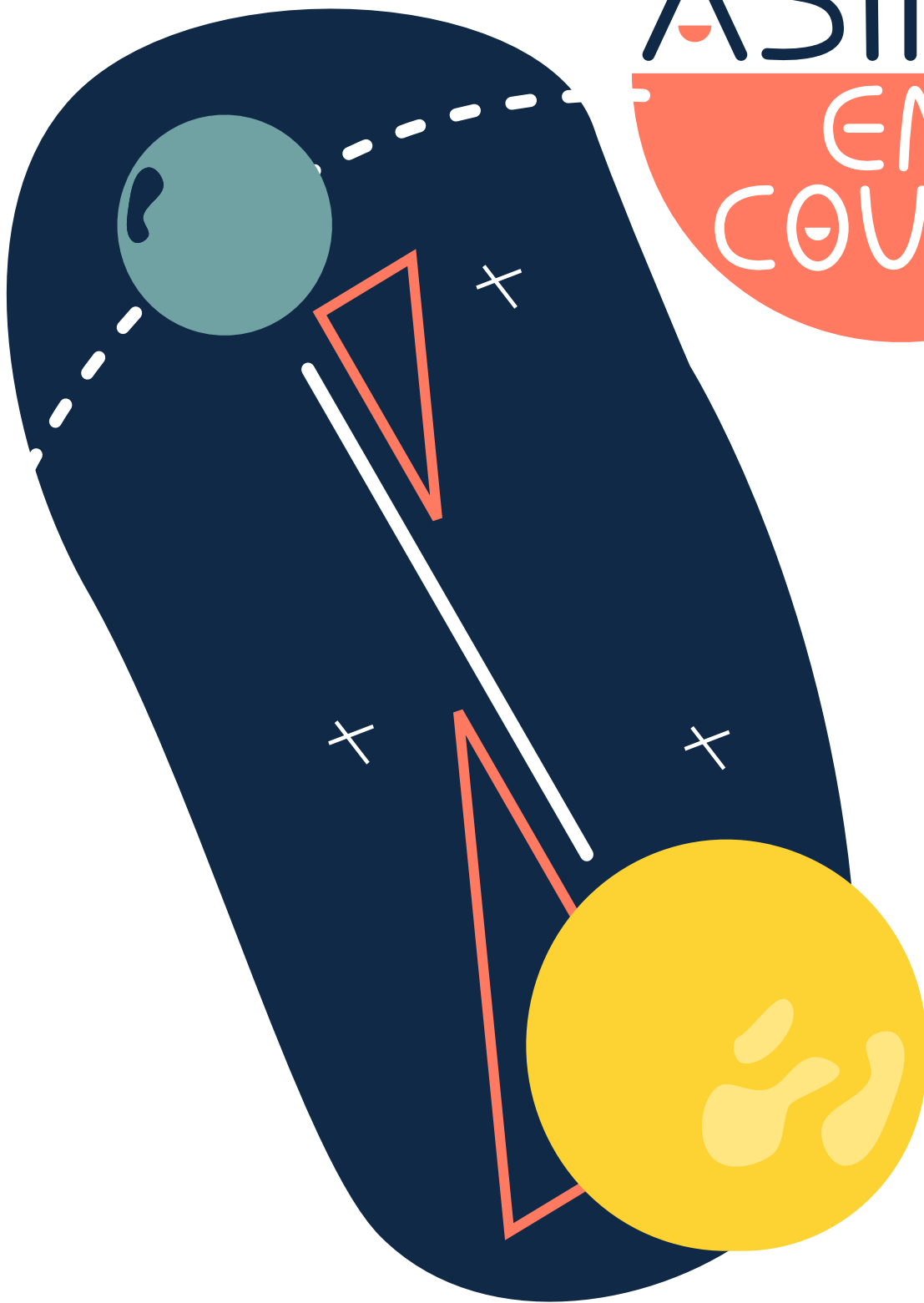


COMPRENDRE LES EQUINOXES

ASTRES

EN COURS



N°2

EDITO

Ce deuxième numéro de la gazette Astres en cours s'adresse à tous les enseignants mais également à tous types d'éducateurs.

Le 20 mars 2023, vous ne pourrez y échapper. Les journalistes de la presse écrite, numérique et radiophonique ainsi que les présentateurs des bulletins météorologiques l'affirmeront, le confirmeront et le répéteront, parfois au détour d'une information sans lien direct avec notre sujet : « En ce premier jour du printemps... », « Aujourd'hui, c'est l'équinoxe, qui marque le début du printemps. »

Mais pourquoi le 20 mars cette année, et pas le 19 ou le 21 ? Est-ce un décision politique fixée par décret comme le passage à l'heure d'été ? Une coutume comme l'instauration de Noël le 25 décembre ? Une convention pluriséculaire ou une date imposée par la Nature ? Comment le début d'une saison est-il donc défini ?

Département Education & Formation
Universcience
educ-formation@universcience.fr

1 NIVEAU 1 - PARTIR
DES OBSERVATIONS

Page 4

2 NIVEAU 2 - QUELQUES
COMPLICATIONS STIMULANTES

Page 8



3 NIVEAU 2 - UNE DEFINITION
SIMPLE ET PRECISE DE
L'EQUINOXE

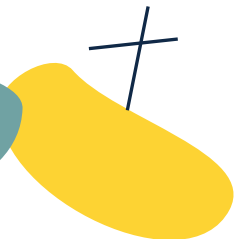
Page 12

4 NIVEAU 3 - LA DATE DE
L'EQUINOXE DANS NOTRE
CALENDRIER

Page 14

5 POUR
EN SAVOIR PLUS

Page 21



6 AMPLITUDES ORTIVE ET
OCCASE DU SOLEIL

Page 23

7 IDEES D'ACTIVITES
POUR LES CLASSES DE
PRIMAIRE

Page 25

1

NIVEAU 1 - PARTIR DES OBSERVATIONS

La sphère céleste est affectée d'un mouvement de rotation d'ensemble d'est en ouest, effectué en 24 h. Ce mouvement, appelé *mouvement diurne*, n'est qu'apparent : il est dû à la rotation de la Terre sur elle-même d'ouest en est autour d'un axe passant par le pôle Sud, le centre de la Terre et le pôle Nord.

L'axe de rotation de la Terre intercepte la sphère céleste en deux points appelés *pôles célestes*. L'étoile Polaire donne la position approximative du pôle céleste Nord. Perpendiculairement à l'axe des pôles célestes, on trouve l'*équateur céleste*, qui est la projection de l'équateur terrestre sur la sphère céleste.

Le mouvement diurne emporte tous les astres – Soleil, Lune, étoiles et planètes, leur fait décrire des cercles parallèles à l'équateur céleste autour de l'axe des pôles célestes et les fait se lever vers l'est et se coucher vers l'ouest.

Toutefois, ce n'est qu'exceptionnellement que le Soleil se lève précisément à l'est et se couche précisément à l'ouest. Une observation sur quelques jours bien répartis dans l'année vous montrera sans ambiguïté qu'en automne et en hiver, il se lève entre l'est et le sud-est et se couche entre l'ouest et le sud-ouest. Au printemps et en été, il se lève entre l'est et le nord-est pour se coucher entre l'ouest et le nord-ouest.

Il n'y a que deux jours par an où le Soleil se lève exactement à l'est et se couche exactement à l'ouest : c'est au deux jours d'équinoxe, vers le 20 mars et le 22 ou 23 septembre.

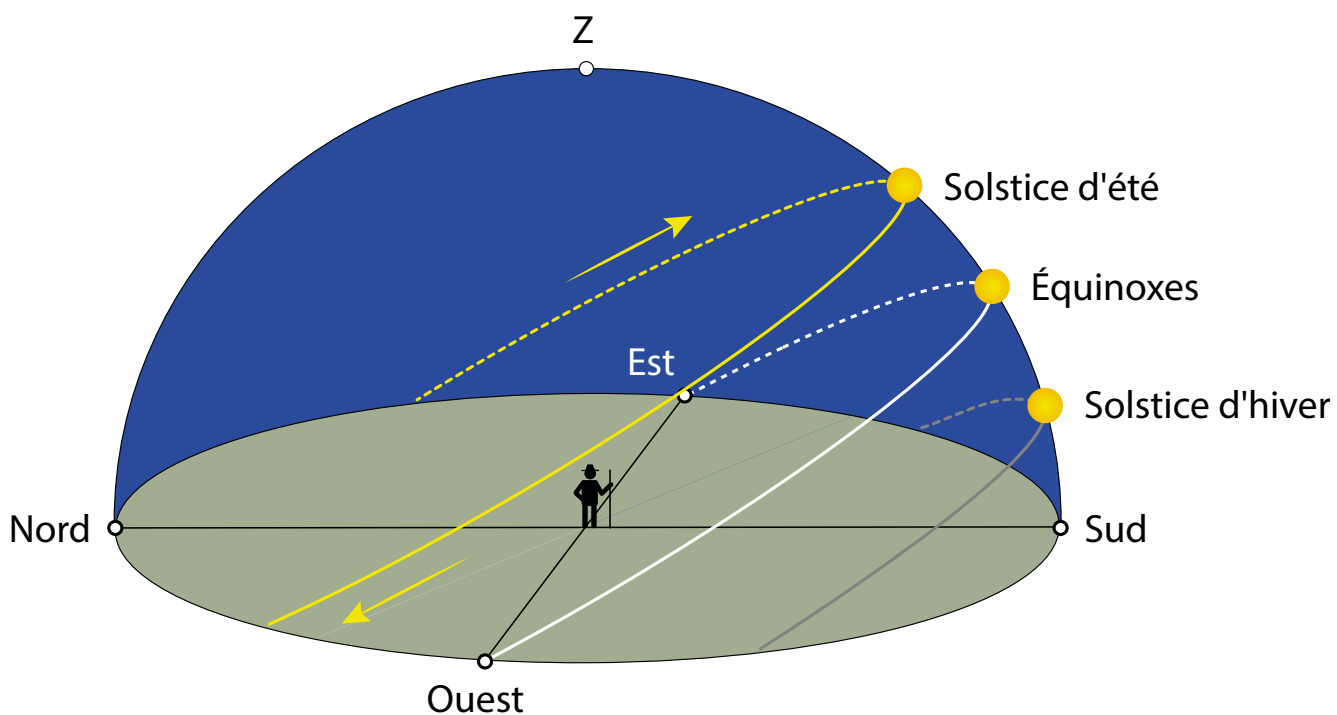
Sous nos latitudes, le Soleil atteint sa plus grande hauteur au-dessus de l'horizon dans la direction du sud. On dit alors qu'il culmine ou qu'il atteint sa culmination. C'est au

solstice d'été, vers le 21 juin, que cette hauteur est maximale. À titre d'exemple, elle se monte à $62,5^\circ$ à Dunkerque (Nord) et 72° à Bonifacio (Corse). En France métropolitaine, contrairement à ce que l'on entend parfois, il est donc impossible de voir le Soleil au zénith. Cela n'est envisageable que dans les zones tropicales, entre les tropiques du Cancer et du Capricorne.

À l'inverse, la hauteur minimale du Soleil à sa culmination est atteinte au solstice d'hiver, vers le 21 décembre, avec $15,5^\circ$ à Dunkerque et 25° à Bonifacio. Ce n'est qu'aux

hautes latitudes (au nord du cercle polaire arctique et au sud du cercle polaire antarctique) que l'on peut être témoin de la nuit polaire ou du Soleil de minuit.

Ce schéma montre la trajectoire apparente du Soleil au cours de la journée aux solstices et aux équinoxes. Z est le zénith et correspond à une hauteur de 90° .



Le tableau de la page suivante se propose de résumer quelques propriétés du mouvement du Soleil aux moments clés de l'année. Les

valeurs numériques sont données pour toute ville partageant la même latitude que Paris.

Date ou saison	Direction de lever du Soleil	Direction de coucher du Soleil	Durée de la journée	Durée de la nuit	Hauteur du Soleil à sa culmination
Équinoxe de printemps	Est	Ouest	12 h partout dans le monde	12 h partout dans le monde	≈ 41°
Printemps	Entre l'est et le nord-est	Entre l'ouest et le nord-ouest	Augmente	Diminue	Augmente
Solstice d'été	Entre l'est et le nord-est, le plus en direction du nord	Entre l'ouest et le nord-ouest, le plus en direction du nord	Journée la plus longue ≈ 16 h	Nuit la plus courte ≈ 8 h	Valeur maximale pour l'année ≈ 64,5°
Été	Entre l'est et le nord-est	Entre l'ouest et le nord-ouest	Diminue	Augmente	Diminue
Équinoxe d'automne	Est	Ouest	12 h partout dans le monde	12 h partout dans le monde	≈ 41°
Automne	Entre l'est et le sud-est	Entre l'ouest et le sud-ouest	Diminue	Augmente	Diminue
Solstice d'hiver	Entre l'est et le sud-est, le plus en direction du sud	Entre l'ouest et le sud-ouest, le plus en direction du sud	Journée la plus courte ≈ 8 h	Nuit la plus longue ≈ 16 h	Valeur minimale pour l'année ≈ 18°
Hiver	Entre l'est et le sud-est	Entre l'ouest et le sud-ouest	Augmente	Diminue	Augmente

D'où viennent les mots « solstice »
et « équinoxe » ?

Faisons une expérience de pensée et plaçons-nous au cœur du printemps. Chaque jour, le Soleil monte un peu plus haut dans le ciel, d'abord rapidement puis de plus en plus lentement. À partir de la mi-juin environ et pendant une dizaine de jours, sa hauteur à sa culmination reste (quasiment) constante. Le Soleil semble ainsi rester stationnaire, avant d'entamer une descente d'abord lente puis de plus en plus rapide. En latin, « Soleil » se dit *sol* et « s'arrêter », *sistere*. De là vient le mot *solstitium* qui a donné notre solstice.

Ce que nous venons de décrire s'applique également au solstice d'hiver, avec un Soleil qui semble stationner à sa hauteur de culmination minimale pendant une dizaine de jours après la mi-décembre.

Il est tout à fait possible de comprendre également l'origine du

Voici donc deux définitions possibles de l'équinoxe pour les classes de primaire (et en fait, ce sont plutôt des conséquences de la véritable définition de l'équinoxe, que nous verrons bientôt) :

- Les équinoxes sont les deux jours de l'année où le Soleil se lève exactement à l'est et se couche exactement à l'ouest ;

terme « solstice » en se remémorant les directions de lever et de coucher du Soleil à ces moments de l'année. C'est au solstice d'été qu'il se lève et se couche le plus vers le nord et au solstice d'hiver qu'il le fait le plus vers le sud. Là aussi, pendant quelques jours, nous voyons le Soleil s'approcher de son position extrême, s'arrêter puis rebrousser chemin.

Quant au mot « équinoxe », le Trésor de la langue Française informatisé (<http://www.atilf.fr/tlf>, ATILF - CNRS & Université de Lorraine) nous enseigne qu'il s'agit de la francisation du latin classique *aequinoctium*, composé de *aequus* « égal » et de *nox* « nuit », d'abord emprunté sous la forme *equinoction*. Ainsi, le jour de l'équinoxe, la nuit est égale... au jour. Douze heures de nuit, douze heures de jour, jour et nuit ont la même durée.

- Les équinoxes sont les deux jours de l'année où la nuit a la même durée que la journée, soit 12 h.

Au niveau de l'école élémentaire, les équinoxes peuvent donc être considérés comme des jours.

2

NIVEAU 2 - QUELQUES COMPLICATIONS STIMULANTES

L'avancée du Soleil sur l'écliptique

La Terre effectue une révolution autour du Soleil en un an. Ce mouvement a pour conséquence le *mouvement annuel*, un léger glissement quotidien du Soleil vers l'est, à hauteur de 1° par jour. En un an, la trajectoire du Soleil définit, sur la sphère céleste, un grand cercle appelé *écliptique*. L'écliptique et l'équateur céleste ne sont pas confondus. Ils sont inclinés l'un sur l'autre de $23^\circ 26'$, qui est l'angle dont la Terre est penchée dans sa course autour du Soleil.

Imaginez qu'un matin, le Soleil se lève exactement au point cardinal est. Il est emporté par le mouvement diurne et, quelques heures plus tard, vient se coucher vers l'ouest. Exactement au point cardinal ouest ?

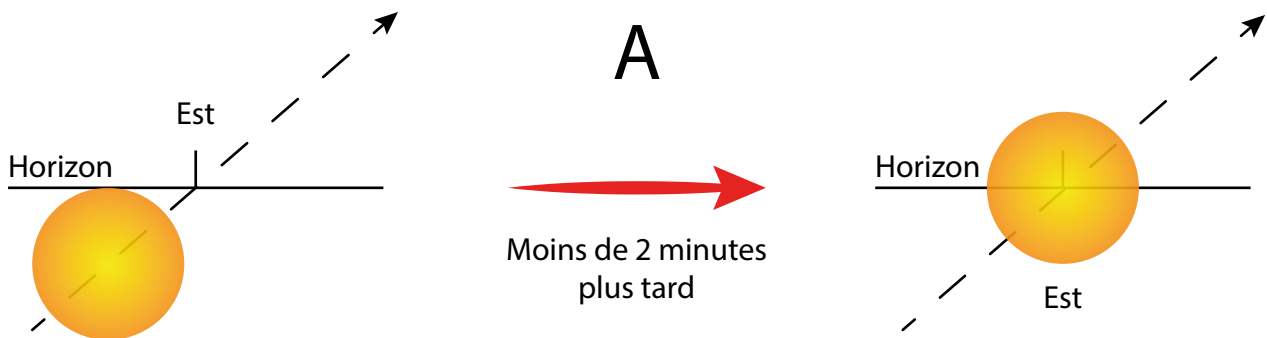
Non ! En effet, durant cette période de quelques heures, le Soleil s'est déplacé d'une fraction de degré vers l'est sur l'écliptique. L'écliptique et l'équateur céleste n'étant pas confondus, le Soleil se couchera très légèrement au sud ou au nord du point cardinal ouest, suivant la période de l'année où nous plaçons cette expérience de pensée.

En toute rigueur, ce fait met ainsi en défaut nos deux définitions de l'équinoxe (« Les équinoxes sont les deux jours de l'année où le Soleil se lève exactement à l'est et se couche exactement à l'ouest » et « Les équinoxes sont les deux jours de l'année où la nuit a la même durée que la journée, soit 12 h »).

Le Soleil n'est pas un point

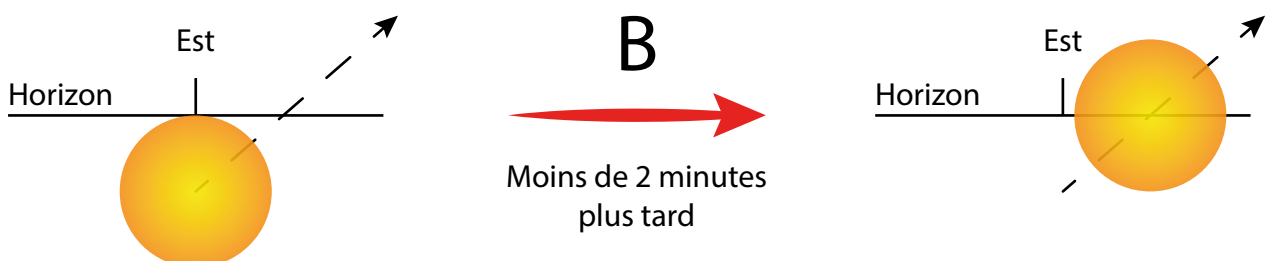
Le Soleil n'est pas ponctuel, il se présente sous la forme d'un disque dont le diamètre apparent est d'environ $0,5^\circ$ (soit 30 minutes d'angle ou $30'$). Le fait que le Soleil ne soit pas ponctuel a une influence sur la façon dont nous envisageons la direction de son lever. Qu'entendons-nous d'ailleurs lorsque nous écrivons que le Soleil

se lève exactement à l'est ? Est-ce, comme dans le schéma A, du centre géométrique du disque solaire dont nous parlons ? Dans ce cas, le limbe supérieur du Soleil se lèverait légèrement vers le nord-est et les élèves seraient en droit d'affirmer que le Soleil ne se lève pas exactement à l'est et que l'équinoxe est certainement tombé la veille.



Dans le schéma B, le limbe supérieur du Soleil devient observable au point cardinal est. On peut considérer que le Soleil se lève.

Toutefois, son centre passera au-dessus de l'horizon légèrement vers le sud-est.



Là aussi, ce fait met ainsi en défaut nos deux définitions de l'équinoxe présentées précédemment.

La réfraction astronomique

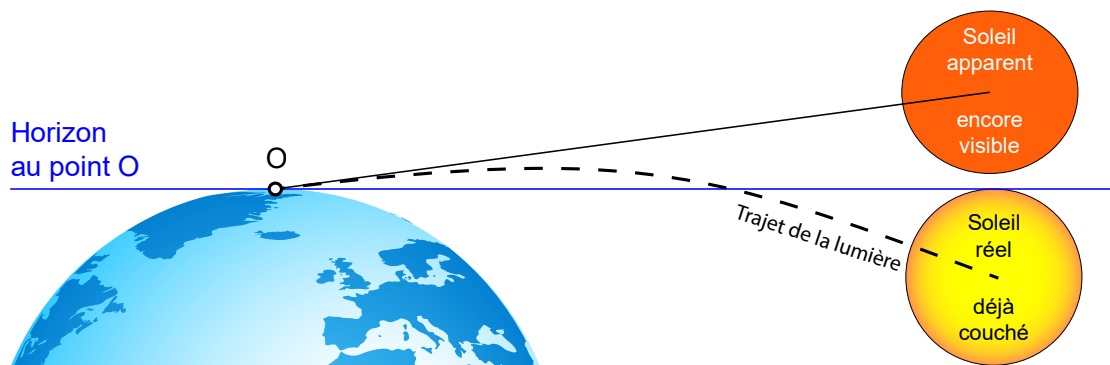
... ou pourquoi voit-on encore le Soleil au moment du coucher alors qu'il est déjà sous l'horizon ?

La réfraction est un phénomène que nous avons déjà tous rencontré. Sa manifestation la plus évidente est la brisure apparente d'une cuillère plongé dans un verre rempli d'eau. Lorsqu'elle passe d'un milieu transparent à un autre, la lumière est déviée car sa célérité n'est pas la même dans les deux milieux : il y a alors réfraction de la lumière. Ce phénomène se produit aussi de manière continue dans un milieu transparent dont la masse volumique n'est pas uniforme, ce qui est le cas de l'atmosphère. En effet, la masse volumique de l'air varie avec l'altitude ; aussi la lumière émise par un astre ne nous parvient pas en ligne droite, mais pendant la traversée de l'atmosphère, elle suit une trajectoire curviligne, ce qui a pour effet de relever la hauteur de l'astre : il est vu plus haut dans le ciel qu'il ne l'est réellement.

L'intensité de la réfraction dépend de la pression (elle est d'autant plus forte que la pression est élevée) et de la température (elle est d'autant

plus forte que la température est basse). À l'horizon, la valeur moyenne de la réfraction est difficile à évaluer car elle dépend du modèle d'atmosphère utilisé. À titre d'exemple, *Le guide des données astronomiques* de l'Institut de mécanique céleste et de calcul des éphémérides (IMCCE) édité par EDP Sciences utilise la valeur de $36' 36''$, issue de la théorie de l'astronome et géodésien Rodolphe Radau (1835-1911). C'est plus que le diamètre apparent du Soleil et de la Lune et signifie que, lorsque le limbe inférieur de ces deux astres touche l'horizon... ils sont en réalité déjà couchés.

D'ailleurs, si à l'horizon la réfraction vaut $36' 36''$, elle s'élève seulement à $30' 21''$ un demi-degré plus haut, soit une différence de $6' 15''$. Le diamètre apparent du Soleil et de la Lune étant d'environ $30'$, ces deux astres subissent un aplatissement perceptible proche du $1/5^e$ de leur diamètre à leur lever et leur coucher.





Pleine lune obscurcie et déformée par l'atmosphère terrestre, photographiée par les astronautes de la navette spatiale

Discovery le 21 décembre 1999. Crédit : NASA.

Avec un Soleil relevé par la réfraction de manière aléatoire à son lever et à son coucher, en fonction de l'état imprévisible à long terme des basses couches de l'atmosphère

(pression, température, humidité), nous retombons sensiblement sur les mêmes difficultés rencontrées avec de la prise en compte de la non-punctualité du Soleil.

En conclusion...

Les trois points que nous venons de décrire (progression du Soleil sur l'écliptique, diamètre apparent non nul du Soleil, réfraction atmosphérique) ne sont pas de nature à modifier radicalement notre compréhension de la nature et de la date de l'équinoxe (si ce n'est d'un jour au maximum), mais ils peuvent être source de confusion.

Nous avons besoin d'une définition qui permette de s'affranchir de ces sources d'incertitude et qui donne à l'équinoxe une date et un horaire précis... quitte à ce que pour nous, petits observateurs terrestres, il perde toute réalité observable tangible.

3

NIVEAU 2 - UNE DEFINITION SIMPLE ET PRECISE DE L'EQUINOXE

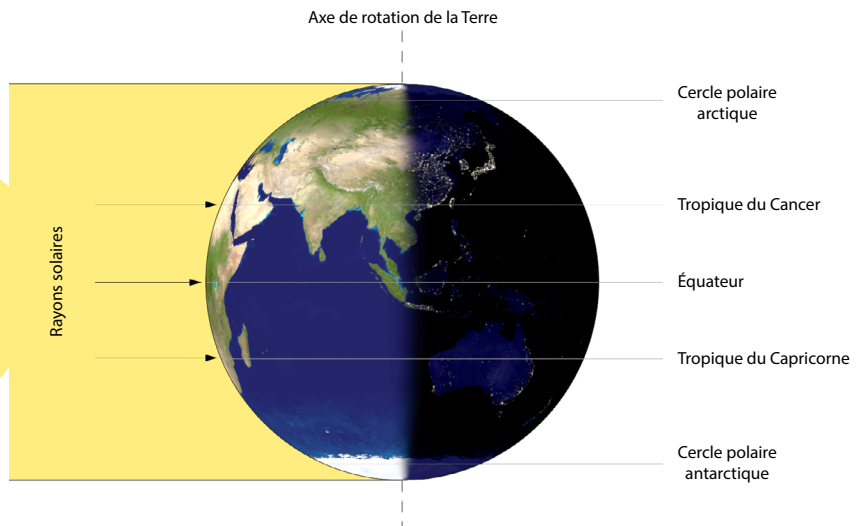
L'écliptique et l'équateur céleste ne sont pas confondus. L'équateur céleste intercepte l'écliptique en deux points : le *point vernal* (noté γ et actuellement situé dans la constellation des Poissons jusqu'en l'an 2597, où il glissera dans la constellation du Verseau) et le point situé dans la direction opposée, dans la constellation de la Vierge – il glissera dans la constellation du Lion vers 2439.

Le Soleil se déplaçant sur l'écliptique à hauteur de 1° par jour environ, il rencontre ces deux points successivement. Les équinoxes correspondent aux instants où le centre géométrique du disque solaire passe sur ces deux points immatériels, autrement

dit à l'instant où le Soleil traverse l'équateur céleste. Il existe donc en cet instant un point sur l'équateur terrestre d'où l'on peut voir le Soleil au zénith.

Voici donc la définition que l'on peut enseigner aux élèves du collège et du lycée : l'instant de l'équinoxe correspond au moment où le Soleil traverse l'équateur céleste (ou le plan de l'équateur terrestre, si vous considérez la situation depuis l'espace). Dans notre hémisphère, l'équinoxe de printemps correspond au passage du Soleil dans la direction du point vernal ; l'équinoxe d'automne, au passage du Soleil à 180° de là.

À l'instant de l'équinoxe, le Soleil traverse l'équateur céleste. Ses rayons frappent alors perpendiculairement l'équateur terrestre.



Les saisons des astronomes

Les astronomes préfèrent définir solstices et équinoxes par rapport à l'écliptique, moins sujet aux influences gravitationnelles de la Lune et des autres planètes que l'équateur. L'instant de l'équinoxe de printemps (resp. d'automne) est officiellement défini comme le moment auquel la longitude écliptique géocentrique apparente du centre du Soleil est égale à 0° (resp. 180°). L'instant du solstice d'été (resp. d'hiver) est défini comme le moment auquel la longitude écliptique géocentrique du centre du Soleil est égale à 90° (resp. 270°). Pour vous familiariser avec le concept de longitude écliptique, vous pouvez lire la fiche dédiée aux différents systèmes de coordonnées célestes (<https://www.cite-sciences.fr/fr/vous-etes/enseignants/ressources-en-ligne/>).

Nous n'entrerons pas plus avant dans des explications qui nous amèneraient à un niveau de complexité non désiré ici.

Quoiqu'il en soit, les astronomes pouvant aujourd'hui prédire la position et le mouvement du Soleil sur la sphère céleste avec une précision stupéfiante, ils sont en mesure de donner l'instant de cette traversée à la fraction de seconde près.

Ainsi, l'équinoxe de printemps prendra place le 20 mars 2023 à 21 h 24 min... 27,74 s en temps universel. Pour obtenir l'heure légale correspondante en France, il suffit d'ajouter 1 h lorsque nous sommes en heure d'hiver et 2 h en heure d'été. Ainsi, l'équinoxe de printemps 2023 se produira le 20 mars à 22 h 24 min 27,74 s à nos montres.

Dans ce document, nous n'avons pas traité la question d'un point de vue héliocentrique, depuis l'espace. En effet, les saisons, leur succession et leurs effets sur Terre peuvent très bien être décrits dans un référentiel purement géocentrique.

4

NIVEAU 3 - LA DATE DE L'EQUINOXE DANS NOTRE CALENDRIER

Maintenant que nous savons concrètement ce qu'est l'équinoxe, il nous faut comprendre pourquoi la date du passage du Soleil dans la direction de l'équinoxe se promène discrètement dans le calendrier... tout en restant contenue, comme par magie, dans un intervalle de quelques jours.

Notre calendrier, le calendrier grégorien, est un calendrier solaire. Son but est qu'à très long terme, il ne se décale pas par rapport aux saisons. La durée de son année civile, moyennée sur plusieurs siècles, doit donc être aussi proche que possible de l'année tropique

(c'est-à-dire l'année des saisons), à savoir 365,24219 jours environ (soit 365 jours 5 h 48 min 45 s).

Le calendrier grégorien reprend la structure du calendrier julien de la Rome antique. L'année commune du calendrier julien comptait 365 jours et tous les quatre ans, on ajoutait un jour intercalaire, le jour bissexté. L'année moyenne civile comptait alors $(3 \times 365 + 366) / 4 = 365,25$ jours.

L'année civile du calendrier julien était légèrement trop longue par rapport à l'année des saisons et celui-ci dérivait d'un peu plus de 3 jours en 400 ans.



L'origine du mot bissextile

L'année bissextile nous vient de la Rome antique. Il faut d'abord savoir que les Romains avaient trois jours de référence par mois : les calendes (le 1^{er} jour du mois), les ides (situées à peu près à la moitié du mois et se produisant le 13 ou le 15) et les nones (le 8^e jour précédant les ides, soit le 5 ou le 7). De plus, ils ne comptaient pas les jours comme nous, mais à rebours et disaient « aujourd'hui, c'est le 14^e jour avant les calendes de juin » ou « le 3^e jour avant les nones de novembre », etc. Pour mettre fin au chaos qui gouvernait l'établissement du calendrier républicain – Rome était une république depuis 509

av. J.-C., Jules César introduisit un nouveau calendrier en 46 av. J.-C. Il était autorisé en cela par son titre de *Pontifex Maximus*, la charge la plus élevée de la religion romaine. La réforme fut établie après consultation de l'astronome Sosigène d'Alexandrie. L'année civile commune comptait désormais 365 jours, sauf une fois tous les quatre ans, où l'on doublait le 23 février pour obtenir une année de 366 jours. Ce jour supplémentaire se nommait *ante diem bis sextum Kalendas Martias*, c'est-à-dire « sixième jour doublé avant les calendes de mars ». De là provient le mot bissextile puis le terme d'année bissextile.

Bien que le problème fût rapidement reconnu et que des solutions fussent proposées, il fallut attendre le XVI^e siècle – le décalage atteignait alors une dizaine de jours – pour qu'une réforme soit mise en place. Elle fut adoptée par le pape Grégoire XIII à partir des travaux du savant et grand érudit jésuite Clavius. Il fallut d'abord rattraper le décalage existant : on supprima 10 jours en octobre 1582 et l'on sauta directement du 4 au 15. Pour éviter que le décalage

ne réapparaisse, on décida de supprimer trois jours bissextes en 400 ans : les millésimes multiples de 100 sans être multiples de 400 seraient des années communes. Ainsi, 1700, 1800 et 1900 ne furent pas bissextiles mais 2000 le fut. En appliquant cette règle, on arrive à une année civile moyenne de :

$$(365 \times 300 + 366 \times 100 - 3) / 400 = \dots$$

365,2425 jours.

La précision est donc sensiblement améliorée, toutefois la perfection n'est pas atteinte puisque l'année moyenne grégorienne est encore un peu trop longue et présente un excès de 3 jours au bout de 10 000 ans environ. Les dates des saisons vont encore dériver en moyenne faiblement vers le début de l'année dans le calendrier grégorien.

Faut-il alors légiférer dès à présent et jeter le calendrier grégorien aux oubliettes de l'Histoire ? Non,

car du fait du raccourcissement actuel et temporaire de l'année des saisons (évalué à 0,5 s par siècle) et de l'allongement du jour de 1,64 milliseconde par siècle (dû au ralentissement de la rotation de la Terre sur elle-même), établir de nouvelles règles valables sur plusieurs milliers d'années est illusoire, les incertitudes sur la durée de l'année sur 10 000 ans étant du même ordre de grandeur que les 3 jours en trop...

De l'inégale durée des saisons... et de ses conséquences

Dès l'Antiquité, on s'est aperçu que les saisons n'avaient pas toutes la même durée. Aujourd'hui, il suffit de consulter un calendrier et de compter les jours pour s'en convaincre. Il s'agit d'une conséquence de la deuxième loi de Kepler (1609), qui affirme que le rayon-vecteur reliant la planète au Soleil balaie des aires égales en des intervalles de temps égaux. En d'autres termes, une planète va d'autant plus vite sur sa trajectoire qu'elle est proche du Soleil et d'autant moins vite qu'elle en est éloignée.

En ce début du XXI^e siècle, c'est au début du mois de janvier, en plein hiver boréal, que la Terre est au plus près du Soleil et passe au périhélie. L'hiver est donc la saison la plus courte dans notre hémisphère, avec

une durée proche 89 j 0 h. C'est au début du mois de juillet, en plein été boréal, que la Terre est au plus loin du Soleil et passe à l'aphélie. L'été est, dans notre hémisphère, la saison la plus longue avec une durée d'environ 93 j 16 h. Le printemps et l'automne ont des durées intermédiaires, respectivement de 92 j 18 h et de 89 j 21 h.

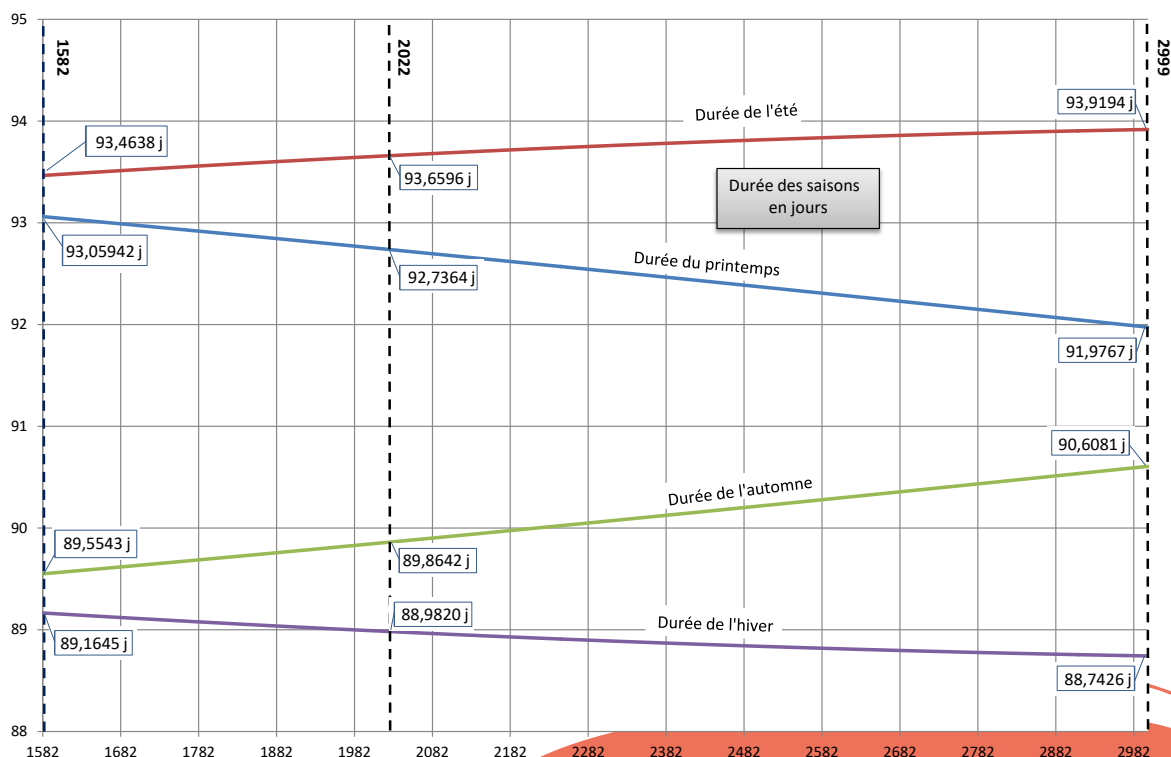
Toutefois, au fil des années, la durée des saisons change. En effet...

- l'excentricité de l'orbite terrestre varie de presque 0 (cercle parfait) à 0,06 (orbite légèrement excentrique) selon différentes périodes qui se combinent grossièrement pour donner un cycle de plus ou moins 100 000 ans ;
- la ligne reliant périhélie et aphélie (la ligne des apsides) tourne lentement dans son plan à raison d'une révolution tous les 110 000 ans environ ;
- l'axe de rotation de la Terre décrit un cône de précession en quelque 26 000 ans, entraînant avec lui dans cette ronde l'équateur terrestre avec pour conséquence, la rétrogradation du point vernal.

Ainsi, entre l'an 1583 et l'an 2999, la durée du printemps diminuera de près de 1 j 2 h, celle de l'été augmentera de près de 11 h, celle de l'automne de plus de 1 j 1 h et celle de l'hiver diminuera de plus de 10 h.

L'illustration ci-dessous est tirée du document « Le solstice d'été en juin 2022 » édité par l'IMCCE et librement téléchargeable ici :

https://www.imcce.fr/newsletter/medias/2022/06/docs/Solstice_ete_2022.pdf. Il montre la variation de la durée des saisons entre l'an 1582 et l'an 2999.



Au fil des siècles, la durée des saisons change...

La variation de la durée des saisons suit un cycle d'environ 21 000 ans.

Attention, il ne faut pas confondre la mobilité des dates des saisons due aux variations de leurs durées avec celle due à la mauvaise approximation de l'année tropique par le calendrier grégorien. Cette

dernière, sur la même période [1582-2999], est de l'ordre de - 10 h 55 min. Finalement, la dérive éventuelle de la date des solstices et des équinoxes dans notre calendrier, à l'échelle des siècles, est due à la combinaison de ces deux phénomènes, qui peuvent se renforcer... ou se contrebalancer.



Examinons maintenant un document créé par l'IMCCE, recensant les dates des équinoxes de printemps entre 1583 et 2999. Le fichier est librement accessible ici :

https://www.imcce.fr/newsletter/medias/2023/03/docs/Equinoxe_printemps_1583_2999.pdf

Voici les instants (en temps universel) des équinoxes de printemps en mars entre 2020 et 2029, arrondis à la seconde la plus proche :

Année (année bissextile)	Instants	Différence de temps d'un équinoxe à l'autre
2020	Le 20 à 03 h 49 min 36 s	
2021	Le 20 à 09 h 37 min 27 s	365 j 5 h 47 min 51 s
2022	Le 20 à 15 h 33 min 23 s	365 j 5 h 55 min 56 s
2023	Le 20 à 21 h 24 min 28 s	365 j 5 h 51 min 05 s
2024	Le 20 à 03 h 06 min 21 s	365 j 5 h 41 min 53 s
2025	Le 20 à 09 h 01 min 25 s	365 j 5 h 55 min 04 s
2026	Le 20 à 14 h 45 min 53 s	365 j 5 h 44 min 28 s
2027	Le 20 à 20 h 24 min 36 s	365 j 5 h 38 min 43 s
2028	Le 20 à 02 h 17 min 02 s	365 j 5 h 52 min 26 s
2029	Le 20 à 08 h 01 min 52 s	365 j 5 h 44 min 50 s

On remarque tout d'abord que la dérive de l'équinoxe vers la fin du mois pendant les années communes est compensée par l'ajout du jour bissextile tous les quatre ans. Ensuite, on constate que

les intervalles de temps entre deux équinoxes consécutifs ne sont pas constants. Ces irrégularités trouvent leur origine dans les **perturbations planétaires** et la **nutations**.

Les perturbations planétaires

Dans son périple autour du Soleil, la Terre est perturbée par l'attraction gravitationnelle des planètes (principalement Vénus et Jupiter) et de la Lune. Légèrement accélérée ou ralentie par ces corps célestes, la Terre est parfois en avance, parfois en retard sur la position théorique qu'elle occuperait si elle n'était pas

perturbée. L'effet total dû à la Lune et aux planètes peut atteindre 30 secondes d'arc (30") en longitude héliocentrique. La Terre mettant environ 12 minutes pour parcourir cette distance, un équinoxe ou un solstice peut se produire jusqu'à 12 minutes plus tôt ou plus tard qu'en moyenne.

La nutation

La nutation, due à l'attraction conjuguée du Soleil et de la Lune, est un petit mouvement périodique de l'axe de rotation de la Terre autour de sa position moyenne, qui s'ajoute à la précession (pour en savoir plus sur la précession, voir le document dédié à l'étoile Polaire, accessible ici : <https://www.cite-sciences.fr/fr/vous-etes/enseignants/ressources-en-ligne>). La nutation impose au point vernal un mouvement de va-et-vient autour de sa position moyenne. Le terme principal de ce mouvement a une amplitude de 17,2 secondes d'arc

(17,2") et une période de 18,6 ans.

Il existe d'autres termes périodiques plus petits, dont un présente une amplitude de 1,3" et une période de six mois. Ainsi, en raison de la nutation, le point vernal peut précéder ou suivre sa position moyenne avec un retard ou une avance allant jusqu'à 19". Les saisons peuvent ainsi débuter jusqu'à 8 minutes plus tôt ou plus tard qu'en l'absence de sa prise en compte.

Finalement, le cumul de ces deux effets, qui peut monter à 20 minutes, explique le fait que l'intervalle de temps entre deux équinoxes de printemps n'est pas constant.

Reprenons le tableau présenté en dernière page du document (https://www.imcce.fr/newsletter/medias/2023/03/docs/Equinoxe_printemps_1583_2999.pdf).

Il regroupe, sur la période [1589-2999], le nombre d'occurrences de l'équinoxe de printemps à la date du 19, 20 et 21 mars, pour chaque siècle.

Notons que le XVI^e siècle inclut les années 1583 à 1600 et le XXX^e siècle, les années 2901 à 2999.

Siècle	Nombre d'équinoxes tombant le 19 mars	Nombre d'équinoxes tombant le 20 mars	Nombre d'équinoxes tombant le 21 mars
XVI ^e	0	13	5
XVII ^e	16	80	4
XVIII ^e	5	81	14
XIX ^e	0	66	34
XX ^e	0	43	57
XXI ^e	20	78	2
XXII ^e	7	82	11
XXIII ^e	0	71	29
XXIV ^e	0	49	51
XXV ^e	24	76	0
XXVI ^e	8	85	7
XXVII ^e	1	76	23
XXVIII ^e	0	55	45
XXIX ^e	30	70	0
XXX ^e	12	81	6

Du XVII^e au XX^e siècle, la date de l'équinoxe moyen dérive vers la fin du calendrier car les années séculaires 1700, 1800 et 1900 ne sont pas bissextiles.

La toute dernière année du XX^e siècle, 2000, est bissextile. Son

influence se fait sentir tout au long du XXI^e siècle : la dérive vers la fin du calendrier est brutalement compensée. Elle reprend ensuite jusqu'au XXIV^e siècle, jusqu'à être largement contrebalancée par l'année 2400, bissextile.

5

POUR EN SAVOIR PLUS

Une page très complète proposée par l'IMCCE sur les saisons :

<https://promenade.imcce.fr/fr/pages4/438.html>

La lettre d'information de l'IMCCE de mars 2023 est accessible en ligne ici :

<https://www.imcce.fr/lettre-information/archives/199>

Elle propose un article intitulé « Passage du Soleil dans la direction de l'équinoxe de printemps en 2023 ».

P. Causeret et L. Sarrazin, *Les saisons et les mouvements de la Terre*, éd. Belin, coll. Bibliothèque scientifique, 2001.

D. Savoie, *Cosmographie. Comprendre les mouvements du Soleil, de la Lune et des planètes*, éd. Belin, coll. Bibliothèque scientifique, 2006.

D. Savoie, *Les cadrans solaires*, éd. Belin, coll. Bibliothèque scientifique, 2003.

IMCCE et Bureau des longitudes, *Guide de données astronomiques 2023 pour l'observation du ciel à l'usage des professionnels et amateurs. Annuaire du Bureau des longitudes*, éd. EDP Sciences, 2022.

IMCCE / Observatoire de Paris, *Connaissance des temps, Éphémérides astronomiques 2023*, éd. IMCCE, 2022. L'ouvrage est librement téléchargeable depuis l'onglet « Publications » puis « Publications institutionnelles ». Lien direct :

https://www.imcce.fr/content/medias/publications/publications-institutionnelles/CDT_2023_ebook.pdf

Un logiciel de calcul d'éphémérides l'accompagne, disponible gratuitement en version Windows, Mac et Linux.

Ouvrage collectif rédigé par des spécialistes de l'Observatoire de Paris, de l'Observatoire de la Côte d'Azur et du Bureau des longitudes, *Introduction aux éphémérides et phénomènes astronomiques. Supplément explicatif à la Connaissance des Temps*, éd. EDP Sciences, coll. Références astronomiques, 2021 pour la 2^e édition.

En anglais

Si vous avez la possibilité de lire ces quelques pages, vous réaliserez combien la brève introduction au thème des solstices et des équinoxes que constitue ce petit dossier présente les phénomènes de manière très simplifiée !

J. Meeus, *Mathematical astronomy morsels*, éd. Willmann-Bell, 1997. Chap. 57, pp. 346-352, About the equinoxes and the solstices.

J. Meeus, *More mathematical astronomy morsels*, éd. Willmann-Bell, 2002. Chap. 63, pp. 357-366, The Gregorian calendar and the tropical year.

Sur le blob

Universcience, l'établissement public qui réunit la Cité des sciences et de l'industrie et le Palais de la découverte, a lancé en mars 2019 **le blob, l'extra-média**. Gratuit, sans abonnement et sans publicité, le blob est un média de service public. Le blob propose une nouvelle vidéo à la une chaque jour, avec un fil d'actualité scientifique quotidien et des enquêtes mensuelles sur les grands enjeux contemporains, mêlant donc sujets de fond et actualité « chaude ».

D'où viennent les saisons ? (2011)
<https://leblob.fr/astro-espace/ou-viennent-les-saisons>

Un épisode de la série « Kezako ? ».

J. Meeus, *Mathematical astronomy morsels IV*, éd. Willmann-Bell, 2007. Chap.63, pp.351-354, The declination of the Sun at the equinoxes and at the solstices.

J. Meeus, *Mathematical astronomy morsels V*, éd. Willmann-Bell, 2009. Chap. 63, pp. 343-344, Where does the Sun rise at the equinoxes?



Les saisons (2010)

<https://leblob.fr/environnement-nature/les-saisons>

Dans une parodie de jeu télévisé, les enfants du centre de loisirs de la rue de Tanger à Paris répondent à des questions sur les saisons. Laurence Denis, médiatrice scientifique à la Cité des sciences, complète les réponses des enfants.

Un épisode de la série « Qui veut gagner des neurones ? ».

La Terre et les saisons (2008)

<https://leblob.fr/astro-espace/la-terre-et-les-saisons>

Un jardinier nous explique, en langue des signes française (LSF), le pourquoi et le comment des saisons grâce à une modélisation 3D du système Terre / Lune.

6

AMPLITUDES ORTIVE ET OCCASE DU SOLEIL

L'amplitude ortive, aussi obscur que ce terme puisse paraître, désigne simplement l'arc mesuré sur l'horizon entre la direction de l'est et celle de la position occupée par un astre à son lever. L'amplitude occase est l'arc mesuré sur l'horizon entre la direction de l'ouest et celle de la position occupée par un astre à son coucher.

Dans ce qui suit, nous négligerons la réfraction atmosphérique et le diamètre apparent du Soleil. Il ne

faudra donc pas prendre les résultats que nous obtiendrons pour argent comptant.

Nous allons utiliser l'une des **formules de conversion** entre le système de coordonnées horaires et le système de coordonnées horizontales. Là aussi, nous vous renvoyons à la fiche dédiée aux différents systèmes de coordonnées célestes (<https://www.cite-sciences.fr/fr/vous-etes/enseignants/ressources-en-ligne/>).

$$\sin \delta = \sin \varphi \sin h - \cos \varphi \cos h \cos a$$

Dans cette formule, δ est la déclinaison du Soleil, φ est la latitude du lieu d'observation, h est la hauteur du Soleil et a son azimut, compté à partir du sud.

On souhaite connaître l'azimut du Soleil à son lever et son coucher. Sa hauteur en ces deux instants est donc nulle. Avec $h = 0$, la formule devient :

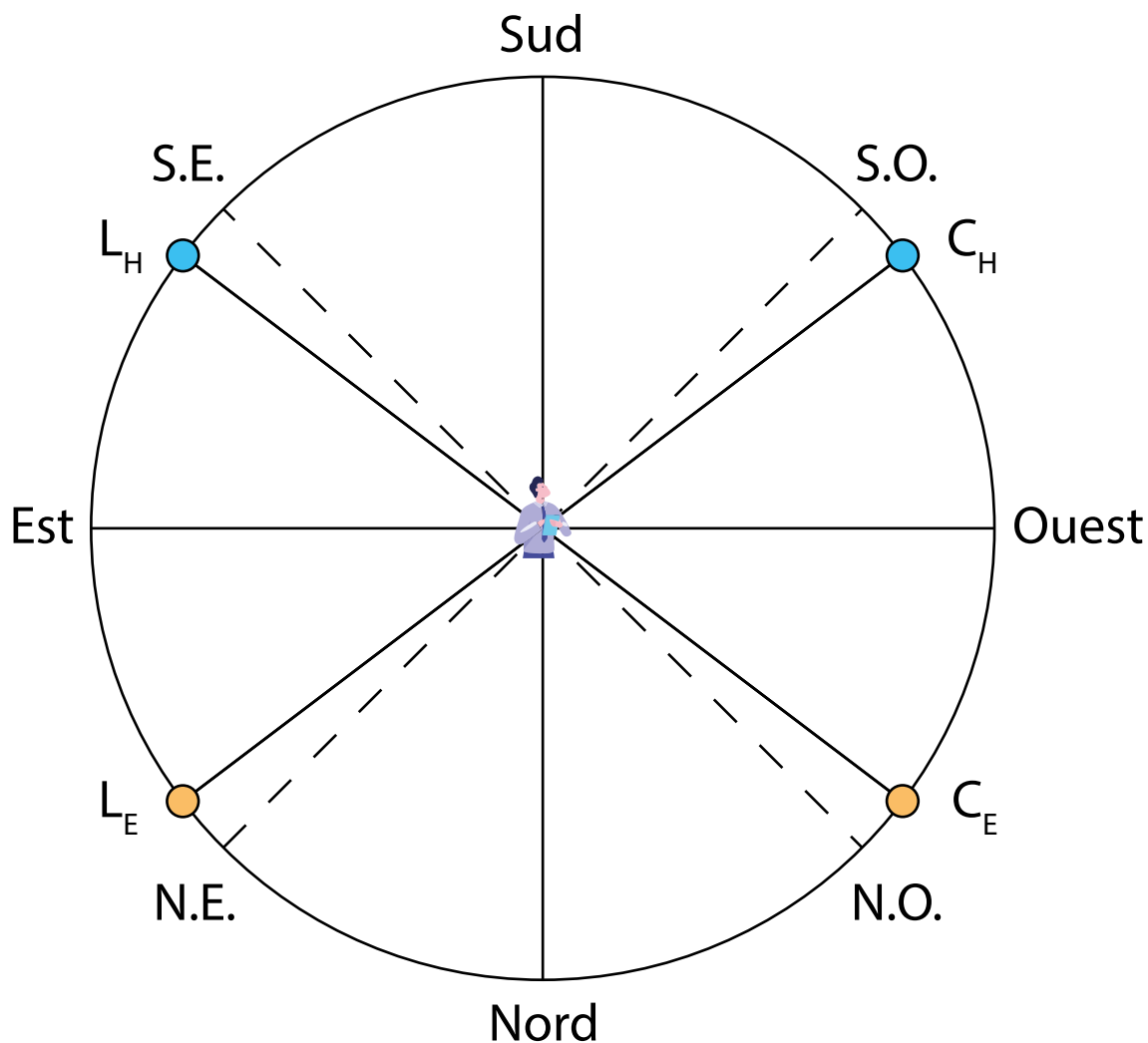
$$\cos a = - \sin \delta / \cos \varphi$$

L'équation donne deux solutions pour a , égales en valeur absolue mais de signe opposé. Elles

correspondent au lever et au coucher du Soleil et sont symétriques par rapport au point cardinal sud.

δ varie entre $-23^\circ 26'$ au solstice d'hiver à $+23^\circ 26'$ au solstice d'été, en passant par une valeur nulle aux équinoxes.

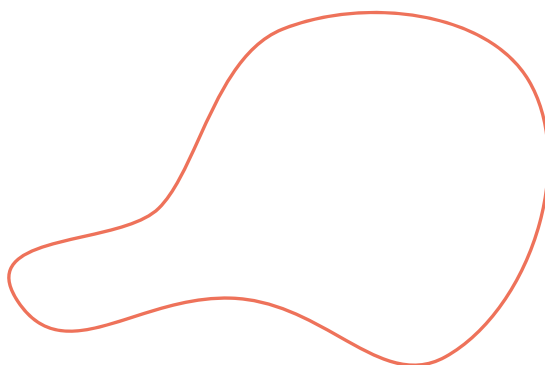
A Paris ($\varphi = 48^\circ 50'$), on obtient $a = \pm 52^\circ 50'$ au solstice d'hiver et $a = \pm 127^\circ 10'$ au solstice d'été. La figure de la page suivante vous propose une vue des directions de lever et de coucher du Soleil aux solstices et aux équinoxes à Paris, depuis le zénith de l'observateur.



Dans ce schéma sont indiquées la direction des quatre points cardinaux et des quatre points intercardinaux, les directions du lever du Soleil aux solstices d'hiver (L_H) et d'été (L_E) ainsi que les directions du coucher du Soleil aux solstices d'hiver (C_H) et d'été (C_E).

Les arcs Sud- L_H et Sud- C_H s'élèvent à $52^\circ 50'$ alors que les arcs Sud- L_E et Sud- C_E se montent à $127^\circ 10'$.

A Paris, les amplitudes ortive et occase maximales du Soleil valent donc $(90^\circ - 52^\circ 50') = 37^\circ 10'$.



7

IDEES D'ACTIVITES POUR LES CLASSES DE PRIMAIRE

Apprendre à s'orienter avec le Soleil

S'orienter signifie connaître la direction des points cardinaux nord, sud, est et ouest.

Le plus simple est de se munir d'un fil à plomb et de connaître à l'avance de l'instant exact de passage du Soleil dans la direction du sud, c'est-à-dire à sa culmination. Vous trouverez, par exemple, cette information sur le site de l'IMCCE et plus particulièrement dans la rubrique « Visibilité des astres » (<https://ssp.imcce.fr/forms/visibility>).

Il vous suffit de renseigner l'adresse ou les coordonnées GPS de votre choix, de choisir la ou les dates concernées, le corps céleste dont vous voulez obtenir les instants de

lever, culmination et coucher et le tour est joué ! Les résultats sont donnés en temps universel avec une précision d'une minute. Il vous suffit d'ajouter une heure en période d'hiver et deux heures en période d'été pour obtenir l'heure légale, autrement dit l'heure de votre montre.

Observez la direction de l'ombre de votre fil à plomb à l'instant de la culmination du Soleil : sa direction sera celle du nord géographique. Derrière vous, le sud, à votre gauche l'est et à votre droite, l'ouest. On pourra amortir les oscillations du fil en plongeant le plomb dans un bocal rempli d'eau.

Pour apprendre à s'orienter de nuit, nous vous invitons à consulter le document dédié à l'étoile Polaire. Il se trouve sur cette page :

<https://www.cite-sciences.fr/fr/vous-etes/enseignants/ressources-en-ligne>.

Mesurer la hauteur du Soleil

La hauteur du Soleil peut se mesurer de différentes façons. On peut, par exemple, utiliser un sextant, un instrument de navigation.

On peut aussi utiliser un appareil de visée comme celui présenté ci-dessous. « Après avoir réglé l'horizontalité, on vise le Soleil de manière que l'ombre du crochet placé à l'extrémité haute de la baguette se projette sur le petit écran placé à l'autre extrémité ».



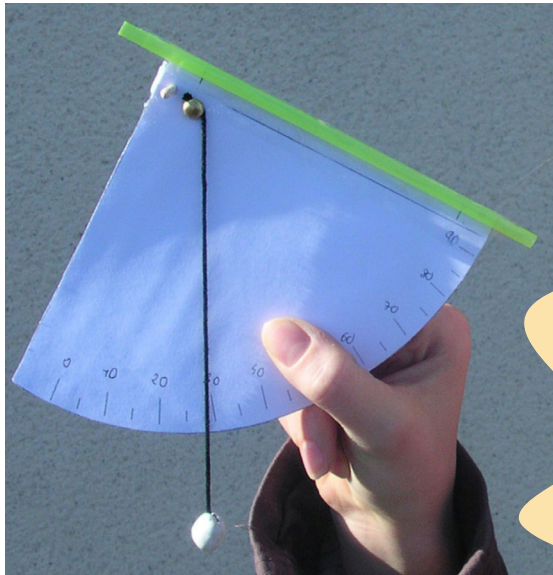
Le sextant permet de mesurer précisément la hauteur du Soleil. Crédit : National Museum of the U.S. Navy.



Texte et photographie provenant de l'excellent ouvrage de P. Causeuret et L. Sarrazin, *Les saisons et les mouvements de la Terre*, référencé dans la partie « Pour en savoir plus ».

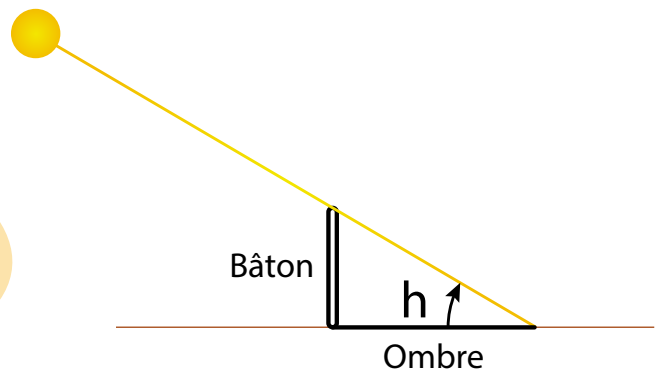
Enfin, un quart de cercle est autre instrument qu'on peut employer pour une lecture directe de la hauteur du Soleil.

Un simple bâton planté verticalement dans le sol fournit indirectement (après calcul) la hauteur du Soleil.



Photographie issue du n°138 (juin 2012) des Cahiers Clairaut, la revue du Comité de liaison enseignants et astronomes (CLEA). Article « Un atelier scientifique sur la navigation » par Thierry Mourot, pp. 21-22.

Soleil



Si l est la longueur du bâton, L la longueur de l'ombre et h la hauteur du Soleil, alors on a la relation : $\tan h = l/L$

Département Education & Formation
Rédaction : J. KIEKEN
Illustration & graphisme : H. MALCUIT
Nous contacter :
educ-formation@universcience.fr