées dans une planche. On prend alors un crayon et on trace alors la figure délimitée par la corde tendue, comme sur la figure. Les deux foyers de l'ellipse F_1 et F_2 sont les deux endroits où on a planté les punaises.



L'ellipse est plus ou moins allongée selon la distance entre les punaises et la longueur de la corde. Selon la loi de la gravitation, la masse centrale (l'étoile ou la planète autour de laquelle l'objet est en orbite) doit être située au foyer *F*. La ligne qui va d'un côté à l'autre de l'ellipse en passant par les foyers est le grand axe de l'ellipse. La moitié de la longueur de cet axe s'appelle le *demi-grand axe* et est notée *a*.



Les deux points où l'ellipse et le grand axe se croisent (points *A* et *P* sur la figure) sont les apsides. (Le grand axe est aussi appelé la ligne des apsides ou la ligne apsidiale.) Le point *A* est le point de l'orbite le plus éloigné de la masse centrale, nommé en général apoapside (on utilise aussi les termes d'apside supérieure ou d'apoapse). Le point *P* est le point de l'orbite le plus près de la masse centrale

et est nommé en général la périapside (on utilise aussi les termes d'apside inférieure ou de périapse).

Il existe en fait tout un vocabulaire pour nommer ces points selon l'astre qui joue le rôle de masse centrale. Si l'orbite se fait autour du Soleil, le point le plus près est le périhélie et le point le plus loin est l'aphélie. Si l'orbite se fait autour de la Terre, le point le plus près est le périgée et le point le plus loin est l'apogée.

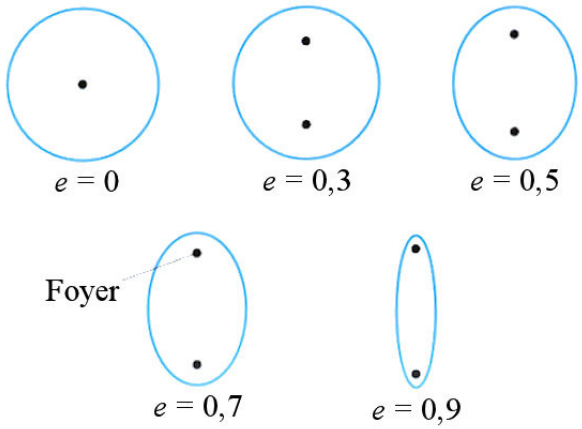
Masse centrale	Périapside	Apoapside
Soleil	Périhélie	Aphélie
Terre	Périgée	Apogée

L'excentricité

L'excentricité de l'ellipse mesure l'étirement de l'ellipse.

Si l'excentricité est nulle et on obtient un cercle. Plus l'excentricité est élevée, plus les foyers sont distants l'un de l'autre et plus l'ellipse est allongée.

La valeur de l'excentricité d'une ellipse se situe toujours entre 0 (cercle) et 1 (mais elle ne peut pas être exactement égale à 1).



astro.wsu.edu/worthey/astro/html/lec-ellipse.html

Plus l'excentricité est élevée, plus il y a un écart important entre la distance la plus petite et la distance la plus grande de la masse centre sur l'orbite. Par exemple, voici les distances les plus grandes et les distances les plus petites pour une orbite autour du Soleil ayant un demi grand-axe de 100 millions de km pour 3 excentricités différentes.

Excentricité de 0,1

Périhélie : 90 millions de km
Aphélie : 110 millions de km
Différence : 20 millions de km

Excentricité de 0,5

Périhélie : 50 millions de km
Aphélie : 150 millions de km
Différence : 100 millions de km

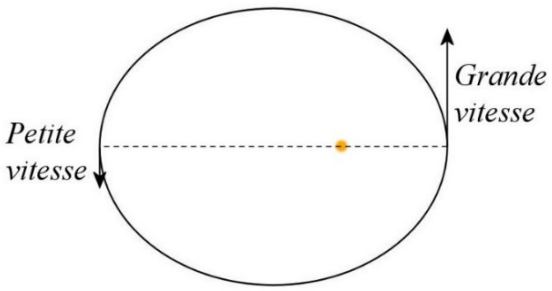
Excentricité de 0,9

Périhélie : 10 millions de km

Aphélie : 190 millions de km
Différence : 180 millions de km

La vitesse orbitale

La vitesse de la planète sur l'orbite n'est pas constante. Sans entrer dans les détails, la conservation de l'énergie fait en sorte que l'objet en orbite va plus vite quand il est près de la masse centrale et va moins vite quand il s'éloigne de la masse centrale. La vitesse maximale est donc atteinte à la périapside et la vitesse minimale est atteinte à l'apoapside.



3.5 L'ORBITE DE LA TERRE AUTOUR DU SOLEIL

Le demi grand-axe, l'excentricité et la période

La Terre tourne autour du Soleil en suivant une orbite elliptique. Le demi-grand axe de l'orbite est 149 597 870,7 km. Cette distance porte le nom d'*unité astronomique.*

$$1UA = 1,495\,978\,707 \times 10^{11}\,m$$

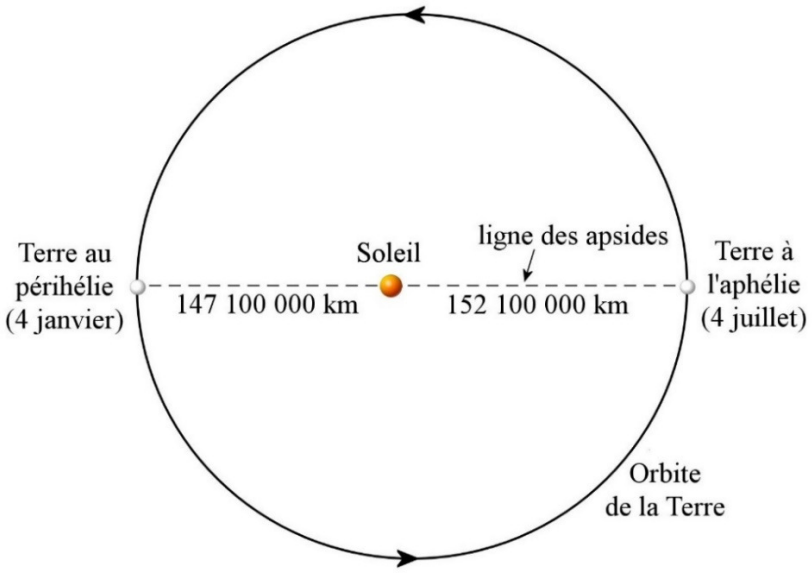
Aujourd'hui, on mesure cette distance à l'aide de radar. En mesurant le temps que prend l'onde pour aller et revenir au Soleil (environ 16 minutes), on peut facilement trouver, avec la vitesse de la lumière, la distance du Soleil.

On verra dans des chapitres ultérieurs comment on a mesuré la distance entre la Terre et le Soleil avant qu'on ne puisse utiliser les ondes radars. On verra alors que ç'a été un véritable défi de déterminer la valeur de l'unité astronomique.

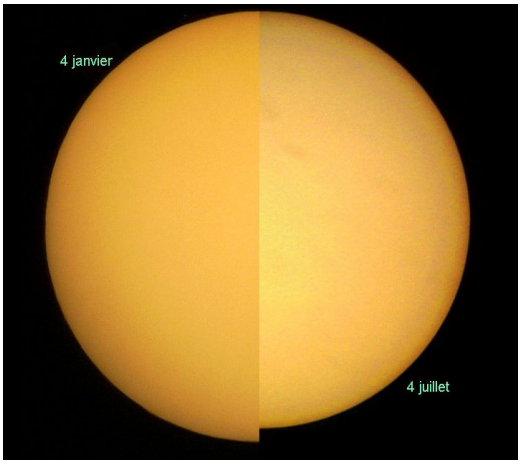
Ce 149 597 870,7 km est la distance moyenne entre la Terre et le Soleil. La distance varie puisque l'orbite est excentrique. L'excentricité de l'orbite de la Terre est relativement petite.

$$e = 0,016\,71$$

Cela signifie qu'au périhélie, la distance est de 147 100 000 km et qu'à l'aphélie, la distance est 152 100 000 km. La figure suivante donne les distances et le moment de l'année quand la Terre est au périhélie et à l'aphélie. (L'excentricité est exagérée sur l'image.)

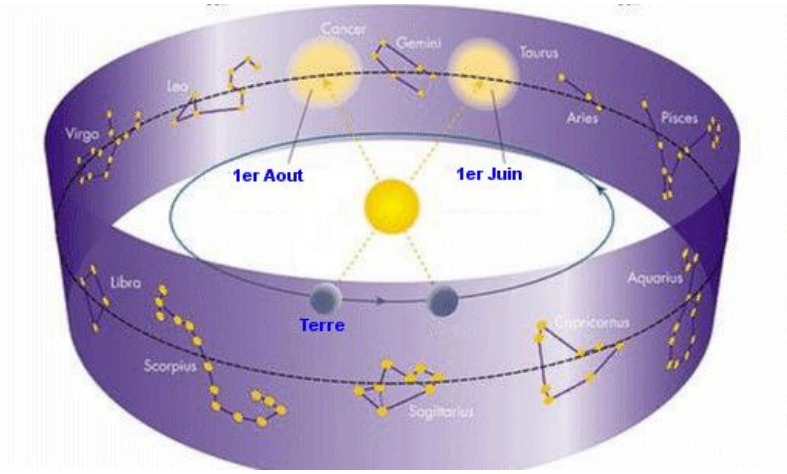


Ce changement de distance entre le Soleil et la Terre s'accompagne aussi d'un changement de grosseur apparente du Soleil. Le Soleil semble le plus gros le 4 janvier puisqu'il est plus près et il semble être le plus petit le 4 juillet parce qu'il est plus loin.



www.physics.smu.edu/jcotton/ph1311/prolog2.htm

On peut aussi connaitre le temps que prend la Terre pour faire le tour de son orbite autour du Soleil puisque le mouvement du Soleil par rapport aux étoiles dans le ciel est dû au mouvement de la Terre autour du Soleil. C'est ce que vous montre la figure suivante.



www.louisg.net/astronomie.htm

On peut voir sur cette figure que le 1er juin, par exemple, le Soleil est devant la constellation du Taureau. Le déplacement de la Terre sur son orbite change alors l'alignement entre les étoiles et le Soleil. Ainsi, le 1er aout, on voit maintenant le Soleil devant la constellation du Cancer. Ce n'est donc pas le Soleil qui a changé de place, c'est plutôt le mouvement de la Terre autour du Soleil qui a changé l'alignement entre la Terre, le Soleil et les étoiles.

Le temps que prend la Terre pour faire le tour du Soleil est donc identique au temps que prend le Soleil pour faire un tour complet par rapport aux étoiles tel que vu de la Terre. Ce temps est l'année sidérale.

$$1a_{sid} = 365\,j\ 6h\ 9m\ 9,75s$$

La masse du Soleil

Les formules utilisées pour les orbites elliptiques permettent de trouver la masse de l'objet au centre de l'orbite. Ainsi, avec les caractéristiques de l'orbite de la Terre, on peut facilement déterminer la masse du Soleil.

Juste pour vous donner une idée, le lien entre la période d'une planète en orbite elliptique et la masse de l'objet au centre de l'orbite est

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{a^3}{GM_c}}$$

Dans cette formule, a est le demi grand-axe de l'ellipse, G est la constante gravitationnelle et M_c est la masse de l'astre autour duquel l'objet en orbite tourne. Avec cette formule, on peut facilement calculer la masse du Soleil (qui est la masse centrale dans ce cas) avec la période et le demi-grand axe de l'orbite de la Terre autour du Soleil. Ce calcul donne la masse suivante.

$$1M_\odot = 1,9885\times10^{30}\,kg$$

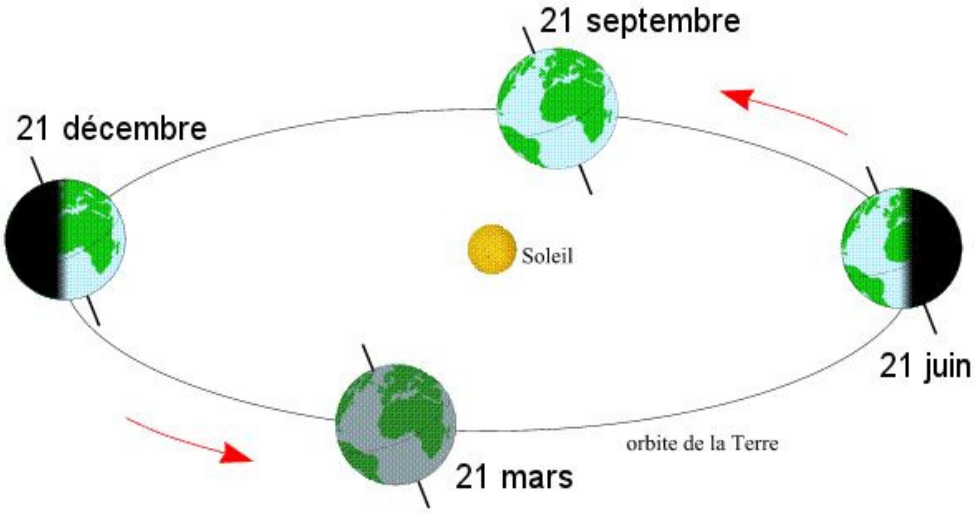
Remarquez le symbole utilisé en astronomie pour représenter le Soleil : ⊙. Ce symbole vient du hiéroglyphe égyptien pour Ra, le dieu soleil. C'est d'ailleurs le premier symbole utilisé dans le hiéroglyphe du pharaon Ramsès le grand ( ).

C'est avec la loi de la gravitation qu'on a trouvé la masse de toutes les planètes, étoiles et galaxies de l'univers. Remarquez que cette formule permet uniquement de trouver la masse de l'astre autour duquel un autre objet est en orbite. Ainsi, avec la période de rotation de la Terre autour du Soleil, on peut trouver la masse du Soleil, mais pas celle de la Terre.

3.6 LES SAISONS

On peut parfois lire que les saisons sont dues à la variation de la distance entre la Terre et le Soleil. L'été serait chaud parce que le Soleil serait plus près durant l'été alors que l'hiver serait froid parce que le Soleil serait alors plus loin de la Terre. Non seulement c'est faux, mais c'est le contraire qui se produit puisque la distance entre le Soleil et la Terre atteint sa valeur minimale le 4 janvier, pratiquement au début de l'hiver, et sa valeur maximale le 4 juillet, pratiquement au début de l'été.

Les saisons sont plutôt dues à l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre par rapport à l'axe de rotation de la Terre autour du Soleil.



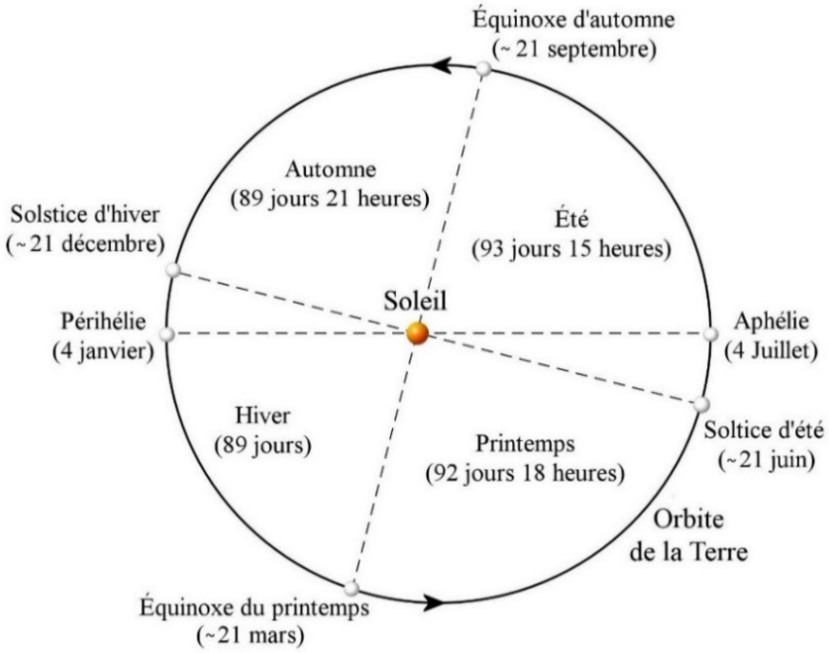
media4.obspm.fr/public/AMC/pages_saisons/definition-saisons_impression.html

Avec l'inclinaison de la Terre, on voit que l'hémisphère nord reçoit beaucoup de lumière et de chaleur du Soleil le 21 juin, alors que l'hémisphère sud en reçoit peu. À cette date, c'est donc l'été dans l'hémisphère nord et l'hiver dans l'hémisphère sud.

On voit aussi que le 21 décembre, l'hémisphère nord reçoit peu de lumière et de chaleur du Soleil alors que l'hémisphère sud en reçoit beaucoup. À cette date, c'est donc l'hiver dans l'hémisphère nord et l'été dans l'hémisphère sud.

Variations de la durée des saisons

La vitesse de la Terre sur son orbite n'étant pas constante, le temps qui s'écoule pendant une saison n'est pas toujours le même. L'image suivante vous donne la durée des saisons dans l'hémisphère nord, de même que la position de la Terre sur l'orbite lors des équinoxes et des solstices. On remarque que l'hiver est la saison la plus courte et l'été la plus longue. Dans l'hémisphère sud, c'est le contraire.

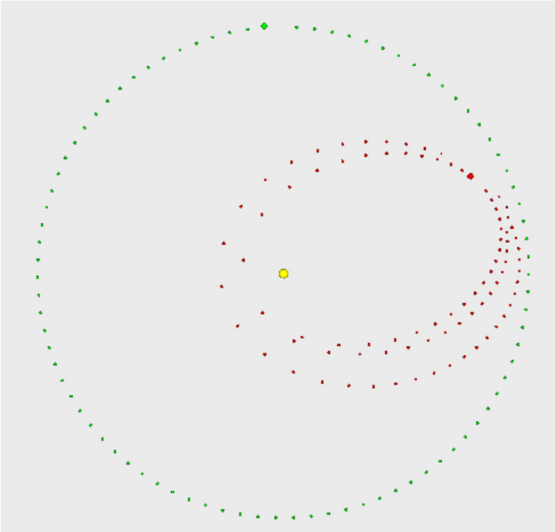


3.7 LES PERTURBATIONS

Que sont les perturbations ?

La forme des orbites est plus complexe que ce qui a été vu précédemment. En réalité, les orbites ne sont presque jamais des ellipses parfaites. S'il n'y avait que deux astres dans l'univers, alors les orbites seraient des ellipses parfaites. Dès qu'il y a plusieurs objets, les perturbations faites par les autres objets modifient lentement les trajectoires des astres qui passent à proximité.

Dans le système solaire, le mouvement de toutes les planètes est perturbé par la force gravitationnelle exercée par les autres planètes. Notons que plus une planète est légère, plus il est facile de la dévier de sa trajectoire. Les comètes et les astéroïdes étant des objets relativement légers, il arrive très souvent que leurs orbites elliptiques soient modifiées, spécialement si elles passent près d'une planète massive comme Jupiter.



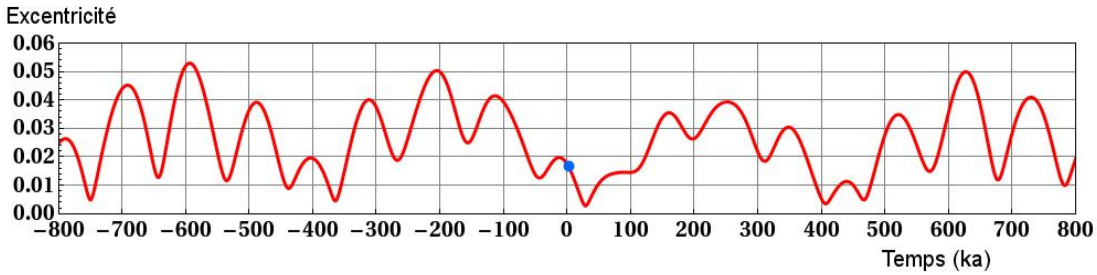
On peut voir sur cette figure les modifications faites (sur une période de 50 ans) à l'orbite d'un astéroïde (en rouge) qui vient passer trop près de Jupiter (en vert).

Effets sur l'orbite de la Terre

L'orbite de la Terre autour du Soleil est également affectée par les perturbations des autres planètes. Voyons comment ces perturbations modifient l'orbite de la Terre.

Variation de l'excentricité

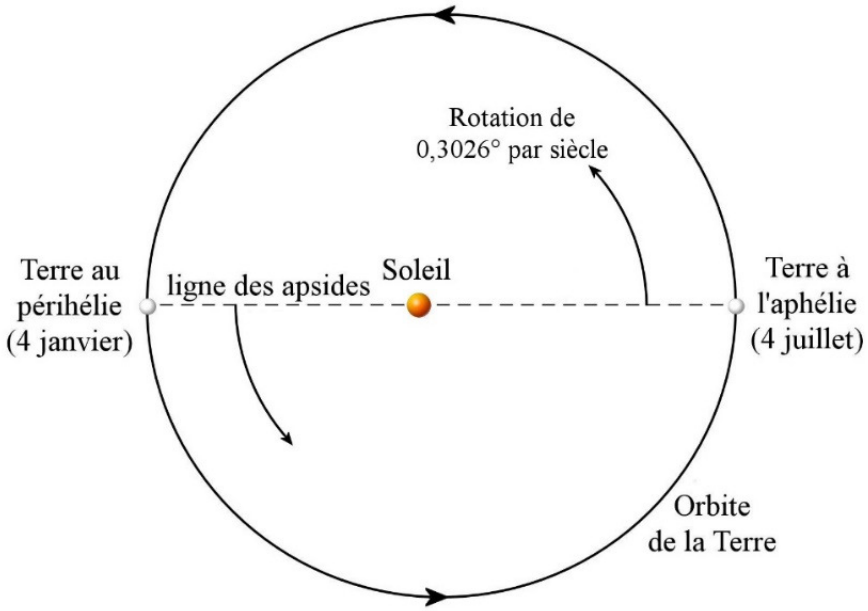
L'excentricité actuelle de l'orbite de la Terre est de 0,017. Toutefois, les perturbations font varier cette valeur entre 0,005 et 0,058. Le graphique suivant montre les variations de l'excentricité au cours du temps.



en.wikipedia.org/wiki/User:Incredio/Drafts

Déplacement du périhélie

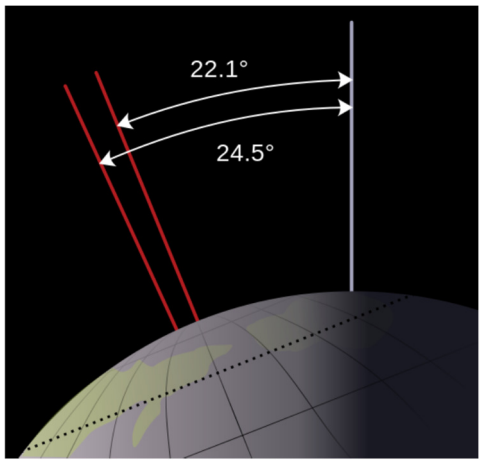
Les perturbations font également tourner le grand axe de l'orbite terrestre (ligne des apsides sur la figure) dans l'espace, mais d'à peine 0,30264° par siècle dans la même direction que la rotation de la Terre autour du Soleil.



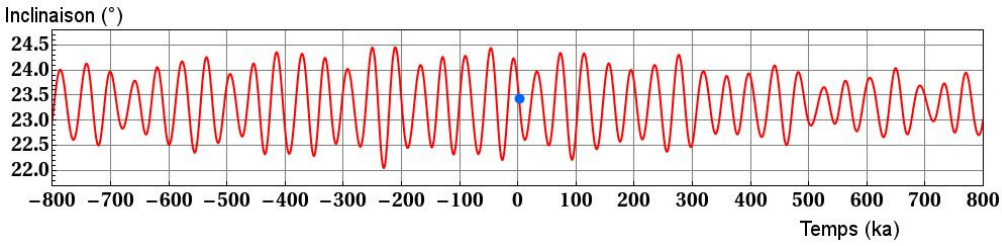
Le temps entre les passages de la Terre au périhélie s'appelle l'année anomalistique. Cette année a une durée de 365 jours 6 heures 13 minutes et 52,5 s (en 2000). Elle est donc 4 minutes et 42,7 secondes plus longue que l'année sidérale (qui est le temps que prend la Terre pour faire le tour du Soleil) qui vaut 365 jours 6 heures 9 minutes et 9,8 s. C'est normal qu'elle soit plus longue, car le périhélie se déplace dans le même sens que la Terre sur l'orbite. La Terre doit donc rattraper le périhélie, ce qui augmente le temps. À ce rythme, il faudra près de 118 950 ans avant que le grand axe de l'ellipse de la Terre fasse une révolution complète.

Variation de l'orientation de l'axe de la Terre

Les perturbations modifient aussi un peu l'inclinaison de l'axe de la Terre par rapport au plan de l'orbite terrestre de sorte que l'angle d'inclinaison peut varier entre 22,1° et 24,5°. En ce moment, cet angle est de 23,45°. Sur le graphique suivant, on peut voir les variations d'inclinaison au cours du temps.



wikipedia.qwika.com/en2fr/Milankovitch_cycles



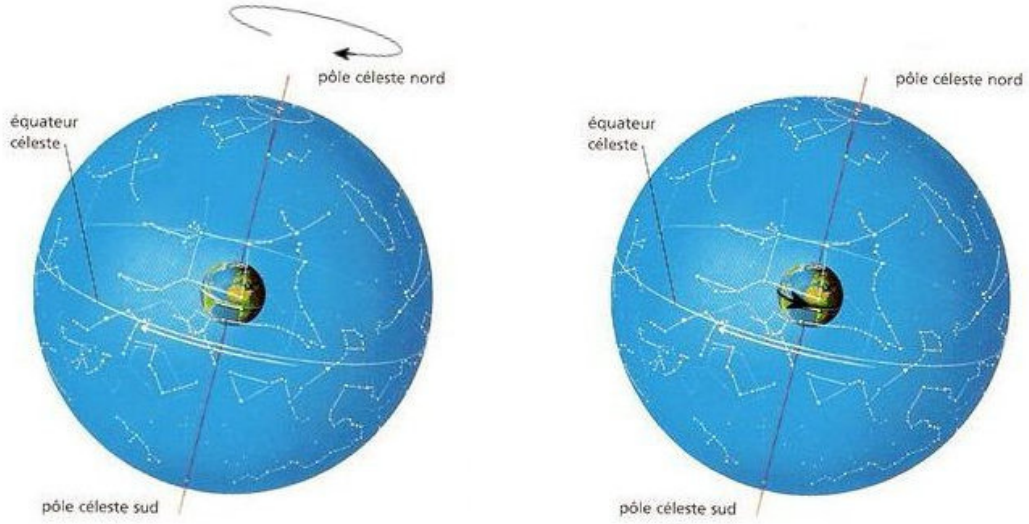
en.wikipedia.org/wiki/User:Incredio/Drafts

Notez que la présence de la Lune stabilise grandement l'orientation de l'axe terrestre. Sans la Lune, les variations pourraient être beaucoup plus importantes et elle pourrait même atteindre 180° !

3.8 LA ROTATION DE LA TERRE SUR ELLE-MÊME

Le jour sidéral

On se rappelle qu'on voit les étoiles tourner autour de la Terre avec une période de 23 heures 56 minutes et 4 secondes. Avant Newton, on pensait généralement que c'était la sphère céleste qui tournait autour de la Terre. Maintenant, on sait que ce n'est pas le ciel qui tourne autour de la Terre, c'est plutôt la Terre qui tourne sur elle-même en 23 h 56 min 4 s alors que les étoiles restent fixes.



en.quetes.free.fr/archives/la_mer/articles/florent_lamerlenord.htm

L'effet est exactement le même. Il y a eu quelques penseurs qui ont proposé que la Terre tourne sur elle-même bien avant que cette idée ne soit acceptée. Pensons principalement à Héraclite du Pont (4^{e} siècle av. J.-C.), Aristarque de Samos (3^{e} siècle av. J.-C.), Âryabhata (5^{e} siècle), quelques savants Arabes autour de l'an 1000, Jean Buridan et Nicolas Oresme (14^{e} siècle) et Galilée (début de 17^{e} siècle). On dit même qu'après sa condamnation par l'inquisition en 1632, Galilée aurait dit « Et pourtant elle tourne » en faisant référence à la rotation de la Terre sur elle-même. Il est cependant peu probable que Galilée ait dit une telle chose devant les inquisiteurs parce qu'elle aurait entrainé de fâcheuses conséquences.

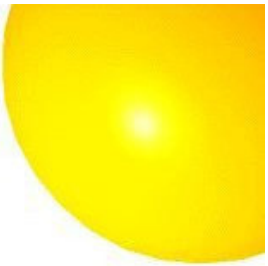
Avec la publication des lois de Newton en 1687, il n'y avait plus de place pour le doute. Non seulement la rotation de la Terre devenait possible, mais la rotation des étoiles autour de la Terre devenait impossible. Une étoile qui fait un mouvement circulaire autour de la Terre avec une période de près de 24 heures devrait subir une force centripète considérable dirigée vers la Terre. La force de gravitation de la Terre était beaucoup trop petite par rapport à cette force, on ne pouvait expliquer l'origine de la force centripète qui aurait permis cette rotation des étoiles.

Tout cela signifie que la Terre tourne sur elle-même avec une période égale au jour sidéral. La période de rotation de la Terre sur elle-même est donc de

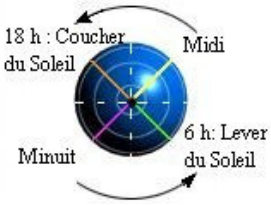
$$23 \text{ h } 56 \text{ min } 4 \text{ s} = 86\,164 \text{ s}$$

Le jour solaire

C'est la rotation de la Terre sur elle-même qui est responsable de l'alternance entre le jour et la nuit parce qu'on passe alternativement du côté de la Terre éclairé par le Soleil au côté qui n'est pas éclairé par le Soleil.



L'orientation de la Terre par rapport au Soleil détermine quelle heure il est à l'endroit où vous êtes sur Terre. Premièrement, on définit *midi* comme étant l'heure de tous les endroits se situant sur le méridien qui est dirigé vers le Soleil (méridien en jaune).



academic.brooklyn.cuny.edu/geology/leveson/core/linksa/findlong.html

Il est 18 heures pour tous les endroits qui se trouvent sur le méridien en orange. À partir de ce moment, on ne peut plus voir le Soleil et c'est la nuit qui commence.

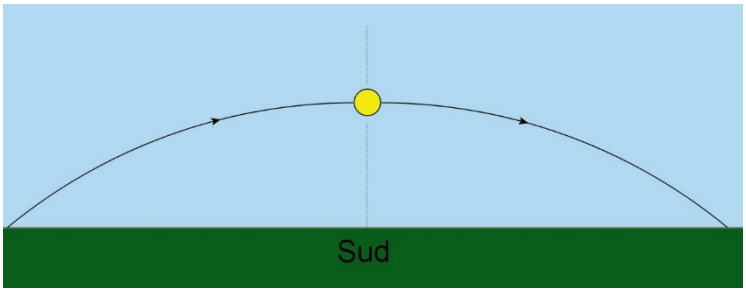
Il est minuit pour tous les endroits qui se trouvent sur le méridien opposé au Soleil (méridien en mauve).

Il est 6 h pour tous les endroits qui se trouvent sur le méridien en vert. À partir de ce moment, on commence à voir le Soleil et le jour commence.

On remarque alors facilement que l'heure est différente selon l'endroit où vous êtes sur Terre. Quand il est midi à Québec, il est minuit à Jakarta (Indonésie), qui est presque exactement sur le méridien opposé au nôtre, alors qu'il est 18 h à Budapest (Hongrie) et 6 h sur l'ile de Kaua'i (Hawai'i). C'est le fameux décalage horaire.

Avec la rotation de la Terre, on passe successivement par les endroits où il est midi, 18 h et minuit et 6 h pour ensuite revenir directement en ligne avec le Soleil 24 heures plus tard. Ce cycle se répète toutes les 24 heures. Cette période est le jour solaire.

Vu de la Terre, la rotation de la Terre donne l'impression que le Soleil se déplace dans le ciel. Dans l'hémisphère nord, on a l'impression que le Soleil se déplace de l'est vers l'ouest durant la journée.



À midi, le Soleil est alors vers le sud (du moins, pour un observateur dans l'hémisphère nord). (Le Soleil est rarement exactement vers le sud à midi, il y a de minimes variations durant l'année parce que l'orbite de la Terre est elliptique, en plus d'un décalage selon notre position dans notre fuseau horaire et d'un décalage supplémentaire d'une heure en été avec l'heure avancée.)

Pendant longtemps, on a cru que tout ceci était dû à la rotation du Soleil autour de la Terre avec une période de 24 heures. On sait maintenant que ce changement est plutôt dû à la rotation de la Terre sur elle-même alors que le Soleil reste en place.

Différence entre jour solaire et jour sidéral

Pourquoi y a-t-il une différence entre le jour solaire et le jour sidéral ? Allons-y premièrement avec les définitions exactes de chacun de ces éléments.

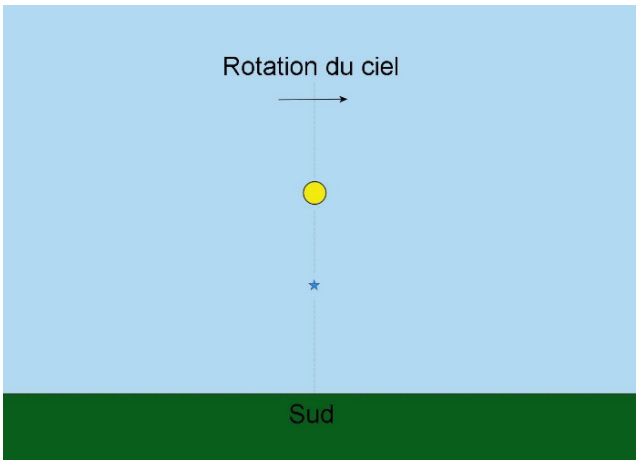
Jour solaire (24 heures).

> Temps pour que le Soleil revienne dans la même direction vue de la surface de la Terre.

Jour sidéral (23 heures 56 minutes et 4 secondes)

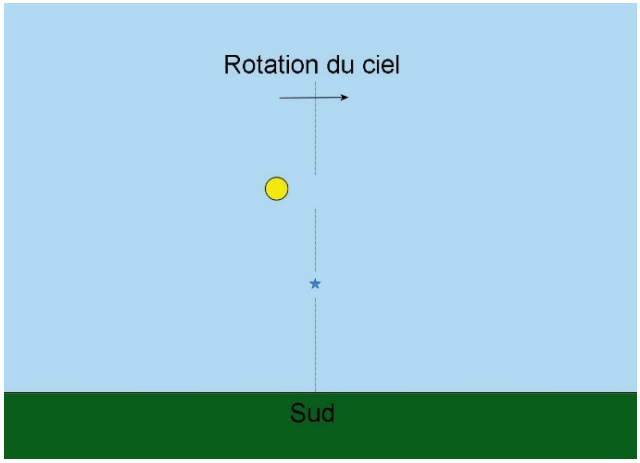
> Temps pour qu'une étoile revienne dans la même direction vue de la surface de la Terre. (D'ailleurs, sidéral vient de *sidus* qui signifie étoile en latin.)

Prenons une direction précise pour illustrer. Supposons qu'à un certain moment le Soleil et une étoile (qu'on ne pourrait pas voir puisque c'est le jour, mais supposons qu'on peut la voir) sont directement vers le sud pour un observateur sur Terre. Quand le Soleil est ainsi directement vers le sud, il est midi. (Supposons qu'il n'y a pas tous ces petits décalages qui font que le Soleil est rarement directement vers le sud à midi.)

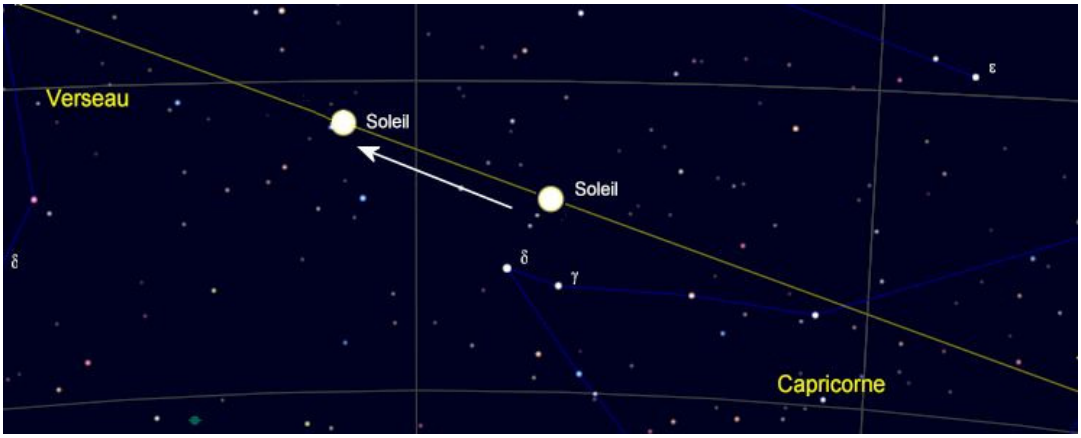


Avec la rotation de la Terre, l'étoile et le Soleil se déplaceront dans le ciel pour revenir directement au sud une journée plus tard. Regardons la situation 23 heures 56 minutes et 4 secondes plus tard (figure de gauche).

À ce moment, l'étoile est revenue exactement dans la même direction. Puisque l'étoile est revenue dans la même direction, un jour sidéral s'est écoulé.



Par contre, le Soleil n'est pas exactement revenu vers le sud parce qu'on a vu au chapitre 2 que le Soleil se déplace un peu chaque jour par rapport aux étoiles.

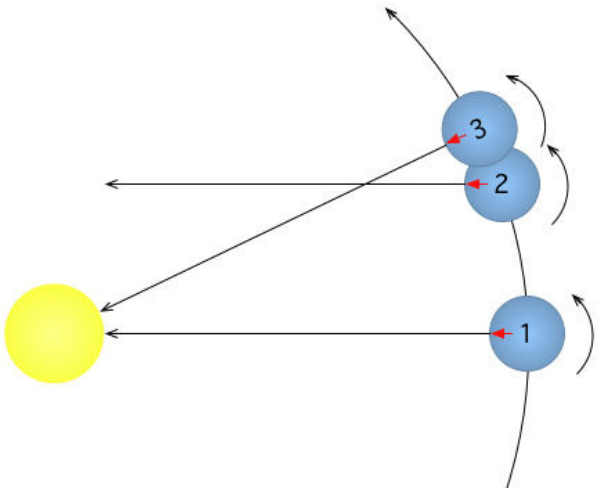


Fait avec le programme *Cartes du ciel*

Le Soleil s'est déplacé vers la gauche (pour un observateur de l'hémisphère nord) de près de 1° en un jour par rapport aux étoiles. (Il peut aussi y avoir un léger déplacement vers le haut ou vers le bas par rapport à la position du jour précédent. Ainsi, le Soleil monte un peu chaque jour pendant l'hiver et le printemps et baisse un peu chaque jour pendant l'été et l'automne). Il faudra donc un peu plus de temps pour que le Soleil revienne directement vers le sud. Le temps supplémentaire est de 3 minutes et 56 secondes, ce qui nous amène à 24 heures pour le jour solaire. (En fait, ce 3 minutes 56 secondes est une moyenne, il y a de légères variations au cours de l'année.)

Cette différence entre le jour solaire est due à la rotation de la Terre autour du Soleil. Réexaminons notre situation en prenant en considération la position de la Terre autour du Soleil.

La position 1 de la Terre est notre situation initiale : le Soleil et l'étoile (qui serait très loin à gauche sur cette figure) sont dans la même direction. 23 heures 56 minutes et 4 secondes plus tard, la Terre est la position 2. À ce moment, la Terre a fait un tour complet sur elle-même et l'étoile est revenue dans la même direction. Par contre, le Soleil n'est plus dans cette direction puisque la Terre s'est déplacée sur son orbite. On doit donc attendre quelques instants pour que la Terre tourne un peu plus (position 3) pour que le Soleil revienne dans la même direction. Le temps nécessaire pour que la Terre fasse cette rotation supplémentaire est de 3 minutes et 56 secondes, ce qui nous amène à 24 heures pour que le Soleil revienne dans la même direction.



en.wikipedia.org/wiki/Solar_time

Ainsi, si on vous demande en combien de temps la Terre fait un tour sur elle-même, vous devez répondre 23 heures 56 minutes et 4 secondes, et non pas 24 heures qui est plutôt la durée du jour solaire.