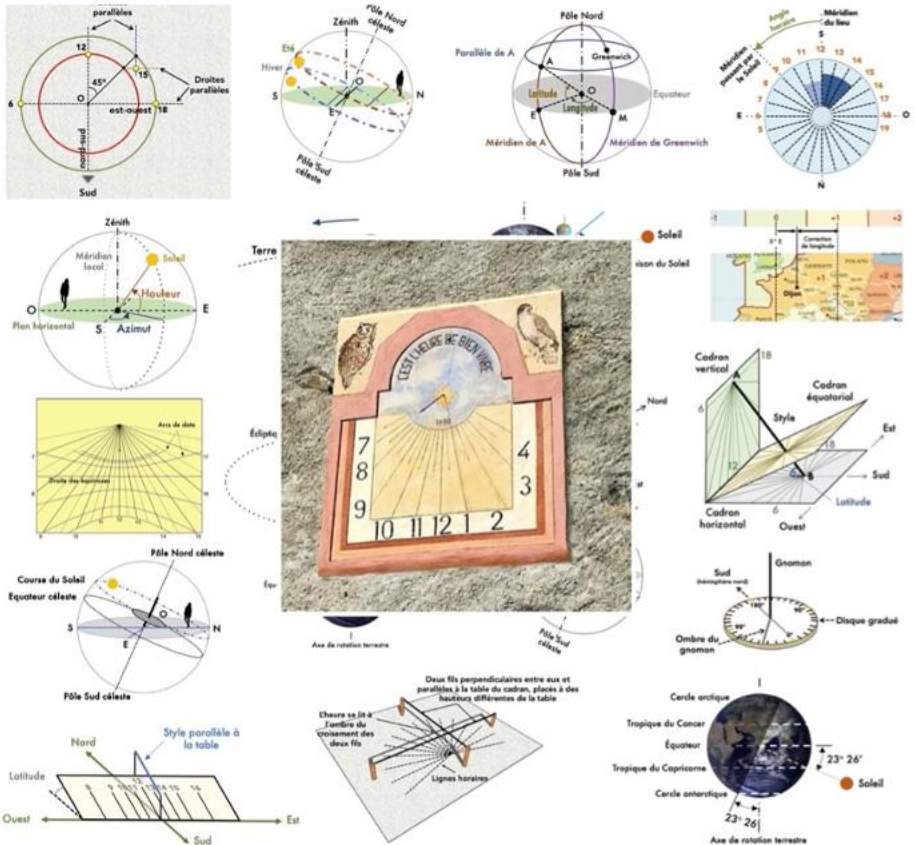


Roger Torrenti



La science des cadrans solaires à la portée de tous

Publié sous licence Creative Commons BY-NC-SA 4.0 DEED



CC BY-NC-SA 4.0 DEED

**Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Partage dans les Mêmes Conditions
4.0 International**

*À mon épouse qui supporte patiemment
que je consacre beaucoup de temps à ma passion
des cadrans solaires et de leur science, la gnomonique.*

*À mes amies et amis du comité éditorial du magazine
« Cadrans solaires pour tous ».*

*À mes amies et amis de la Commission des cadrans solaires
de la Société astronomique de France.*

*Et à mes autres amies et amis qui, en France et à l'étranger,
partagent cette passion des cadrans solaires et de la gnomonique.*

*Et un grand merci à Yves Opizzo et Yvon Massé qui ont bien voulu
relire et repérer imprécisions et autres corrections nécessaires avant
publication.*

SOMMAIRE

INTRODUCTION	7
L'auteur.....	7
Objectifs de cet ouvrage	8
MOUVEMENTS RELATIFS DE LA TERRE ET DU SOLEIL	15
Quelques chiffres... ..	15
Révolution de la Terre autour du Soleil	16
Rotation de la Terre sur elle-même	17
Coordonnées d'un lieu	19
Jour solaire et jour moyen.....	22
Équation du temps	23
Fuseaux horaires et UTC.....	24
De l'heure solaire à l'heure légale.....	26
Déclinaison du Soleil	29
La sphère céleste locale.....	32
Azimut et hauteur du Soleil	33
Angle horaire du Soleil	37
COMPRENDRE ET REALISER DES CADRANS SOLAIRES	39
Méridiennes.....	41
Cadrans globes	44
Cadrans équatoriaux	46
Cadrans polaires	49
Cadrans horizontaux ou verticaux.....	53
Cadrans analemmatiques.....	64

La science des cadrans solaires à la portée de tous

Cadrans d'azimut ou de hauteur	69
<i>Cadrans d'azimut</i>	70
<i>Cadrans de hauteur</i>	72
Choisir une devise.....	77
Bien d'autres cadrans	78
ANNEXE : RAPPELS MATHÉMATIQUES	80

Accueil Le MOOC Les livres Le magazine Actualités L'auteur

Un site dédié aux cadrans solaires et à leur science, la gnomonique

Accès au MOOC

MOOC
Cadrans
solaires

Accédez ici au MOOC cadrans solaires, un cours en ligne libre et gratuit, accessible à tous : pour comprendre et savoir construire des cadrans solaires de tout type.

Les livres

Les cadrans solaires
Gnomonique
Cadrans solaires pour tous

Découvrez des livres et opuscules consacrés à la gnomonique et aux cadrans solaires, disponibles en téléchargement libre et, pour certains, également disponibles en version papier.

Le magazine

CADRANS SOLAIRES POUR TOUS
CADRANS SOLAIRES POUR TOUS
CADRANS SOLAIRES POUR TOUS

Le magazine trimestriel « Cadrans solaires pour tous », lancé en septembre 2021 peut être téléchargé gratuitement ou commandé en version papier.

Actualités

Retrouver ici nos actualités relatives au concours annuel en cours ou aux dernières initiatives et productions du comité éditorial du magazine « Cadrans solaires pour tous ».

Plan du site - Mentions Légales - Contact

Page d'accueil du site www.cadrams-solaires.info de l'auteur

Ce site donne librement accès au « MOOC cadrans solaires », à tous les numéros (et à tous les articles séparément) du magazine « Cadrans solaires pour tous », ainsi qu'à divers documents et ouvrages en accès libre.

Lorsque dans le présent ouvrage figurent des renvois vers le MOOC ou ce magazine, c'est donc le lien ci-dessus qui devra être utilisé pour accéder aux contenus relatifs à ces renvois.

INTRODUCTION

L'auteur

Roger Torrenti est né à Nice et a fait ses études secondaires au lycée Masséna de Nice, avant d'intégrer en 1973 l'École centrale Paris (aujourd'hui CentraleSupélec). Il a commencé sa carrière comme chargé de recherches sur les énergies renouvelables au Commissariat à l'énergie atomique (Saclay), avant de rejoindre Sophia Antipolis, dirigeant pendant cinq ans une équipe de recherches du Centre d'énergétique de l'École des Mines de Paris (aujourd'hui MINES Paris - PSL). En 1984, il crée une société d'études et de recherches, qu'il dirigera jusqu'en 2015 et qui deviendra au fil des ans un acteur reconnu des programmes européens de recherche et d'innovation dans le domaine des technologies de l'information et de la communication, et de la coopération internationale (Europe-Asie et Europe-Afrique) dans ce domaine.

Il est passionné par les aspects théoriques et pratiques des cadrans solaires depuis son enfance et, malgré une carrière professionnelle dense, a pu continuer au fil des ans à s'adonner à cette passion. Il est notamment l'initiateur du *Concours international sur les cadrans solaires* lancé en 1980 par l'École des Mines de Paris et participe activement, depuis 2018, aux travaux de la Commission des cadrans solaires (<https://ccs.saf-astronomie.fr/>) de la Société astronomique de France.

C'est dans un souci de partage qu'il a conçu son site web (page ci-contre) et voulu mettre des connaissances au service de tous via le *MOOC cadrans solaires* (cours en ligne gratuit et sans inscription) lancé mi-2018, et le magazine trimestriel *Cadrans solaires pour tous*, gratuit également, lancé fin 2021 avec un groupe de passionnés.

C'est avec le même souci qu'il a préparé le présent ouvrage et tenu à développer le MOOC, le magazine et ce livre sous licence CC BY-NC-SA, permettant le partage et l'adaptation de son contenu.

Objectifs de cet ouvrage

La science des cadrans solaires, ou gnomonique, est un ensemble de connaissances relatives au mouvement de la Terre sur elle-même et autour du Soleil, permettant de déterminer la position précise du Soleil dans le ciel à tout instant et, in fine, de relier cette position, par l'ombre d'un gnomon, à l'heure de nos montres ou de nos téléphones portables.

La gnomonique est donc la partie, se focalisant sur la position du Soleil, de l'astronomie de position (ou astrométrie), cette branche de l'astronomie s'intéressant à la position, dans le ciel, des objets célestes (étoiles, constellations, Lune, planètes, Soleil, etc.), qui a été si utile, depuis tant de siècles, à la navigation maritime, et même aux transports terrestres.

Le gnomon (ou style) d'un cadran solaire désigne la tige dont l'ombre (ou celle d'une partie de cette tige, son extrémité par exemple), indique l'heure sur la table du cadran, où sont tracées des lignes horaires, des courbes diurnes, etc.

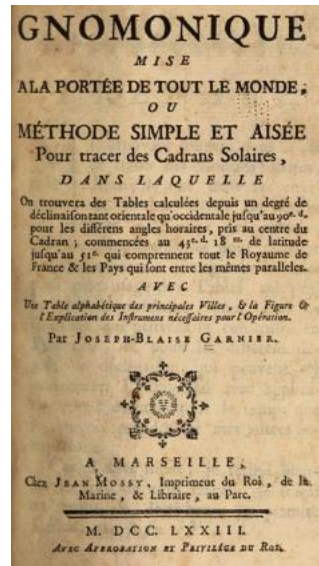
On emploie également le terme gnomon pour désigner un simple bâton ou mât planté verticalement dans un sol horizontal, dont l'ombre pourra indiquer, comme nous le verrons plus loin, l'heure ou une direction (nord-sud par exemple).

Ces définitions étant données, pourquoi vouloir mettre « La science des cadrans solaires à la portée de tous » ?

« Nous avons sur la gnomonique plusieurs ouvrages très savants, mais longs et difficiles (...). L'objet de celui-ci est d'être court, simple et d'une pratique si aisée qu'elle est à la portée de ceux qui ne savent que lire, et (connaissent) un peu d'arithmétique ».

C'est ainsi que Joseph-Blaise Garnier explique, en 1773, sa démarche dans la préface de son ouvrage *Gnomonique mise à la portée de tout le monde*, ouvrage constitué en fait de tableaux de données permettant de tracer rapidement des cadrans solaires verticaux, et ce, pour diverses latitudes du Royaume de France et diverses orientations du mur sur lequel sera réalisé le cadran.

Couverture de l'ouvrage de
Joseph-Blaise Garnier.
(Disponible en téléchargement sur
<https://books.google.fr>)



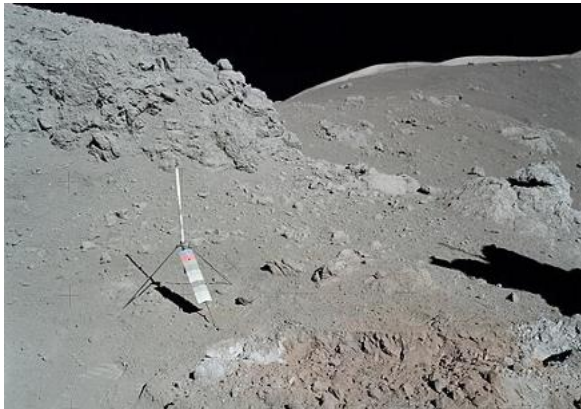
Le présent ouvrage s'inscrit résolument dans la lignée de cet ouvrage, et souhaite mettre la science des cadrans solaires réellement à la portée de tous, jeunes et moins jeunes, ne disposant pas nécessairement de bagage astronomique ou mathématique substantiel.

Des notions de bases de géométrie (qui s'intéresse au plan et à l'espace) et de trigonométrie (qui s'intéresse aux triangles) peuvent cependant s'avérer utiles pour mieux comprendre certains schémas ou concepts. Ces notions sont donc rappelées en annexe.

Et l'on ne peut que saluer les initiatives qui se multiplient d'enseignants, soutenus notamment par le CLEA (Comité de liaison Enseignants et Astronomes - <http://clea-astro.eu/>) et des clubs d'astronomie, qui utilisent la gnomonique comme une approche pertinente de notions de base d'astronomie.

Après avoir parcouru ce petit ouvrage vous devriez maîtriser suffisamment la théorie des cadrans solaires et leurs concepts de réalisation, et avoir assez de références et d'outils, pour concevoir et réaliser facilement des cadrans solaires.

Vous pourrez ainsi rejoindre la grande famille des gnomonistes (qui calculent) et des cadraniers (qui réalisent), remontant à l'Antiquité, qui ont conçu et conçoivent encore les cadrans solaires qui ornent bâtiments et espaces publics, qui sont utilisés en classe dans les cours d'astronomie ou... qui sont embarqués dans les missions lunaires et martiennes.

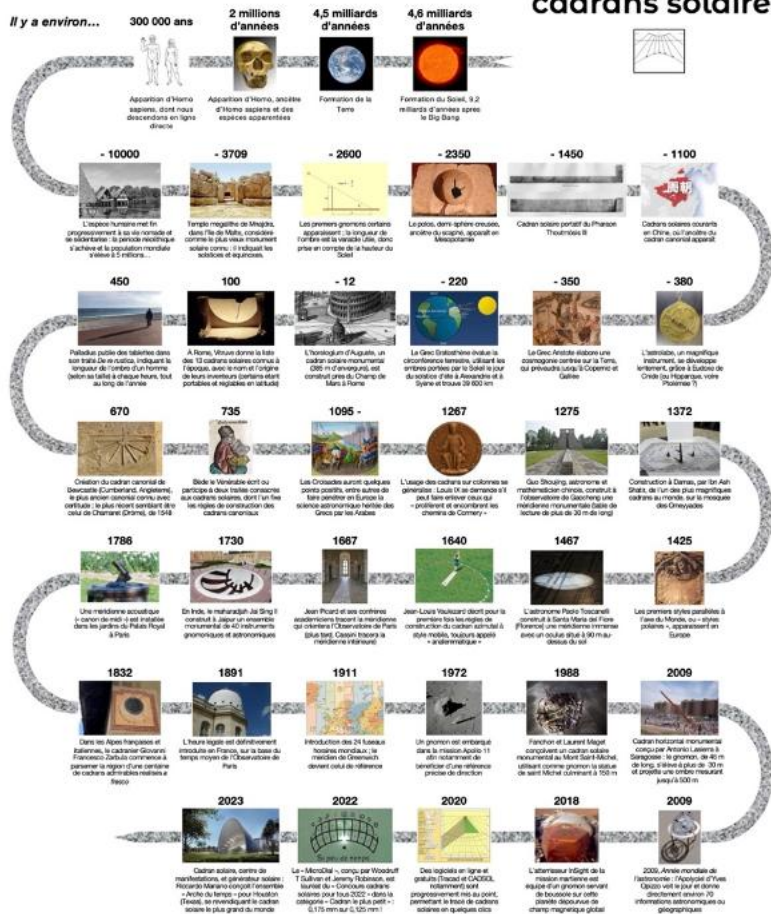


Gnomon installé dans le cadre de la mission Apollo 17 sur la Lune pour déterminer la position des échantillons et calibrer les instruments.

(Document Wikimedia Commons - Source NASA - Domaine public)

Quelques mots, pour conclure sur cette « grande famille », sur l'histoire de la gnomonique et des cadrans solaires qu'illustre la frise chronologique page ci-contre, disponible sous forme de poster sur le site www.cadrans-solaires.info.

Frise chronologique Gnomonique et cadrans solaires



Ce document a été préparé par Roger Tournier à partir du document « Chronologie - Gnomonique et cadrans solaires » publié en janvier 2024 par Yves Chabot avec les concours des membres du comité éditorial du magazine Cadrans solaires pour tous - <https://www.cadrans-solaires.org/>

Creative Commons

Le Soleil, qui conditionne et rythme la vie sur notre planète, a logiquement suscité l'attention (et souvent l'adoration) des humains depuis les temps les plus reculés.

Les cadrans solaires ont connu leur apogée du XVII^e au XIX^e siècle, sous l'effet des progrès en astronomie, des développements scientifiques nécessaires aux explorations maritimes et de la nécessité accrue de connaître l'heure et de mesurer le temps dans une vie économique et sociale de plus en plus organisée. Dans la seconde partie du XIX^e siècle, en pleine révolution industrielle, la nécessité de mesurer le temps de façon plus précise et les progrès de l'horlogerie vont progressivement réduire l'utilité des cadrans solaires.

Aujourd'hui, à l'heure du numérique et de la nanoseconde, les cadrans solaires ne sont cependant pas à ranger au rayon des objets désuets et inutiles, ou d'un patrimoine figé. Ils demeurent en effet des objets au fort potentiel pédagogique, peuvent être simples et précis, et continuer à orner utilement des bâtiments et à enrichir l'espace urbain.

Deux précisions pour terminer cette introduction.

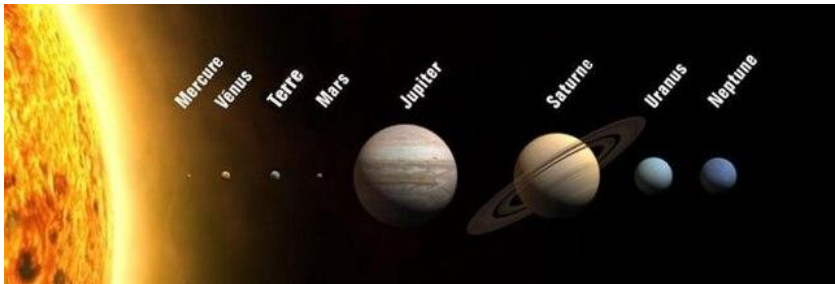
Tout d'abord l'ouvrage a été conçu non seulement pour les personnes de France métropolitaine mais aussi pour celles du monde francophone, car on ne conçoit pas un cadran solaire de la même façon en France métropolitaine ou dans d'autres parties du monde...

Ensuite, précision importante, l'auteur est conscient que le domaine de la gnomonique et des cadrans solaires, comme tout domaine de connaissances, est bien entendu ouvert aussi bien aux (filles et) femmes qu'aux (garçons et) hommes, même si la double flexion, le point médian et toute autre forme d'écriture inclusive ne sont pas systématiquement utilisés dans le texte.



Hypatie d'Alexandrie, philosophe, mathématicienne, astronome et gnomoniste de la fin du IV^e siècle, imaginée ici par Jules Maurice Gaspard en 1908.

(Document Wikimedia Commons - Domaine public)



Le Soleil et les 8 planètes qui gravitent autour de lui ; les tailles relatives des planètes et du Soleil sont respectées sur cette illustration mais pas les distances du Soleil aux planètes (et donc d'une planète à l'autre).

(Document Wikimedia Commons - Domaine public)

MOUVEMENTS RELATIFS DE LA TERRE ET DU SOLEIL

Quelques chiffres...



L'Univers s'est formé il y a quelque 13,7 milliards d'années, et le Soleil, « notre étoile », il y a environ 4,6 milliards d'années. Cette étoile est composée d'hydrogène et d'hélium. C'est une naine jaune de notre galaxie, la Voie lactée. Son diamètre moyen est d'environ 1,4 million de km (soit 3,6 fois la distance Terre-Lune).

Autour de lui gravitent huit planètes, dont la Terre, qui s'est formée il y a un peu plus de 4,5 milliards d'années. Elle est couramment assimilée à une sphère mais est en fait légèrement aplatie aux pôles. Son diamètre moyen est d'environ 12 700 km, soit plus de 110 fois plus petit que celui du Soleil.

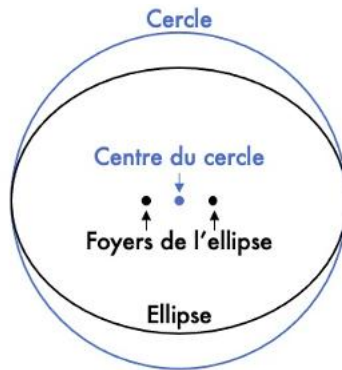
Le Soleil et la Terre sont distants d'environ 150 millions de km ; la lumière met donc, à la vitesse de 300 000 km/s, 8 minutes pour aller du Soleil à la Terre.



Si l'on représentait le Soleil et la Terre à l'échelle...

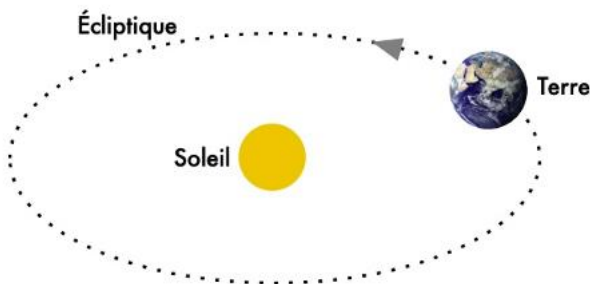
Dans les schémas suivants montrant les positions relatives de la Terre et du Soleil, l'échelle des tailles ne pourra donc pas être respectée, afin que les schémas soient compréhensibles...

Révolution de la Terre autour du Soleil



Du cercle à l'ellipse.

La Terre effectue une révolution autour du Soleil selon une orbite elliptique, c'est-à-dire de la forme d'une ellipse, en fait un cercle légèrement « aplati ». Le Soleil occupe l'un des deux foyers de l'ellipse ; le plan de l'orbite est appelé l'écliptique. Cette révolution se déroule (à 30 km/s !) dans le sens antihoraire, c'est-à-dire inverse de celui des aiguilles d'une montre, en un peu plus de 365 jours (365,2422 jours) ce qui a conduit à convenir, tous les 4 ans, d'une année bissextile de 366 jours (le mois de février compte alors 29 jours).

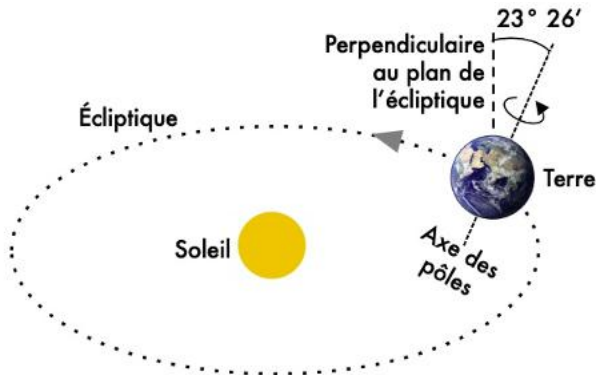


Révolution de la Terre autour du Soleil (la vue est en perspective, et l'ellipse apparaît donc plus « aplatie » qu'elle ne l'est en réalité).

Rotation de la Terre sur elle-même

La Terre effectue par ailleurs une rotation sur elle-même en 1 jour (créant la succession des jours et des nuits) également dans le sens antihoraire, ce qui fait... que le Soleil se lève à l'est.

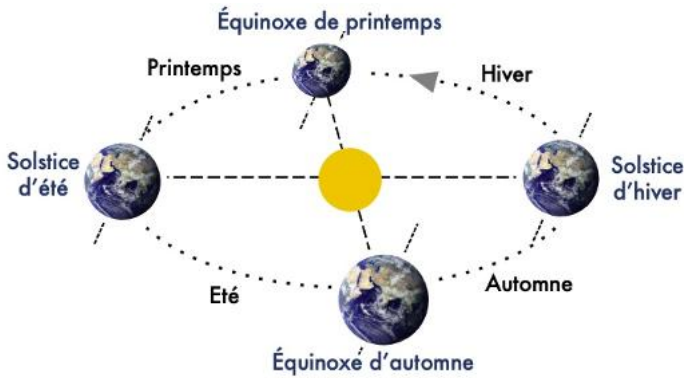
Cette rotation (à plus de 460 m/s au niveau de l'équateur) se fait autour d'un axe passant par les pôles, « axe de rotation terrestre » ou « axe des pôles », incliné d'environ $23^{\circ} 26'$ par rapport à une perpendiculaire au plan de l'écliptique, inclinaison appelée « obliquité ».



Rotation de la Terre et obliquité.

Dans sa révolution autour du Soleil, la Terre occupe 4 positions particulières - les 2 solstices et les 2 équinoxes - qui marquent le passage d'une saison à l'autre dans chaque hémisphère.

On constate en particulier sur le schéma ci-après que si, dans l'hémisphère nord, la période printemps - été est plus chaude que la période automne - hiver, cela est dû à l'obliquité de la Terre. Autour du solstice d'été, l'hémisphère nord est en effet incliné vers le Soleil et reçoit donc un rayonnement plus fort (ratons moins rasants et plus longue durée d'ensoleillement). Et c'est bien sûr réciproquement autour du solstice d'hiver qu'il fait le plus chaud dans l'hémisphère sud !



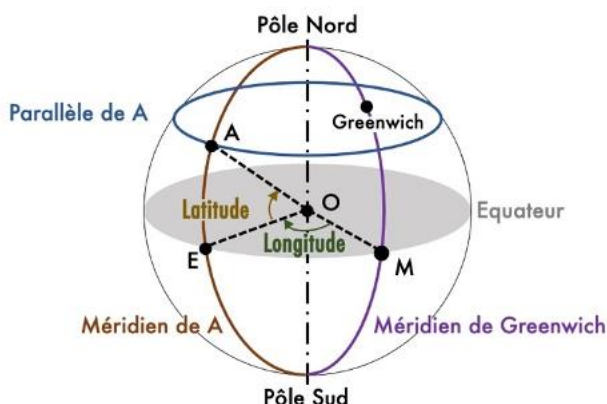
Positions particulières de la Terre sur son orbite : les saisons sont indiquées ici pour l'hémisphère nord ; pour l'hémisphère sud, il convient de remplacer printemps par automne, été par hiver, automne par printemps et hiver par été, les solstices et équinoxes étant également logiquement inversés d'un hémisphère à l'autre.

Un dernier point : c'est bien entendu pour représenter l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre par rapport à son plan orbital, c'est-à-dire l'obliquité de la Terre, que les globes terrestres du commerce sont inclinés d'un angle de $23^{\circ} 26'$!



Globe du commerce.

Coordonnées d'un lieu



Sur ce schéma représentant le globe terrestre (de centre O), assimilé ici à une sphère, on considère le point A, un lieu quelconque à la surface terrestre.

Le « méridien de A » est le demi-cercle passant par les pôles et par A, coupant l'équateur en E (l'équateur délimite deux hémisphères, l'hémisphère nord et l'hémisphère sud). De même le méridien de Greenwich est le demi-cercle passant par l'Observatoire de Greenwich (dans la banlieue de Londres), coupant l'équateur en M. Le « parallèle de A » est le cercle parallèle à l'équateur et passant par A.

La latitude du point A est l'angle entre OE et OA (la direction de OA détermine la verticale du lieu et le plan horizontal en A est perpendiculaire à OA). La latitude est donc comprise entre 0° et 90° et on ajoute à sa valeur la mention N ou S selon que le lieu est situé dans l'hémisphère nord ou sud. Alternativement on n'utilise pas cette mention mais on met le signe « - » devant les latitudes des lieux de l'hémisphère sud.

La longitude est l'angle entre OM et OE. Elle est par convention comprise entre 0° et 180° et on ajoute à sa valeur la mention E ou O selon que le lieu est situé à l'est ou à l'ouest du méridien de Greenwich.

Tout lieu A du globe peut donc se repérer de façon unique par deux coordonnées, sa longitude et sa latitude, que l'on appelle communément aujourd'hui les « coordonnées GPS » et qui sont, nous le verrons plus loin, des données essentielles dans la conception d'un cadran solaire et, pour la longitude, dans la conversion entre « heure solaire » et « heure légale » (celle de nos montres et téléphones portables).

Pour être rigoureux, on devrait bien entendu ajouter une troisième donnée : la hauteur du lieu !

La Tour Eiffel à Paris a par exemple pour latitude $48^\circ 51' 30''$ N et pour longitude $2^\circ 17' 40''$ E que l'on écrit encore (en degrés décimaux) 48,8583 N et 2,2946 E, et son pied est à environ 35 m au-dessus du niveau de la mer.

Si vous consultez l'application ad hoc de votre téléphone mobile ou un « GPS portable » (pour la randonnée par exemple) vous aurez rapidement les coordonnées du lieu où vous vous trouvez.

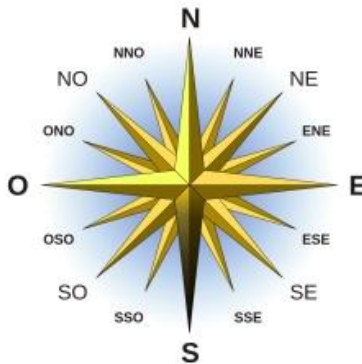
Il existe par ailleurs plusieurs sites web donnant les coordonnées GPS d'un lieu défini par une adresse ou pointé sur une carte interactive comme <https://www.coordonnees-gps.fr/> ou encore <https://www.google.fr/maps/>.



Une bouée, surmontée d'une station météorologique, est installée en mer au croisement du méridien de Greenwich et de l'équateur et a donc pour coordonnées géographiques (0°, 0°).

Elle matérialise l'emplacement de l'île imaginaire de Null Island...

(Document Wikimedia Commons - Licence CC BY-SA 4.0)



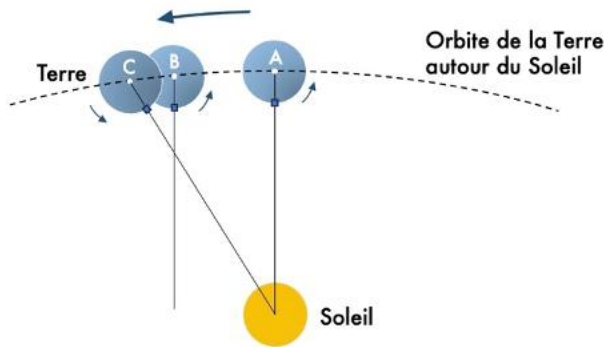
Rose des vents à 16 branches.

(Document Wikimedia Commons - Auteur : Andrew pmk / Flappiefh - Fichier : Compass Rose French North.svg - Licence CC BY-SA 3.0)

Jour solaire et jour moyen

La durée du « jour solaire moyen », c'est-à-dire la durée séparant « en moyenne » (voir page suivante l'explication de « en moyenne ») deux passages successifs du Soleil au méridien d'un lieu (lorsque le Soleil est au plus haut dans le ciel, « plein sud » dans l'hémisphère nord), est, par convention, de 24 h.

Mais la Terre tourne sur elle-même en seulement 23 h 56 min 4 s (que l'on appelle la durée d'un « jour sidéral ») car, pendant cette journée, elle poursuit sa trajectoire autour du Soleil.



Jour sidéral et jour solaire « moyen » : entre A et B, la Terre effectue une rotation sur elle-même, un jour sidéral s'est écoulé. Mais il faut attendre (en moyenne) 3 min 56 s pour qu'un jour solaire se soit écoulé, survenant lorsque la Terre est en C.

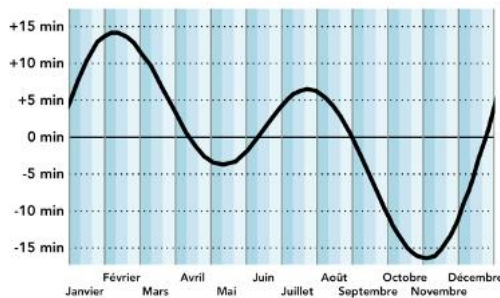
À noter par ailleurs qu'il faudra attendre la fin du Moyen Âge pour que les graduations des cadrans solaires soient fondées sur des heures de durée égale. Depuis l'Antiquité, les cadrans indiquaient des heures inégales, dites « temporaires », les durées du jour et de la nuit étaient arbitrairement divisées en 12 parts égales quel que soit le jour de l'année. D'autre part, la notion de jour sidéral ne sera pas utile dans la plupart des cadrans solaires sauf pour... les (rares) cadrans à heures sidérales.

Équation du temps

Des jours solaires de 24 h donc mais pourquoi « en moyenne » ?

Le fait que l'orbite de la Terre autour du Soleil soit elliptique et que l'axe de rotation terrestre soit incliné par rapport à l'écliptique entraînent en fait des variations de la durée de deux passages successifs du Soleil au même méridien (définissant un « jour solaire vrai »). L'accumulation de ces variations se traduit par un écart allant environ de + 15 min à - 16 min au cours de l'année.

Cet écart entre la durée d'un « jour solaire moyen » (24 h) et celle d'un « jour solaire vrai » est appelé « équation du temps ». L'évolution de l'équation du temps au cours de l'année est représentée par la courbe ci-dessous, traduite fréquemment sur un cadran solaire par une courbe en huit ou « analemme » au niveau de midi solaire (voire au niveau de chaque ligne horaire). Nous reviendrons sur ces courbes en huit dans le chapitre suivant.



On constate par exemple sur cette courbe que, début janvier, la durée de passage du Soleil au même méridien ne sera pas de 24 h mais de 24 h 5 min, alors que début novembre, le « jour solaire vrai » sera de 24 h - 16 min = 23 h 44 min.

On trouvera facilement sur Internet (par exemple à la séquence 5 du MOOC cadrans solaires) des valeurs précises de cette équation du temps au niveau journalier.

Fuseaux horaires et UTC

L'heure locale la plus logique en un lieu donné est l'heure solaire vraie : il est midi lorsqu'il est « midi au soleil » (le Soleil est alors plein sud dans l'hémisphère nord). Il en a été longtemps ainsi, l'heure à Brest n'était alors pas la même qu'à Nice par exemple.

Mais l'avènement de modes rapides de transport et de communication (le train en premier lieu) et l'accélération des échanges commerciaux ont conduit les États à harmoniser l'heure sur l'ensemble de leur territoire (ce fut le cas en 1891 pour la France), à convenir de fuseaux horaires puis (dans la seconde moitié du ^{xx}e siècle) d'un « temps universel coordonné » (ou UTC) au niveau international.

L'heure « légale », celle de nos montres et téléphones portables, est par convention la même dans la portion du globe couverte par un fuseau horaire donné.



Carte mondiale des fuseaux horaires.

Dans cette représentation de notre planète, les fuseaux horaires apparaissent comme des bandes parallèles ; ils sont en réalité enflés à l'équateur et effilés aux pôles.

(Document Wikimedia Commons - Domaine public)

Chacun des 24 fuseaux horaires couvre 15° de longitude. Le « méridien d'origine » ou « premier méridien » (*prime meridian* en anglais) passe par Greenwich (Londres) et l'heure locale dans ce fuseau est par convention UTC $\pm$ 00:00 (ou UTC).

On trouve :

- Vers l'est, les fuseaux +1 (l'heure y est égale à UTC+1 ; il est centré sur le méridien 15° E), +2, +3, etc.
- Vers l'ouest, les fuseaux -1, -2 (l'heure y est égale à UTC-2 ; il est centré sur le méridien 30° O), -3, etc.

Si l'on observe la carte précédente on constate que cette répartition en 24 fuseaux horaires est en fait, pour des raisons géographiques, économiques, géopolitiques, etc., loin d'être simple et harmonieuse...

Par exemple :

- La France a pour méridien de référence celui à l'est du méridien de Greenwich (UTC+1) alors que le méridien de Greenwich traverse son territoire... L'heure UTC+1 a été en effet choisie par de nombreux pays d'Europe et est aussi appelée « heure normale d'Europe centrale » (CET en anglais).
- Les États-Unis d'Amérique se réfèrent, compte tenu de l'étendue de leur territoire, à 4 fuseaux (de UTC-5 à UTC-8) qui suivent (logiquement) la limite des États et sont donc loin d'être réguliers...
- La Chine, au territoire pourtant étendu sur 5 fuseaux, n'a choisi qu'un seul fuseau de référence (UTC+8). Lorsque le Soleil se lève à Pékin, à la même heure, il fait encore bien nuit à la frontière avec le Tadjikistan...
- D'autres pays ont choisi des décalages horaires d'une demi-heure, voire d'un quart d'heure : c'est le cas notamment de l'Inde (UTC+5:30), de l'Australie centrale (UTC+10:30), ou du Népal (UTC+5:45).

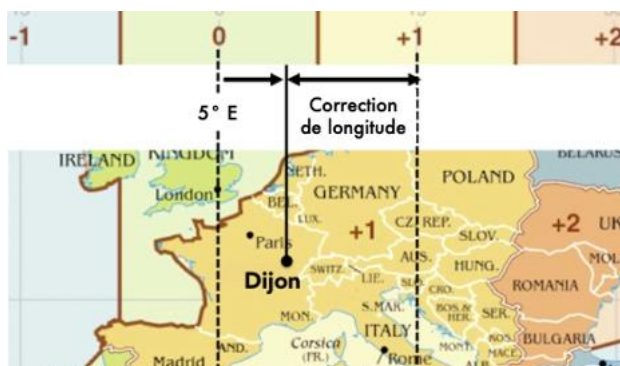
De l'heure solaire à l'heure légale

Considérant ce qui a été présenté aux paragraphes précédents, comment passer de l'heure solaire vraie, traditionnellement indiquée par un cadran solaire, à l'heure légale ?

Nous avons déjà établi que, pour obtenir un « jour solaire vrai » (celui que mesure un cadran solaire), il convenait de corriger le « jour solaire moyen » (de 24 h) par la valeur de l'équation du temps.

Nous venons également de voir que l'heure légale (harmonisée dans un pays donné) faisait référence à un fuseau horaire. Donc si le cadran solaire n'est pas situé sur le méridien de référence, il faudra également effectuer une « correction de longitude ».

En effet, considérons un cadran solaire situé à Dijon, à 5° E environ, soit à 10° d'écart de longitude à l'ouest du méridien de référence 15° E (UTC +1). Le Soleil ne sera pas encore au plus haut dans le ciel à Dijon lorsqu'il sera midi solaire au méridien 15° E : il ne le sera que 40 min plus tard puisque 1 h correspond à 15° de longitude, les 24 fuseaux horaires (24 h) couvrant en effet la circonférence de la Terre soit 360°.



Exemple de correction de longitude.

Il faut donc ajouter 40 min à l'heure lue sur le cadran. On retranchera de même cette correction de longitude si le cadran est situé à l'est du méridien de référence du fuseau considéré.

Enfin, il faut tenir compte de l'heure d'été éventuelle, même si de plus en plus de pays (pas encore ceux de l'Union européenne) renoncent aujourd'hui à ce changement d'heure, les économies d'énergie liées à cette disposition ne se révélant finalement pas suffisantes au regard des désagréments engendrés...

En résumé, pour passer de l'heure solaire, indiquée traditionnellement par un cadran solaire, à l'heure de nos montres, il faut effectuer les opérations représentées par la formule ci-après, que chaque gnomoniste, même débutant, doit connaître... et savoir retrouver !

$$TL = TS + EdT + CL + 1h \text{ (si « heure d'été »)}$$

avec

TL : heure légale (celle de nos montres et téléphones portables)

TS : heure solaire vraie (lue sur le cadran)

EdT : valeur de l'équation du temps au jour considéré

CL : correction de longitude par rapport au méridien de
référence

Une formule à connaître et à savoir retrouver...

On notera que dans de nombreux ouvrages et sites web français consacrés aux cadrans solaires, on trouve une formule « traditionnelle » ajoutant 1 h à la formule ci-dessus, supposant une correction de longitude par rapport au méridien de Greenwich, et non, comme la formule ci-dessus, au méridien du fuseau horaire auquel se réfère la France métropolitaine.

La formule donnée ici est donc plus explicite, et peut être utilisée non seulement pour des cadrans solaires situés en France métropolitaine, mais également en tout point du globe.

On peut d'autre part préciser qu'un cadran solaire indique traditionnellement mais pas nécessairement l'heure solaire vraie, appelée aussi temps vrai local (ou TVL).

Il est en effet assez courant de nos jours (nous donnerons des exemples dans le prochain chapitre), de rencontrer des cadrans solaires de plusieurs types :

- indiquant le temps moyen (par le biais d'une ou plusieurs courbes en huit),
- et/ou tenant compte dans leur tracé de la correction de longitude,
- et/ou comportant une double indication des heures (l'une pour la période « heure d'été », l'autre pour le reste de l'année).

Il est donc possible de réaliser des cadrans solaires indiquant, avec une très bonne précision, de l'ordre de quelques minutes voire moins, l'heure de nos montres et téléphones portables...

Alors, quelle heure doit indiquer le prochain cadran solaire que vous allez concevoir ?

Il n'y a bien entendu pas de bonne ou de mauvaise réponse à cette question : à chacun de choisir l'heure qui lui apparaîtra la plus adaptée à son projet !

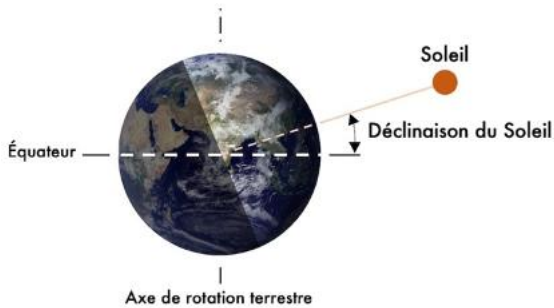
Cependant, si votre cadran est destiné à un espace public et si vous ne choisissez pas l'heure légale, n'oubliez pas de faire figurer près du cadran un panneau explicatif sur la correspondance heure solaire - heure légale, évitant qu'une personne passant près du cadran ne dise : « Mais ce cadran solaire n'est pas bien réglé ou a été mal conçu : il indique une heure erronée »...

Déclinaison du Soleil

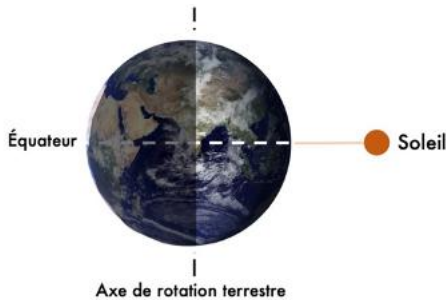
Concentrons-nous maintenant sur le mouvement apparent du Soleil dans le ciel.

Souvenons-nous tout d'abord du schéma représentant la Terre, dans sa révolution autour du Soleil et... redressons la Terre afin que son axe de rotation soit vertical.

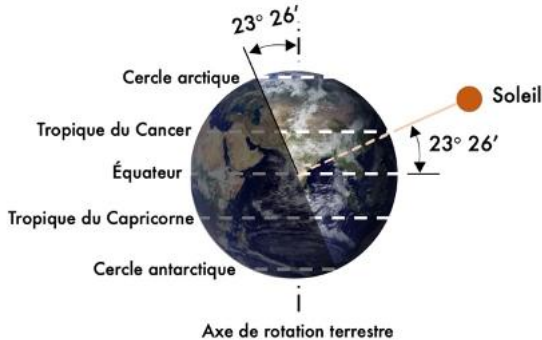
Nous obtenons le schéma ci-après dans lequel le mouvement apparent du Soleil est un cercle autour de l'axe de rotation terrestre, défini par l'angle que fait la direction du Soleil avec le plan de l'équateur, angle appelé déclinaison du Soleil, que l'on peut considérer comme constant au cours d'une journée.



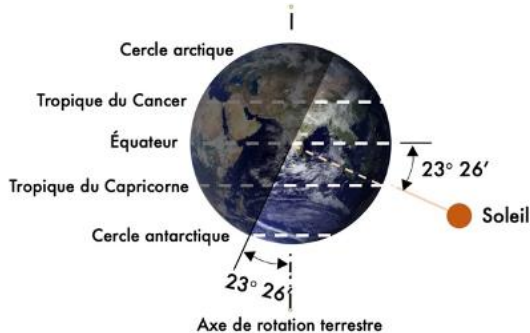
Aux équinoxes (schéma ci-dessous), la déclinaison du Soleil est nulle : on comprend aisément que, partout sur Terre, la durée du jour est alors égale à celle de la nuit.



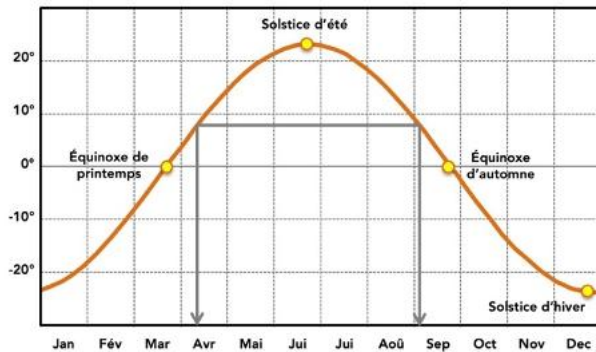
Au solstice d'été, la déclinaison du Soleil est égale à $23^{\circ} 26'$. C'est le jour 24 h / 24 h au-delà du cercle arctique mais « la nuit de 24 h » au-delà du cercle antarctique, et toute personne située sur le tropique du Cancer verra le Soleil à la verticale à midi solaire.



Symétriquement, au solstice d'hiver, quand la déclinaison du Soleil est égale à $- 23^{\circ} 26'$, c'est le jour 24 h / 24 h au-delà du cercle antarctique mais « la nuit de 24 h » au-delà du cercle arctique, et toute personne située sur le tropique du Capricorne verra le Soleil à sa verticale à midi solaire.



La déclinaison du Soleil varie ainsi de $- 23^{\circ} 26'$ au solstice d'hiver à $+ 23^{\circ} 26'$ au solstice d'été, en passant par des valeurs nulles aux équinoxes. On trouvera facilement sur Internet (par exemple à la séquence 5 du MOOC cadrans solaires) des valeurs précises de la déclinaison du Soleil au niveau journalier.



Variation de la déclinaison du Soleil au cours de l'année. Ce schéma met en évidence que la déclinaison du Soleil a la même valeur deux jours dans l'année (sauf aux solstices !), propriété que l'on retrouvera dans le tracé de la plupart des cadrans solaires, que nous aborderons au chapitre suivant.

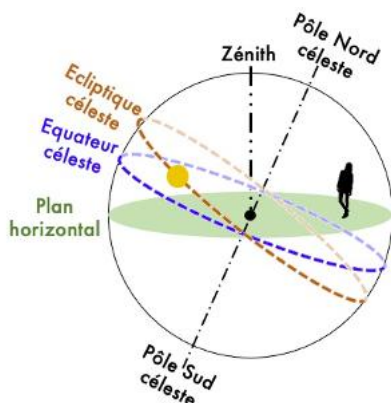
Quelques mots sur l'étymologie des mots solstice et équinoxe pour clore ce paragraphe :

- Solstice vient des mots latins *sol*, « soleil », et *sistere*, « s'arrêter » : aux solstices, la hauteur du Soleil dans le ciel d'un jour à l'autre, à une heure donnée (à midi par exemple), cesse en effet de croître (au solstice d'été) ou de décroître (au solstice d'hiver).
- Équinoxe vient des mots latins *æquus* (égal) et *nox* (nuit) : aux équinoxes, la durée du jour est égale à celle de la nuit en tout lieu de la Terre.

La sphère céleste locale

Abordons maintenant une représentation très utilisée dans le domaine des cadrans solaires : celle de la « sphère céleste locale ».

En un lieu donné, un observateur a son champ de vision défini par le plan de l'horizon (plan horizontal) et une « voûte céleste ». Comme dans un planétarium, il perçoit les astres (dont le Soleil) évoluant sur cette voûte imaginaire.



On peut facilement concevoir que cette voûte est la moitié d'une « sphère céleste locale ». La verticale du lieu où se trouve l'observateur croise la sphère céleste locale en un point appelé zénith. Enfin, sur cette sphère, peuvent figurer l'axe des pôles ainsi que « l'écliptique céleste » et « l'équateur céleste ».

Notons que ce concept géocentrique de sphère céleste locale a conduit, dès l'Antiquité, à construire des « sphères armillaires », instruments permettant de représenter le mouvement apparent du Soleil et d'autres corps célestes autour de la Terre, et utilisés encore de nos jours, à des fins didactiques notamment.

*Sphère armillaire extraite de
l'Encyclopédie de Diderot (1767).
(Document Wikimedia Commons - Domaine public)*



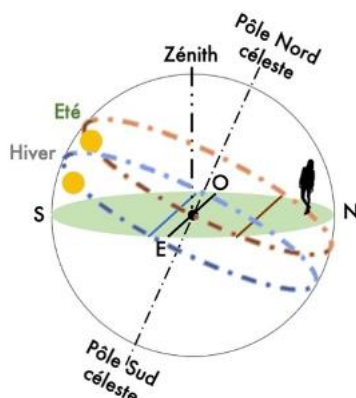
Azimut et hauteur du Soleil

Dans la représentation précédente, nous retrouvons des angles que nous avons déjà rencontrés :

- L'angle entre les plans de l'écliptique et de l'équateur célestes est égal à l'obliquité de la Terre.
- L'angle entre le plan de l'équateur céleste et la droite passant par le Soleil et le centre de la sphère céleste est égal à la déclinaison du Soleil.
- L'angle entre le plan de l'équateur céleste et la verticale du lieu, ainsi que celui entre l'axe des pôles et le plan de l'horizon sont égaux à la latitude du lieu.

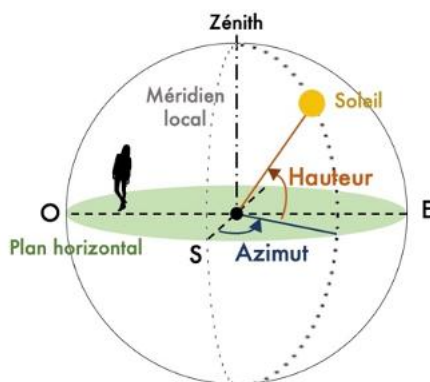
Notons également que dans cette représentation, le Soleil apparaît comme fixe devant des constellations, différentes au cours de l'année ; les 12 signes du zodiaque correspondent aux constellations qui étaient, plusieurs siècles avant notre ère, la plus proche du Soleil sur la sphère céleste à une période donnée.

Le mouvement apparent du Soleil dans une journée se fait selon un cercle de la sphère céleste locale et l'on comprend mieux, par le schéma ci-dessous, que dans l'hémisphère nord, le Soleil, en été, se lèvera au NE et se couchera au NO, alors qu'en hiver ce sera il se lèvera au SE et se couchera au SO.



Considérons maintenant la position du Soleil dans la sphère céleste à un instant donné. Cette position peut être définie par deux angles, l'azimut du Soleil et sa hauteur :

- L'azimut est l'angle que fait le plan vertical contenant le méridien du lieu et le plan vertical passant par le centre de la sphère céleste et le Soleil (il passe également par le zénith). L'azimut varie de 0° à -180° vers l'est et de 0° à $+180^\circ$ vers l'ouest.
- La hauteur est l'angle que fait, avec le plan horizontal, la droite passant par le centre de la sphère céleste et le Soleil. Il varie de -90° à $+90^\circ$ (de 0° à $+90^\circ$ quand le Soleil est visible).



Il existe des formules, que l'on peut assez facilement démontrer, donnant les valeurs de l'azimut A et de la hauteur h du Soleil en fonction du jour (défini par la valeur de la déclinaison du Soleil) et de l'heure solaire (définie par l'angle horaire que nous aborderons au paragraphe suivant) :

$$A = \arctan (\sin H / (\sin \varphi \cos H - \cos \varphi \tan \delta))$$

$$h = \arcsin (\sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos H)$$

δ : déclinaison du Soleil, φ : latitude du lieu, H : angle horaire du Soleil

On retiendra en particulier de ces formules que la hauteur et l'azimut dépendent logiquement du jour de l'année et de l'heure de la journée mais, tout aussi logiquement, de la latitude du lieu.

Dès lors, si l'on connaît, pour un jour de l'année et une latitude donnés, la valeur de l'azimut du Soleil ou de sa hauteur, on pourra en déduire l'heure solaire (respectivement avec un « cadran d'azimut » et un « cadran de hauteur »).

À partir de ces formules on peut bien entendu tracer des courbes montrant l'évolution de la hauteur et de l'azimut, pour une latitude donnée, tout au long de l'année.

Mais des outils très simples d'utilisation tel Azihaut permettent de les tracer instantanément. Sur un tel « diagramme solaire », on constate en particulier qu'au cours d'une journée l'azimut et la hauteur du Soleil évoluent selon une courbe logiquement symétrique par rapport à 12 h solaire, et que la hauteur du Soleil varie peu autour de midi solaire (en conséquence un cadran de hauteur ne sera pas très précis autour de 12 h).

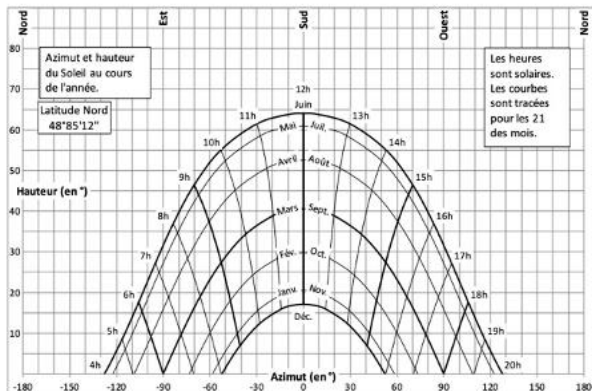
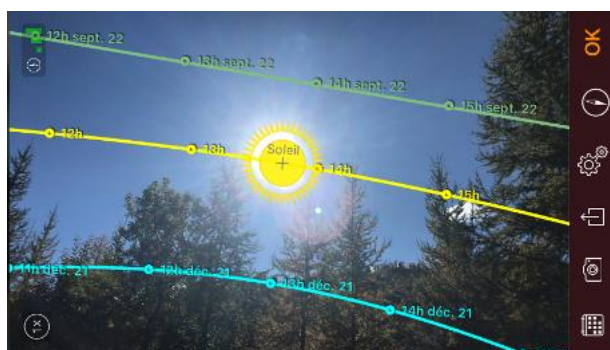


Diagramme solaire obtenu grâce à l'outil Excel Azihaut de Francis Reymann présenté dans la rubrique Actualités du n°17 du magazine Cadrans solaires pour tous (et téléchargeable depuis cette rubrique).

En outre, et tout aussi logiquement, du solstice d'été au solstice d'hiver, la hauteur du Soleil suit une courbe de moins en moins haute et l'amplitude en azimut diminue.

Des applications sur téléphone mobile (Sun Seeker par exemple) permettent également d'accéder instantanément, pour un lieu et un jour donnés, à une table donnant les valeurs de l'azimut et de la hauteur (appelée aussi « élévation ») du Soleil, 15 min par 15 min.

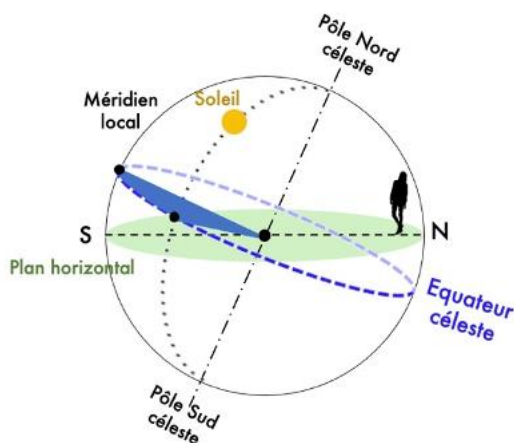


Sun Seeker : une application iOS et Android bien utile, donnant les valeurs de la hauteur et de l'azimut du Soleil à tout moment et permettant également de visualiser la course du Soleil tout au long de l'année (elle apparaît sur votre téléphone ou votre tablette superposée au paysage ciblé).

Angle horaire du Soleil

Outre l'azimut et la hauteur, un autre angle caractérisant la position du Soleil à un instant donné sera souvent considéré dans l'étude des cadrans solaires : l'angle horaire du Soleil.

C'est l'angle, mesuré sur l'équateur céleste, entre le plan défini par le Soleil et l'axe des pôles et le plan méridien local, tel qu'illustré ci-dessous,

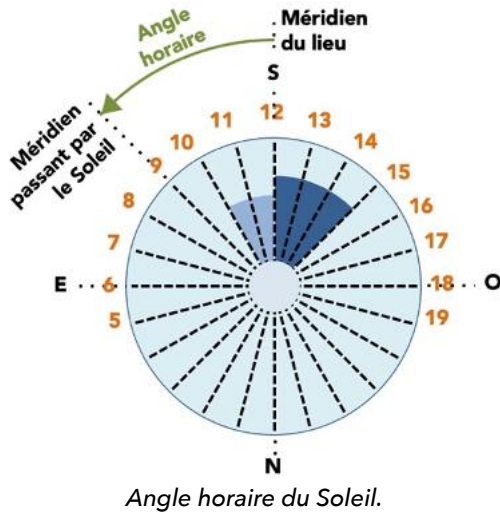


Angle horaire du Soleil.

Mais ce schéma est peut-être difficile à bien interpréter...

Nous allons donc choisir un autre point de vue qui permettra de comprendre plus facilement pourquoi l'angle horaire est si utile...

Plaçons-nous en effet au pôle Nord céleste et regardons vers le pôle Sud céleste. Traçons 24 demi-cercles passant par les pôles et régulièrement espacés de 15° , ce qui, in fine, revient à dessiner les fuseaux horaires sur la sphère céleste locale, ces demi-cercles apparaissant sur l'illustration ci-après comme des lignes pointillées.



L'interprétation de l'angle horaire est dès lors plus facile et son utilité plus évidente. Cet angle, compté à partir du méridien local, varie de 0° à -180° vers l'est et de 0° à $+180^\circ$ vers l'ouest, et peut facilement se traduire en heure solaire : à 10 h (heure solaire) par exemple, l'angle horaire du Soleil sera de -30° , alors qu'à 15 h il sera de $+45^\circ$, à 18 h de $+90^\circ$, etc.

Conservons bien à l'esprit cette sphère céleste traversée par des fuseaux horaires qui correspondent aux heures solaires. Nous nous y référerons dans le chapitre suivant.

Mais avant de clore le présent chapitre théorique, rappelons quelques formules, auxquelles chacun pourra, un jour ou l'autre, avoir recours.

AZIMUT DU SOLEIL AU LEVER OU AU COUCHER

$$A = \arccos(-\sin \delta / \cos \varphi)$$

DURÉE DU JOUR

$$DJ = 2 \arccos(-\tan \delta \tan \varphi)$$

HEURES DU LEVER ET DU COUCHER DU SOLEIL

$$\text{Heure du lever} : 12 \text{ h} - DJ/2 \quad \text{Heure du coucher} : 12 \text{ h} + DJ/2$$

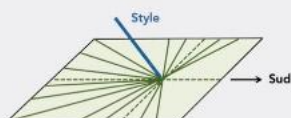
δ : déclinaison du Soleil, φ : latitude du lieu, DJ : durée du jour

COMPRENDRE ET REALISER DES CADRANS SOLAIRES

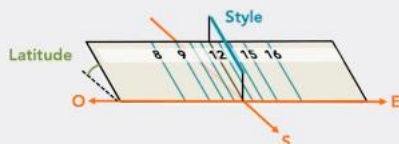
Cadran vertical



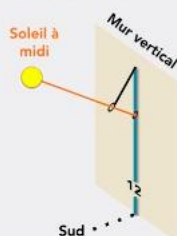
Cadran horizontal



Cadran polaire



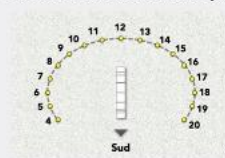
Méridienne



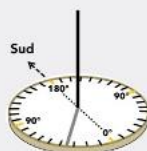
Cadran équatorial



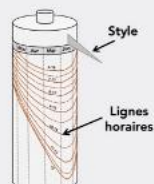
Cadran analemmatique



Compas solaire



Cadran de berger



Comprendre un cadran solaire c'est, nous l'avons dit en introduction de cet ouvrage, comprendre comment, de la position du Soleil dans le ciel, à tout moment, peut être déduite l'heure solaire, voire l'heure « légale », celle de nos montres et de nos téléphones portables.

C'est donc mieux appréhender la relation de notre planète à son étoile, avoir suffisamment assimilé les mouvements relatifs de la Terre et du Soleil tels qu'abordés dans le chapitre précédent.

C'est également devenir capable de reconnaître tout type de cadran solaire et d'expliquer, simplement, son fonctionnement.

Ce sont, par ailleurs, des connaissances qui peuvent être appliquées à la conception ou à la rénovation de bâtiments ou de logements, afin qu'ils utilisent au mieux la course du Soleil au fil des saisons, apportant alors plus de lumière ou d'ombre, plus de confort en été et en hiver.

Comprendre, oui, mais pourquoi réaliser un cadran solaire ?

Tout d'abord pour mettre en pratique les connaissances acquises ayant permis de comprendre un cadran solaire, une mise en pratique qui complétera ces connaissances par les solutions trouvées aux problèmes éventuels rencontrés lors de la réalisation du cadran.

Et puis construire seulement par plaisir de pouvoir partager ses connaissances, d'expliquer à d'autres, de façon très concrète, les mouvements relatifs de la Terre et du Soleil.

Alors, que vous envisagiez la construction d'un cadran très simple ou plus complexe, portable ou mural, ou destiné au domaine public, n'hésitez pas ! Ce chapitre devrait vous donner toutes les clés pour réussir votre projet.

Méridiennes

Les méridiennes sont des cadrans solaires bien particuliers puisqu'elles ne sont a priori destinées qu'à indiquer une seule heure : midi solaire, c'est-à-dire le « vrai » milieu de la journée, lorsque le Soleil est au plus haut dans le ciel (plein sud dans l'hémisphère nord), autrement dit dans le plan méridien local.

Elles ont servi pendant longtemps, installées sur des édifices publics, à régler sa montre, à l'époque où l'heure solaire locale était encore en vigueur et où les mécanismes d'horlogerie étaient moins réguliers qu'aujourd'hui...

*Planche extraite de l'ouvrage de
Dom Bédos de Celles paru en 1760,
« La Gnomonique pratique ou l'art de tracer les
cadrans », montrant des hommes attendant
midi solaire au pied d'une méridienne afin de
régler leur montre à gousset.
(Document Wikimedia Commons - Domaine public)*

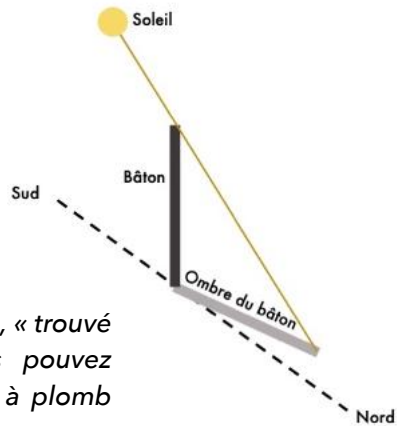


Une méridienne peut être réalisée en quelques minutes !

Vous pouvez par exemple fixer un bâton (un mât, un poteau...) verticalement sur un sol horizontal dans votre jardin, sur votre balcon, dans une cour d'école, etc., puis guetter l'approche de 12 h solaire. Pour ce faire, vous pourrez utiliser la formule de conversion heure légale - heure solaire donnée en page 27 ou plus simplement vous fier à l'une des nombreuses applications en ligne, telle <https://heuresolaire.com/>, qui, ayant géolocalisé votre téléphone portable ou votre ordinateur, donnent directement l'heure solaire locale.

Ainsi, en quelques instants, vous aurez repéré et pu matérialiser sur le sol la direction nord-sud indiquée par l'ombre du bâton à 12 h solaire ; c'est l'ombre du bâton sur cette ligne qui, tous les jours, vous indiquera bien entendu midi solaire.

Vous aurez ainsi, sans boussole, « trouvé le sud », exercice que vous pouvez réaliser également avec un fil à plomb plutôt qu'un bâton...



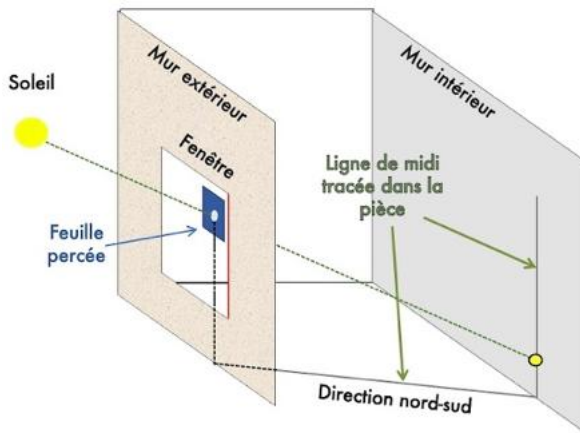
Et vous exploiterez à fond, si vous le souhaitez, les possibilités de ce simple bâton et le transformer en « bâton magique »* vous permettant de retrouver la longitude et la latitude du lieu, de célébrer des dates particulières, voire même d'indiquer l'heure solaire tout au long de la journée !

** Voir l'article « Un bâton magique » d'Yves Opizzo et de l'auteur paru dans le n° 5 du magazine Cadrans solaires pour tous.*

Vous pourrez bien sûr réaliser une telle méridienne sur un mur vertical, utilisant peut-être, comme sur l'illustration de la page précédente, un œilleton pour améliorer la précision de lecture, voire ajouter un analemme pour y lire l'heure moyenne.

Mais il y a bien d'autres manières de réaliser une méridienne et si vous résidez dans un appartement, vous pourrez par exemple coller simplement une feuille ou un carton percé d'un trou sur une fenêtre correctement exposée, imitant ainsi les nombreuses « méridiennes à chambre obscure » installées au cours des siècles dans des édifices religieux*.

** Voir par exemple l'article de l'auteur « Cadrans solaires à chambre obscure » paru dans le n°3 du magazine Cadrans solaires pour tous.*



À midi solaire, vous repèrerez la tache lumineuse sur le mur intérieur puis tracerez une ligne verticale à partir de ce point voire, selon la distance entre le mur extérieur et intérieur, une ligne horizontale afin de pouvoir bénéficier d'une indication du midi solaire tout au long de l'année.

Votre méridienne est prête, là aussi en seulement peu de temps, mais si vous voulez être encore plus « sobre » et rapide dans votre approche, utilisez l'ombre d'un montant vertical de votre fenêtre, celui représenté par un trait rouge sur le schéma ci-dessus par exemple !

*Méridienne monumentale inaugurée en 2026
sur le site de l'Université Paris Cité, esplanade
Pierre-Vidal Naquet, Paris 13^e.
(Photo Alix Loiseleur des Longchamps)*

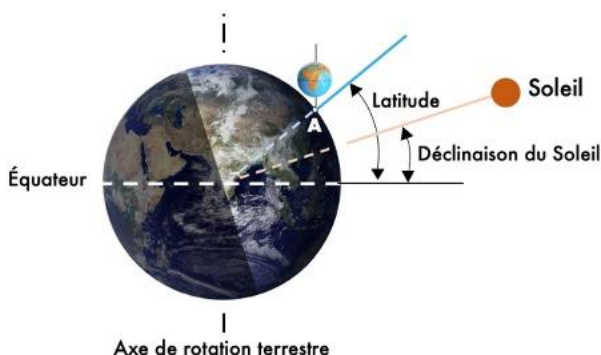


Cadrans globes

Considérons maintenant un cadran solaire tout aussi simple à comprendre et facile à réaliser qu'une méridienne : le « cadran globe ».

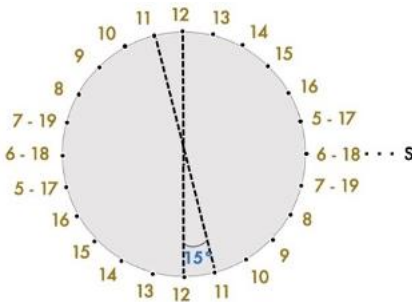
Revenons pour cela au schéma de la page 29 qui nous a servi à préciser le mouvement apparent du Soleil au cours d'une journée : un mouvement circulaire régulier autour de l'axe de rotation terrestre. Supposons (schéma ci-dessous) que vous soyez au point A, à une latitude donnée, et fixiez un globe terrestre du commerce (non représenté à l'échelle ici, bien entendu) avec son axe parallèle à l'axe de rotation terrestre, c'est-à-dire incliné sur le sol horizontal d'un angle égal à la latitude du lieu.

De plus, vous aurez pris soin de repérer votre position sur le petit globe et orienterez cette position vers le sud. Le Soleil semble alors tourner régulièrement autour du petit globe comme il semble tourner régulièrement autour de la Terre !



À midi solaire au lieu A (c'est le cas sur le schéma ci-dessus), le « terminateur », cercle séparant l'ombre et la lumière sur le petit globe, coupera l'équateur de ce globe en deux points opposés.

Vous repérerez alors ces deux points opposés, au niveau de l'équateur, par les indications 12 h. Et vous pourrez, sans attendre, tracer régulièrement toutes les heures autour de l'équateur du globe, et vous lirez logiquement l'heure solaire, toute l'année, selon la position du terminateur sur l'équateur du petit globe.



À gauche, une vue en coupe du petit globe au niveau de l'équateur, montrant les points qui serviront à indiquer, sur la surface du globe, les marques horaires, comme l'a fait (photo de droite) le gnomoniste Joël Robic (voir son site <http://www.cadrans-solaires.fr/>).

Si vous faites l'expérience, vous constaterez cependant que le terminateur n'est pas une ligne bien nette, permettant d'évaluer sa position sur l'équateur avec précision, mais plutôt une zone passant progressivement de la lumière à l'ombre. Et vous aurez peut-être la même idée que d'autres gnomonistes - cadraniers avant vous...

« Terre-cadran » de Jean-Michel Ansel au Parc Ludiver à La Hague. On fait tourner un volet mobile (peu épais) autour de l'axe de rotation du globe jusqu'à ce que son ombre sur le globe soit minimale. La position du Soleil est alors déterminée et l'heure peut être lue sur l'équateur du globe.

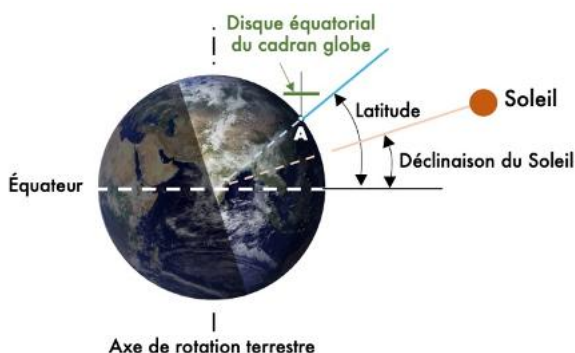
(Photo Jean-Michel Ansel)



Cadrans équatoriaux

Les cadrans équatoriaux, comme les méridiennes et les cadrans globes que nous venons de décrire, sont également des cadrans solaires simples à comprendre et faciles à réaliser. Ils sont très didactiques et, comme les cadrans globes, « universels », utilisables sous différentes latitudes : il suffit de modifier l'inclinaison du cadran par rapport au plan horizontal.

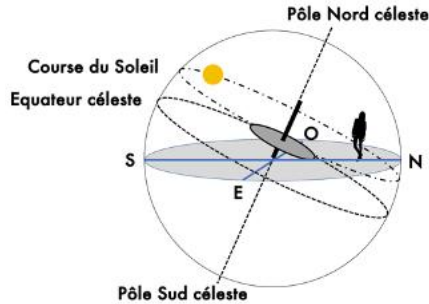
Reprenons le schéma de la page 44 utilisé pour présenter le concept de cadran globe et supposons que nous ne conservions du globe utilisé que son axe et son disque équatorial.



On déduit aisément de ce schéma que l'ombre de l'axe du cadran indiquera directement l'heure solaire sur le disque équatorial, sur lequel auront été tracées des marques horaires régulières, comme pour le cadran globe. Et il conviendra de tracer des marques horaires sur les 2 faces ! En effet le schéma met en évidence que lorsque la déclinaison du Soleil est négative, c'est la partie inférieure du disque équatorial qui est éclairée, alors que lorsque la déclinaison est positive, c'est la partie supérieure.

C'est pourquoi on définit traditionnellement un cadran équatorial comme un cadran solaire dont la table (souvent, mais pas nécessairement, circulaire) est parallèle à l'équateur terrestre et

comporte des lignes horaires tracées sur ses deux faces, et dont le style, perpendiculaire à la table, est donc incliné sur le plan horizontal d'un angle égal à la latitude du lieu. Un cadran équatorial se présente donc traditionnellement comme un disque gradué traversé par le style en son centre, comme... une toupie posée sur le sol.



Un cadran équatorial dans la sphère céleste locale...

Deux précisions importantes : dans l'hémisphère nord, sur le schéma ci-dessus, on notera que la partie supérieure du disque, utilisable de l'équinoxe de printemps à celui d'automne, est logiquement orientée vers le nord. Et on déduira aisément de ce schéma que les heures s'échelonnent en sens inverse sur les deux faces et que l'étendue des lignes horaires est différente sur chaque face, puisque la durée des jours est différente dans ces deux périodes de l'année.

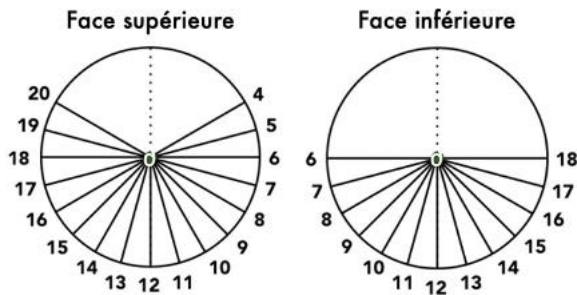
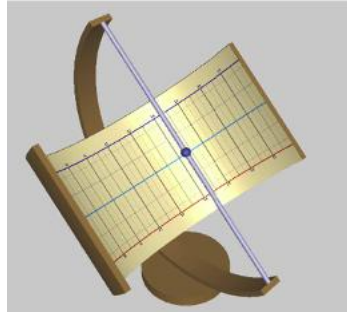


Schéma pour l'hémisphère nord.

Il existe également d'autres variantes de cadrans équatoriaux, notamment les « cadrans (équatoriaux) armillaires », dérivés des sphères armillaires que nous avons mentionnées en présentant la sphère céleste locale. L'heure se lit alors sur une bande graduée enroulée autour de l'équateur d'une sphère virtuelle dont le style constituerait l'axe de rotation.

*Illustration de cadran armillaire
conçu avec le logiciel Shadows Pro.
(<https://www.shadowspro.com>)*



On peut bien entendu réaliser de tels cadrans de différentes dimensions, fixes ou portatifs et on peut choisir, par défaut, de leur faire indiquer l'heure solaire vraie même si ce sont des cadrans qui peuvent facilement indiquer l'heure légale : il suffit en effet de faire légèrement tourner le disque (ou la bande graduée) afin de tenir compte de la correction de longitude, de l'équation du temps et de l'heure d'été le cas échéant.



Le Brihat Samrat Yantra, monumental cadran solaire équatorial (27 m de haut), situé à l'observatoire Yantra Mandir de Jaipur (Inde).

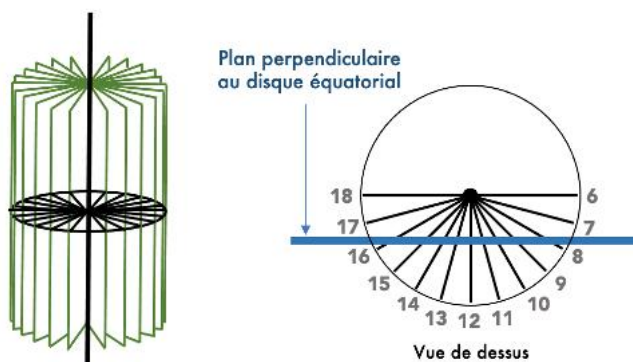
(Photo de l'auteur)

Cadrans polaires

Encore un cadran simple à comprendre et facile à réaliser, didactique et « universel » lui aussi, puisqu'il suffit de modifier son inclinaison pour le rendre utilisable à une autre latitude.

Reprenons le schéma de principe du cadran équatorial, un style perpendiculaire à un disque gradué régulièrement selon l'intersection de plans perpendiculaires au disque, le Soleil étant dans le même plan perpendiculaire, à une heure solaire donnée, tout au long de l'année (schéma de gauche sur l'illustration ci-dessous).

On devine assez aisément que si l'on traverse le disque équatorial (schéma de droite) par un plan qui lui est perpendiculaire, parallèle à la ligne 6 h - 18 h du cadran équatorial et ne passant pas par le centre du disque, les heures solaires que l'on pourra tracer sur ce plan seront des parallèles entre elles et au style, et symétriques par rapport à la ligne de midi solaire.



Supprimons maintenant le disque équatorial ; comme le style est toujours incliné sur le sol d'un angle égal à la latitude, nous obtenons alors... un cadran polaire !

Un cadran polaire est en effet défini comme un cadran dont le style et la table (plane) sont parallèles à l'axe de rotation terrestre. Les lignes horaires tracées sur la table sont parallèles entre elles et au style, symétriques par rapport à la ligne de midi solaire. On notera à ce stade que la largeur de la table n'est pas nécessairement très importante, puisque les lignes horaires sont rectilignes ; elles peuvent même se réduire à des points !

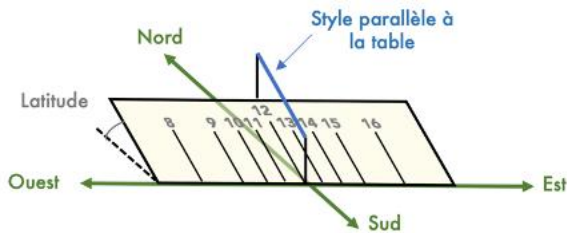
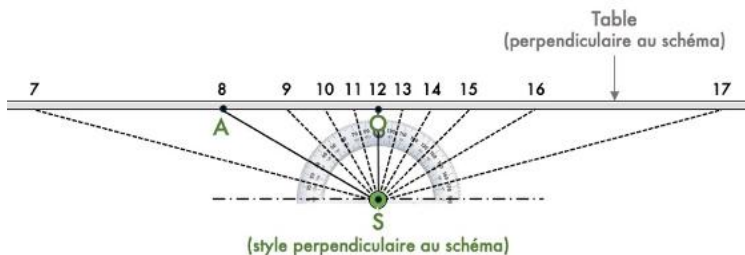


Schéma pour l'hémisphère nord

Le tracé des lignes horaires est logiquement très simple. Sur le schéma ci-dessous, dessiné dans un plan perpendiculaire à la table et au style, un simple rapporteur (de dimension adaptée à la taille du cadran polaire réalisé, afin que le tracé soit précis) suffit pour tracer toutes les lignes horaires (voire des lignes toutes les demi-heures ou même tous les quarts d'heure). Par exemple la ligne de 7 h sera tracée à 15° indiqués sur le rapporteur, celle de 8 h au point A à 30° , etc.

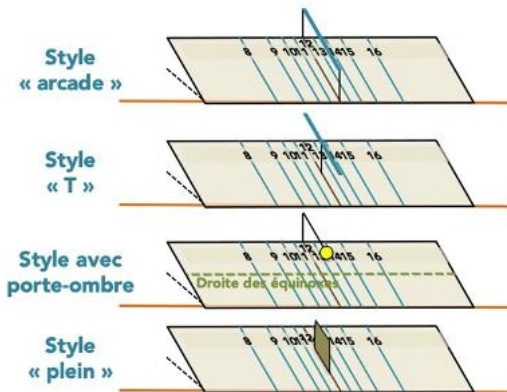
Et bien entendu, vous pourrez vous contenter de ne tracer que la moitié des lignes horaires, celles-ci étant symétriques par rapport à la ligne de midi.



On déduira bien entendu de ce tracé qu'en aucun cas les lignes horaires de 6 h et 18 h ne pourront être tracées sur un cadran polaire, et que la distance OS (du style à la table) ne devra pas être trop grande si l'on veut conserver le tracé d'une plage horaire suffisante sur une table pas trop longue...

Si vous aimez les mathématiques, vous n'aurez pas besoin d'un rapporteur puisque vous aurez remarqué que la distance OA est égale à $OS \cdot \tan AH$, AH étant l'angle horaire, égal (voir page 38) à -15° pour 11 h, 30° pour 14 h, etc.

Vous savez désormais à peu près tout pour réaliser un cadran polaire. Vous trouverez cependant dans la vidéo correspondante du MOOC cadrans solaires (séquence 4) d'autres exemples ou détails de réalisation d'un cadran polaire (types de styles, cadrans polaires à heure légale, etc.).



*Des styles différents de cadrans polaires...
(Illustration extraite de la vidéo citée ci-dessus)*



Cadran polaire de John Carmichael.

(Document Wikimedia Commons - Auteur : John Carmichael - Domaine public).

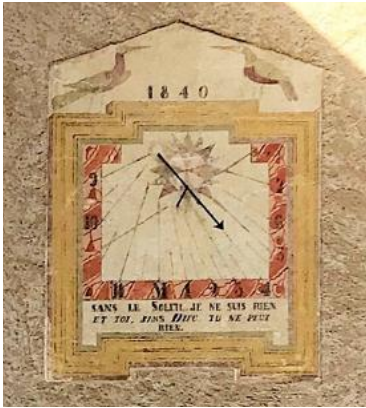


« Le plus grand cadran polaire d'Europe », conçu par José Luis Basanta Campos et réalisé en 2009 à Donramiro en Espagne.

*(Document Wikimedia Commons - Auteur : Relojes de sol en Galicia -
Licence CC BY 4.0)*

Cadrans horizontaux ou verticaux

Nous allons maintenant nous intéresser aux cadrans solaires les plus courants. Il s'agit des cadrans verticaux, anciens ou plus récents, qui ornent les façades des maisons, églises, et bâtiments publics, et des cadrans horizontaux, de grande taille dans des espaces publics ou plus petits, sur des colonnes de jardin.



Cadran vertical sur une maison de Saint-Véran (Hautes-Alpes). Il est signé Zarbula, cadranier piémontais qui a réalisé, dans la seconde moitié du XIX^e siècle, plus de 100 cadrans solaires dans les Alpes françaises et italiennes, dont de très nombreux peuvent encore être admirés aujourd'hui.

(Photo de l'auteur)



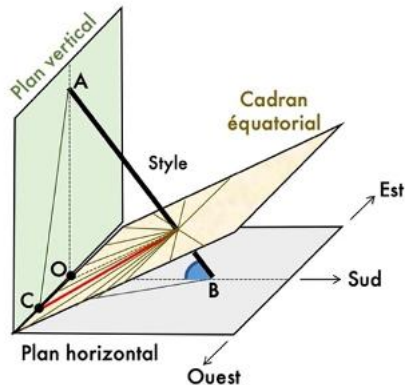
Cadran horizontal monumental, conçu par l'artiste MA2F et construit en 2015 près de Perpignan. Il a malheureusement été vandalisé fin 2018 et n'a pu encore, à ce jour, retrouver sa place dans le paysage.

(Photo MA2F)



Cadran posé sur une colonne d'un jardin de Varsovie. (Photo de l'auteur)

Le tracé des lignes horaires d'un cadran vertical ou horizontal est moins régulier et paraît plus complexe que celui des cadrans polaires et équatoriaux. On peut cependant mieux comprendre ce tracé en considérant le schéma ci-dessous, tracé pour l'hémisphère nord.



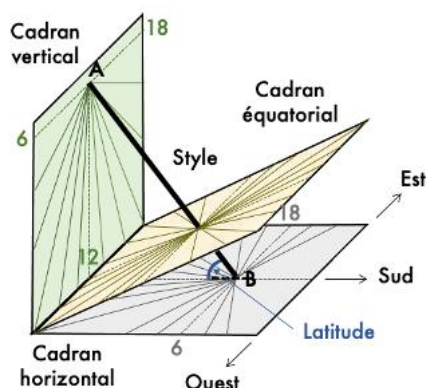
Sur ce schéma, un cadran équatorial à table rectangulaire a été posé sur le sol. La partie inférieure de son style fait (en B) un angle égal à la latitude φ du lieu avec le plan horizontal, alors que la partie supérieure du style s'appuie sur un mur vertical plein sud en A, où l'angle avec le mur est égal à $90^\circ - \varphi$, et ce logiquement si l'on considère le triangle rectangle AOB.

La ligne horaire de 10 h du cadran équatorial, représentée par un trait rouge, rencontre le plan vertical et le plan horizontal en C. Le Soleil sera à cette heure dans le plan ABC puisqu'il est (propriété du cadran équatorial) dans le plan formé par le style et la ligne de 10 h. Donc la ligne AC sera la ligne de 10 h du cadran vertical et la ligne BC la ligne de 10 h du cadran horizontal !

Si l'on répète cette opération pour toutes les heures solaires (au moins pour celles du matin ou de l'après-midi puisque le tracé est symétrique par rapport à la ligne de 12 h), on obtiendra donc un

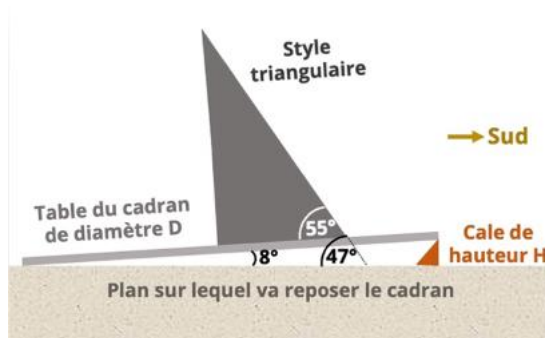
tracé des lignes horaires sur le cadran vertical et le cadran horizontal, avec les particularités suivantes :

- La ligne de 12 h est, pour le cadran vertical, la droite verticale passant par A et, pour le cadran horizontal, la droite passant par B et orientée nord-sud.
- La ligne de 6 h - 18 h est, pour le cadran vertical, la droite horizontale passant par A, et, pour le cadran horizontal, la droite passant par B et orientée est-ouest.



À ce stade, on pourra noter qu'un cadran vertical ne sera pas éclairé toute la journée en été puisque, dans l'hémisphère nord (voir p. 33), le Soleil se lèvera en été au NE et se couchera au NO, et n'éclairera donc pas le mur en début de matinée et en fin d'après-midi (un raisonnement similaire peut bien entendu être fait pour l'hémisphère sud).

Un cadran horizontal présente lui l'avantage, dans un environnement dégagé, d'indiquer l'heure solaire toute la journée en hivers et en été ! Autre avantage du cadran horizontal (s'il n'est pas monumental !) : son tracé reste identique et il suffit de l'incliner lorsqu'on transporte le cadran d'une latitude à l'autre, comme illustré sur le schéma page suivante.



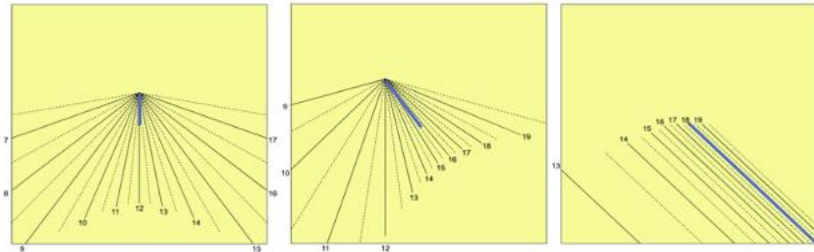
Un cadran horizontal a été initialement tracé pour une latitude de 55°C et doit être installé à la nouvelle latitude de 47°. Il suffit d'orienter le style afin qu'il fasse un angle de 47° avec l'horizontale, c'est-à-dire incliner la table de $(55^\circ - 47^\circ =) 8^\circ$, le tracé des lignes horaires n'étant pas modifié ! Et si vous n'avez pas oublié les bases de la trigonométrie, vous démontrerez aisément que $H_c = D \cdot \sin 8^\circ$.

La méthode décrite ci-dessus, utilisant un cadran équatorial d'appoint, a été utilisée pendant longtemps pour le tracé de cadrans verticaux ou horizontaux. Même si elle s'avère d'application délicate pour le tracé de lignes horaires éloignées de la « ligne méridienne », celle de midi solaire, elle a le mérite de ne recourir qu'à très peu de connaissances mathématiques, et n'utilise aucune formule !

Il existe bien entendu des formules trigonométriques permettant de tracer les lignes horaires de cadrans solaires verticaux ou horizontaux, dont certaines très simples, comme la formule ci-dessous, donnant, pour un cadran horizontal installé à une latitude φ , l'angle α entre une ligne horaire (définie par l'angle horaire H du Soleil) et la ligne de midi.

$$\tan \alpha = \tan H \cdot \sin \varphi$$

Mais revenons au cadran vertical... On conçoit que si le mur n'est pas « méridional » (plein sud, dans l'hémisphère nord) mais « déclinant », c'est-à-dire orienté vers l'est ou vers l'ouest (la déclinaison du mur est l'angle du mur avec le plan méridional), le tracé du cadran sera bien différent, et aura notamment perdu son tracé symétrique par rapport à la ligne de midi.



Évolution du tracé des lignes horaires d'un cadran vertical selon l'orientation du mur : plein sud à gauche, orienté sud-ouest au centre, plein ouest à droite.

(Captures d'écran de cadrans tracés à l'aide du logiciel Tracad)

Mais les choses peuvent se compliquer encore : le mur peut être incliné par rapport à la verticale... Comment tracer des lignes horaires sur de tels cadrans sans recourir à un cadran équatorial ou à des formules trigonométriques complexes ?

Tout d'abord, le « tracé à la montre », par une journée ensoleillée, est une solution très pratique, notamment pour tout cadran horizontal ou vertical... Après avoir correctement fixé le style sur le plan horizontal ou dans le mur (il doit être dans le plan méridional et incliné d'un angle égal à la latitude par rapport au plan horizontal), il suffit de matérialiser, pour chaque heure solaire donnée (voire chaque demi-heure, quart d'heure, etc.) la trace de l'ombre solaire sur le sol ou le mur. L'heure solaire sera déterminée par la formule de conversion heure légale - heure solaire (voir p. 27), ou plus simplement suivie sur une application de votre téléphone portable, telle <https://heuresolaire.com/>.

Une fois le tracé des lignes horaires réalisé pour une demi-journée (pour un cadran horizontal ou un cadran vertical plein sud) ou une journée, le tracé sera immuable et servira toute l'année ! À noter que ce « tracé à la montre » s'applique aux cadrans « verticaux » de tout genre : cadrans inclinés - déclinants, cadran tracé sur une surface irrégulière, ou même un rocher !

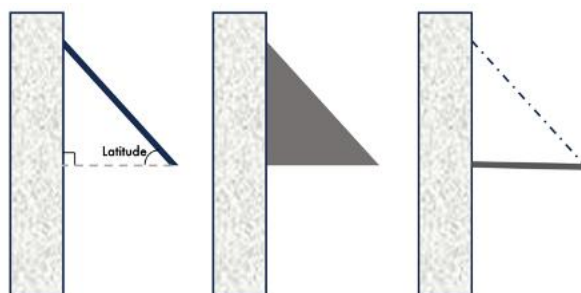
Mais aujourd'hui, c'est bien entendu les logiciels qui s'avèrent les plus pratiques pour tracer rapidement des cadrans verticaux ou horizontaux (ainsi que des cadrans de tout type). On peut citer notamment :

- le logiciel Shadows Pro de François Blateyron (<https://www.shadowspro.com>) dont une version de base peut être téléchargée gratuitement,
- les logiciels en ligne Tracad d'Yvon Massé (<https://gnomonique.fr/forum/>) et CadsolOnLine de Jean-Luc Astre (<https://sundial.web-pages.fr/>) qui permettent, gratuitement et en quelques clics, de tracer une large gamme de cadrans solaires adaptés à vos besoins, et d'obtenir un fichier exportable utilisable pour votre projet.

Mais revenons au style que vous installerez sur votre cadran, style qui devra être, nous l'avons déjà dit précédemment, installé avec soin, dans le plan méridional et incliné par rapport à l'horizontale d'un angle égal à la latitude du lieu.

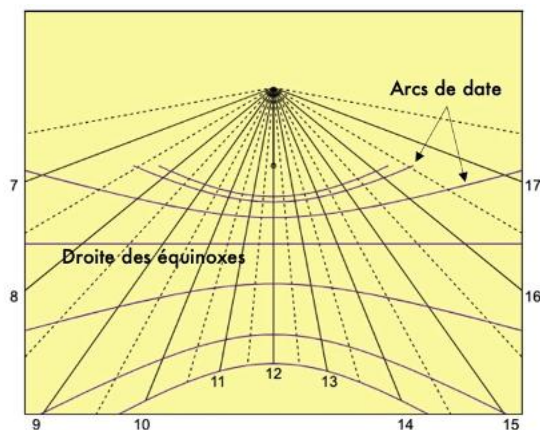
Trois types principaux de style peuvent être installés :

- la traditionnelle « tige » comportant éventuellement au bout un œilleton,
- un triangle plein dont l'hypoténuse constitue la tige, qui est plus facile peut-être à fixer et s'avérera plus solide dans le temps,
- enfin un « gnomon », triangle précédent dont on n'aura conservé qu'un côté.



Les trois principaux styles pour cadrans horizontaux ou verticaux (ici représentés pour un cadran vertical méridional vu de profil) : à gauche la traditionnelle tige, au centre le triangle plein, à droite le gnomon.

Le cadran que vous tracerez pourra comporter, outre des lignes horaires (indiquant l'heure solaire locale, l'heure moyenne ou l'heure légale), un ou plusieurs analemmes, ainsi que des « arcs de date », hyperboles que parcourra, à une date donnée, l'extrémité de la tige (ou la tache lumineuse de l'œilleton), de l'hypoténuse du triangle ou du gnomon (attention : l'extrémité seule du gnomon indiquera la date et l'heure !).



Tracé d'un cadran vertical méridional incluant des arcs de date, l'arc devenant une droite aux équinoxes.

(Capture d'écran d'un tracé obtenu à l'aide du logiciel Tracad)

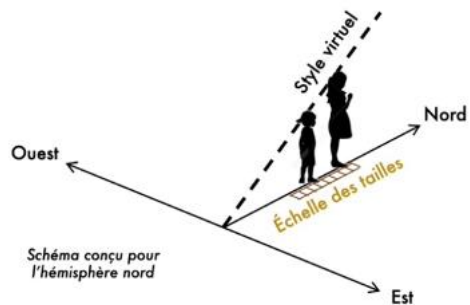
Ces trois principaux types de style se retrouvent bien entendu dans les cadrans horizontaux.

Dans le cas d'un cadran horizontal, le choix d'un gnomon comme style pourra s'avérer approprié notamment si le cadran est destiné à un lieu public, à une école par exemple, car il présentera moins de risques d'accidents ou de dégradations qu'une tige ou un triangle. Dans ce cas, on retrouve comment « exploiter à fond les possibilités d'un simple bâton planté verticalement dans le sol », tel qu'évoqué au début de ce chapitre. Mais on pourra même aller plus loin et... supprimer le style !



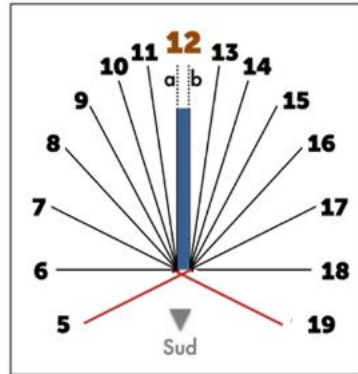
*Cadran horizontal monumental sans style situé à une extrémité de la promenade des Anglais à Nice.
(Photo de l'auteur)*

Très bien mais... comment lire l'heure sur un tel cadran ? C'est simplement en faisant intervenir le passant, comme dans le cas d'un cadran analemmatique que nous aborderons plus loin dans ce livre. En effet, il suffit de placer, sur la droite de midi solaire, des plots correspondant à des tailles différentes (de 1 m à 2 m tous les 10 cm par exemple). La position des plots sur « l'échelle des tailles » correspond aux positions où la tête de la personne touche un style virtuel (incliné de la latitude sur le sol horizontal). L'heure se lit donc à l'ombre du sommet de la tête du passant !



Un dernier point concernant les styles pour cadrans verticaux ou horizontaux : si le style que vous utilisez est assez épais vous devrez prendre soin à bien détacher les deux parties du tracé, chacun correspondant à l'ombre portée de chaque arête du style.

Sur ce cadran horizontal au style épais triangulaire, le tracé a été séparé en deux parties, et chaque partie est placée de part et d'autre du style épais. L'ombre de l'arête a du style indiquera les heures du matin ; l'ombre de l'arête b les heures après midi. Mais attention, les lignes de 5 h et 19 h (en rouge sur l'illustration) devront se référer respectivement aux arêtes b et a, car le Soleil se trouvera alors sous le plan défini par les deux arêtes !



Vous savez maintenant l'essentiel pour construire un cadran horizontal ou vertical.

Pour prouver votre maîtrise, vous serez peut-être tenté de réaliser un « cadran polyédrique », par exemple un dodécaèdre (12 faces) voire un rhombicuboctaèdre (26 faces) comprenant un cadran sur la majorité de ses faces.

*Cadran rhombicuboctaédrique du mont Saint-Odile en Alsace comportant 24 cadrans.
(Document Wikimedia Commons - Auteur Tristan -
Licence CC BY 2.0)*



Mais vous pourrez aussi vous orienter, surtout si vous souhaitez faire plaisir à des enfants (et les initier à l'astronomie) ou êtes en

charge d'animations en milieu scolaire, vers des modèles plus simples, plus didactiques, comme par exemple un cadran portatif, similaire aux « montres solaires » qui ont fait leur apparition à la fin du Moyen Âge.

Cadran solaire diptyque en ivoire
de la fin du ^{xv}e siècle.

(Crédit Galerie Delalande -

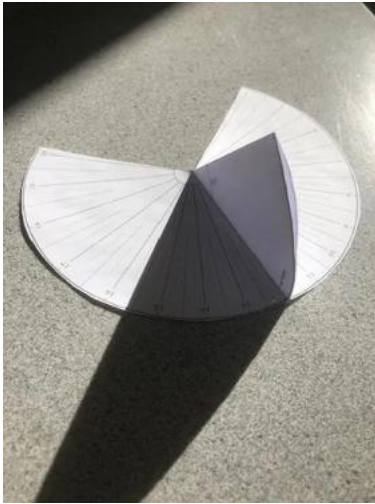
<https://www.galeriedelalande.fr>)



« Montre solaire » conçue pour des élèves d'école primaire, qui doivent découper une feuille cartonnée, sur laquelle un cadran horizontal est déjà tracé, puis insérer une ficelle à deux endroits indiqués et l'accrocher par deux nœuds, la longueur de la ficelle étant telle qu'elle fait un angle, par rapport à l'horizontale, égal à la latitude du lieu. Et cette montre solaire pourra servir de boussole aux enfants, puisque, s'ils connaissent l'heure solaire au moment de l'utilisation, ils pourront orienter leur cadran solaire afin qu'il indique cette heure solaire, la ligne de 12 h se trouvant alors dans la direction nord-sud !
(Photo de l'auteur)

Un autre modèle simple et didactique : un cadran à découper (sur une feuille de papier ou bristol). David Alberto, professeur de physique-chimie en lycée, en propose plusieurs sur son site <https://www.astrolabe-science.fr>, en téléchargement libre.

La science des cadrans solaires à la portée de tous



*Un des cadrans solaires à découper et plier proposé par David Alberto sur son site.
(Photo David Alberto)*



*Des élèves de CE2-CM1 de l'école de Gattières (Alpes-Maritimes) arborent fièrement le cadran solaire qu'ils ont réalisé avec leur professeure (d'après le modèle ci-dessus de David Alberto).
(Photo de l'auteur)*

Cadrans analemmatiques

Un cadran analemmatique se rencontre assez fréquemment dans les espaces publics. Sur un sol horizontal sont disposées des marques horaires, autour d'une ellipse. L'ombre d'une personne (ou, plus rarement, d'un gnomon) placée à la bonne date sur une « ligne-calendrier » au centre du cadran, indique l'heure solaire.



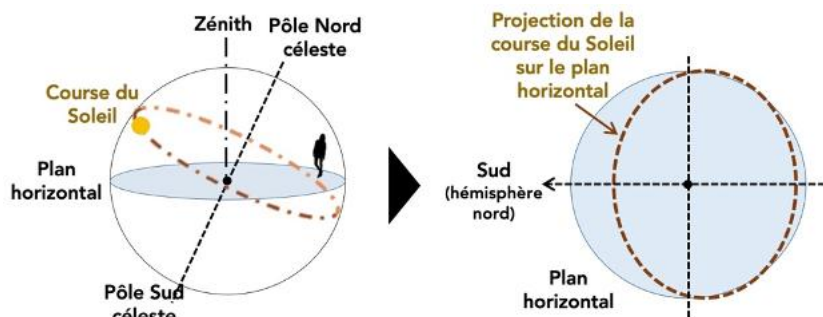
Cadran analemmatique dans le parc de Montaud à Saint-Étienne.

(Document Wikimedia Commons - Auteur : Phuyardwik - Licence CC BY-SA 3.0)

C'est un cadran dont le principe est assez difficile à comprendre. Il est donc d'un intérêt pédagogique plus limité que les gnomons et méridiennes, cadrans équatoriaux et polaires, cadrans muraux et horizontaux. En outre, il est d'une précision très moyenne lorsque l'ombre de la tête d'une personne sert à indiquer l'heure. Cependant il implique la personne qui s'en sert, qui devient partie intégrante du cadran solaire (le gnomon). Il peut donc à ce titre être intéressant à installer dans un espace public, d'autant plus qu'il reste assez simple à réaliser, comme nous le verrons plus loin.

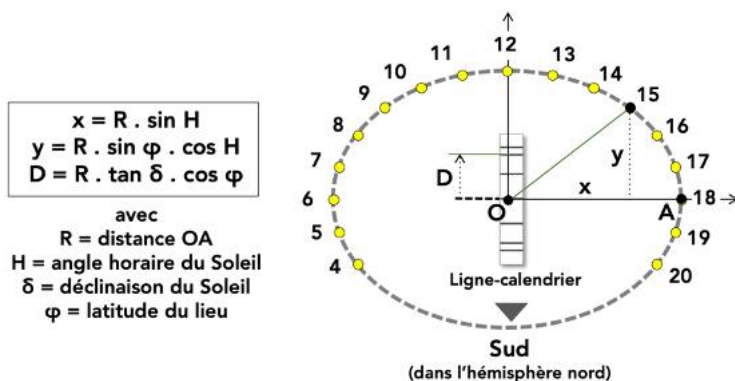
Il est cependant indispensable qu'il soit accompagné d'un panneau explicatif à proximité afin que le passant se mette au bon endroit (ce qui n'est pas toujours le cas...) et puisse convertir, s'il le souhaite, l'heure lue (heure solaire locale) en heure légale.

Pour comprendre le principe d'un cadran analemmatique, il faut revenir à la sphère céleste locale et projeter, sur le plan horizontal, la course apparente du Soleil : on obtient une ellipse.



Les ellipses obtenues sont différentes selon le jour de l'année. On peut cependant démontrer que, à condition de déplacer un gnomon vertical (ou une personne) le long d'une « ligne-calendrier » située sur le petit axe de l'ellipse tracée pour un jour donné, l'heure lue sur les marques horaires fixes autour de l'ellipse sera correcte tout au long de l'année.

On peut utiliser des formules pour tracer les marques horaires et déterminer la distance D du centre O de l'ellipse à laquelle le gnomon (ou la personne) doit être placé selon le jour de l'année.



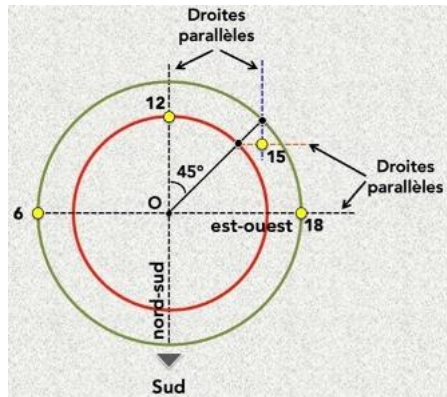
Mais on peut également, sans avoir recours à des formules mathématiques, tracer un tel cadran grâce aux logiciels déjà cités ou avec la méthode décrite ci-après.

Traçons sur un sol horizontal, autour d'un point O, deux cercles, le premier d'un rayon égal à R (2 à 3 m par exemple), le second de rayon plus petit, égal à $R \cdot \sin \varphi$ (φ est la latitude du lieu). Une corde fixée en O et équipée à son autre extrémité d'une craie ou d'un gros crayon permet de tracer aisément ces cercles.

Traçons ensuite deux segments de droite :

- le premier dans la direction nord-sud : on déterminera cette direction à l'aide d'une boussole, ou d'un gnomon (voire d'un fil à plomb) comme proposé en page 42,
- le second, perpendiculaire, dans la direction est-ouest.

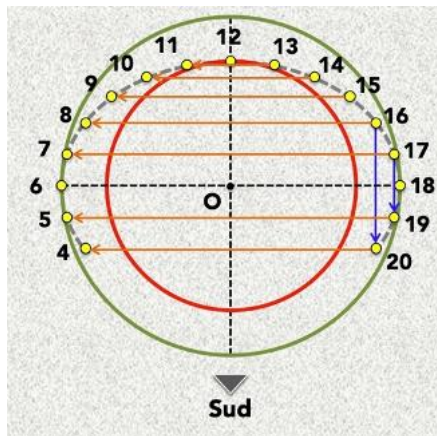
On peut d'ores et déjà placer les marques horaires 6 h, 12 h et 18 h (heure solaire) aux emplacements indiqués sur le schéma. Les autres marques horaires sont placées selon la méthode indiquée sur le schéma (la marque est celle de 15 h correspondant à un angle horaire du Soleil égal à $3 \cdot 15^\circ = 45^\circ$).



On peut placer, selon la même méthode, les marques horaires manquantes pour la période 12 h - 18 h : l'angle à utiliser pour 13 h étant de 15° , pour 14 h de 30° , etc.

Les marques horaires 19 h et 20 h sont symétriques de celles de 17 h et 16 h par rapport à la direction est-ouest. Les marques horaires de 4 h à 11 h sont symétriques de celles de 13 h à 20 h par rapport à la direction nord-sud.

On obtient alors un ensemble complet de marques horaires disposées selon une ellipse, comme le schéma ci-après le représente (le tracé correspond ici à une latitude d'environ 45° N ; la plage horaire 4 h - 20 h est donc pertinente en été).

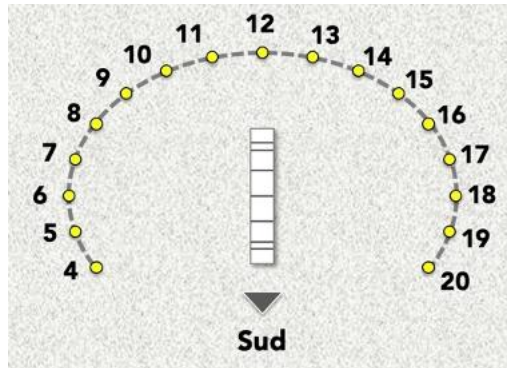


On peut bien entendu, suivant la même méthode, tracer les demi-heures voire les quarts d'heure, tout en gardant cependant à l'esprit qu'un tel cadran est par nature peu précis lorsqu'une personne joue le rôle de gnomon, et donc qu'aller au-delà de marques horaires n'est probablement pertinent que si l'on installe un vrai (et fin) gnomon, ou si le cadran est de grande taille.

Il reste à tracer la ligne-calendrier sur laquelle le gnomon, ou la personne invitée à tenir ce rôle, devra se placer selon le jour de l'année. Ce tracé s'appuiera sur la formule mathématique donnée précédemment.

Le cadran analemmatique est prêt à être utilisé !

Le cadran analemmatique est prêt à être utilisé !



Pour terminer, il conviendra de finaliser les marques horaires par des plots plats ou en relief, avec les heures indiquées sur ces plots ou sur le sol. Les solutions sont nombreuses !



*Cadran analemmatique installé par le Clea au centre d'oxygénation du Col Bayard, près de Gap. Sur le panneau surplombant les rochers est inscrit
« Astronome, Golfeur, Skieur, par ton ombre indique mon heure ».*

(Photo Clea)

Cadrans d'azimut ou de hauteur

Nous allons nous intéresser maintenant aux cadrans d'azimut et aux cadrans de hauteur, c'est-à-dire aux cadrans solaires dont la conception s'appuie sur la mesure de l'un ou l'autre de ces deux angles qui, nous l'avons vu précédemment (page 34), déterminent précisément, dans la sphère céleste locale, la position du Soleil dans le ciel à tout moment de la journée.

Compte tenu de l'importance de ces angles et de leur évidence pour indiquer la position du Soleil dans le ciel, Il est logique que, depuis de nombreux siècles, l'on ait conçu et développé des cadrans de hauteur et des cadrans d'azimut. Il existe donc logiquement une très grande variété de tels cadrans, certains de tracé assez élaboré, d'autres faciles à réaliser. Nous nous focaliserons sur ces derniers dans ce chapitre.

Rappelons, avant de décrire les cadrans d'azimut et de hauteur, certaines caractéristiques que nous avons déjà soulignées :

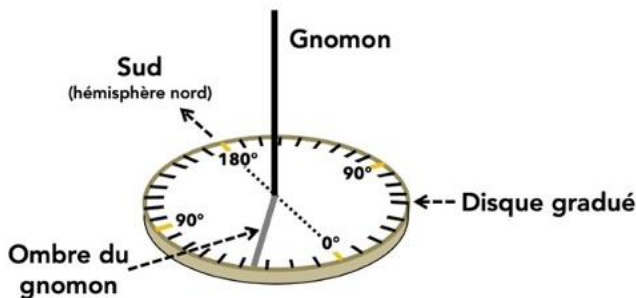
- L'azimut et la hauteur du Soleil dépendant de la latitude (et du jour de l'année), le tracé de tels cadrans ne restera donc correct que pour une latitude donnée.
- Il existe des formules permettant de calculer azimut et hauteur du Soleil à tout moment d'une journée mais on pourra préférer recourir à un diagramme solaire imprimé ou à des applications pour téléphone mobile donnant instantanément les valeurs de ces deux angles.
- La hauteur du Soleil variant peu autour de midi solaire, un cadran de hauteur ne sera donc pas très précis à ce moment de la journée.
- La mesure de la hauteur du Soleil, un jour donné, permettra de déterminer l'heure solaire sans nécessité de connaître au préalable la direction nord-sud.

CADRANS D'AZIMUT

Considérons tout d'abord la grande famille des cadrans d'azimut.

Nous ne reviendrons pas sur les cadrans d'azimut que sont les méridiennes et les cadrans analemmatiques, déjà décrits. À noter que les méridiennes sont des cadrans d'azimut ne marquant qu'un instant de la course du Soleil dans la journée, celui où son azimut est égal à 0° , c'est-à-dire à midi solaire.

Commençons par un cadran d'azimut très simple, constitué d'un disque horizontal, régulièrement gradué, traversé en son centre par un gnomon vertical.



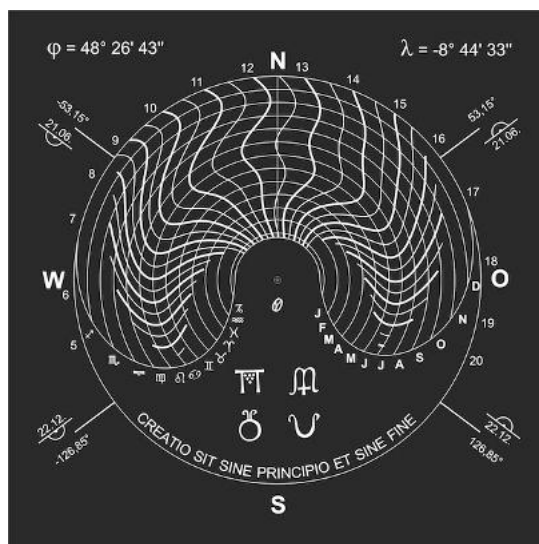
Supposons que le disque soit strictement horizontal (un niveau à bulle fixé sur le disque s'avérera utile...) et que l'on ait avec soi une table de valeurs ou un diagramme solaire imprimé, donnant les correspondances entre azimut du Soleil et heure solaire. Si l'on fait tourner le disque autour de son axe afin que l'angle de l'ombre du gnomon avec la direction nord-sud indiquée sur le disque soit égal à l'azimut à l'instant donné, on obtiendra... la véritable direction nord-sud.

Un tel « compas solaire » a servi notamment de boussole, pendant la seconde guerre mondiale, aux armées parcourant les déserts africains sans carte fiable (ni de repères pour utiliser des cartes), et ne pouvant utiliser pour s'orienter des boussoles

magnétiques à cause des masses métalliques des véhicules militaires !

On retrouve ici une propriété déjà évoquée lorsque nous avons décrit les « montres solaires » : tout cadran solaire (portable) peut être transformé en boussole solaire puisqu'un cadran solaire peut indiquer la direction nord-sud (comme une boussole) si l'on connaît l'heure solaire...

Mais dans la famille des cadrans d'azimut on trouve aussi le « cadran araignée ». À chaque mois de l'année correspond un cercle tracé autour du gnomon, sur lequel les marques des azimuts correspondant aux heures solaires pleines ont été rapportées ; le réseau des heures fait penser aux pattes d'une araignée... L'heure se lit à l'intersection de l'ombre et du cercle du mois considéré (le cadran étant au préalable correctement orienté).



« Cadran araignée » tracé et réalisé par le
gnomoniste - cadranier Yves Opizzo.
(Photo Yves Opizzo)

Nous ne présenterons pas ici les cadrans à projection orthographique ou stéréographique, ou d'autres types de cadrans d'azimut plus complexes à réaliser, et préférons terminer par un astucieux « cadran azimutal de fenêtre », facile à réaliser, présenté dans le n°3 du magazine *Cadrans solaires pour tous*.



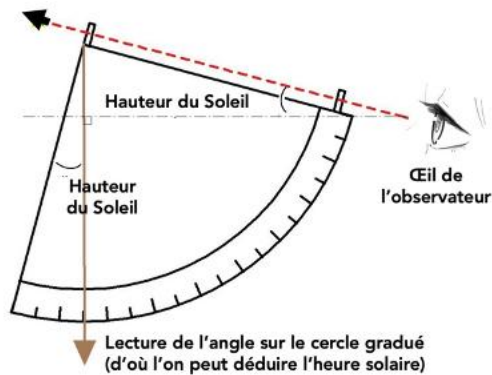
Cadran azimutal de fenêtre : c'est, à cette heure de la journée, l'arête extérieure du côté gauche de la fenêtre qui projette son ombre sur le côté droit de l'embrasure où sont tracées des courbes permettant de relier l'azimut du Soleil, ainsi mesuré, à l'heure solaire, voire légale.

(Photo Celtic Wizard)

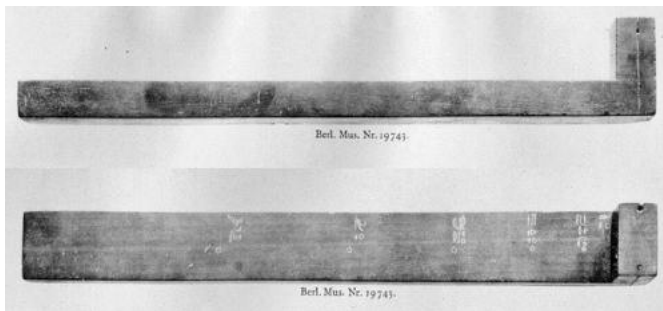
CADRANS DE HAUTEUR

Abordons maintenant la famille, également très étendue, des cadrans de hauteur.

On trouve dans cette famille des cadrans très anciens, notamment le « cadran en L » des Égyptiens et le « quadrant », utilisé pendant longtemps dans la navigation maritime.



Le « quadrant », cadran de hauteur en usage dès l'Antiquité, qui permet, par une simple visée (avec des lunettes appropriées !), de déterminer la hauteur du Soleil ou d'autres objets célestes.



*« Cadran en L » de l'époque du pharaon Thoutmôsis III (xv^e siècle avant notre ère). L'objet, tenu horizontal, aurait été (les spécialistes ont des analyses différentes sur l'usage de l'instrument) dirigé vers le Soleil. L'ombre de l'arête intérieure de la petite partie relevée indique alors l'heure sur la partie horizontale.
(Document Wikimedia Commons - Domaine public)*

Le plus connu des cadrans solaires de hauteur est probablement le « cadran de berger », ainsi appelé parce que cet instrument, dont on trouve des premières versions dès l'Antiquité, a été adopté par les bergers des Pyrénées au xx^e siècle.

Il se présente sous la forme d'un cylindre équipé d'un style et est bien entendu tracé, comme tout cadran de hauteur, pour une latitude donnée. Les droites verticales du cylindre correspondent à des dates (chaque mois de l'année par exemple) alors que des courbes à heure solaire constante sont tracées autour du cylindre

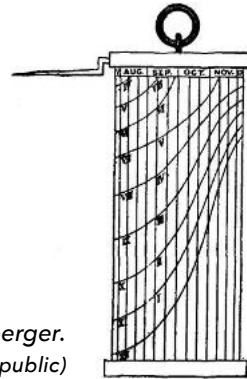
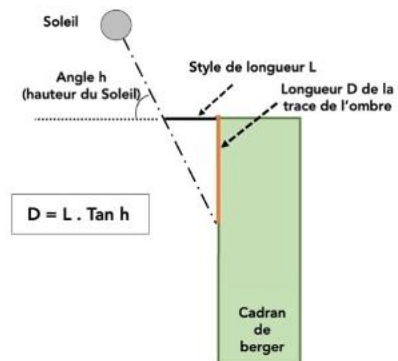


Schéma d'un cadran de berger.

(Document Wikimedia Commons - Domaine public)

Pour lire l'heure solaire, on fait pivoter le style mobile sur la date considérée, puis on oriente l'ensemble vers le Soleil, tenant le cadran suspendu par une chaîne accrochée au sommet du cylindre, assurant ainsi sa verticalité. On lit alors l'heure solaire sur la courbe horaire que touche l'extrémité de l'ombre du style, extrapolant l'heure lue si l'extrémité de l'ombre du style ne se confond pas exactement avec une courbe horaire (on peut aussi utiliser un tracé sur lequel figureront les demi-heures, voire les quarts d'heure).

Une formule simple relie la longueur de l'ombre, la longueur du style et la hauteur du Soleil, permettant de tracer les courbes à heure solaire constante autour du cadran.



Comme pour d'autres cadrans déjà étudiés, des logiciels comme Shadows Pro (<https://www.shadowspro.com>) permettent cependant d'obtenir rapidement le tracé de ces courbes sans avoir recours à des formules.

Vous pouvez même trouver sur le site de David Alberto (<https://www.astrolabe-science.fr>) des tracés déjà réalisés pour des latitudes de 42° à 51° et un mode d'emploi pour construire un cadran de berger en quelques minutes, à partir d'une canette de soda !

Cadran de berger dont le cylindre est une canette de soda et le style un agitateur pour boisson ou une pique à brochette.
(Photo David Alberto)



La famille des cadrans de hauteur comporte enfin de petits objets tels l'anneau solaire (ou « anneau de paysan ») et l'anneau astronomique (ou « anneau équinoxial universel »), ainsi que d'autres cadrans portatifs commercialisés de nos jours, certains d'une précision assez relative... Nous ne les décrirons pas en détail ici, terminant, une fois encore, par un cadran de hauteur astucieux et simple à réaliser, le « Soleil en cage » du prolifique et ingénieux cadranier Claude Gahon.

Le « Soleil en cage » peut être réalisé à partir d'une simple boîte en carton dont une face aura été évidée pour y fixer une feuille de papier calque sur laquelle auront été imprimées les courbes horaires. Sur l'autre face opaque, se trouve une fente horizontale, qui projette un trait de lumière sur les courbes horaires.
(Photo Claude Gahon)





L'auberge La maison de Gaudissard, à Molines-en-Queyras (France), accueille ses hôtes avec ce beau cadran solaire à la sage devise...

(Photo de l'auteur)



Cadran réalisé par l'artiste Ben (Benjamin Vautier) à Coaraze dans les Alpes-Maritimes (France). Sa devise épicurienne, en niçois, se traduit par « Le temps passe ; passe-le bien ! » (jeu de mots entre « ben » et « Ben »)

(Photo de l'auteur)

Choisir une devise...

À ce stade de l'ouvrage vous devriez être prête ou prêt à réaliser un cadran solaire. Dans ce cas, vous pouvez penser à lui apporter, par une devise, une touche finale ! Citoyennes, philosophiques, morales, religieuses, humoristiques, romantiques, etc., les devises qui accompagnent traditionnellement les cadrans solaires, en langue nationale officielle, langue régionale ou latin souvent, sont de nature très variée. Olivier Escuder en a recensé dans son ouvrage *Paroles de Soleil - Tomes I et II* (Édit. Le Manuscrit) plus de 2 000 différentes en France. La courte liste ci-dessous s'efforce donc simplement de montrer leur diversité.

- Nous sommes tous égaux en droit
- Ah ! Que le temps passe vite
- Tempus fugit (le temps s'enfuit)
- À qui sait aimer les heures sont lumineuses
- Omni hora deum lauda (à toute heure louez le Seigneur)
- Prends garde à l'une d'elles
- Est-ce la dernière, qui le sait ?
- Quand je ne sais rien je me tais (comme un cadran solaire sans soleil)
- Tu sortiras quand ce cadran marquera l'heure et le moment (sur un cadran dessiné par un prisonnier de la Bastille)
- Do Si Sol (je donne si le soleil donne)
- Nil novi sub sole (rien de neuf sous le soleil)
- Souviens-toi de vivre
- Carpe diem

À vous de trouver la devise correspondant le mieux à votre philosophie, à votre tempérament, à votre humeur, au message que vous voulez faire passer !

Bien d'autres cadrans

Il existe bien d'autres types de cadrans solaires que tous ceux abordés jusqu'ici. Nous ne tenterons pas ni de les décrire en détail, ni même d'en établir une liste exhaustive, nous contentant d'en citer quelques-uns :

- Les polos des Babyloniens et les scaphés des Grecs puis des Romains.
- Les cadrans canoniaux, qui ont pendant longtemps orné les édifices religieux.
- Les cadrans s'étant développés dans le monde islamique.
- Les cadrans commémoratifs, conçus pour célébrer une date, voire une heure et une date particulières.
- Les cadrans bifilaires au concept si particulier ou les cadrans à réflexion, les « cadrans vitrail », les « canons de midi », les cadrans à heures temporaires ou sidérales, etc.

Pour aller plus loin, découvrir les cadrans ci-dessus en détail et compléter plus généralement vos connaissances sur les cadrans solaires et leur science, n'hésitez pas à télécharger la compilation des magazines *Cadrans solaires pour tous* parus à ce jour (<https://gnomonique.fr/divers/mag-CSpour-tous-compil.pdf>), un document de plus de 900 pages dans lequel, grâce à l'outil de recherche intégré, vous pourrez probablement trouver les informations que vous recherchez. Et pourquoi ne pas rejoindre le forum d'échange et de partage d'Yvon Massé (<https://gnomonique.fr/forum/>) ou un club astronomique près de chez vous, à vous rapprocher du CLEA si vous êtes enseignant (<http://clea-astro.eu/>), voire à participer aux actions de la Commission des cadrans solaires (<https://ccs.saf-astronomie.fr/>) de la Société astronomique de France ou à celles d'associations similaires à l'étranger¹.

¹ <https://www.cadrans-solaires.info/sequence5/co/1-3-bis-associations-specialisees.html>

La science des cadrans solaires à la portée de tous

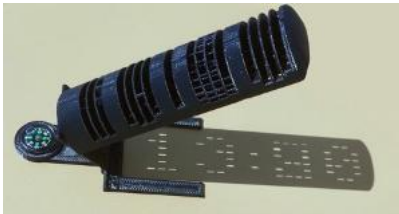


Cadran de Jean Pakhomoff à heures solaires et sidérales, incluant une courbe donnant le moment de la prière de l'Asr et indiquant également la hauteur et l'azimut du Soleil.

(Photo Jean Pakhomoff)

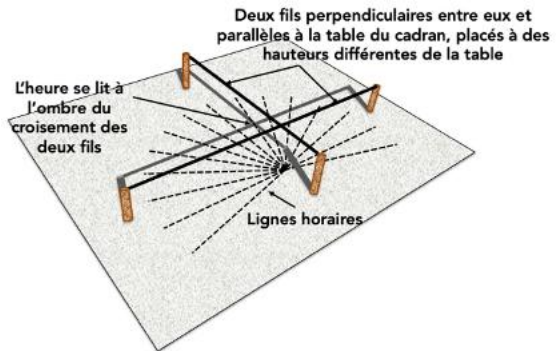
« Mémorial des vétérans d'Anthem » en Arizona (États-Unis) : ensemble de 5 dalles de marbre verticales, perforées de façon qu'à 11 h 11 le 11 novembre, le Soleil vienne éclairer le Grand sceau des États-Unis reproduit sur le sol.

(Document Wikimedia Commons - Auteur : view2az - Licence CC BY 2.0)



Cadran solaire réalisé avec une imprimante 3D, projetant sur une surface plane l'indication de l'heure solaire sous forme numérique.

(Photo de l'auteur)



Principe d'un cadran bifilaire.

ANNEXE : RAPPELS MATHÉMATIQUES

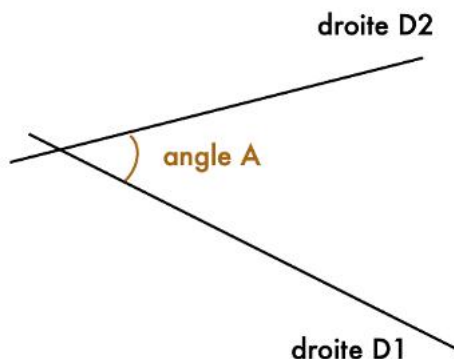
Des notions de bases de géométrie (qui s'intéresse au plan et à l'espace) et de trigonométrie (qui s'intéresse aux triangles) sont utiles pour mieux comprendre les fondements théoriques ou certains aspects pratiques des cadrans solaires. Celles et ceux disposant déjà de bonnes bases mathématiques trouveront cette annexe superflue. Les autres redécouvriront des définitions et propriétés simples peut-être déjà étudiées mais oubliées concernant les droites et les plans, les triangles rectangles, les fonctions trigonométriques, etc.

La trigonométrie sphérique (qui s'intéresse aux angles et distances sur une sphère) tient une place importante dans la théorie des cadrans solaires, ce qui est logique puisque le mouvement apparent du Soleil s'étudie dans la « sphère céleste locale ». Dans l'approche d'une « gnomonique à la portée de tous » nous n'aborderons cependant pas ce domaine, nous contentant de la trigonométrie euclidienne.

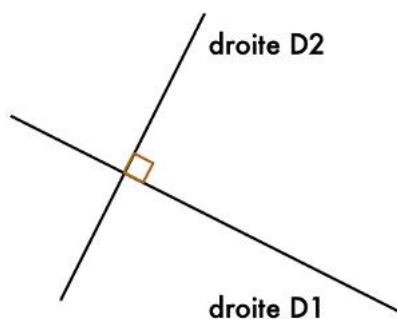


*Fragment des « Éléments », livre du savant grec Euclide (III^e siècle avant notre ère) considéré comme l'un des textes fondateurs des mathématiques en Occident.
(Document Wikimedia Commons - Domaine public)*

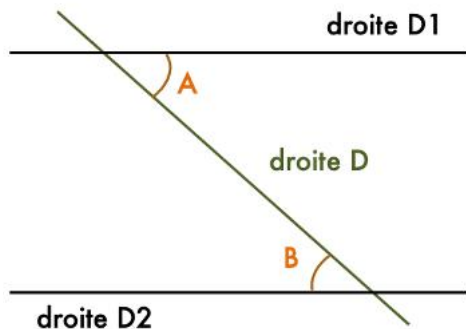
Des droites D1 et D2 situées dans un même plan se coupent selon un angle A si elles ne sont pas parallèles.



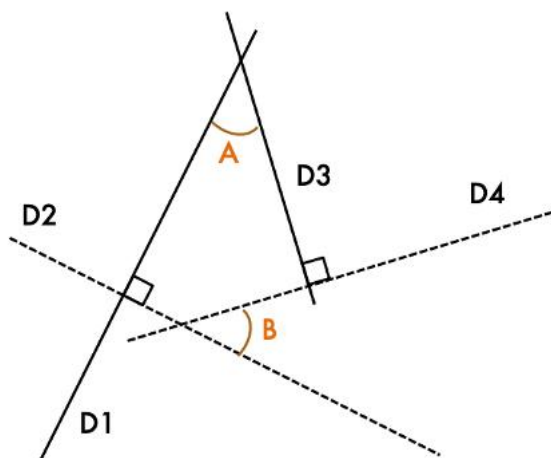
Les droites D1 et D2 sont dites perpendiculaires si l'angle entre D1 et D2 est un angle droit (égal à 90° ou $\pi/2$ radians).



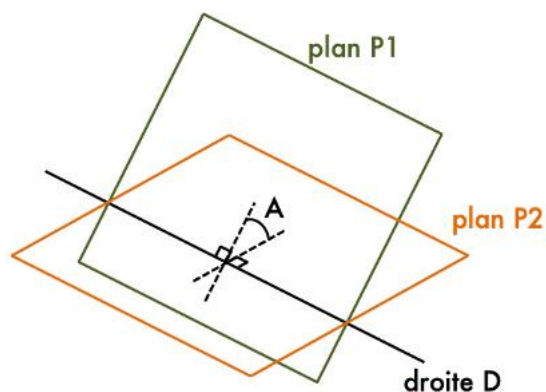
On retrouve des angles égaux ($A = B$) dans l'intersection d'une droite D et de deux droites parallèles D1 et D2.



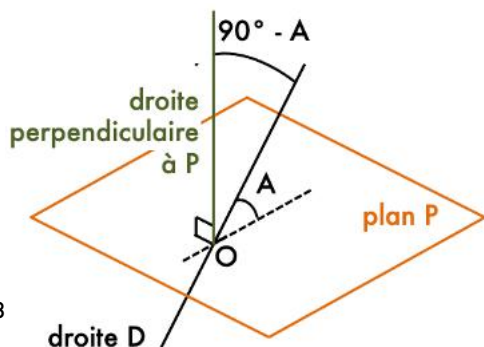
Si D1 et D2 sont perpendiculaires et si D3 et D4 sont perpendiculaires alors l'angle A entre D1 et D3 est égal à l'angle B entre D2 et D4.



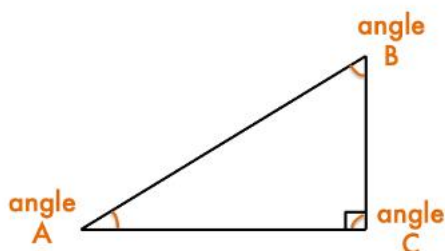
Deux plans P1 et P2, s'ils ne sont pas parallèles, se coupent selon une droite D et forment un angle A entre eux.



Si une droite D coupant un plan P en O fait avec ce plan un angle A, la perpendiculaire à P passant par O fait (logiquement) avec ce plan un angle de $90^\circ - A$.

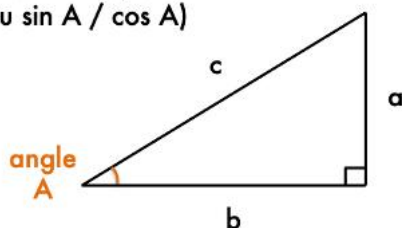


Dans un triangle rectangle, l'angle B est de $90^\circ - A$ puisque la somme des angles d'un triangle est de 180° (π radians) et que l'angle C est de 90° .



$$\begin{aligned}\sin A &= a/c \\ \cos A &= b/c \\ \tan A &= a/b \\ (\text{ou } \sin A / \cos A)\end{aligned}$$

Fonctions trigonométriques
sinus, cosinus et tangente.



Réciproque des fonctions
trigonométriques : Arc
sinus, Arc cosinus et Arc
tangente.

$$\text{si } \sin A = X \text{ alors } A = \arcsin X$$

(se lit « si sinus A égale X alors
A égale arc sinus X »)

$$\text{si } \cos A = Y \text{ alors } A = \arccos Y$$

(« si cosinus A égale Y
alors A égale arc cosinus Y »)

$$\text{si } \tan A = Z \text{ alors } A = \arctan Z$$

(« si tangente A égale Z
alors A égale arc tangente Z »)

