

À LA MESURE DU TEMPS

La mesure du temps a toujours été une préoccupation des hommes depuis qu'ils ont pris conscience de son écoulement. Cette mesure a très vite permis d'organiser la société. Pour cela, les hommes ont créé des dispositifs de plus en plus ingénieux pour mesurer le temps à l'aide de phénomènes physiques bien choisis. Les liens entre la mesure du temps et l'astronomie sont d'ailleurs des plus anciens. C'est pour cette raison que la mesure du temps et la mesure de l'espace ont souvent été regroupées dans les observatoires astronomiques. Et cette intrication de l'espace et du temps est encore plus prégnante dans le cadre de la théorie de la relativité d'Einstein.

TEMPS MESURÉS, TEMPS DÉMESURÉS – II

Comme nous l'avons vu lors de l'épisode précédent, le xiv^e siècle marque les débuts de l'horlogerie. Par le mouvement régulier des mécanismes, elle permet en particulier de produire des heures de durées égales. De façon peut-être paradoxale, le xiv^e siècle marque aussi, de façon concomitante, le renouveau des cadrans solaires.

Les épisodes précédents ont en effet mis en lumière l'utilisation, jusqu'au début de la Renaissance, des heures inégales, notamment pour des besoins religieux. La comparaison de l'heure du Soleil à l'heure des horloges permettra le développement du style polaire. Auparavant, il était droit, c'est-à-dire perpendiculaire au plan du cadran, seule l'ombre de son extrémité indiquant l'heure. Les cadrans solaires indiqueront désormais des heures égales. Et on les trouvera en grande quantité dans les bâtiments religieux, les châteaux, les jardins publics...

L'apogée de la gnomonique se situe au $xvii^e$ siècle. C'est pendant ce siècle que les méridiennes sont aussi construites dans les cathédrales. Les horloges sont alors réglées par les cadrans solaires ou les méridiennes, et ce jusqu'au xix^e siècle. Le corolaire étant que les horloges gardent le temps (celui qui passe) en cas de mauvais temps (celui qu'il fait). Après le xix^e siècle, les cadrans solaires seront surtout construits pour des raisons esthétiques.

Il existe un grand nombre d'ouvrages traitant de la construction de cadrans solaires, nous renvoyons le lecteur à la bibliographie. Sans être exhaustif, cet épisode devrait permettre à qui le souhaite de construire différents types de cadrans solaires.

Principe des cadrans solaires

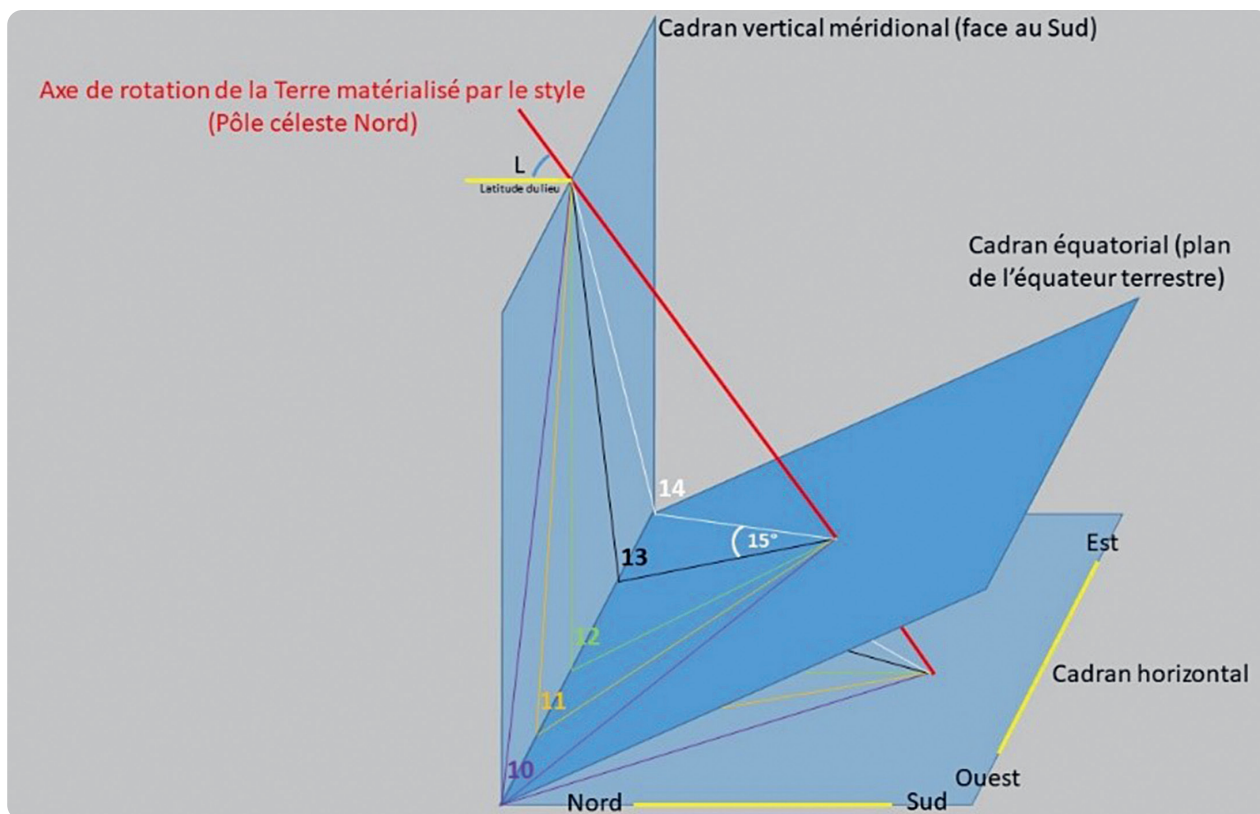
Le principe des cadrans solaires est toujours le même, quelle que soit leur forme (plan, cylindrique, sphérique, concave, convexe ou même irrégulier). Il faut imaginer que le Soleil

tourne autour de l'axe de rotation de la Terre, cet axe étant matérialisé par une tige métallique qu'on appelle le style. Le Soleil tourne donc autour du style en 24 heures, ce style étant rigoureusement parallèle à l'axe de rotation de la Terre. Il est donc orienté Nord-Sud. Le jour des équinoxes, le Soleil se déplace

dans le plan de l'équateur terrestre (en négligeant son mouvement en déclinaison). Le jour des solstices, il se déplace dans des plans parallèles à l'équateur, au-dessus de ce dernier en été, au-dessous en hiver.

Le cadran le plus simple est donc le cadran équatorial. Il est plan et ses deux faces possèdent des

lignes horaires (pour l'été et l'hiver) espacées régulièrement de 15° . Les cadrans horizontaux et verticaux s'en déduisent comme le montre la figure, cette dernière indiquant également comment le style est orienté. Sur un cadran vertical, la ligne de midi (solaire) est verticale et la ligne 6 h/18 h horizontale.



Relation entre le cadran équatorial, vertical (méridional) et horizontal.

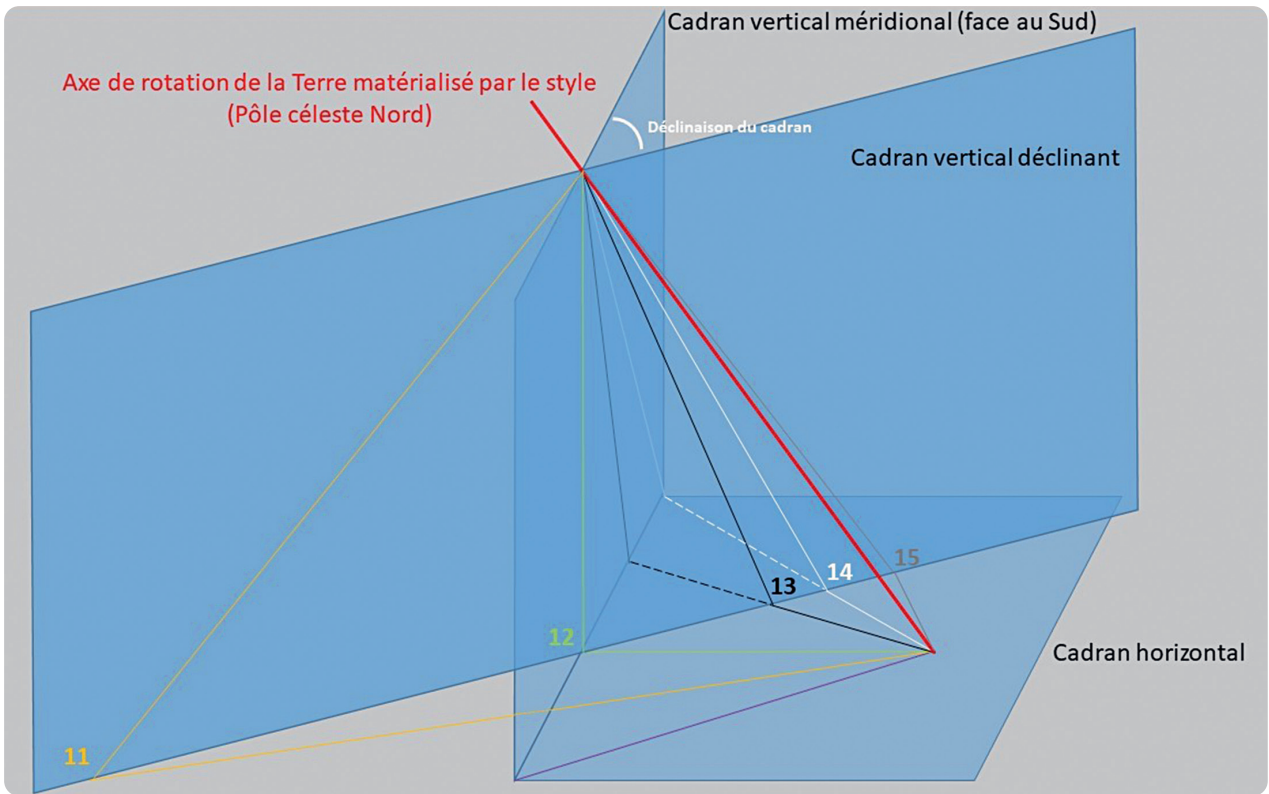
Crédits F. Taris

Pour un cadran qui ne serait pas orienté plein sud (donc déclinant), de nombreuses méthodes de tracé existent. L'une d'elles consiste à calculer le temps légal (celui d'une montre bien réglée, par exemple ici : <https://heurelegalefrancaise.fr/index.html?lang=fr>) correspondant à une heure solaire donnée (10 h, 11 h, 13 h, 14 h, etc.). Pour cela, il faut savoir que le temps solaire se déduit du temps légal après trois corrections :

- une heure de décalage en hiver, deux heures en été ;
- une correction de longitude, puisque le temps

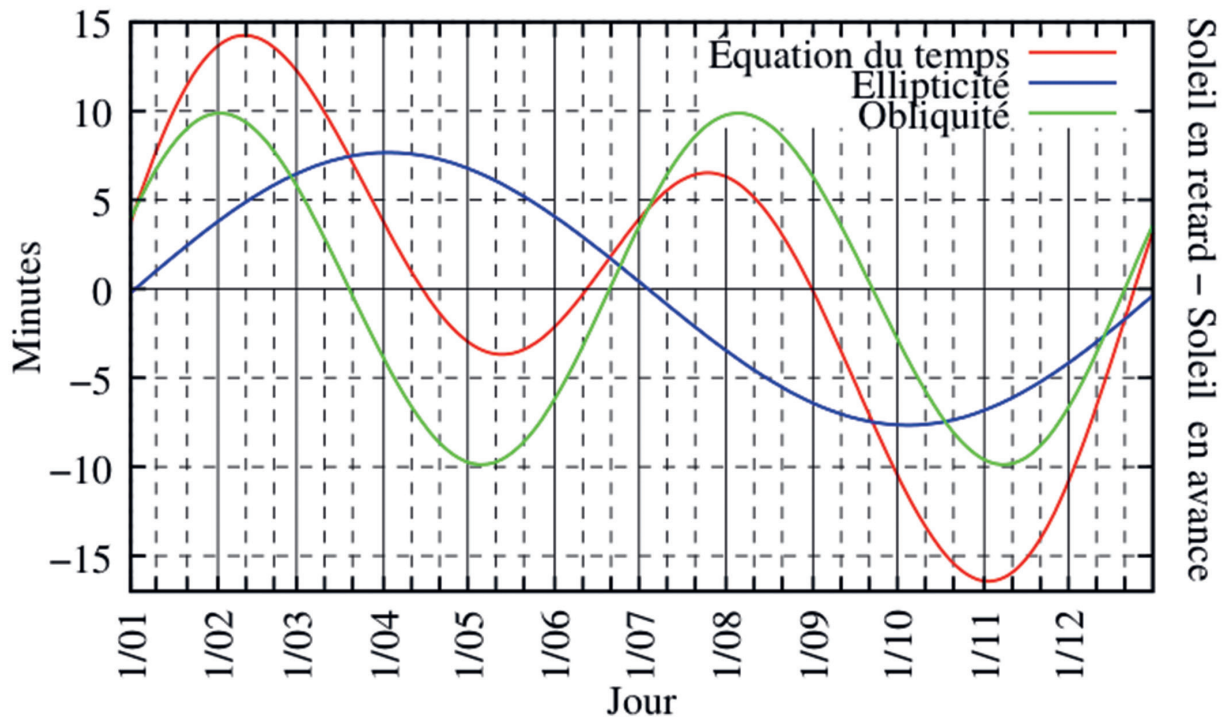
légal est basé sur le temps du méridien de Greenwich ;

- une correction due au fait que, d'une part, l'orbite de la Terre n'est pas circulaire, mais elliptique (équation du centre) et que, d'autre part, cette orbite se trouve dans le plan de l'écliptique, alors que le Soleil se déplace dans le ciel sur des plans parallèles à l'équateur terrestre (réduction à l'équateur). La somme de ces deux inégalités (l'équation du temps) est bien connue pour chaque jour de l'année.



Relation entre les cadrans horizontal, vertical et vertical déclinant.

Crédits F. Taris



L'équation du temps avec ses deux composantes (équation du centre ou ellipticité et réduction à l'équateur ou obliquité).

CC BY-SA 2.5 A. Vial

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
Jour	min s	min s	min s	min s	min s	min s	min s	min s	min s	min s	min s	min s
1	+03 28	+13 32	+12 22	+03 57	-02 50	-02 09	+03 52	+06 23	+00 06	-10 14	-16 23	-11 03
2	+03 56	+13 40	+12 10	+03 39	-02 57	-01 59	+04 04	+06 19	-00 12	-10 33	-16 24	-10 40
3	+04 24	+13 47	+11 58	+03 21	-03 03	-01 50	+04 15	+06 15	-00 32	-10 52	-16 25	-10 17
4	+04 51	+13 53	+11 45	+03 04	-03 09	-01 40	+04 26	+06 09	-00 52	-11 11	-16 25	-09 53
5	+05 18	+13 58	+11 32	+02 47	-03 15	-01 29	+04 36	+06 04	-01 12	-11 29	-16 23	-09 29
6	+05 45	+14 02	+11 18	+02 30	-03 19	-01 18	+04 46	+05 57	-01 32	-11 47	-16 21	-09 04
7	+06 11	+14 06	+11 04	+02 13	-03 24	-01 07	+04 56	+05 50	-01 52	-12 05	-16 19	-08 38
8	+06 37	+14 09	+10 50	+01 56	-03 27	-00 56	+05 06	+05 43	-02 13	-12 22	-16 15	-08 12
9	+07 02	+14 11	+10 35	+01 39	-03 30	-00 44	+05 15	+05 34	-02 33	-12 39	-16 10	-07 46
10	+07 26	+14 12	+10 20	+01 23	-03 33	-00 32	+05 24	+05 26	-02 54	-12 55	-16 05	-07 19
11	+07 50	+14 13	+10 04	+01 07	-03 35	-00 20	+05 32	+05 16	-03 15	-13 11	-15 59	-06 51
12	+08 14	+14 12	+09 48	+00 52	-03 36	-00 08	+05 40	+05 07	-03 37	-13 26	-15 52	-06 24
13	+08 36	+14 11	+09 32	+00 36	-03 37	+00 03	+05 47	+04 56	-03 58	-13 41	-15 44	-05 56
14	+08 59	+14 10	+09 16	+00 21	-03 37	+00 16	+05 54	+04 45	-04 19	-13 55	-15 35	-05 27
15	+09 20	+14 07	+08 59	+00 07	-03 36	+00 29	+06 00	+04 34	-04 41	-14 09	-15 26	-04 58
16	+09 41	+14 04	+08 42	-00 07	-03 35	+00 42	+06 06	+04 21	-05 02	-14 22	-15 15	-04 30
17	+10 01	+14 00	+08 25	-00 21	-03 34	+00 55	+06 11	+04 09	-05 24	-14 34	-15 04	-04 00
18	+10 20	+13 55	+08 08	-00 34	-03 32	+01 08	+06 16	+03 56	-05 45	-14 46	-14 52	-03 31
19	+10 39	+13 50	+07 50	-00 47	-03 29	+01 21	+06 20	+03 42	-06 06	-14 58	-14 39	-03 01
20	+10 57	+13 44	+07 33	-01 00	-03 26	+01 34	+06 24	+03 28	-06 28	-15 08	-14 25	-02 32
21	+11 14	+13 37	+07 15	-01 13	-03 22	+01 47	+06 27	+03 13	-06 49	-15 19	-14 11	-02 02
22	+11 31	+13 30	+06 57	-01 24	-03 18	+02 00	+06 30	+02 58	-07 10	-15 28	-13 55	-01 32
23	+11 47	+13 22	+06 39	-01 36	-03 13	+02 13	+06 32	+02 43	-07 31	-15 37	-13 39	-01 02
24	+12 02	+13 13	+06 21	-01 47	-03 08	+02 26	+06 33	+02 27	-07 52	-15 45	-13 22	-00 33
25	+12 16	+13 04	+06 03	-01 57	-03 02	+02 39	+06 34	+02 11	-08 13	-15 52	-13 04	-00 03
26	+12 29	+12 55	+05 45	-02 07	-02 56	+02 51	+06 34	+01 54	-08 34	-15 59	-12 46	+00 26
27	+12 42	+12 44	+05 27	-02 17	-02 49	+03 04	+06 34	+01 37	-08 54	-16 05	-12 27	+00 56
28	+12 53	+12 34	+05 09	-02 26	-02 42	+03 16	+06 33	+01 19	-09 15	-16 10	-12 07	+01 25
29	+13 04		+04 51	-02 35	-02 34	+03 28	+06 32	+01 01	-09 35	-16 14	-11 46	+01 54
30	+13 14		+04 33	-02 43	-02 26	+03 40	+06 29	+00 43	-09 55	-16 18	-11 25	+02 23
31	+13 24		+04 15		-02 18		+06 27	+00 25		-16 21		+02 52

Valeurs numériques de l'équation du temps en 2025.

Crédits F. Taris (éphémérides LTE)

Si par exemple on souhaite connaître l'heure légale correspondant à 14 h de temps solaire le 25 octobre 2025 en un lieu situé à 2° Est de Greenwich, le calcul se réduit à :

$$\begin{aligned}
 & 14 \text{ h (heure solaire)} \\
 & + 1 \text{ h (hiver)} \\
 & - 2 \times 24/360 \text{ (signe négatif pour une longitude} \\
 & \quad \text{Est, convertie en heures)} \\
 & - 0 \text{ h } 15 \text{ min } 52 \text{ s (équation du temps)} \\
 & = 14 \text{ h } 36 \text{ min } 08 \text{ s.}
 \end{aligned}$$

calcul pour toutes les heures solaires de 7 h à 17 h, on construit ainsi l'ensemble du cadran.

Autre exemple pour un lieu à 3° Ouest de Greenwich, le 15 juillet 2025 à 10 h (heure solaire) :

$$\begin{aligned}
 & 10 \text{ h (heure solaire)} \\
 & + 2 \text{ h (été)} \\
 & + 3 \times 24/360 \text{ (signe positif pour une longitude} \\
 & \quad \text{Ouest, convertie en heures)} \\
 & + 0 \text{ h } 06 \text{ min } 00 \text{ s (équation du temps)} \\
 & = 12 \text{ h } 18 \text{ min } 00 \text{ s}
 \end{aligned}$$

Autrement dit, il faudra tracer sur le plan du cadran l'ombre du style à cette heure. En reproduisant ce

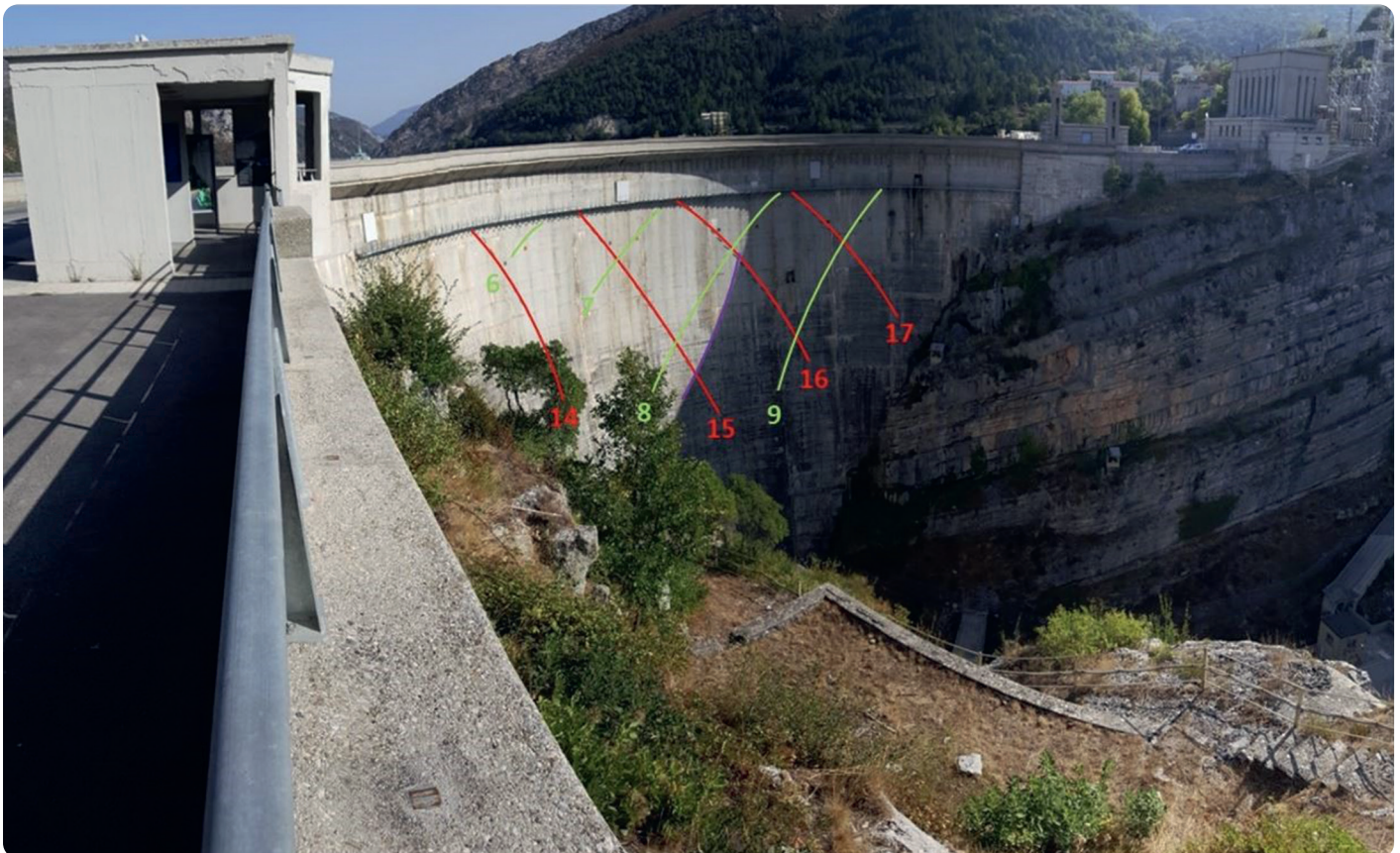
D'autres méthodes de calcul des cadrans existent (formules mathématiques, logiciels...), mais, quelle que soit la méthode utilisée, il faut garder à l'esprit que la lecture de l'heure solaire ne se fera jamais à la seconde près !

Il est bien sûr possible d'ajouter des lignes particulières (lieux des points parcourus par l'ombre de l'extrémité du style) comme la droite des équinoxes, les hyperboles des solstices ou de dates particulières (anniversaires...). L'analème (<https://vo.imcce.fr/meridienne/equation.php>) peut également être ajouté, mais un cadran solaire doit rester simple à lire pour quiconque ne connaît pas la gnomonique... Le lecteur intéressé trouvera des compléments d'information dans la bibliographie.

L'imagination du cadranier est la seule limite à la forme d'un cadran et à sa décoration ! Les quelques exemples qui suivent démontrent que l'imagination est parfois grande...

Quelques exemples de cadrans solaires remarquables

Le cadran du barrage de Castillon (Hautes-Alpes) est le plus grand du monde. Son originalité tient au fait qu'il n'y a pas de style. C'est l'ombre de la corniche, lorsqu'elle tangente une ligne horaire, qui indique l'heure (<https://www.youtube.com/watch?v=5X8MaoPPdN8>). Il a été calculé par D. Savoie (SYRTE), R. Lehoucq (CEA-Irfu) et inauguré en 2009.



Barrage de Castillon.

L'ombre de la corniche (ligne violette) indique environ 8 h 15. Quarante-cinq minutes plus tard, elle tangentera la ligne de 9 h (en vert).

CC BY-SA 3.0 Luigifab (légendes LTE)

La nef solaire, fruit d'une collaboration entre Denis Savoie (SYRTE), Odile Mir (sculpteur) et Robert Queudot (ingénieur). Il s'agit de deux pyramides entrelacées, construites en 1993, situées en bordure de l'autoroute A9 sur l'aire de repos de Tavel Nord (Gard). Le fonctionnement de ce cadran monumental est exposé sur ce site : <http://sunandshadows.net/VirtualSundials/tavel-13.avi>.

La nef se compose de deux cadrans presque horizontaux et de trois cadrans inclinés-déclinants et de deux styles, un pour le matin et un pour le soir. L'ombre des styles se projette sur les « voiles » où se trouvent des plis moulés dans le béton, ainsi qu'au sol où les lignes horaires sont matérialisées par des rainures d'acier. L'heure solaire peut y être lue à quelques dizaines de secondes près.



La nef solaire.

Les heures solaires sont matérialisées sur l'image par des lignes noires et l'ombre d'un des cadrans par une ligne violette.

CC BY-SA 4.0 G. Giraud (légendes LTE)

Le cadran à réflexion de l'INES (Institut national de l'énergie solaire) est situé près de Chambéry (Savoie). Ce n'est plus un gnomon, mais une tache de lumière projetée par un miroir qui indique l'heure et certaines dates remarquables. Cette configuration

complexe est rendue nécessaire par la forme du bâtiment sur lequel se trouve le cadran, ainsi que par son emplacement. En effet, sa façade principale, orientée vers le nord, est un voile de béton courbé d'une surface de 500 m², haute de 9,60 m et longue

d'environ 52 m. De plus, une très grande « écope » inclinée, recouverte de capteurs solaires, se trouve sur son toit. Cette écope est un obstacle important à l'éclairage du voile. Enfin, le tout est implanté au fond d'une vallée entourée de montagnes ! Ce cadran a été calculé par Denis Savoie (SYRTE) et Marc Goutaudier (Palais de la découverte). La complexité architecturale du bâtiment a rendu nécessaire l'implantation de deux miroirs, dont l'inclinaison doit être connue à mieux que 1° étant donné les di-

mensions du cadran. Ces miroirs réfléchissent deux taches de lumière : une tache pour le matin et une autre pour l'après-midi. Elles sont d'ailleurs simultanément visibles pendant quelques heures autour du midi solaire. Chaque miroir peut en fait être considéré comme l'extrémité d'un style droit perpendiculaire au mur. La particularité d'un cadran vertical à miroir incliné-déclinant est que la ligne midi n'est plus verticale ! Les lignes horaires et les courbes des dates ont été gravées à même le béton brut. ■



Le cadran de l'INES.

On distingue clairement les deux taches de lumière à l'extrême gauche et à l'extrême droite du cadran.

Crédits D. Savoie



Le cadran de l'INES.

Gros plan de l'image précédente.

Crédits D. Savoie



Le cadran de l'INES.

Gros plan de l'image précédente.

Crédits D. Savoie

Bibliographie

<https://www.cadrans-solaires.info/le-mooc/>

Cadran info, revue de la commission des cadrans solaires de la SAF, mai 2014, n° 29.

C. Garino, « Les Cadrans solaires : leur calcul et leur construction », *Bulletin de l'union des physiciens*, janvier 1989, vol. 83, n° 710, p. 35-68.

A. Gotteland & G. Camus, *Cadrans solaires de Paris*, CNRS Éditions, 1993.

D. Savoie, *Gnomonique moderne*, Paris, Société astronomique de France, 1997

D. Savoie, *Une Histoire des cadrans solaires en Occident. La Gnomonique du Moyen Âge au xx^e siècle*, Paris, Les Belles Lettres, 2021.

Une requête sur le site du catalogue de la bibliothèque de l'Observatoire de Paris permettra au lecteur intéressé par un point particulier de la gnomonique de trouver des ouvrages de référence (183 actuellement référencés). On trouvera par exemple des inventaires de cadrans par ville, département ou région de France (Paris, Bourgogne, Hautes-Alpes, Perche, etc.), le tracé des cadrans par le calcul, l'histoire des cadrans solaires, leurs devises et bien d'autres thèmes ...

<https://catalogue.obspm.fr/cgi-bin/koha/opac-search.pl?idx=&q=cadrans+solaires>