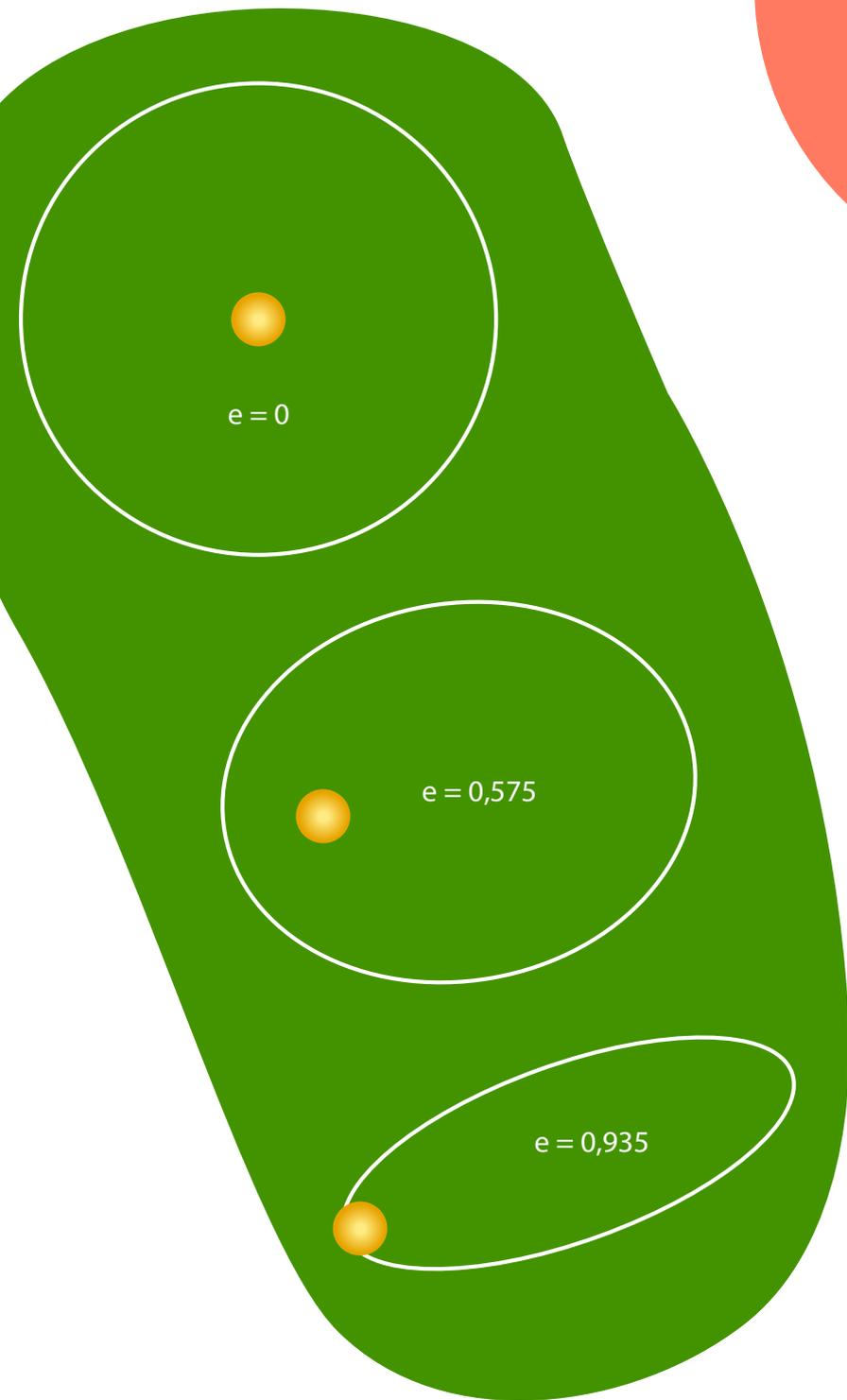


AU PLUS PRES DU SOLEIL

ASTRES

EN COURS



Activités

N°5 bis

1 EN PRIMAIRE

QUELLE EST LA DUREE
DE CHAQUE SAISON ?

Page 3

CONSTRUISONS
DES ELLIPSES !

Page 6

2 AU COLLEGE

MESURER LE DIAMETRE
APPARENT DU SOLEIL

Page 12

POURQUOI FAIT-IL PLUS
CHAUD EN ETE ?

Page 15

Cette activité peut aussi être traitée en primaire

3 AU LYCEE

RETROUVER SOI-MEME
LES DONNEES DU PASSAGE
AU PERIHELIE...
ET A L'APHELIE

Page 16

1

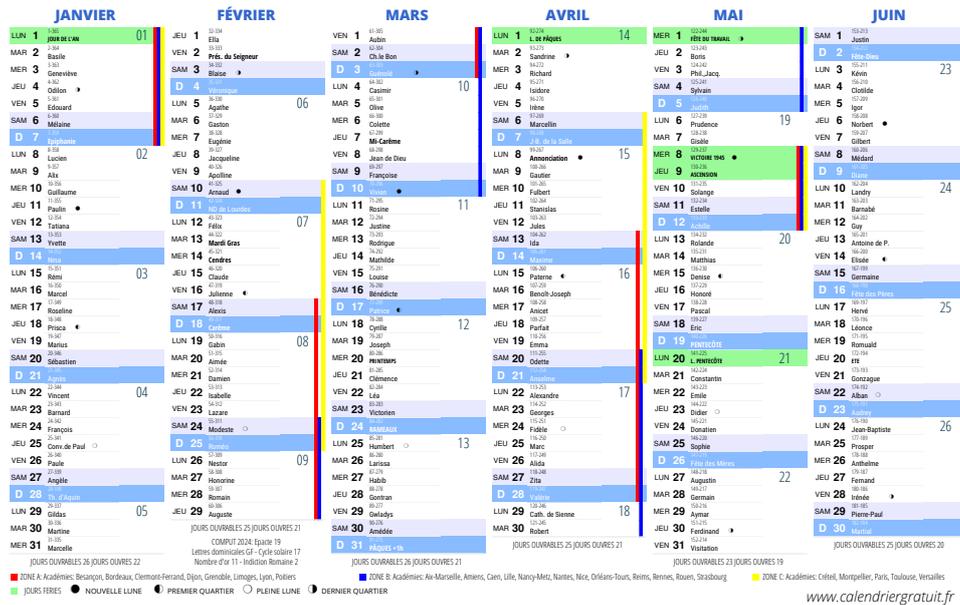
EN PRIMAIRE

Quelle est la durée de chaque saison ?

La plupart des calendriers donnent la date du début de chaque saison, sans indication d'heure, alors que le début de chaque saison peut être calculé à la fraction de seconde près. Ils ne sont donc pas précis mais permettent de se rendre compte de l'inégalité de la durée des saisons. Le calendrier comme celui présenté

ci-dessous donne pour l'année 2024, le début :

- du printemps le 20 mars ;
- de l'été le 20 juin ;
- de l'automne le 22 septembre ;
- de l'hiver le 21 décembre ;
- du printemps 2025 le 20 mars.



Si l'on se fie aux données récoltées sur ce calendrier, on obtient les durées suivantes.

- printemps : 92 jours
- été : 94 jours
- automne : 90 jours
- hiver : 89 jours

Pour faire ce calcul, vous pouvez demander aux enfants de dénombrer les jours entre deux dates directement sur le calendrier ou, plus simplement, utiliser un outil numérique comme celui que l'on trouve ici : https://www.ephemeride.com/calendrier/deux_dates/81/

Si vous souhaitez atteindre une précision supérieure au jour, il faut vous tourner vers une source plus sérieuse : l'Institut de mécanique céleste et de calcul des éphémérides (IMCCE) et en particulier, vers sa page dédiée aux formulaires de calcul d'éphémérides (<https://ssp.imcce.fr/forms/>).

Tout en bas de cette page, cliquez sur « Saisons » et vous aboutirez à un formulaire permettant de calculer les débuts des saisons

astronomiques sur Terre (et sur Mars). Le lien direct est <https://ssp.imcce.fr/forms/seasons>.

Sélectionnez « 2024 » et vous obtiendrez les instants des équinoxes et des solstices à la seconde près... en temps universel. Pour les convertir en heure légale française (l'heure de nos montres), il convient d'y ajouter 1 h en période d'hiver et 2 h en période d'heure d'été.

On trouve ainsi :

Début du printemps (équinoxe)
20 mars 2024 à 4 h 6 m 24 s

Début de l'été (solstice)
20 juin 2024 à 22 h 51 m 0 s

Début de l'automne (équinoxe)
22 septembre 2024 à 14 h 43 m 40 s

Début de l'hiver (solstice)
21 décembre 2024 à 10 h 20 m 34 s

Début du printemps (équinoxe)
20 mars 2025 à 10 h 1 m 29 s

Comment soustraire facilement deux dates complexes

On souhaite connaître la durée du printemps 2024. Il est toujours possible de faire le calcul « à la main » mais cela peut s'avérer fastidieux. Voici une méthode efficace et rapide. Elle fait appel à la période julienne, une échelle de temps qui numérote, sans discontinuité, les jours depuis une date conventionnelle fixée au 1^{er} janvier de l'an 4713 av. J.-C. (= - 4712) à 12 heures. Elle fut introduite par l'érudit français Joseph Scaliger (1540-1609) et permet de s'affranchir, entre autres, de la complexité introduite par la durée inégale des mois et par les années bissextiles dans le dénombrement des jours.

Pour transformer une date de notre calendrier en date julienne, il suffit d'entrer la date ici : <https://ssp.imcce.fr/forms/calendars> (page « Concordance entre calendriers », onglet « date et heure »), sous la forme « 2023-12-20T18:11:17.300 » si, par exemple, on souhaite connaître la date julienne correspondant au 20 décembre 2023 à 18 h 11 m 17,3 s TU. Appuyez sur « Convertir » et le tour est joué ! Faites l'opération pour la date du début d'une saison, la même opération pour le début de la saison suivante et effectuez la soustraction : vous obtiendrez la durée de la saison en jours et en fraction de jour.

Prenons l'exemple du printemps 2024. Le formulaire relatif aux saisons nous donne, pour l'équinoxe de printemps, la date suivante (TU) : 2024-03-20T03:06:24. Nous copions cette date et la collons sur la page « Concordance entre calendriers », onglet « date et heure ». Nous obtenons ainsi « Date julienne = 2460389.6294444446 ».

Durée du printemps 2024 : $2460482,36875 - 2460389,6294444446 = 92,7393055554$ j
= 92 j 17 h 44 m 36 s

Durée de l'été 2024 : $2460576,030324074 - 2460482,36875 = 92,7393055554$ j
= 93 j 15 h 52 m 40 s

Durée de l'automne 2024 : $2460665,8892824072 - 2460576,030324074 = 89,8589583332$ j = 89 j 20 h 36 m 54 s

Durée de l'hiver 2024-2025 : $2460754,8760300926 - 2460665,8892824072 = 88,9867476854$ j = 88 j 23 h 40 m 55 s

Ces durées sont à comparer avec celles obtenues par simple lecture du calendrier (printemps 92 jours, été 94 jours, automne 90 jours et hiver 89 jours). La concordance est plutôt satisfaisante.

Il reste à demander aux élèves la raison pour laquelle, selon eux, les saisons ont des durées différentes.

Nul doute que l'un d'entre eux vous répondra que la raison réside dans l'inégale longueur des mois : février, situé au cœur de l'hiver, est le mois le plus court. Juillet et août comptent tous deux 31 jours et sont deux mois estivaux. Pas étonnant que l'hiver soit court et l'été long !

Cette belle explication n'est malheureusement pas la bonne : que février compte 20 ou 40 jours ne changerait strictement rien à la durée des saisons. En effet, cette

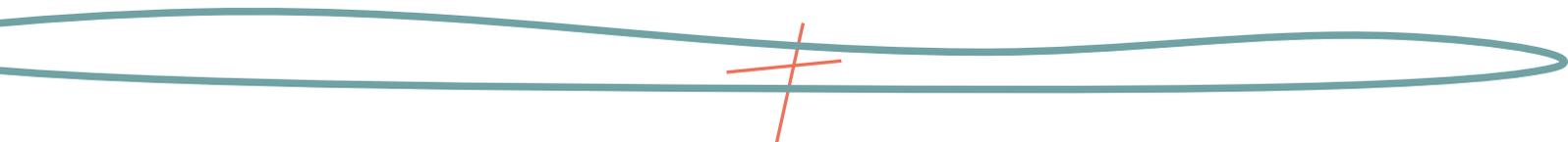
durée correspond à une différence entre deux dates. Modifier l'origine commune de deux dates ne modifie en rien le temps qui les sépare.

La lecture du chapitre 3 du document « Au plus près du Soleil » donne la réponse : la Terre décrit une ellipse autour du Soleil. Les morceaux d'ellipses sont décrits d'autant plus rapidement que la Terre est proche du Soleil. Or, il se trouve que c'est en plein hiver dans l'hémisphère nord que la Terre est au plus près du Soleil ! La saison correspondante sera donc la plus courte. Au contraire, l'été est la saison la plus longue.

Construisons des ellipses !

Et pas n'importe quelles ellipses : les ellipses qui représentent les véritables trajectoires de quelques corps autour du Soleil : la Terre, Mars, Mercure et la comète de Halley, des corps célestes rangés par ordre d'excentricité orbitale croissante.

De quoi a-t-on besoin ? À notre niveau, deux paramètres suffisent à caractériser l'ellipse : son plus grand diamètre (ce qu'on appelle le grand axe de l'ellipse) et son excentricité, qui est une mesure de son aplatissement. Mais où trouver ces données ?



Plusieurs sources sont utilisables. Pour la Terre, Mercure et Mars, nous avons extrait les données de l'article scientifique *Numerical expressions for precession formulae and mean elements for the Moon and the planets*, Simon *et al.*, *Astronomy and Astrophysics*, Vol. 282, p. 663 (1994), en négligeant les termes de faible amplitude (<https://adsabs.harvard.edu/full/1994A%26A...282..663S>).

Les éléments orbitaux de la comète de Halley sont tirés de la *JPL Small-Body Database*, une base de données mise à jour quotidiennement qui répertorie les petits corps du Système solaire (comètes et astéroïdes).

Lien direct vers la page dédiée à cette comète : https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb_lookup.html#/?des=1P.

Vous pouvez aussi consulter le site [Wikipedia](#) car, en astronomie, les données déposées sont généralement fiables et les auteurs donnent leurs sources.

Nous donnons ici les valeurs, avec quatre chiffres significatifs :

- des **demi-grands axes a** des ellipses, exprimées en unité astronomique (ua). Il s'agit d'une unité particulièrement bien adaptée à la mesure des distances dans le Système solaire. Elle équivaut à peu près à la distance moyenne Terre-Soleil. Depuis 2012, elle est définie comme valant exactement... 149 597 870, 7 km ;

- des **excentricités orbitales e** . Le cercle possède une excentricité nulle.

Corps céleste	Terre	Mars	Mercure	Comète de Halley
Demi-grand axe (ua)	1,000	1,524	0,3871	17,93
Excentricité	0,01671	0,09340	0,2056	0,9679

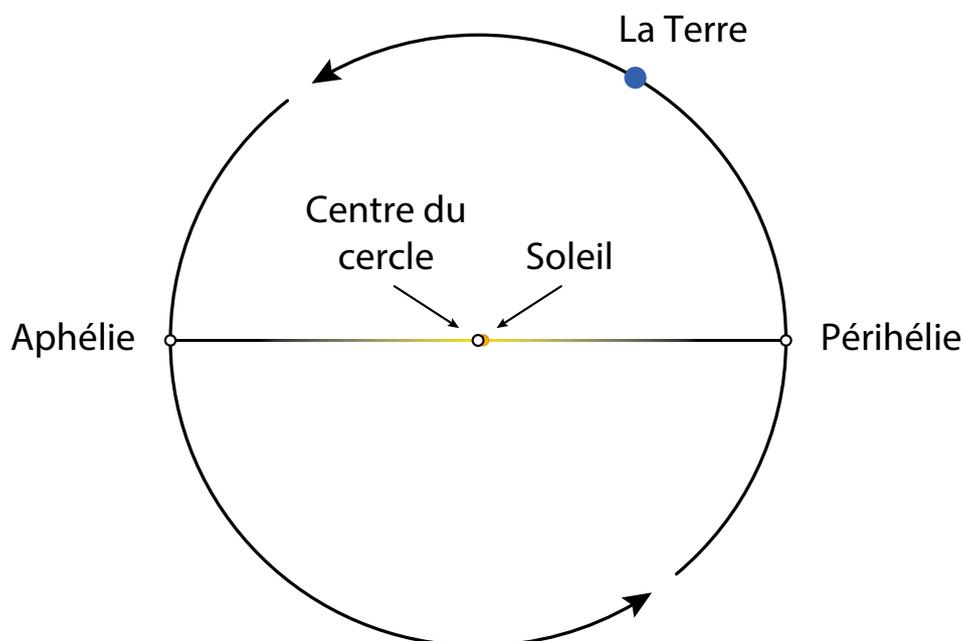
Le tracé est simple pour **la Terre** car, avec une excentricité orbitale aussi faible, sa trajectoire peut être représentée sous la forme d'un cercle. Sur le dessin, dix centimètres sur le carton équivaldront à une unité astronomique.

En pratique, les enfants tracent un cercle de 10 cm de rayon sur un carton, en marquant bien le centre, noté C.

Ils tracent ensuite un diamètre, qui représente le segment [périhélie-aphélie]. Sur ce diamètre, ils placent un point situé, en théorie, à 1,7 mm

du centre (et en pratique, quelque part entre 1 et 2 mm). Ce point n'est autre que le Soleil, que l'on note S.

Le point d'intersection entre le cercle et le diamètre, côté Soleil, est le périhélie. Le point d'intersection entre le cercle et le diamètre, de l'autre côté, est l'aphélie.



Sur ce dessin, la Terre et le Soleil ne sont pas à l'échelle. S'ils l'étaient vraiment, on verrait à peine le Soleil. Quant à la Terre... La même remarque s'appliquera à tous les dessins des pages suivantes.

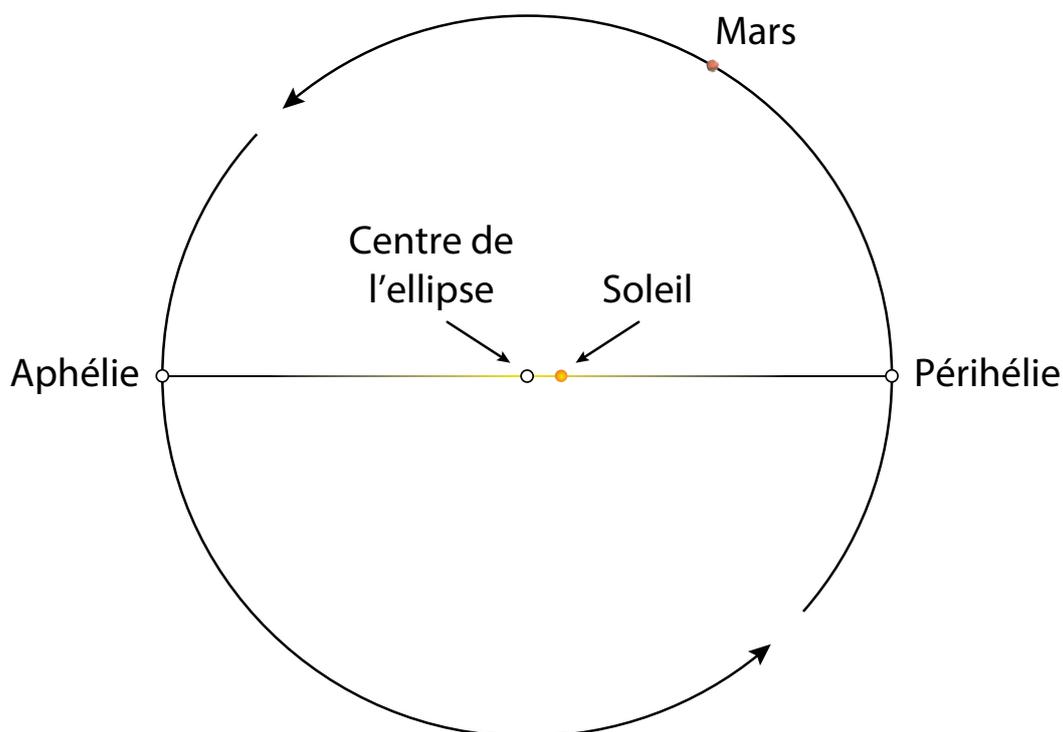
Examinons maintenant le cas de la **planète Mars**. L'excentricité de son orbite est-elle assez faible pour qu'un cercle la modélise correctement ? Dans le doute, passons au tracé d'une ellipse (voyez la page 13 du document explicatif).

En pratique, les enfants commencent par marquer, sur un carton, deux points, qui seront les deux foyers de l'ellipse décrite par Mars.

De combien faut-il les espacer ? Dans une ellipse, les deux foyers sont séparés par une distance $2ae$. Avec $a = 1,524$ et $e = 0,09340$, on obtient une séparation de $0,2847$ unité astronomique, soit $2,85$ cm sur le carton.

Ils se munissent ensuite d'une ficelle, dont ils fixent l'une des extrémités à l'aide d'une punaise sur l'un des deux points tracés précédemment. Ils doivent alors accrocher la ficelle grâce à une seconde punaise, sur l'autre point, de telle sorte que la longueur de la ficelle fixée s'élève à $2a = 3,048$ unités astronomiques, soit $30,5$ cm.

Le trajet que la pointe d'un feutre parcourera sur le carton, en maintenant la ficelle tendue, n'est autre que l'ellipse décrite par Mars !



L'expérience nous prouve qu'avec une excentricité orbitale proche d'un dixième, la différence entre un cercle et l'ellipse décrite par Mars est encore beaucoup trop faible pour sauter aux yeux. Il devient toutefois évident que le Soleil n'occupe pas le centre de l'ellipse.

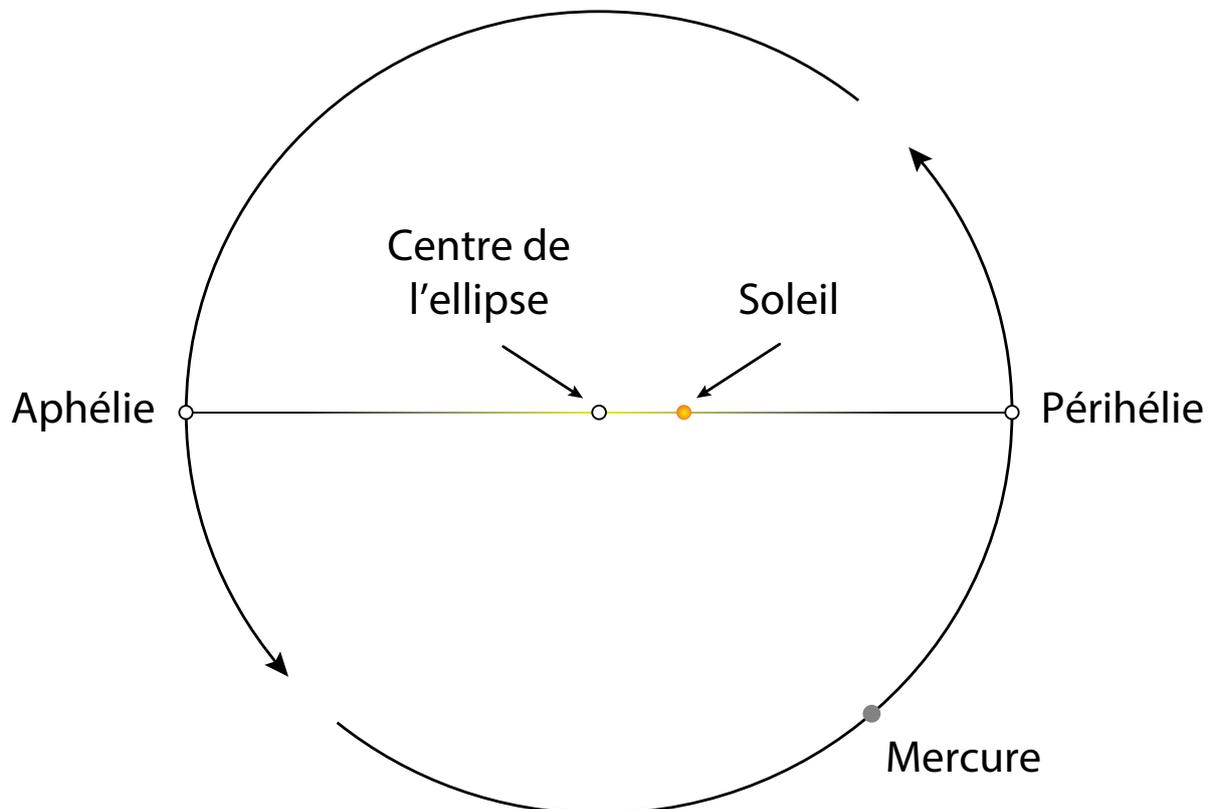
Passons ensuite à la **planète Mercure**. L'excentricité de son orbite s'élève à 0,2056. Aucune autre planète ne possède une excentricité orbitale aussi élevée.

En pratique, les enfants suivent la même démarche qu'avec le cas martien et commencent par marquer les deux points qui seront les deux foyers de l'ellipse décrite par Mercure.

De combien faut-il les espacer ? Dans une ellipse, les deux foyers

sont séparés par une distance $2ae$. Avec $a = 0,3871$ et $e = 0,2056$, on obtient une séparation de 0,1592 unité astronomique, soit 1,6 cm sur la feuille.

La longueur de la ficelle à fixer se monte à $2a = 0,7742$ unité astronomique, soit 7,75 cm.

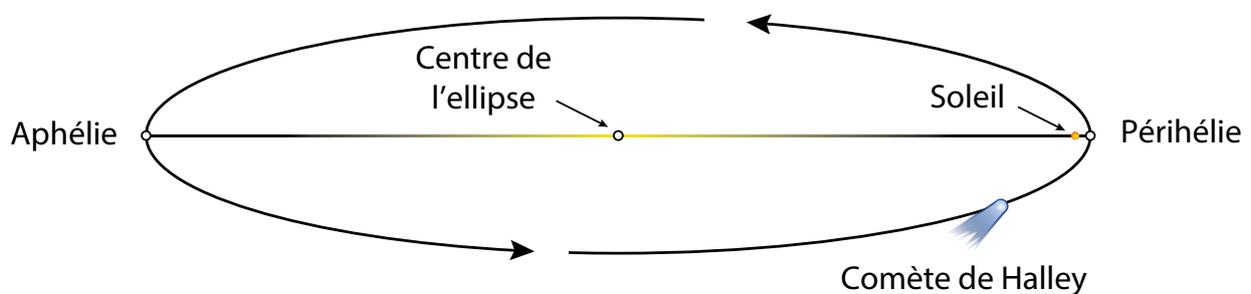


La différence entre un cercle et l'ellipse décrite par Mercure commence à se deviner. Le Soleil est franchement excentré.

Traisons enfin le cas de la **comète de Halley**. Cette célèbre comète est passée au périhélie en février 1986, à l'aphélie en décembre 2023 et repassera au périhélie en juillet 2061. L'excentricité de son orbite, très élevée, vaut 0,9679. Sa trajectoire est donc une ellipse particulièrement aplatie.

En pratique, les deux foyers de l'ellipse sont séparés par $2ae$. Avec $a = 17,93$ et $e = 0,9679$, on obtient une séparation de 34,71 unités astronomiques, soit 3,47 m sur le carton ! Il est temps de changer d'échelle : 10 cm sur le carton

équivalent désormais à 10 unités astronomiques. Nous voici donc avec deux points séparés de 34,7 cm. La longueur de la ficelle à fixer se monte à $2a = 35,85$ unités astronomiques, soit 35,85 cm.



Comme on pouvait s'y attendre, l'ellipse est très aplatie. Au périhélie, la comète de Halley ne se trouve qu'à $a(1-e) = 0,5747$ unité astronomique du Soleil (soit 86 millions de kilomètres, entre les orbites de Mercure et de Vénus) et à l'aphélie, elle s'en éloigne de $a(1+e) = 35,28$ unités astronomiques (soit 5,278 milliards de kilomètres, au-delà de l'orbite de Neptune, la planète la plus lointaine).

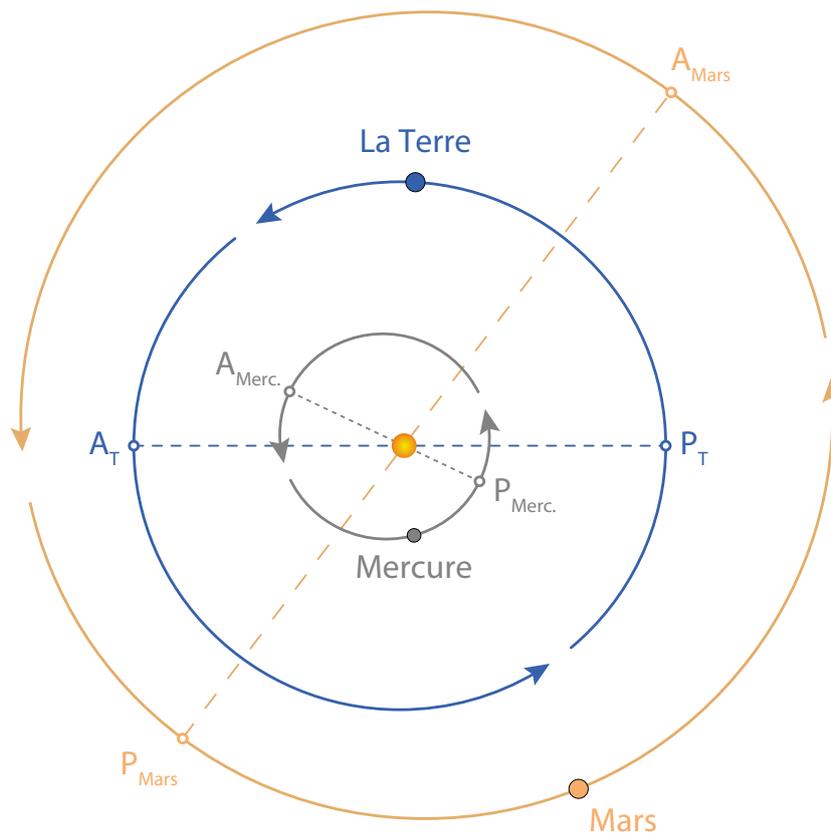
Les corps célestes dont l'excentricité orbitale vaut 1 décrivent des paraboles et ceux dont l'excentricité est strictement supérieure à 1, des hyperboles. Dans les deux cas, ces objets peuvent s'éloigner indéfiniment du Soleil et sortir du système solaire. Seuls trois exemples sont connus :

- la comète C/1980 E1 (Bowell). Elle a acquis une excentricité orbitale de 1,058 suite à un passage près de la planète Jupiter en décembre 1980 ;
- 'Oumuamua, le premier objet interstellaire à avoir été identifié, découvert en 2017 alors qu'il passait à 30 millions de kilomètres de la Terre. Son excentricité orbitale se monte à 1,201 ;
- 2I/Borissov (excentricité orbitale : 3,356), une comète interstellaire découverte en 2018.

Peut-on placer sur un même dessin les orbites des trois planètes que nous venons d'étudier ? Oui, mais il convient de considérer les particularités suivantes :

- il n'y a aucune raison que les axes [périhélie-aphélie] des trois planètes (ce qu'on appelle les *lignes des apsides*) soient parallèles entre eux. Il faut donc trouver l'angle entre ces axes et un axe de référence. Ces *longitudes du périhélie*, vous pouvez les trouver **1.** dans l'article *Numerical expressions for precession formulae and mean elements for the Moon and the planets* cité plus haut, sous le nom *longitude of perihelion* ou **2.** sur les pages Wikipedia des planètes en question, en sommant les éléments « noeud ascendant » et « argument du périhélie ». Elles valent, pour la Terre : $102,94^\circ$; pour Mars : $336,06^\circ$; pour Mercure : $77,46^\circ$.

- les trois planètes gravitent autour du Soleil dans des plans qui ne sont pas confondus mais faiblement inclinés les uns par rapport aux autres. Le plan de l'orbite martienne est ainsi incliné de $1,85^\circ$ par rapport au plan de l'orbite terrestre et celui de Mercure, de $7,00^\circ$. Nous devrions donc projeter les ellipses décrites dans l'espace par Mars et Mercure sur le plan de l'orbite terrestre, ce qui devrait les rendre un (tout) peu plus petites que ce que nous allons dessiner.



Orbites des planètes Mercure, la Terre et Mars dans leur véritable configuration. P_i et A_i désignent respectivement la position du périhélie et de l'aphélie de l'orbite de la planète considérée.

Mesurer le diamètre apparent du Soleil

La variation de la distance Terre-Soleil au cours de l'année se traduit par une variation du diamètre apparent de notre étoile d'environ 3 % (31,5' à l'aphélie et 32,5' au périhélie). Indécélable à l'œil nu, elle peut être mise en évidence à l'aide de moyens somme toute modestes.

Il convient d'abord de répéter quelques règles fondamentales.

Observer le Soleil à l'œil nu sans protection est dangereux, très dangereux. Le [Syndicat national des ophtalmologistes de France](#) indique que les risques sont de deux natures :

- des lésions cornéennes à type de kératite, douloureuses mais réversibles en quelques jours ;
- des lésions rétiniennes à type de brûlures rétiniennes liées à l'effet thermique du rayonnement solaire et à un effet photochimique sur les cellules rétiniennes particulièrement fragiles. Cet effet peut être irréversible et conduire à une altération définitive de la vue.

Avec un instrument d'optique, dont la fonction est de concentrer la lumière, la situation peut vite devenir dramatique

et un simple regard dans l'oculaire peut mener à la cécité totale en une fraction de seconde !

Si vous souhaitez observer notre belle étoile à la lunette ou au télescope, il est obligatoire d'utiliser un filtre, à placer avant même l'entrée des rayons lumineux dans l'instrument. Les petits filtres à visser sur les oculaires sont à proscrire impérativement. Les filtres utilisés pour l'observation visuelle du Soleil sont généralement réalisés en films Mylar®, un polymère. De tels filtres, particulièrement opaques, divisent le flux solaire par un facteur supérieur à 100 000. Avec eux, l'observation est sans danger et vous pourrez mettre en évidence les taches solaires. Les filtres $H\alpha$ donnent également accès aux protubérances solaires... mais sont beaucoup plus chers.



De nombreuses sources de grande qualité proposent déjà cette activité. Nous nous contenterons donc d'en fournir les liens, avec quelques explications.

Tout d'abord, le LESIA (Laboratoire d'études spatiales et d'instrumentation en astrophysique), l'un des cinq départements scientifiques de l'Observatoire de Paris, vous propose une page double sur l'observation du Soleil (<https://lesia.obspm.fr/L-observation-du-Soleil.html>) et répond aux questions « Comment l'observer en toute sécurité ? » et « Que peut-on y voir ? ».



Le SolarScope est un exemple de dispositif qui permet de projeter, de manière tout à fait sûre, l'image du Soleil sur un support « écran » par l'intermédiaire d'une lunette de visée. Il est particulièrement bien adapté aux écoles, aux clubs et aux groupes.

Les **Cahiers Clairaut**, bulletin du CLEA (Comité de liaison enseignants et astronomes, <http://clea-astro.eu/clea/aLaUne/smart>), mettent à votre disposition **deux articles** librement téléchargeables où sont exposées plusieurs méthodes offrant une mesure ou, au contraire, un suivi précis du diamètre apparent du Soleil tout au long de l'année :

1 - n°76, printemps 1996
La mesure du diamètre apparent du Soleil, P. Causeret, lien direct :
http://clea-astro.eu/archives/cahiers-clairaut/CLEA_CahiersClairaut_073_02.pdf

2 - n°103, automne 2003
Diamètre apparent du Soleil, R. Marical, lien direct :
http://clea-astro.eu/archives/cahiers-clairaut/CLEA_CahiersClairaut_103_04.pdf.

Soutenue par l'Union astronomique internationale, la plateforme astroEDU (<https://astroedu.iau.org/>) propose de nombreuses activités en rapport avec l'astronomie. Le site est en langue anglaise. Une activité nous intéresse ici. Il s'agit de *Measure the Solar Diameter* (<https://astroedu.iau.org/en/activities/measure-the-solar-diameter/>).

Elle ne requiert que 30 minutes par temps ensoleillé et quelques objets que l'on trouve facilement chez soi. Traduite en français par un astronome, elle est accessible ici : <http://www.space-awareness.org/fr/activities/1305/mesurer-le-diametre-du-soleil/>.



Enfin, le chapitre 8 de l'excellent livre *Les saisons et les mouvements de la Terre*, dont vous trouverez les références à la fin du document explicatif, est entièrement dédié à la mesure du diamètre apparent du Soleil. Quatre méthodes sont présentées, par ordre de précision croissante. Elles sont assez semblables aux méthodes exposées dans les deux articles proposés dans les Cahiers Clairaut en page précédente.

Pourquoi fait-il plus chaud en été ?

Le chapitre 7 de l'ouvrage *Les saisons et les mouvements de la Terre*, intitulé « Expliquer les variations de température », propose différentes expériences qui valident l'explication des variations de température sur Terre par la hauteur du Soleil au-dessus de l'horizon (évaluation de la luminosité à l'œil nu et avec un luxmètre, mesure d'une surface éclairée sur un globe terrestre, évaluation de la température avec du chocolat, un thermomètre et des peintures sensibles à la température).



La fondation *La main à la pâte* propose une séquence d'activités nommée « Les saisons : pourquoi fait-il plus chaud en été qu'en hiver ? » ici : <https://fondation-lamap.org/sequence-d-activites/les-saisons-pourquoi-fait-il-plus-chaud-en-ete-qu-en-hiver>. En voici le descriptif : « Par une activité de modélisation, les élèves comprennent que la Terre tourne autour du Soleil et que son axe pointe toujours dans la même direction. Ils comprennent que cette inclinaison est à l'origine des saisons. Une autre activité expérimentale, optionnelle, leur permet de comprendre qu'en hiver, les rayons du Soleil sont plus inclinés qu'en été, ce qui explique qu'il fasse plus froid ».



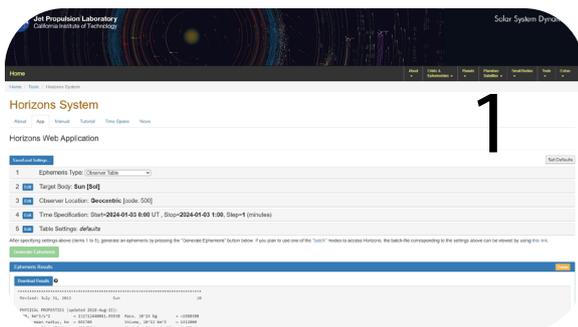
Nous avons affirmé, au début du document explicatif, que dans l'hémisphère nord, l'été est en moyenne 2,3 °C plus chaud que dans l'hémisphère sud. Bien que la période estivale boréale se produise près du passage à l'aphélie, la répartition inégale des terres émergées sur notre planète contrebalance largement l'effet d'une distance plus grande au Soleil. L'activité suivante, en langue anglaise (<https://astroedu.iau.org/en/activities/oceans-as-a-heat-reservoir/>) permet aux élèves de constater que les océans et les terres ne se comportent pas de la même manière face à une source externe de chaleur. Ils comprendront aussi comment les océans peuvent stocker la chaleur plus efficacement que les terres, atténuant ainsi une partie du réchauffement climatique causé par l'effet de serre.

3 AU LYCEE

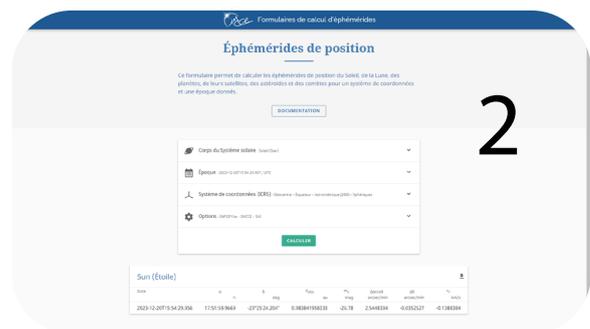
Retrouver soi-même les données du passage au périhélie... et à l'aphélie

Deux générateurs fiables d'éphémérides en ligne sont à conseiller. Leur précision est extrêmement grande, ils fournissent les mêmes résultats et ce sont eux que nous avons utilisés pour établir toutes les données de ce document. Vous pouvez donc employer l'un ou l'autre.

1. le système d'éphémérides américain *JPL Horizons*, utilisé pour la navigation des sondes spatiales, qui permet de produire de manière flexible des éphémérides de haute précision pour les objets du système solaire (<https://ssd.jpl.nasa.gov/horizons/app.html#/>).



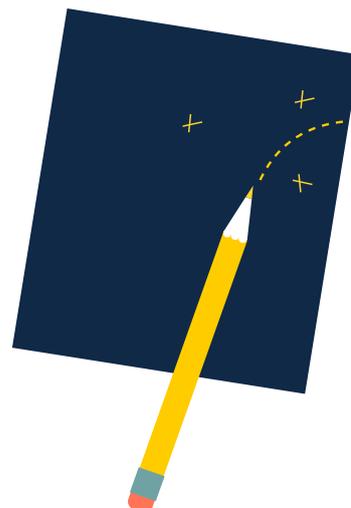
2. l'outil de construction d'éphémérides du Système solaire français *INPOP* (pour Intégration Numérique Planétaire de l'Observatoire de Paris) <https://ssp.imcce.fr/forms/ephemeris>.



Le système *JPL Horizons* est toutefois le seul à permettre une évaluation rapide de la distance entre le centre du Soleil et le centre de masse du système Terre-Lune, dont nous aurons besoin sous peu.

1. Faites **déterminer** à vos élèves **la date du passage de la Terre au périhélie en 2024 et sa distance au Soleil en cet instant.**

Comment procéder ? Voici une méthode, il en existe d'autres. Ouvrez la page *JPL Horizons* (<https://ssd.jpl.nasa.gov/horizons/app.html#/>). Sélectionnez le Soleil comme cible (« Target Body: Sun ») et placez-vous au centre de la Terre (« Observer Location: Geocentric »).



À la ligne « Time Specification », vous devez entrer la date de début du calcul et la date de fin puis préciser un pas de calcul assez large (1 jour). Si vous n'avez aucune idée du résultat à atteindre (c'est-à-dire la date du passage de la Terre au périhélie), vous pouvez entrer le 1^{er} janvier 2024 à 0 h comme date de début et le 1^{er} janvier 2025 à 0 h comme fin. Appuyez ensuite sur « Generate Ephemeris », patientez puis descendez la page. Après quelques lignes de paramètres abscons dont la signification vous est donnée en bas de page, vous accéderez enfin aux données recherchées. La liste est longue ! En voici les six premières lignes.

Date_(UT)_HR:MN	R.A._(ICRF)_DEC	APmag	S-brt	delta	deldot	S-O-T /r	S-T-O	Sky_motion	Sky_mot_PA	RelVel-ANG	Lun_Sky_Brt	sky_SNR
2024-Jan-01 00:00	18 42 15.67 -23 04 50.3	-26.779	-10.589	0.98331828203968	-0.0196071	0.0000 /?	0.0000	2.5473702	85.679642	-0.042888	n.a.	n.a.
2024-Jan-02 00:00	18 46 40.65 -23 00 09.1	-26.779	-10.589	0.98330982075485	-0.0097506	0.0000 /?	0.0000	2.5476036	85.248322	-0.024235	n.a.	n.a.
2024-Jan-03 00:00	18 51 05.33 -22 55 00.3	-26.779	-10.589	0.98330695065837	-0.0002500	0.0000 /?	0.0000	2.5478249	84.818928	-0.006260	n.a.	n.a.
2024-Jan-04 00:00	18 55 29.68 -22 49 24.2	-26.779	-10.589	0.98330945816947	0.0088672	0.0000 /?	0.0000	2.5480290	84.391628	0.0109879	n.a.	n.a.
2024-Jan-05 00:00	18 59 53.68 -22 43 20.8	-26.779	-10.589	0.98331711419766	0.0175746	0.0000 /?	0.0000	2.5482108	83.966593	0.0274576	n.a.	n.a.
2024-Jan-06 00:00	19 04 17.29 -22 36 50.4	-26.779	-10.589	0.98332967491138	0.0258479	0.0000 /?	0.0000	2.5483646	83.543990	0.0431039	n.a.	n.a.

Les colonnes qui nous intéressent sont surlignées en rose. La **première** donne **l'instant** auquel sont fournis les résultats, la **deuxième** (« delta ») la **distance** qui sépare l'observateur situé au centre de la Terre du centre du Soleil, exprimée en unité astronomique. Il s'agit d'une unité particulièrement bien adaptée à la mesure des distances dans le Système solaire. Elle équivaut à peu près à la distance moyenne Terre-Soleil. Depuis 2012, elle est définie comme valant exactement 149 597 870, 7 km. Enfin, la **troisième** colonne (« deldot ») fournit la **vitesse** du centre du Soleil (en km.s⁻¹) par rapport à l'observateur, situé au centre de la Terre. Une valeur positive indique un éloignement, une valeur négative un rapprochement.

Le passage au périhélie est caractérisé par le passage de « delta » par un minimum et un « deldot » nul. On remarque qu'entre le 3 janvier à 0 h et le 4 janvier à 0 h, « deldot » a changé de signe. Le passage au périhélie a donc lieu entre ces deux dates. On maintenant peut resserrer notre intervalle de temps et descendre le pas de calcul à 1 h.

2024-Jan-03 00:00	18 51 05.33 -22 55 00.3	-26.779 -10.589	0.98330695065837	-0.0002500
2024-Jan-03 01:00	18 51 16.35 -22 54 46.9	-26.779 -10.589	0.98330694930890	0.0001377

C'est désormais le 3 janvier, entre 0 h et 1 h, que nous avons acculé l'instant du passage au périhélie. Allons plus loin et pour cela, descendons le pas de calcul à 1 minute.

2024-Jan-03 00:38	18 51 12.31 -22 54 51.8	-26.779 -10.589	0.98330694872043	-0.0000044
2024-Jan-03 00:39	18 51 12.49 -22 54 51.6	-26.779 -10.589	0.98330694871998	0.0000021

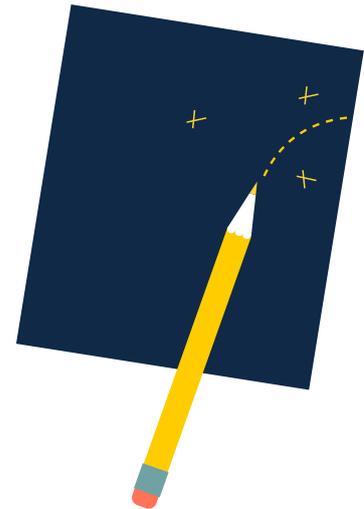
Le passage au périhélie est désormais restreint au 3 janvier entre 0 h 38 et 0 h 39. Peut-on encore améliorer la précision ? Oui, en rusant : à la ligne « Time Specification », entrez comme début « 2024-01-03 00:38 », comme fin « 2024-01-03 00:39 », indiquez 120 dans « Step size » puis sélectionnez « equal intervals ». Générez l'éphéméride et vous obtiendrez vos données à la demi-seconde près. Il n'est pas possible d'obtenir une précision temporelle supérieure.

2024-Jan-03 00:38:40.000	18 51 12.43 -22 54 51.7	-26.779 -10.589	0.98330694871984	-0.0000001
2024-Jan-03 00:38:40.500	18 51 12.43 -22 54 51.7	-26.779 -10.589	0.98330694871984	0.0000000
2024-Jan-03 00:38:41.000	18 51 12.44 -22 54 51.7	-26.779 -10.589	0.98330694871984	0.0000001

On obtient ainsi que le passage au périhélie a lieu le 3 janvier 2024 à 0 h 38 min 40,5 s en Temps universel (TU), c'est-à-dire à 1 h 38 min 40,5 s en heure légale française. La distance entre le centre de la Terre et le centre du Soleil vaut alors 0,983 306 948 719 84 unité astronomique soit 147 100 625, 773 km.

L'outil INPOP, lui, donne un passage au périhélie à 0 h 38 min 39 s TU, avec une distance correspondante de 0,983 306 948 728 unité astronomique soit 147 100 625, 774 km : un écart en temps de 1,5 s et en distance de 1 m. Comme annoncé, on trouve bien une cohérence extrême entre les résultats issus des deux générateurs d'éphémérides.

2. Faites retrouver à vos élèves les instants de passage de la Terre au périhélie sur une dizaine d'années autour de 2024, puis calculer les intervalles de temps entre deux passages consécutifs au périhélie. Pour leur faciliter la tâche, voyez le paragraphe « Comment soustraire facilement deux dates complexes » en bas de la page 4. Faites leur alors constater les écarts important d'une année à l'autre.



3. Proposez leur de faire le même travail mais cette fois, avec le passage du centre de masse Terre - Lune au périhélie. Pour se déplacer du centre de la Terre au centre de masse du système Terre - Lune, il suffit d'écrire « @earth-moon barycenter » à la ligne « Observer Location ». Constatez la nette diminution de ces écarts.

4. Faites leur établir le lien entre la phase de la Lune lors du passage du centre de masse au périhélie et son retard (ou son avance) sur le passage de la Terre au périhélie. Un outil de détermination des phases de la Lune est disponible ici : <https://ssp.imcce.fr/forms/phases>.

5. Il est possible de réaliser un travail similaire non pas sur le passage de la Terre au périhélie, mais sur son passage à l'aphélie six mois plus tard environ.

Vos élèves devraient trouver que le passage à l'aphélie aura lieu le 5 juillet 2024 à 5 h 6 min 9 s TU soit 7 h 6 min 9 s en heure légale française, à une distance de 1,016 725 528 767 21 unité astronomique, soit à 152 099 974, 190 km du Soleil. L'outil INPOP donne un passage à l'aphélie 2 secondes plus tôt et 2 m plus loin.

