

Au Sommaire :

- **Cadran de Tavel... 20 ans déjà**
- **L'astrolabe horizontal d'Oughtred**

- **Histoire**

Cadran de Délos,
Cadran de Maure-de-Bretagne,
Le cadranier inconnu,
Le manuscrit de Fournes,
Dispersion des canoniaux en
France.

- **Réalisations**

Analemme, Cadran triangle,
Cadran catoptrique, Astrolabe
solaire.

- **Découvertes**

Bloc gnomonique à Jussey.

- **Etudes**

Equation du temps, Image
projetée par le soleil, Cadran
à rétrogradation d'ombre,
Cadran sur calotte sphérique,
Logiciel pour les bifilaires,
Cercles hindous.

- **Informations**

Nouveaux Cadrans, Questions
gnomoniques, Sociétés
étrangères.





Sommaire du N° 27

Sommaire en allemand, anglais, espagnol, italien	traduction de : R. Kriegler, M. Lambalieu, D. Collin, L. de Dinechin	3
<u>Cadran de Délos</u>	Bonnin J. & Savoie D.	8
<u>Cadran de hauteur "triangle"</u>	Bousquet André	13
<u>Maquette d'un cadran catoptrique</u>	Capriles J. Fernando	16
<u>The Marean-Kielhorn director</u>	☒ Collin Dominique	21
<u>Image produite par une fente</u>	Ferrari Gianni	39
<u>Reflexion soleil par miroirs</u>	Ferrari Gianni	61
<u>Equation du temps et soleils fictifs</u>	Gapaillard Jacques	73
<u>Réalisation d'un analemmatique à Jully (89)</u>	Garino Claude	86
<u>Bloc gnomonique à Jussey (70)</u>	☒ Kieffer M. & Fremann F.	91
<u>Cadran de Maure-de-Bretagne</u>	Lambalieu Michel	99
<u>Logiciel cadrans horizontaux bifilaires</u>	☒ Mercier E. & Collin D.	102
<u>Cadran à rétrogradation d'ombre</u>	☒ Mercier Eric	114
<u>Cadran sur calott sphérique</u>	Pakhomoff Jean	123
<u>Heure et date d'après le soleil</u>	Pakhomoff Jean	126
<u>Astrolabe solaire</u>	Reimann Francis	128
<u>Généralisation d'Analemmatiques</u>	Rouxel Bernard	131
<u>Nef solaire de Tavel 1993-2013</u>	☒ Savoie Denis	135
<u>Dispersion des cadrans canoniaux</u>	Schneider Denis	142
<u>Cercles hindous verticaux</u>	Ugon Michel	149
<u>Le cadranier inconnu du Queyras (3ème partie)</u>	Ugon Michel	153
<u>Le curieux manuscrit de Fournes</u>	☒ Vialle Jacques	162
<u>Informations diverses</u> ° Dernières réalisations ou découvertes de cadrans et d'astrolabes en France et en Afrique du Nord.	☒ Contributeurs : J-M Ansel, D. Benoit, J. Bonnin, G. Brélivet, J-P. Cornec, M. Djebbar,	166

<ul style="list-style-type: none">◦ Que déduire à partir d'une photo de cadran,◦ Détermination de la prière de l'Asr,◦ Cadran de Regensburg,◦ Le cadranier David Beriner,◦ Gnomonique du monde.	 	A. Ferreira, P. Gagnaire, Cl. Gahon, Cl. Guicheteau, R. Kriegler, J. Mahé, A. Marchal, Y. Opizzo, J-M.Poncelet, J-Cl. Reita, F. Rousseau, Ph. Sauvageot, D. Savoie, J-C. Tauleigne, H. Tabili, F.T amarit, Sociétés étrangères.	
---	--	--	--

CD :  Indique que l'étude détaillée ou le logiciel est inclus dans le dossier "annexe".

Couverture de Cadran Info :

Cadran solaire dressé sur l'aire de repos de Tavel dans le Gard, sur l'autoroute A9, près d'Avignon et réalisé par les Autoroutes du Sud de la France (ASF). Photo Denis Savoie.

Un très grand merci à Pierre Parbel pour sa relecture d'articles.

CADRAN-INFO

est un moyen de diffusion d'articles gnomoniques rédigés principalement par les membres de la commission des cadrans solaires de la SAF.

Il vient en complément des publications de la **Société Astronomique de France**: *L'Astronomie* avec son article mensuel concernant les cadrans solaires et *Observations & travaux* qui présentent épisodiquement des sujets concernant la gnomonique.

CADRAN-INFO regroupe la majorité des présentations faites lors de nos deux réunions annuelles ainsi que des articles reçus en cours d'année.

CADRAN-INFO est devenu au cours des années UNE référence en matière d'études, de techniques, de méthodes, pour certaines totalement inédites.

CADRAN-INFO paraît en mai et en octobre sous forme: papier (N&B ou en couleurs) et CD (les N°s 1 à 5 sont des numérisations des tirages papier).

A partir du N° 11, la version CD comprend des annexes (logiciels, documents...)

La liste des articles parus depuis le premier numéro est disponible sur demande.

Dans un souci d'échanges de connaissances et d'informations, **CADRAN-INFO** est offert aux autres associations gnomoniques (Allemagne, Angleterre, Autriche, Belgique, Canada, Espagne, Hollande, Italie, Japon, USA, Suisse).

Ph. Sauvageot

- ◆ Les articles sont présentés par ordre alphabétique des auteurs (ou en fonction de la composition du bulletin). Le contenu est sous la responsabilité de l'auteur.
- ◆ Les articles¹ sont à envoyer à Ph. Sauvageot par mail ou sur CDrom/DVD PC (Word, Excel, **PAS DE PDF**) éventuellement sur papier.
- ◆ Les auteurs qui souhaiteraient que leurs articles soient réservés exclusivement aux revues *L'Astronomie* ou *Observations Travaux* devront le préciser dans leur envoi.
- ◆ Les auteurs doivent obligatoirement indiquer leurs sources ou références si le sujet a déjà fait l'objet d'articles ou de communications récents.
- ◆ Toute reproduction totale ou partielle des présents articles ne peut se faire qu'avec l'accord des auteurs.
- ◆ Les articles, documents, photos... ne sont pas retournés aux auteurs après publication.

Pour tout renseignement :

Ph. SAUVAGEOT, 7, rue de Gloriette, 91640 Vaugrigneuse : sauvageotph@wanadoo.fr
ou au secrétariat de la SAF, 3, rue Beethoven, 75016 PARIS.

Aucun caractère publicitaire dans nos articles ou informations



D : Inhaltsverzeichnis Cadran-Info n° 27

Eine Sonnenuhr aus Délos von Bonnin Jérôme & Savoie Denis : Die Studie und Analyse einer Sonnenuhr aus Délos die im Louvre Museum von Paris aufbewahrt wird.
Sonnenuhr eines Höhen-"Dreiecks" von Bousquet André : Realisierung eines Modells, das es erlaubt, die Stunde von der Höhe der Sonne zu unterscheiden.
Modell einer Reflex- Sonnenuhr von Capriles José Fernando : Realisierung einer kleinen äquatorialen Spiegel-Sonnenuhr.
Der Marean-Kielhorn-Weiser von Collin Dominique ☒ : Beschreibung und Studie eines Navigationsinstruments, das heutzutage vergessen ist. Es ist ein horizontaler Astrolab, der von Oughtred so modifiziert wurde, daß er sowohl als Sextant dienen kann, als auch als Instrument, um damit den wahren Norden zu bestimmen.
Ein Bild das neben einem Schlitz erzeugt wird von Ferrari Gianni : Studie von der Entstehung eines Bildes, das auf einer waagerechten oder senkrechten Fläche durch die Strahlen der Sonne erzeugt wird, die durch einen Schlitz hindurch gehen.
Reflexion des Sonnenlichts durch Spiegel von Ferrari Gianni : Sonnenstrahlen werden durch Spiegel reflektiert.
Zeitgleichung und erfundene Sonnen von Gapaillard Jacques : Studie über die jährliche Variabilität vom "wahren" solaren Tag.
Realisierung einer analemmatischen Sonnenuhr in Jully (89) von Garino Claude : Rückkehr der Erfahrung nach der Realisierung einer analemmatischen Sonnenuhr auf dem Platz der Burg von Jully in

¹ Police : Times New Roman, taille : 12, marges : 2,5 avec en-tête et pied de page.

Yonne (89).
Gnomonischer Block von Jussey (70) von Kieffer Maurice & Fremann Francis ☒ : Entdeckung und Beschreibung eines gnomonischen Blocks von Jussey in Haute-Saône (70).
Eine maurische Sonnenuhr in der Bretagne von Lambalieu Michel : Analyse eines Fragments einer horizontalen Sonnenuhr von 1724 oder 1726.
Software für horizontale bifilare Sonnenuhren von Mercier Eric & Collin Dominique ☒ : Software zur Berechnung von beliebigen horizontalen bifilaren Sonnenuhren. Die Abbildungen der Sonnenuhren sind sofort nutzbar.
Sonnenuhr mit rückläufigem Schatten von Mercier Eric ☒ : Modellierung des rückläufigen Schattens einer Sonnenuhr von Juvisy mit Hilfe der Beobachtungen von Flammarion.
Sonnenuhr auf einer sphärischen Kappe von Pakhomoff Jean : Theoretische Übung einer Sonnenuhr gezeichnet auf der Umgrenzung eines kugelförmigen Kappchens.
Stunde und Datum der Sonne zufolge von Pakhomoff Jean : Wie man die Stunde und das Datum durch die Beobachtung der Richtung und der Höhe der Sonne auf einem gegebenen Breitengrad-Horizont bestimmt.
Sonnen-Astrolab von Reimann Francis : Ein auf die Sonne beschränktes Modell, zu einer stereographischen Projektion, die eine siderische Position mit geographischen Linien überlagert.
Allgemeines über Analematische Sonnenuhren von Rouxel Bernard : Präsentation verschiedener Typen analemmatischer Sonnenuhren im allgemeinen.
Nef solaire de Tavel 1993-2013 von Savoie Denis ☒ : Rückkehr nach 20 Jahren zur Realisierung von Nef solaire vom Norden her zum Tavel in Gard, auf der A9-Autobahn.
Die Verteilung von kanonischen Sonnenuhren von Schneider Denis : Einige Ideen über die ungleiche Verbreitung kanonischer Sonnenuhren in Frankreich.
Senkrechte indische Kreise von Ugon Michel : Die Verwendung der Indischen Kreise, um die Basen einer Sonnenuhr zu zeichnen, ihre Neigung, besonders auf den senkrechten Mauern.
Der unbekannte Sonnenuhrbauer von Queyras (3. Teil) von Ugon Michel : Von Château-Queyras bis Fontgillarde und der Umgebung auf der Suche nach diesem rätselhaften Sonnenuhrbauer.
Das rätselhafte Manuskript von Fournes von Vialle Jacques ☒ : Hypothesen betreffend eines Sonnenuhren-Manuskriptes, von ca. 1922.
Verschiedene Informationen ☒ : Letzte Realisierungen oder Entdeckungen von Sonnenuhren und Sternhöhenmesser, Gnomonische Fragen und Antworten, Sonnenuhrenperiodika aus aller Welt.



E: Sumari Cadran-Info n° 27

Cuadrante de Délos de Bonnin Jérôme y Savoie Denis : Estudio y análisis de un cuadrante solar procedente de Délos y conservado al Museo del Louvre en París.
Cadrante de altura "triángulo" de Bousquet André : Realización de una maqueta que permite conocer la hora a partir de la altura del sol.
Maqueta de un cuadrante catóptrico de Capriles J Fernando : Realización de un pequeño reloj de sol ecuatorial a reflexión.
El Marean-Kielhorn director de Collin Dominique ☒ : Descripción y estudio de un Instrumento de navegación olvidado hoy día. Es un astrolabio horizontal de Oughtred, modificado de modo que pueda servir tanto sextante que de instrumento destinado a determinar el Norte verdadero.
Imagen producida por una ranura de Ferrari Gianni : Estudio de la formación de la imagen producida

en un rayos horizontales o verticales del sol con una hendidura.
La reflexión de la luz solar medianete espejos de Ferrari Gianni : La luz del sol se refleja en un espejo.
Ecuación del tiempo y soles ficticios de Gapaillard Jacques : Estudio sobre la variabilidad anual del “día solar verdadero”.
Realización de un analemmatique a Jully (89) de Garino Claude : Vuelta de experiencia sobre la realización de un cuadrante analemmatique sobre el lugar del castillo de Jully en Yonne (89).
Bloque gnomonique a Jussey (70) de Kieffer Maurice y Fremann Francis ☒ : Descubrimiento y descripción de un bloque gnomonico a Jussey en Haute-Saone (70).
Cuadrante de Moro de Bretaña de Lambalieu Michel : Análisis del fragmento de cuadrante horizontal datado 1724 ó 1726.
Programa informático cuadrantes horizontales de dos hilos de Mercier Eric y Collin Dominique ☒: Programa informático de dibujo de cuadrantes horizontales bifilares a hijos cualesquiera. Imágenes de la tabla del cuadrante directamente utilizables.
Cuadrante a retrogradación de sombra de Mercier Eric ☒: Modelización de la retrogradación de la sombra del cuadrante de Juvisy según las observaciones de Flammarion.
Cuadrante sobre casquete esférico de Pakhomoff Jean : Estudio teórico de un reloj de sol trazado sobre el perímetro de un casquete esférico.
Hora y fecha según el sol de Pakhomoff Jean : Conocimiento de la hora y la fecha por la medida de la dirección y la altura del sol sobre un horizonte de latitud dada.
Astrolabio solar de Reimann Francis : Maqueta limitada al sol, a proyección estereográfica superponiendo una posición sideral con líneas geográficas.
Generalización de Analemmatiques de Rouxel Bernard : Présentation de distintos tipos de relojes de sol analemmatiques generalizados.
Nave solar de Tavel 1993-2013 de Savoie Denis ☒: Por sus 20 años, vuelta sobre la realización de la nave solar de la superficie septentrional de Tavel en el Gard, sobre la autopista A9.
Dispersión de los cuadrantes canónicos de Schneider Denis : Estudio de la dispersión desigual de los cuadrantes canónicos franceses.
Círculos hindúes verticales de Ugon Michel : Utilización de los círculos hindúes para trazar las bases de un reloj de sol cualquiera que sea su inclinación, en particular sobre las paredes verticales.
El fabricante de cuadrantes desconocido del Queyras (3.º parte) de Ugon Michel : De Château-Queyras hasta Fontgillarde delimitando aún más a este fabricante de cuadrantes enigmático.
El curioso manuscrito de Fournes de Vialle Jacques ☒: Hipótesis relativas a un manuscrito de gnomonico que data cerca de 1922.
Distinta información ☒ : Últimas realizaciones o descubrimientos de cuadrantes y astrolabios, cuestión/respuestas gnomonices, revisadas del mundo.



GB : Contents Cadran-Info n° 27

Sundial from Delos by **Bonnin Jérôme & Savoie Denis** : Study and analysis of a sundial found in Delos and preserved in the Paris Louvre museum.

"Triangle "Altitude sundial by **Bousquet André** : Constructing a model which allows to determine time

from the sun height.
Model of a catoptric sundial by Capriles J Fernando : Construction a small reflection equatorial sundial.
The Marean-Kielhorn director by Collin Dominique ☒ : Description and study of a nowadays forgotten navigation instrument. This is a modified Oughtred horizontal astrolabe to be used as well as a sextant as a device to determine true north.
Image produced by a slot by Ferrari Gianni : Study of the formation of the image produced on a horizontal or vertical plane by the sun's rays with a slot.
Reflection of sunlight by mirrors by Ferrari Gianni : Sunlight reflected by a mirror.
Time equation and false suns by Gapaillard Jacques : Study of the annual changes of “ the true solar day”.
Making of an analemmatic sundial in July (89) by Garino Jean-Claude : Feedback on the making of the analemmatic sundial erected in the July castle site (Yonne department -89)
Gnomonic block at Jussey (70) by Kieffer Maurice & Fremann Francis ☒ : Discovery and description of a gnomonic stone at Jussey haute-Saône (70).
Maure de Bretagne Sundial by Lambalieu Michel : Searches and analysis of the fragment of an horizontal sundial dated 1724 or 1726.
Software for bifilar horizontal sundials by Mercier Eric & Collin Dominique ☒ : Software for drawing any bifilar horizontal sundials. Immediately usable pictures of the sundial table.
Sundial using shadow by Mercier Eric ☒ : Retrogradation.
Sundial on spherical cap by Pakhomoff Jean : Theoretical study of a sundial drawn on the perimeter of a spherical cap.
Hour and Date from sun position by Pakhomoff Jean : How to determinate hour and date thanks to the measure of the height and the direction of the sun on a given latitude horizon.
Solar astrolabe by Reimann francis : Model limited to solar use, with stereographic projection of sidereal position with geographic lines.
Generalization analemmatic sundials by Rouxel Bernard : Display of different types of generalized solar analemmatic sundials.
Tavel Solar nave 1993-2013 by Savoie Denis ☒ : For its 20 th anniversary, return on the building of the solar nave in the north rest area at Tavel (Gard) on the A9 highway.
Scattering of canonical sundials by Schneider Denis : Some ideas of the uneven spreading of French canonical sundials.
Vertical indians circles by Hugon Michel : Uses of indian circles to draw bases of a sundial whichever its lead angle, particularly on vertical wall.
The Queyras unknown sundial maker (3rd part) by Vialle Jacques ☒ : From Château-Queyras to Fontgillarde by searching of a better knowledge on this enigmatic sundial maker.
Fourne Strange manuscript by Vialle Jacques : Hypothesis on this manuscript about gnomonic dated around 1922.
Miscellaneous information ☒ : Recent discoveries or makings of sundials and astrolabes. Gnomonic questions and answers, world magazines.



I: Indice Cadran-Info n° 27

Meridiane di Délos da Bonnin Jérôme & Savoie Denis : Studio e analisi di un orologio solare originario di Délos, e conservato al Museo del Louvre a Parigi.
Orologio di altezza "triangolo" da Bousquet André : Fabbricazione di un modellino per leggere l'ora, dalla lettura dell'altezza del sole.
Modellino di un orologio catadiottrico da Capriles J Fernando : Fabbricazione di un orologio solare equatoriale a “inflexione”

<p>The Marean-Kielhorn director da Collin Dominique ☒ : Descrizione e studio di uno strumento di navigazione ormai scordato. È un astrolabio orizzontale di Oughtred, modificato in modo tale da essere usato come sestante, eppure da strumento per conoscere il nord vero.</p>
<p>Equazione del tempo e soli immaginari da Gapaillard Jacques : Studio della variabilità annuale del "giorno solare vero"</p>
<p>Immagine prodotta da una fessura da Gianni Ferrari : Studio della formazione dell'immagine prodotta su un raggio orizzontali o verticali del sole con una fessura.</p>
<p>Riflessione della luce solare da specchi da Ferrari Gianni : La luce solare riflessa da uno specchio.</p>
<p>Fabbricazione di un analematico a Jully (F-89) da Garino Claude : Insegnamenti dalla fabbricazione di un analematico al castello di Jully (dipartimento dell'Yonne, F-89).</p>
<p>Bloco gnomonico a Jussey (F-70) da Kieffer Maurice & Fremann Francis ☒ : Scoperta e descrizione di un bloco gnomonico a Jussey in Haute-Saône (F-70).</p>
<p>Orologio solare di Maure de Bretagne da Lambalieu Michel : Analisi del pezzo di orologio orizzontale datato 1724 o 1726.</p>
<p>Software quadranti orizzontali bifilari da Mercier Eric & Collin Dominique ☒ : Software di disegno degli orologi orizzontali bifilari a fili qualsiasiunque. Le immagini della tavola del quadrante possono essere utilizzate direttamente.</p>
<p>Quadrante a retrogradazione di ombra da Mercier Eric ☒ : Modellazione della retrogradazione dell'ombra del orologio solare di Juvisy secondo le osservazioni di Flammarion.</p>
<p>Quadrante sulla calotta sferica da Pakhomoff Jean : Studio teorico di un orologio solare tracciato sul perimetro di una calotta sferica.</p>
<p>Ora e data secondo il sole da Pakhomoff Jean : Conoscenza dell'ora e della data, dalla misura della direzione e dell'altezza del sole su di un orizzonte di latitudine conosciuta.</p>
<p>Astrolabio solare da Reimann Francis : Modellino limitata al sole, a proiezione stereografica, combinando una posizione siderale con linee geografiche.</p>
<p>Generalizzazione di quadranti analematici da Rouxel Bernard : Presentazione di differenti tipi di quadranti solari analematici generalizzati.</p>
<p>Nef solaire de Tavel 1993-2013 da Savoie Denis ☒ : Per il suo 20^{mo} anniversario, ritorno sulla realizzazione della caracca solare de l'area di sosta nord di Tavel nel Gard, sull'autostrada A9 (Fr-30).</p>
<p>Dispersione dei quadranti canoniali da Schneider Denis : Lavori d'approccio sulla ripartizione irregolare dei quadranti canoniali francesi.</p>
<p>Cerchi hindù verticali da Ugon Michel : Utilizzazione dei cerchi hindù per tracciare la pianta di un orologio solare, qualunque sia la sua inclinazione, particolarmente sui muri verticali.</p>
<p>Il fabbricante di meridiane del Queyras (3era parte) da Ugon Michel : Da Château-Queyras fino a Fontgillarde, provando di capire meglio questo fabbricante enigmatico.</p>
<p>Le manoscritto strano di Fournes de Vialle Jacques ☒ : Ipotesi diverse a proposito di un manoscritto di gnomonica datato circa 1922.</p>
<p>Informations diverses ☒ : Ultime opere o scopertedi meridiane e di astrolabi, domande / risposte gnomoniche, rassegna stampa del mondo.</p>



Cadran de Délos

Jérôme BONNIN et Denis SAVOIE

À propos d'un cadran solaire provenant de Délos, conservé au musée du Louvre (Ma4823)¹

En juin 2012, à la suite d'une demande de John Davis, éditeur du *B.S.S Bulletin*, nous avons souhaité retrouver un des cadrans représentés dans une aquarelle de C. R. Cockerell datée de 1810². Il s'agissait d'un cadran bien particulier, considéré comme perdu dans de nombreux ouvrages de gnomonique, notamment le catalogue de Sh. Gibbs (*Greek and Roman Sundials*, New-Haven, 1976, p. 354, n° 5010). Or, grâce à l'aide de Mme Avisseau-Broustet, conservateur en chef au département des Monnaies, Médailles et Antiques, nous avons pu le localiser et en faire une étude complète le 05 septembre 2012³. C'est le résultat de cette étude que nous proposons ici, la partie historique ayant été conduite par J. Bonnini et la partie mathématique par D. Savoie.

HISTOIRE D'UNE REDÉCOUVERTE

Il s'agit de l'unique cadran solaire de Délos qui ne soit pas conservé *in situ*. Il a été découvert selon toute vraisemblance en 1810. En effet, le dessin de C. R. Cockerell est daté de cette année et ce dernier a précisé dans ses écrits que le cadran avait été exhumé sous ses yeux. L'instrument est toutefois demeuré sur l'île de Délos après le départ de Cockerell. En 1811 ou 1812, un moine capucin vivant à Mykonos, le père Urbain, donne l'instrument qu'il dit avoir découvert « au milieu des ruines de Délos » à un architecte français, A. F. Mauduit (1778-1854)⁴. C'est ainsi que le cadran est acheminé à Paris où il est d'abord analysé par le célèbre astronome Jean-Baptiste-Joseph Delambre. Ce dernier va alors produire trois articles assez similaires sur l'instrument⁵. Une fois ce travail achevé, A. F. Mauduit donna l'objet au

¹ L'ensemble de cet article constitue la traduction d'une communication effectuée pour le Bulletin de la B.S.S : J. Bonnini, D. Savoie, « Report on the Greek dial from Delos stored in the Louvre (Ma 4823) », *BSS Bulletin* 25(i), March 2013, p. 20-22. Nous remercions J. Davis pour avoir permis de présenter ces recherches dans *Cadran Info*.

² J. Davis, J. Bonnini, « Early 19th Century English Drawings of Greek Dials », *BSS Bulletin* 24 (iii), September 2012, p. 43-44.

³ Nous n'aurions pu réaliser cette étude sans l'accord du musée et sans l'aide précieuse de M. Ludovic Laugier, ingénieur d'études au Louvre. L'objet a par ailleurs été publié récemment par le musée du Louvre : M. Hamiaux, *Les Sculptures grecques, II, La période hellénistique*, Paris, 1998, p. 203.

⁴ A. F. Mauduit, *Découvertes dans la Troade*, Paris, 1840, p. 242.

⁵ J.-B. J. Delambre, « Mathématiques, cadran antique trouvé dans l'île de Délos, et par occasion de la gnomonique des anciens : Notice lue à la classe des sciences physiques et mathématiques de l'Institut royal de France, le 10 octobre 1814 », *Magasin encyclopédique ou Journal des sciences, des lettres et des arts* V. 1814, p. 361-391 ; « D'un cadran trouvé à Délos, et par occasion de la gnomonique des anciens, par M. le chevalier Delambre. Année 1814 », *Mémoires de la classe des sciences mathématiques et physiques de l'Institut de France. Années 1813, 1814, 1815*, Paris, 1818, p. XXIX-XXXIX ; et enfin « Lettre de M. Delambre, secrétaire perpétuel de l'Institut royal de France pour les sciences mathématiques, au sujet d'un cadran antique rapporté

cabinet des Médailles de Paris⁶ où il fut exposé dans la salle du zodiaque. En 1929, il fut transféré au Louvre, où il se trouve toujours aujourd'hui, conservé dans les réserves sous le numéro d'inventaire MND 1580 / Ma 4823.

Notre but n'est pas de donner une description complète de l'objet. En effet, J.-B. J. Delambre en a donné de très bonnes il y a deux siècles maintenant. Ces études peuvent se trouver aisément sur internet. Le lecteur peut également se reporter à la publication de M. Hamiaux citée en note 3. Néanmoins, nous souhaitons apporter quelques informations supplémentaires sur le lieu de découverte du cadran ainsi que sur certaines de ses particularités.

LE TEMPLE D'APOLLON À DÉLOS



Les informations concernant le lieu de découverte exact du cadran ne sont pas très précises. L'aquarelle de C.R. Cockerell montre que l'instrument ne se trouvait déjà plus à l'endroit précis de son érection lorsqu'il a été découvert. Il a été réutilisé, probablement à partir du III^e siècle de notre ère, comme matériau de construction dans un mur en pierres sèches. Cependant, d'après Cockerell et Mauduit, nous pouvons supposer que l'ensemble fut, à l'origine, érigé à proximité du temple

d'Apollon. De nos jours, le nom de « temple d'Apollon » est utilisé pour trois temples situés à l'intérieur du sanctuaire d'Apollon. En 1810 par contre, il ne pouvait s'agir que du « grand temple » périptère hexastyle construit entre le V^e et le I^{er} siècle avant notre ère. Pour des raisons inconnues, ce temple n'a jamais été terminé.

Nous ne pourrions peut-être jamais préciser quel était le lien entre ce temple et le cadran solaire, et peut-être même n'y a-t-il jamais eu de lien réel. Mais la présence de nombreux cadrans solaires antiques dans des sanctuaires dédiés à Apollon permet de supposer que ce lien n'est peut-être pas que le fruit de l'imaginaire des archéologues. Le cadran solaire est en effet très souvent associé à Apollon (ou à d'autres dieux encore) dans l'Antiquité. A Naucratis (Égypte) par exemple, un cadran solaire miniature a été découvert à l'intérieur même du temple d'Apollon. Il est conservé au British Museum sous le numéro d'inventaire 1909 2-16 10. À Pompéi, il s'en trouvait également un, sur une colonne, en face du temple. Malheureusement, nous ne comprenons pas encore exactement la raison de ces dispositions particulières. Le lien entre Apollon et le Soleil est indubitablement important. Mais ce qui pose réellement question, c'est de savoir si le cadran solaire avait une fonction bien définie lors des célébrations cultuelles ou s'il servait simplement à donner l'heure aux personnes fréquentant le sanctuaire.

INFORMATIONS SUPPLÉMENTAIRES SUR LE CADRAN SOLAIRE

L'instrument est relativement bien conservé (figure 1). Seule la base du cadran est endommagée. Il manque néanmoins le gnomon cylindrique. Des traces de pigment rouge sont

de Délos par l'auteur », dans *Découvertes dans la Troade, extrait des mémoires de A. F. Mauduit*, Paris, 1840 p. 236–239, fig 3 et 4.

⁶ *Le Moniteur universel* 264, 21 septembre 1814.

visibles le long des lignes horaires et calendaires (figure 2), mais elles semblent plutôt modernes (XIX^e siècle). Le disque de marbre sur lequel le cadran est gravé mesure 56 cm de diamètre. Il est presque circulaire, avec un pied rectangulaire (en partie manquant) à la base. Le centre du disque présente encore l'orifice circulaire utilisé par l'artisan pour dessiner puis tailler la forme circulaire du cadran. Au-dessus du trou de scellement du gnomon, nous avons pu remarquer un graffiti, difficilement lisible et, selon toute vraisemblance, moderne. Deux petites marques à peine visibles placées sur la ligne d'horizon pourraient être les témoins de la méthode utilisée pour tracer le réseau horaire. L'arrière de la pierre est lisse, sans inscription ou autre réseau horaire complémentaire. Seuls trois orifices circulaires sont présents, l'un d'eux correspondant au trou de scellement du gnomon. Les deux autres seraient les restes d'un système de fixation du cadran à un support, probablement un mur.

Enfin, la forme de ce cadran solaire, connue seulement par un autre exemple à Grottaferrata, pourrait se rapprocher de ce que Vitruve nomme le *discus in planitia*. Cela reste bien sûr hypothétique.



Fig 1. Cadran solaire de Délos conservé au Louvre, face principale. Cliché : J. Bonnin 2012.



Fig 2. Vue rapprochée du réseau horaire.

ÉTUDE GNOMONIQUE (DENIS SAVOIE)

Il s'agit d'un cadran solaire vertical qui fonctionne orienté exactement vers l'est. C'est donc un cadran vertical oriental, fonctionnant le matin, du lever du Soleil jusqu'aux environs de son passage dans le plan du cadran, donc avant midi solaire.

Les cinq lignes d'heures ne sont pas chiffrées ; l'heure indiquée est l'heure temporaire. Le cadran comporte deux arcs des solstices (le plus bas est celui du solstice d'été, le plus haut celui du solstice d'hiver) et la droite des équinoxes. Le style droit, c'est-à-dire le gnomon horizontal (perpendiculaire au plan du cadran) qui porte ombre sur le cadran et dont l'extrémité seule indique l'heure (et la date) est implanté à l'intersection de la ligne des équinoxes et de la droite horizontale (celle-ci correspondant à l'instant du lever du Soleil). On note un très léger décalage du trou d'implantation par rapport à la droite équinoxiale.

Afin de déterminer la latitude pour laquelle ce cadran est calculé, on relève l'inclinaison de la droite des équinoxes avec la ligne horizontale qui passe par le pied du gnomon, cet angle valant $(90^\circ - \varphi)$ où φ est la latitude. Plusieurs mesures⁷ donnent un angle de 59° avec une incertitude de $0,5^\circ$. D'où une latitude de $31^\circ \pm 0,5^\circ$ (Rappel : la latitude moderne de Délos est $37^\circ 23'$; celle d'Alexandrie de 31° . Il y a donc un écart en latitude d'au moins 6°).

Sur la droite des équinoxes, on relève la distance r entre une ligne d'heure et le point d'implantation du gnomon. On détermine ainsi la longueur a du gnomon par la relation trigonométrique : $a = r \tan H$ où H est l'angle horaire équinoxial ($H = 15^\circ$ pour la ligne temporaire 5, 30° pour la ligne temporaire 4, etc).

Pour $H = 15^\circ$, on mesure $r = 9,2$ cm d'où $a = 2,5$ cm.

Pour $H = 30^\circ$, on mesure $r = 4,3$ cm d'où $a = 2,5$ cm.

Pour $H = 45^\circ$, on mesure directement $a = 2,6$ cm.

Pour $H = 60^\circ$, on mesure $r = 1,5$ cm d'où $a = 2,6$ cm.

On notera que 1 millimètre d'erreur (due à la mesure, à l'épaisseur du trait gravé, à la légère excentricité du trou) se traduit par une erreur de ± 1 mm. Les valeurs semblent plus proches de 2,6 cm quand on recalcule le cadran de façon moderne.

En adoptant une obliquité de l'écliptique de 24° (au II^e siècle av. J.-C, elle vaut en réalité $23^\circ 43'$), le calcul moderne⁸ (avec comme paramètres $\varphi = 31^\circ$, $a = 2,6$ cm) montre que l'arc hyperbolique d'été est très bien calculé sur la partie haute, donc depuis la ligne d'horizon jusqu'à la ligne temporaire 5. Ensuite il plonge trop brutalement puisqu'il recoupe la verticale passant par le point d'implantation, ce qui n'est pas normal. Les lignes d'heures temporaires entre l'arc d'été et la droite des équinoxes sont parfaitement correctes.

Par contre l'arc hyperbolique d'hiver est totalement erroné ; sa distance à la ligne équinoxiale est bien trop importante. On note en plus une nette cassure des lignes d'heures automne-hiver sur l'équinoxiale ; non seulement l'arc est faux mais en plus les lignes le sont également : elles

sont trop inclinées et devraient être dans le prolongement des lignes printemps-été.

Cadran vertical oriental trouvé à Délos

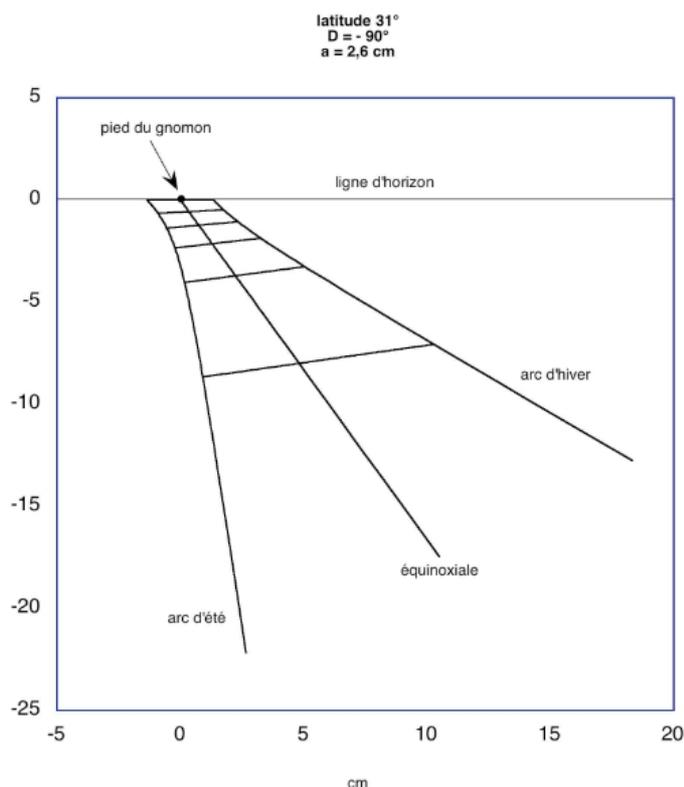


Fig 3. Tracé du cadran de Délos tel qu'il devrait être.

⁷ Toutes les mesures ont été faites sur deux frottis, en plus de mesures directes sur le cadran.

⁸ D. Savoie, *La Gnomonique*, Les Belles Lettres, Paris, 2008.

On notera que le déplacement en latitude du cadran (tracé pour une latitude de 31° et installé à une latitude de $37^\circ 23'$) entraîne une erreur maximale de 9 minutes d'heure temporaire (en valeur absolue) en hiver (figures 3 et 4). En fait, l'erreur la plus flagrante (et qui devait être bien visible) était que l'extrémité de l'ombre du gnomon ne tombait pas sur les arcs des solstices ni sur la droite des équinoxes à la bonne date.

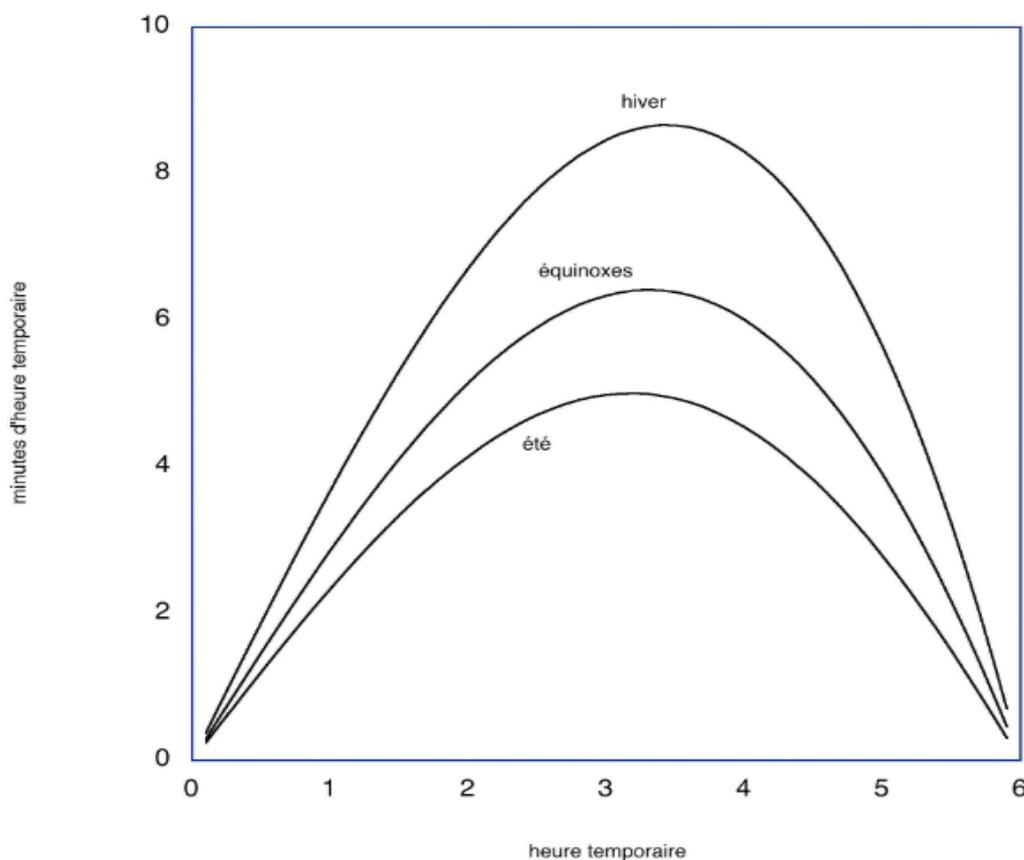


Fig 4. Erreur dans la lecture de l'heure due à un déplacement en latitude.

CONCLUSION

Pour conclure, nous pouvons présenter ce cadran solaire comme exceptionnel à bien des égards. En premier lieu, sa typologie, son lieu de découverte et les circonstances de cette dernière sont des éléments inhabituels. De plus, en dépit d'un réseau horaire assez différent de ce que l'on pourrait attendre, cet instrument s'intègre bien dans la liste, importante, des cadrans solaires découverts à Délos. Enfin, nous avons également la chance de posséder à son sujet de documentation illustrée dès le début XIX^e siècle, de plusieurs études scientifiques et d'une étude mathématique moderne. Les cadrans solaires antiques possédant une telle documentation sont rares. Il reste cependant plusieurs questions à éclaircir, notamment à propos de sa situation originelle, de la raison de sa réalisation ou encore de la méthode utilisée pour sa construction.





Cadran de hauteur "triangle"

André BOUSQUET

C'est en lisant l'ouvrage L'Astrolabe, Histoire, théorie et pratique de R. D'Hollander (Paris, 1999) où l'auteur faisait mention d'un instrument moderne dit « Girasol » que A. Bousquet eut l'idée d'inverser l'usage du système et de partir de la mesure de la hauteur du Soleil pour connaître l'heure.

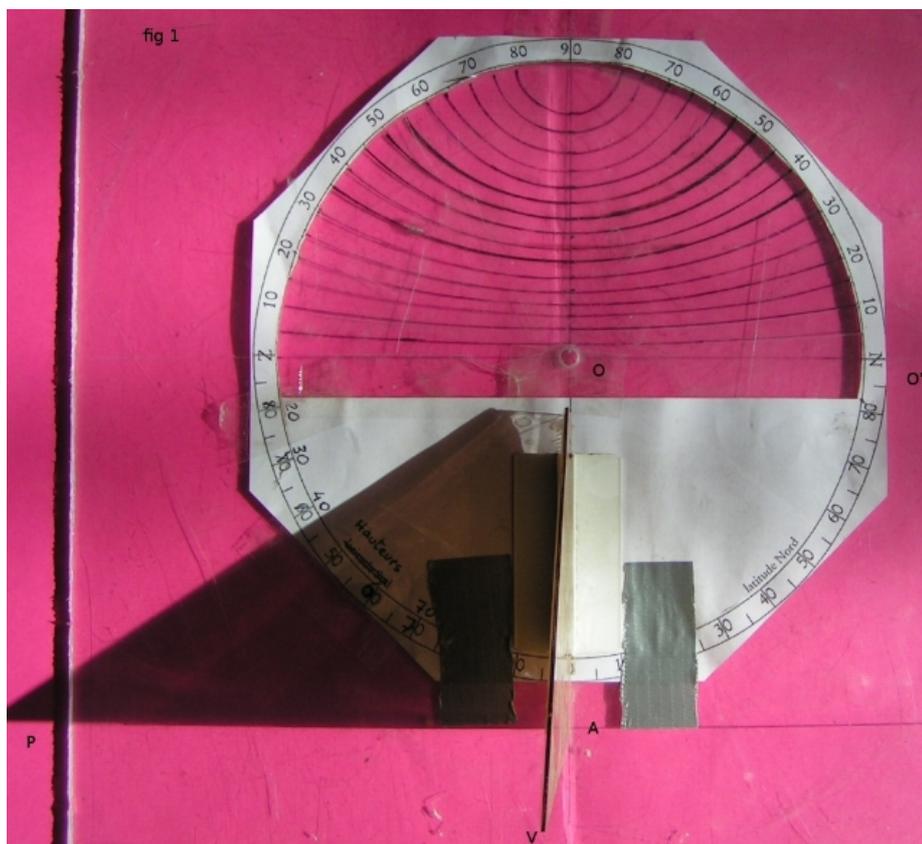
En lisant l'ouvrage *L'Astrolabe, Histoire, théorie et pratique* de R. D'Hollander (Paris, 1999), j'ai remarqué au chapitre 13 (13.8 plus précisément) que l'auteur faisait mention d'un instrument moderne dit « Girasol », présenté ainsi :

« ...Le système ainsi réalisé a été baptisé Girasol. Il est décrit, dans le Girasol, hauteur et azimut du Soleil pour toutes les latitudes, construction et applications, édité par le Centre de recherches méthodologiques d'architecture (CERMA) de Nantes, qui en est le concepteur et le réalisateur. »

Il s'agit essentiellement de déterminer la hauteur et l'azimut du Soleil en fonction de la date, de l'heure et de la latitude.

L'idée m'est venue que l'on pouvait inverser l'usage du système en mesurant la hauteur du Soleil pour connaître l'heure, d'où le titre du cadran, mais je ne suis pas très versé dans la classification des cadrans solaires.

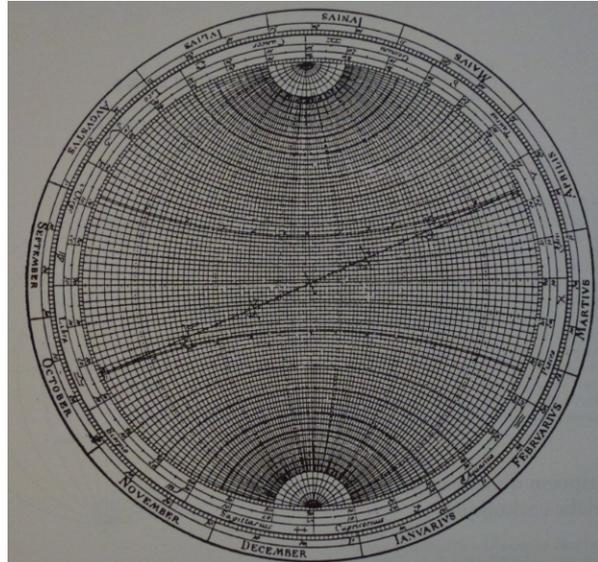
Je reprends une dénomination voisine de celle attribuée par J-F. Echard à un cadran dérivé du cadran de Freeman (Cadran-Info, n°13 mai 2006).



Dans la figure 1, la demi-circonférence inférieure sert à cette mesure de hauteur à partir de l'ombre de l'hypoténuse d'un triangle rectangle isocèle. Le triangle est orienté perpendiculairement au Soleil. Le triangle horizontal APO est égal au triangle AVO, l'angle h se trouve en P et se lit comme angle complémentaire de POA.

La valeur de h est reportée dans un dispositif inspiré du Girasol, qui est un astrolabe simplifié du type scaphé (projection depuis le point vernal gamma sur le grand cercle/colure des solstices) [voir *L'Astrolabe* au chapitre VIII].

Scaphé de l'astrolabe catholique de Michel Coignet, 1598, pl. XII du chapitre VIII. ►



La simplification vient du fait que l'on ne s'intéresse qu'au Soleil d'une part et d'autre part que l'on ne trace que les parallèles (en cercles croissant depuis le pôle jusqu'à l'équateur) en négligeant les méridiens qui pourraient servir comme autre moyen de connaître l'heure à partir d'une mesure d'azimut.

Dans la figure 2, l'abaque d'évaluation comprend une deuxième partie mobile portant les déclinaisons du Soleil et les angles horaires, exprimés en heures.

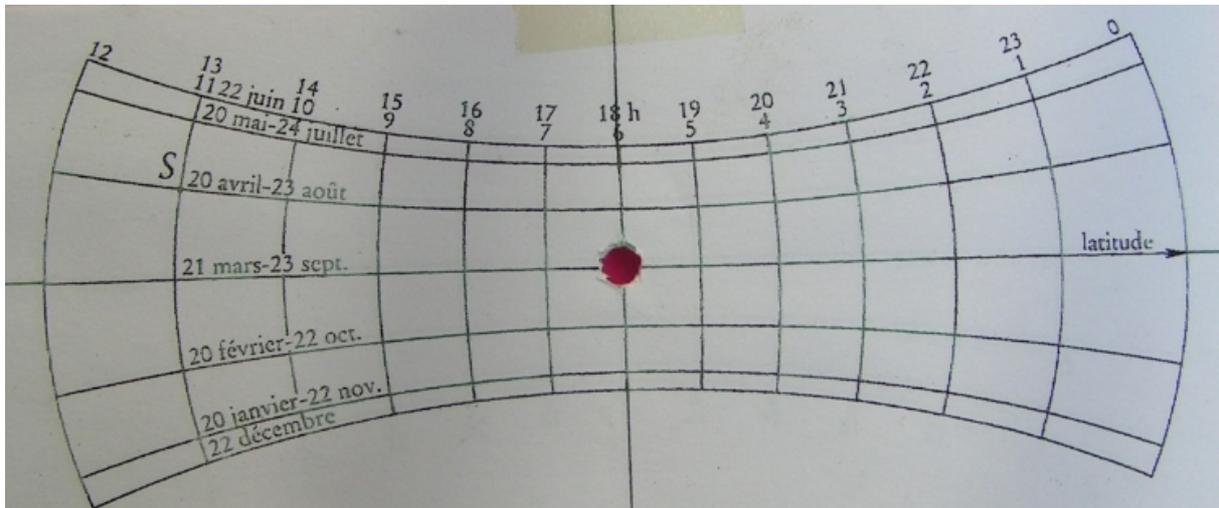
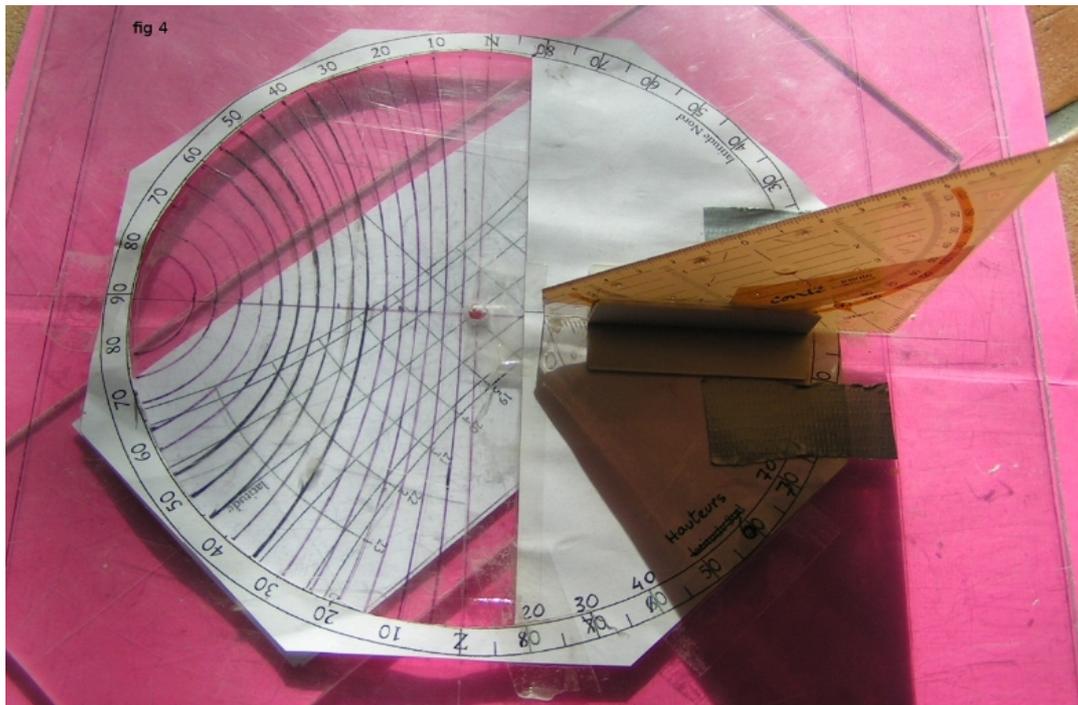
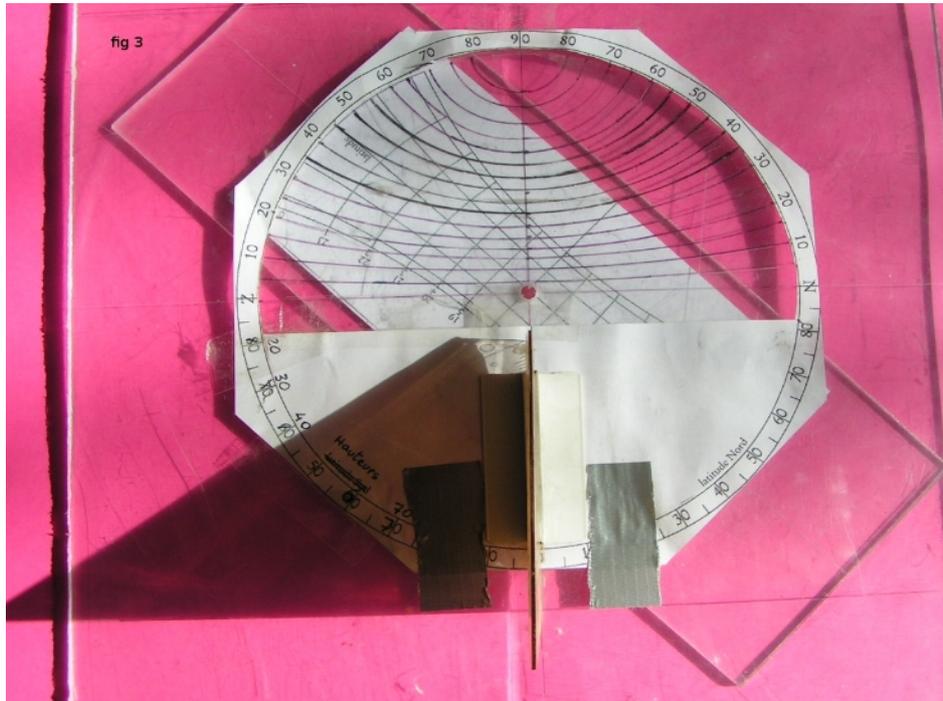


Figure 2.

La maquette montre que l'évaluation se fait par interpolation entre courbes... ce qui conduit à une certaine approximation que je n'ai pas évaluée ; ce n'est pas un cadran de précision.

A noter que le cadran a un diamètre de 20 cm environ.





Maquette d'un cadran catoptrique

J. Fernando CAPRILES H.

Le site web¹ de J. Fernando Capriles H² signalé par Reinold Kriegler, décrit la réalisation d'un petit cadran solaire équatorial à réflexion. Avec la permission de l'auteur, voici une traduction libre de son article.

Comme le cadran solaire à diffraction, le cadran à réflexion peut servir d'indicateur horaire, en remplaçant l'ombre du gnomon par un faisceau de lumière.

Cette fonctionnalité nous permet de réaliser un couple de cadrans solaires (cadran équatorial avec tracés de part et d'autre de la table) dans un ensemble qui pourrait être qualifié de «cadrans solaires réversible»

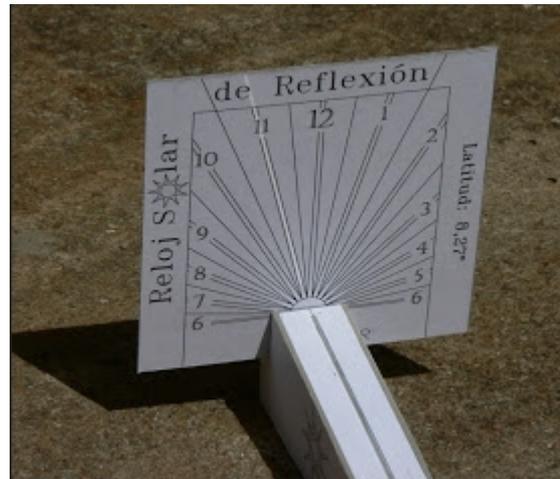
Ce type d'horloge, connu depuis l'Antiquité, porte le nom d'horloge catoptrique, en référence à l'art ou science qui étudie la réflexion de la lumière.

Dans cet article, nous allons décrire la réalisation d'un cadran équatorial catoptrique à partir d'un miroir plan, qui reflète la lumière du Soleil telle une «aiguille de lumière» qui pivote au rythme de la nature.

En tant que «projet test», cette horloge est basée sur la réflexion et le principe des cadrans équatoriaux. Ces derniers ont l'avantage d'être la plus facile des constructions, évitant les formules complexes ou des coordonnées divers.

Pour être clair, les lignes horaires sur un équatorial sont simplement obtenues par le tracé d'angles égaux de 15° répartis uniformément autour du centre du gnomon.

Pour comprendre le principe de fonctionnement de cette montre à réflexion, il



faut savoir, qu'un cadran équatorial reproduit parfaitement le mouvement diurne du Soleil sur la sphère céleste quelle que soit la saison. Il peut être démontré facilement par la géométrie de niveau secondaire que le Soleil «tourne» autour du gnomon durant toute la journée à raison de 15° par heure.

Dans notre cadran à réflexion équatorial, le style est remplacé par un miroir plan étroit, de sorte que la lumière puisse «rebondir» comme une bande de lumière qui semble émerger de l'origine des lignes horaires et se projeter sur la «table» du cadran. Le miroir a sa surface réfléchissante tournée vers le ciel et il est par définition parallèle à l'axe du monde. Ainsi la

1- <http://sudandolagotagorda.blogspot.fr/2010/12/reloj-de-sol-por-reflexion-o-catoptrico.html>.

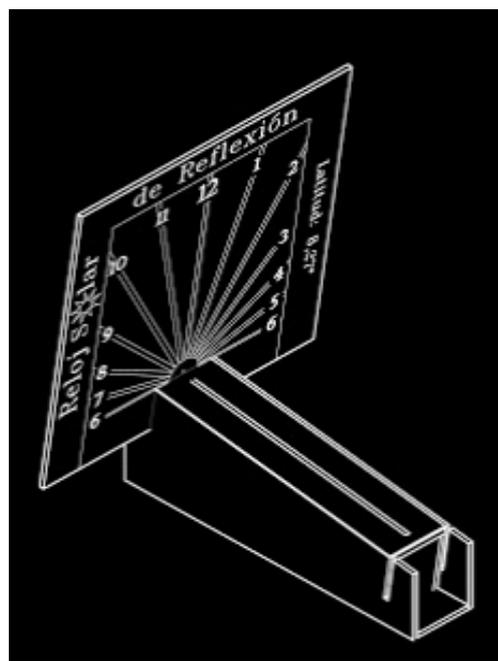
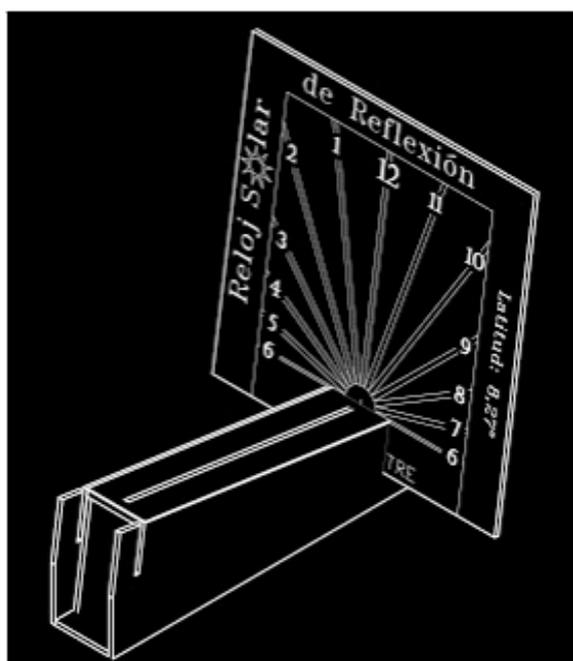
2- jfcapriles1@cantv.net.

lumière réfléchi reproduit sur la table le mouvement de l'ombre d'un style classique.

De par le principe équatorial de notre horloge, la table du cadran est graduée des deux côtés et disposée vers le Soleil d'un côté ou de l'autre en fonction des saisons (automne/hiver ou printemps/été). La base du cadran qui est également le support du miroir assure le parallélisme avec l'axe de rotation de la Terre et par conséquent le parallélisme de la table avec l'équateur. Le miroir est placé sous un masque afin de produire un réflecteur à bande étroite, et ainsi une sorte d'aiguille horaire lumineuse.

Le cadran solaire à réflexion que nous concevons est situé au tropique du Cancer. Le trajet apparent annuel du Soleil dans le ciel est donc nord-sud au zénith. De la sorte durant les mois de janvier, février, mars, septembre, octobre, novembre, décembre et une partie d'avril, le Soleil brille au sud de la table du cadran solaire en regardant dans cette direction, alors que durant les mois d'avril (en partie), mai, juin, juillet et août, le Soleil est situé au nord et l'éclairage se fait sur l'autre face de la table du cadran. C'est la raison pour laquelle il est nécessaire que cette table équatoriale soit tracée des deux côtés et qu'elle doit aussi occuper deux positions différentes (fixation dans la fente du bas du support ou fixation dans la fente du haut) selon que le Soleil est situé au nord ou au sud du plan de la table.

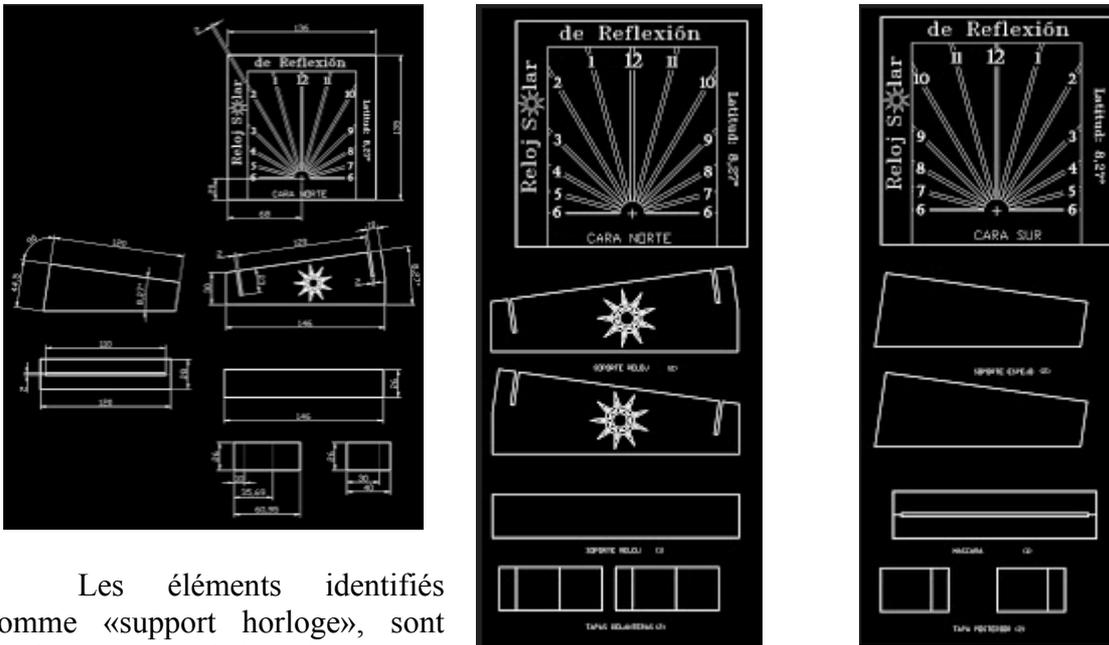
Les images suivantes montrent le cadran solaire en position pour la période où le Soleil est au nord du plan de la table et celle où le Soleil est au sud de celui-ci.



Pour ce petit projet a été utilisé un miroir issu d'un ancien kaléidoscope. Les dimensions du miroir plan sont de 25 x 3 x 120 mm.

En raison de la petite taille du miroir, l'horloge est elle-même de taille modeste et sa construction est réalisée avec un carton de 2 mm d'épaisseur. Ces matériaux sont ceux que j'ai utilisé pour réaliser tous les différents types de cadrans solaires présentés sur mon site.

Les images ci-dessous montrent les constituants du cadran solaire.



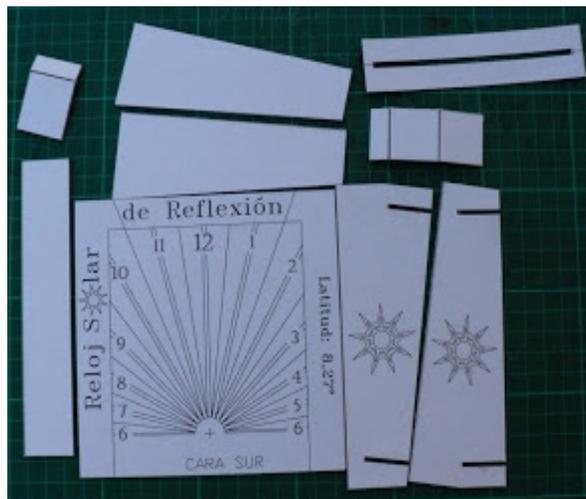
Les éléments identifiés comme «support horloge», sont destinés à recevoir le cadran

solaire équatorial lui-même (table) et à le fixer en fonction de la latitude. Les composants appelés «porte-miroir» sont sur les faces intérieures du «support horloge». C'est le miroir qui servira de gnomon lumineux. La profondeur des rainures pour recevoir la table du cadran solaire comprend l'épaisseur du verre du miroir au centre du cadran et correspond à ce qui est appelé la platine. A l'emplacement du miroir, le «masque» permet que le reflet du miroir ne soit qu'un étroit faisceau de lumière projeté sur la table équatoriale. L'épaisseur du masque doit être aussi faible que possible et en l'occurrence, j'ai utilisé uniquement du papier ordinaire.

Mieux que des mots, la série de photographies ci-après montrent étape par étape le processus de fabrication et d'assemblage du cadran solaire par réflexion.



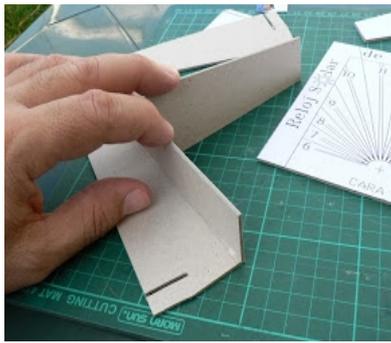
Ensemble des pièces en carton



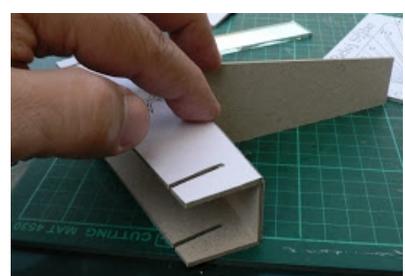
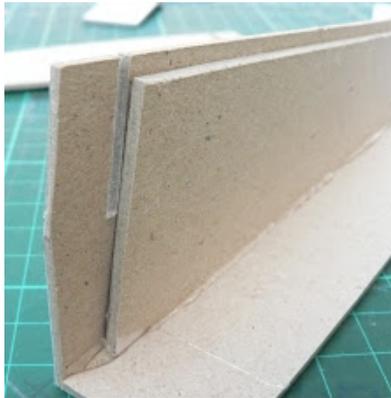
Pièces découpées et prêtes à être assemblées



Miroir



Assemblage du support du cadran et mise en place du support du miroir



▲ Support avec le miroir en place

Le miroir avec son masque de papier ►



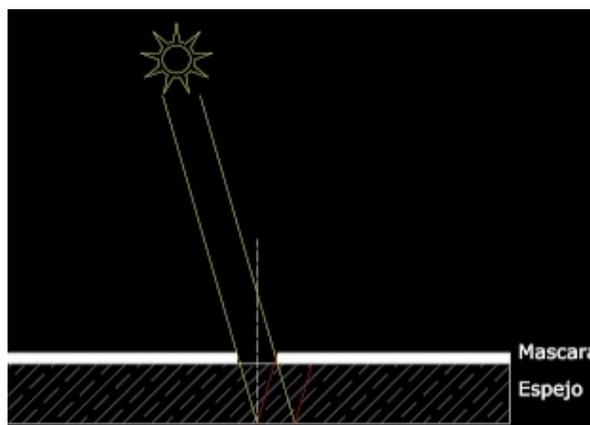
L'horloge conçue est ici calculée pour la ville de Puerto Ordaz ($8,27^\circ$ de latitude nord). Pour une autre latitude, l'angle de $8,27^\circ$ indiqué sur les dessins devra être remplacé par celui de l'endroit où sera réalisé le cadran à réflexion.

Pendant le suivi des heures indiquées par le cadran solaire, j'ai pu constater qu'il ne peut pas montrer les heures au-dessous de 10 h 30 AM ou au-delà de 1 h 30 PM, «l'aiguille lumineuse» n'étant pas visible. Ce défaut provient du miroir utilisé et de la conception même (erreur de débutant). Cependant il convient de se concentrer sur l'idée principale, en ignorant certaines considérations. Ainsi, la réalisation pratique de cette maquette donne le ton et nous offre l'occasion d'améliorer les futures constructions, de même que l'incitation à rechercher la

cause des erreurs ou les lacunes.

En traçant rapidement le trajet des rayons lumineux réfléchis, nous nous rendons compte de la cause de l'échec.

Le miroir utilisé est constitué d'un verre normal, dans lequel la platine est dans le fond, de telle sorte que, sous un certain angle d'incidence, la lumière réfléchie est interceptée par le masque. Le masque est 3 mm au-dessus de la couche réfléchissante, ce qui limite fortement l'angle balayé par l'horloge de l'aiguille lumineuse, comme le montre la figure ci-contre.



Malgré ce détail perturbant, l'horloge a fonctionnée selon son principe basé sur la réflexion de la lumière solaire. La conception peut être considérablement améliorée si l'on utilise un miroir dont la couche de platine recouvre la surface supérieure (je n'ai pas pu m'en procurer) et non la partie inférieure comme le miroir utilisé.

Cet essai incite à développer un cadran catoptrique dont le cadran équatorial montre la simplicité. La présente expérience offre un aperçu des possibilités de ce type de conception en laissant toute liberté à l'esprit créatif des lecteurs.



Le cadran indique l'heure solaire de 11:00 AM

On trouveras sur le site <http://sudandolagotagorda.blogspot.fr/2010/12/rejoj-de-sol-por-reflexion-o-catoptrico.html> de J. Fernando Capriles H. des propositions d'améliorations (surface polie) ou de simplifications (utilisation d'un cadran équatorial classique sans déplacement de la table en fonction des saisons).





L'astrolabe d'Oughred

Dominique COLLIN

Une Découverte

Une récente acquisition sur les sextants de marine¹ me fit découvrir de façon totalement fortuite, un instrument de navigation appelé *Marean-Kielhorn Director*. L'apparence de la représentation graphique qui l'équipait ne laissa aucun doute quand à son origine : il s'agit d'une projection stéréographique de la voute céleste, et donc d'un astrolabe... Quand à la fonction de chacun des autres organes apparents, c'était encore un mystère avant son achat.

La décision de son acquisition fut assez rapide, poussée même par la rareté avérée de l'instrument après quelques recherches sur l'Internet. Une brève description avait été publiée dans la revue américaine du NASS, "The Compendium", par M. Stephens Sasch. [Sasch, 2010]. Je me propose ici de décrire cet instrument et son fonctionnement. Puis après avoir brièvement présenté une reconstitution graphique du tympan de l'instrument² sur système LaTeX/Tikz, j'aborderai la précision que l'on peut espérer atteindre en présentant quelques problèmes qui peuvent être résolus avec ce nouvel instrument.

1. Description de l'instrument

(a) *L'instrument (fig.1) est composé :*

- d'un grand plateau circulaire en bakélite gradué depuis le nord de 0° à 360° - les quatre points cardinaux sont marqués N, E, S, W ; ce plateau est muni de deux index fixes repliables, placés sur la ligne nord-sud. Un grand index placé côté nord (N) et de couleur orange et un index côté sud correspondant à une fente de visée pour l'observateur. Le plateau permet aussi le rangement des différents tympan. Il est muni d'un axe central et d'un second axe du côté nord : simple vis dans laquelle se loge les tympan perforés à cet effet, ce qui les maintiens lors de la rotation du second plateau.
- d'un disque en plexiglas, mobile et équipé de deux index repliables : un au centre et un autre à l'extrémité de l'échelle des hauteurs. Ce plateau se fixe sur le grand plateau à l'aide d'une vis moleté assurant un serrage sans blocage.
- d'une échelle de hauteur gravée sur le disque en plexiglas (ligne rouge) ;
- d'un total de quatre index dont trois sont muni d'un trait de repère (voir (b)) :
 - deux index de visée pour l'horizon en mer (1 fente + 1 plexiglas orange) ;
 - deux index pour l'acquisition de la hauteur du soleil :
 - 1 index (plexiglas vert) pour la projection sur l'index translucide ;
 - 1 index central, en plexiglas translucide, pour la réception de l'ombre de l'index vert et la conservation de l'alignement de l'horizon ;
- d'une pile de 33 disques cartonnés (ce sont les tympan) avec un trou au centre de 16 mm de diamètre et deux petits trous côté nord et côté sud permettant de loger correctement le tympan et permettre l'utilisation pour l'hémisphère nord ou pour l'hémisphère sud.
- de deux clips (rouge et blanc) se fixant sur la circonférence du plateau.

Et au dos de l'instrument :

- une courroie (fixée par des rivets) pour tenir l'instrument d'une main ;
- une table de déclinaison de +24° à -24°, avec un pas de 1° tous les 4 jours ;

¹ Instrument de précision permettant la mesure de la hauteur du soleil ou des étoiles.

² Un exemplaire, modèle « Life-boat », du *Marean-Kielhorn Director* sera gracieusement offert à la commission des cadrans solaires lors de l'une de ses réunions de l'année 2013.

- un manuel d'instruction rapide.

Et enfin, l'instrument possède sa propre boîte de rangement, en bois, munie d'une courroie pour le transport.

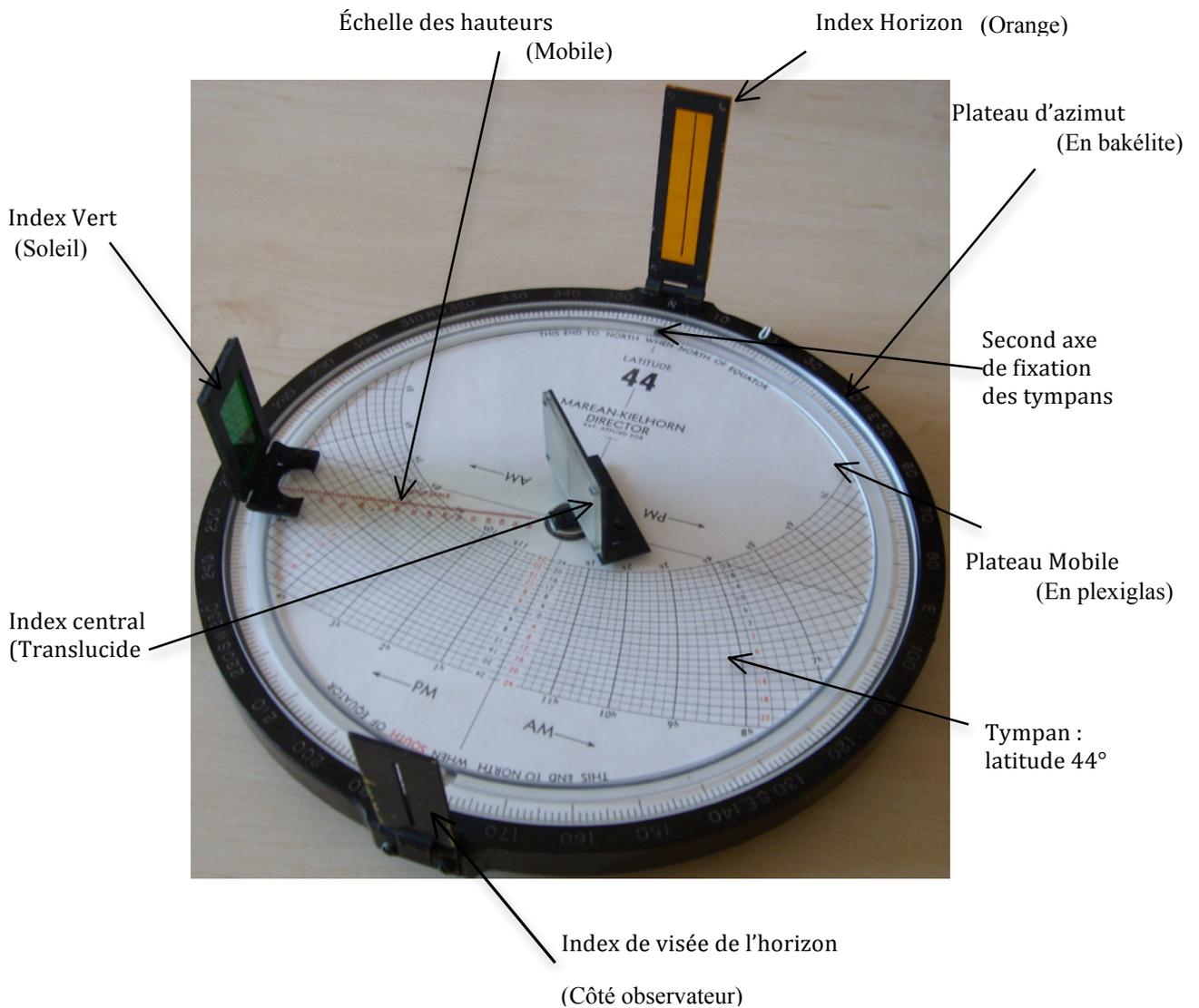


Fig. 1.1 - Présentation générale de l'instrument.



Correspondance date-déclinaison

Instructions rapides

Fixation de la courroie

Fig. 1-2 - Dos de l'instrument.

Les deux trous sur le fond du plateau principal (fig. 2) permettent de soulever par le dessous la pile des 33 tympan pour les retirer un par un ou en bloc.

(b) Les index. Photos et description rapide

Tous les index sont repliables. Pour se servir de l'instrument, il faut les dresser perpendiculairement aux plateaux. Le dispositif de fixation permet d'assurer et de fixer la perpendicularité. (Cf. Description dans le brevet US n°2440827).

Plateau fixe en bakélite		Plateau mobile en plexiglass	
Index côté nord (N) muni d'un axe central devant s'aligner sur l'horizon.	Index côté sud - fente de visée de l'horizon et derrière laquelle se place l'œil de l'observateur. Lorsque ces deux index sont inopérants, on utilise un niveau à bulle.	Index vert placé à l'extrémité de l'échelle des hauteurs. Il se déplace sur le cercle horizon. Sa ligne centrale, qui se projette sur l'index au centre, sert aussi de gnomon lorsqu'on tient l'instrument horizontalement.	Index translucide. Il sert à recevoir l'ombre de la ligne centrale de l'index vert (gnomon) par superposition avec son propre index, tout en contrôlant son alignement avec celui de l'horizon (index orange). L'angle entre les normales des index vert et translucide est de 29°.
			

(c) *En ce qui concerne les tympan*

- Sur la circonférence de chaque tympan : des graduations de 1° à 360° , avec un trait plus long tous des 5° puis autre un peu long tous les 10° . (La valeur de l'azimut étant gravé sur le grand plateau tous les 10°).
- Chaque disque est dessiné sur une seule face.
- Les disques comportent la projection stéréographique sur l'horizon des éléments de la sphère céleste à partir du Nadir, pour toutes les latitudes paires de 0° à 64° . (33 disques).
- Le tympan pour une latitude donnée peut servir autant pour l'hémisphère nord que pour l'hémisphère sud.
- La projection du pôle nord céleste est indiquée lorsque cela est possible.
- Les lignes nord-sud et est-ouest sont tracées sur le tympan.
- L'installation du tympan pour l'hémisphère nord ou sud est respectivement indiqué par le texte : « this end to north when north of equator » et « this end to south when south of equator ». Le mot south est en rouge.

Sur chaque tympan on trouve :

- Des arcs de cercles limités par les arcs des solstices (ou arcs de déclinaison 24° , valeur volontairement arrondie). Ce sont les *parallèles célestes* ou *arcs-diurnes* en projection stéréographique.
 - L'arc de cercle de l'équateur est en trait épais.
 - Les déclinaisons positives sont en noir : elles correspondent aux jours où le soleil est au-dessus de l'équateur céleste.
 - Les déclinaisons négatives sont en rouge : elles correspondent aux jours où le soleil est sous l'équateur céleste.
 - Elles sont tracées de 2 en 2 degrés.
 - Elles sont marquées tous les 4 degrés le long du méridien ($\delta=24, 20, 16, 12$ etc.) et respectivement à l'endroit et à droite du méridien et à l'envers à gauche du méridien. Puis tous les 4 degrés, et à l'endroit, le long d'un méridien céleste respectivement du matin et du soir ($\delta=22, 18, 14, 10$, etc.).
- Des arcs de cercles passant tous par le pôle nord céleste : ce sont les *méridiens célestes* ou arcs horaires. Les angles horaires sont directement exprimés en temps vrai. Ils sont tracés tous les 10 min de temps vrai ; les arcs des heures pleines sont en trait épais.
 - Les graduations des heures pleines de l'est vers le méridien le long du solstice d'hiver (pour l'hémisphère nord) sont $5^h, 6^h, 7^h, 8^h, 9^h, 10^h, 11^h$; celles du méridien vers l'ouest sont $1^h, 2^h, 3^h, 4^h, 5^h, 6^h, 7^h$...
 - Le long du solstice d'été le marquage des heures pleines est écrit à l'envers (ils servent donc pour l'hémisphère sud et l'arc correspond alors au solstice d'hiver...) Les graduations de l'est vers le méridien sont : $6^h, 7^h, 8^h, 9^h, 10^h, 11^h$; celles du méridien vers l'ouest sont $11^h, 10^h, 9^h, 8^h, 7^h, 6^h, 5^h$... Elles serviront lorsque l'observateur est dans l'hémisphère sud.
 - Les indications « AM » et « PM » du côté de solstice d'hiver, puis du côté du solstice d'été confirment la distinction des heures du matin et de l'après-midi.

Une reproduction fidèle du tympan se trouve en annexe. La construction est décrite au paragraphe 3.

(d) *L'échelle des hauteurs*

- Elle est gravée en rouge sur le disque mobile transparent.
- Elle est graduée tous les degrés avec marquage des hauteurs tous les 5 degrés de 5° à 75° .
- Le prolongement de l'échelle des hauteurs pointe sur l'azimut du soleil lorsque le réglage

est réalisé. Le réglage consiste à faire coïncider la hauteur avec un arc de déclinaison, ou avec un arc horaire selon les données initiales utilisées. (Cf. Paragraphe 4 pour plus de détail).

- Sur le zéro de l'échelle des hauteurs est placé un gnomon : c'est l'axe de l'index vert. L'alignement de l'ombre de l'axe de l'index vert avec l'échelle des hauteurs permet d'orienter et de caler l'instrument sur l'axe nord-sud.

2. Principales utilisations de l'instrument

Le *Marean-Kielhorn Director* possède plusieurs modes de fonctionnement. Leur combinaison permet d'obtenir l'azimut du soleil ainsi que l'alignement et la conservation de l'alignement de l'instrument avec le nord vrai. Chaque opération requiert une attention soutenue.

(a) Utilisation en tant que sextant

Le premier index (la fente de visée) et le deuxième index, l'index d'horizon (Orange) permettent la mise en station de l'instrument. L'observateur tenant l'appareil verticalement, doit placer par visée directe, les deux lignes de ces index sur la ligne d'horizon. Ensuite, par une rotation du plateau en plexiglas, il doit amener l'image du repère de l'index vert sur le repère de l'index au centre du plateau et les ajuster avec ceux de l'horizon et le grand index Orange. La hauteur du soleil est alors l'angle entre le nord (N) et la ligne rouge de l'échelle des hauteurs.

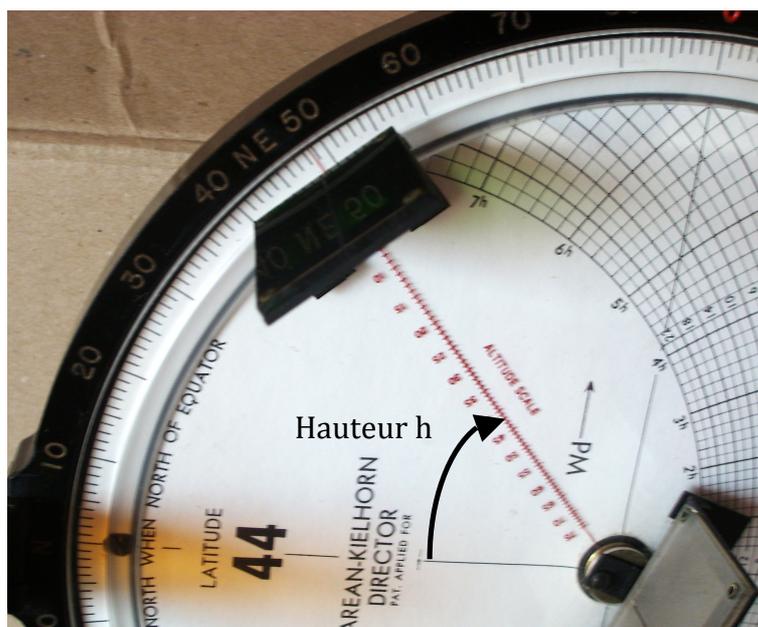


Fig. 2-1. - Lecture de la hauteur du soleil. ($h \approx 48.5^\circ$)

Lorsque l'horizon n'est pas visible ou encore lorsqu'on est dans l'incapacité d'utiliser le dispositif Fente de visée-index Orange, alors on peut avoir recours à un niveau à bulle que l'on place tangentiellement sur la périphérie du grand plateau, en tenant toujours ce dernier verticalement. Le plus simple est d'installer le niveau à bulle exactement au-dessus du repère Est (E). Ainsi, la ligne nord-sud est horizontale et l'index de l'échelle des hauteurs marque directement avec la graduation sur le tympan la hauteur du soleil... Le seul inconvénient est que l'on ne pourra pas mesurer de hauteur inférieure à 6° . Or, on peut placer ou l'on veut le niveau à bulle³ sur la circonférence et de préférence sur une graduation du grand plateau. Il faudra alors

³ On peut lire dans le brevet US n°2440827, (*op. Cit.* : Colonne 4, lignes 46 à 74), une description (figure à l'appui), pour le modèle « *Navigator* », d'un niveau à bulle qui se place sur l'index d'horizon côté nord, et signale la

prendre le complémentaire de la différence entre l'angle marqué en-dessous du niveau à bulle et celui marqué par l'index de l'échelle des hauteurs. Si α est la graduation au-dessus de laquelle est placé le niveau à bulle, alors la ligne $90-\alpha$ et $90+\alpha$ est horizontale. Prenons un exemple : si le niveau à bulle est placé au-dessus de la graduation 120° et que l'index de l'échelle des hauteurs indique 74° , alors la hauteur du soleil est de 44° (la ligne horizontale étant l'axe $30^\circ-210^\circ$).

Fig. 2-2. - Mesure de la hauteur à l'aide d'un niveau à bulle.

Il faut tenir l'instrument verticalement, assurer proprement le niveau à bulle et en même temps ajuster la projection de l'index vert sur celui de l'index au centre du plateau mobile... Ces trois réglages simultanés donnent une mesure de la hauteur du soleil avec une précision de l'ordre du demi-degré.



(b) *Utilisation en tant qu'astrolabe ou solveur du triangle de position ZPS*

La projection stéréographique des éléments de la sphère céleste sur l'horizon du lieu depuis le Nadir⁴ conduit à l'astrolabe horizontal d'Oughtred, du nom du mathématicien anglais qui, le premier, a décrit cet instrument. Examinons comment on utilise la hauteur quelle que soit la façon dont elle a été obtenue. Une mesure en un instant t de la hauteur du soleil s'écrit $h_t \pm \Delta h_t$. En général, Δh_t est de l'ordre $1/10^\circ$, voire moins s'il s'agit d'un sextant. Or, il se trouve qu'en raison des graduations de l'échelle des hauteurs, on ne va pas pouvoir exploiter une telle précision ! La mesure de la hauteur sera forcément arrondie à l'unité, ou au mieux à la moitié de l'unité selon la capacité que l'on a à apprécier l'intervalle entre deux graduations successives, sachant qu'elles sont de plus en plus resserrées à mesure que la hauteur au-dessus de l'horizon augmente. Il s'avère que procéder ainsi ne dégrade pas forcément de beaucoup la détermination de l'azimut !

Lorsque une valeur de la hauteur du soleil a été repérée sur l'échelle de hauteur, il faut faire tourner cette échelle pour amener la graduation retenue à l'intersection avec l'arc de déclinaison correspondant au jour de l'observation.

La méthode se résume ainsi :

- (1) on sélectionne sur l'échelle de hauteur la graduation correspondant la hauteur du soleil ;
- (2) on sélectionne l'arc diurne correspondant à la déclinaison approchée du soleil le jour de l'observation ;

possibilité de mettre un niveau à bulle sur la circonférence du plateau en bakélite. Le modèle présenté ici n'est pas équipé de ce dispositif : c'est une version « light » du brevet (modèle « life-boat »).

⁴ Pôle de la projection stéréographique.

- (3) on fait tourner le plateau en plexiglas de façon à amener la graduation de l'échelle de hauteur sur l'arc de déclinaison correspondant (fig.2-3a).
- (4) A ce moment-là, l'échelle de hauteur indique sur la graduation extérieure du tympan l'azimut du soleil. (Cf. fig. 2-3b.)

Se référer au paragraphe 4 pour des exemples qui, pour obtenir l'azimut, n'utilisent pas la hauteur du soleil, ou sa déclinaison. Le principe d'utilisation est de toute façon le même : il faut rechercher une coïncidence entre l'échelle de hauteur qui fait intervenir soit l'azimut, soit la hauteur, soit les deux à la fois, et un arc de cercle venant du deuxième groupe de variable : déclinaison ou angle horaire.

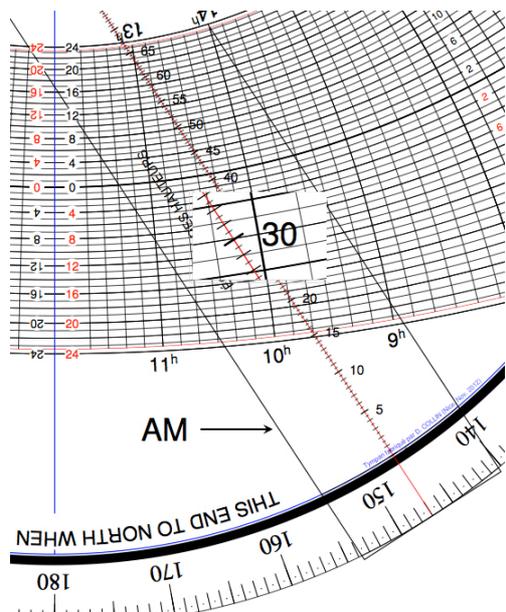


Fig. 2-3a. - Positionnement de l'échelle des hauteurs.
On ajuste la graduation 30° de l'échelle des hauteurs sur la ligne de 10° de déclinaison sud (matin du 19 octobre à 44° de latitude nord par exemple).

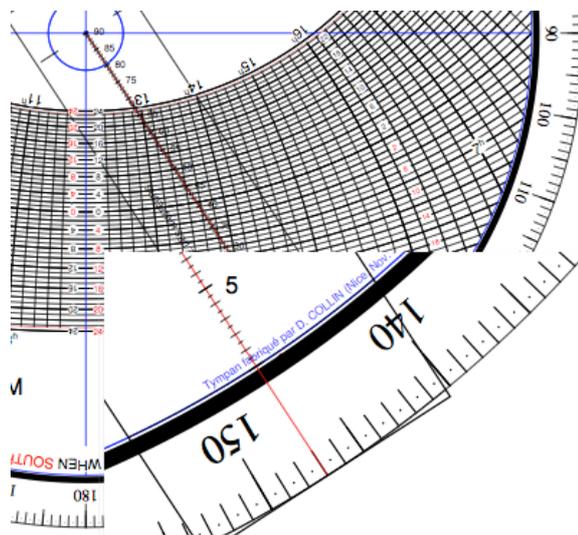


Fig. 2-3b. - Utilisation de l'échelle des hauteurs.
On lit l'azimut grâce au prolongement de l'axe de l'échelle des hauteurs (on ici $Z=147^\circ$).

(c) Utilisation en tant que boussole - Auto-orientation de l'instrument (usage final)

Lorsque l'échelle des hauteurs est fixée à partir des réglages précédents, elle indique alors une valeur numérique de l'azimut du soleil. A ce moment-là, en tenant l'instrument horizontalement avec l'index vert perpendiculaire au plateau en plexiglas, on fait tourner le grand plateau de telle façon à ce que l'ombre de l'index vert se superpose à l'échelle de hauteur. A cet moment-là, le repère de l'index vert (ou gnomon) est dans le plan azimutal du soleil : par conséquent, la ligne nord-sud est dans la direction du nord vrai.

Cet alignement est à faire à chaque mesure de la hauteur du soleil...

On peut ensuite se servir du clip côté ouest par exemple (et selon la situation) afin de le placer dans la direction suivie par l'axe du bateau : on connaît alors le cap. Réciproquement, on peut faire suivre par le bateau un cap choisi en alignant son axe dans la direction désirée et repérée par la position du clip.

Dans un autre cadre, rien n'empêche non plus un randonneur d'utiliser cet instrument pour connaître le nord, ou tout simplement s'orienter, ou encore connaître le temps qu'il lui reste avant midi, ou avant le coucher du soleil ou encore son lever... Bien sûr, il ne saurait se substituer intégralement à la très pratique boussole et une carte topographique, mais peut-être à la durée de vie des batteries d'un GPS...

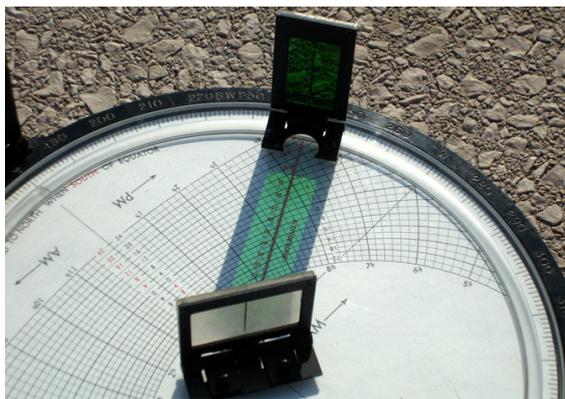


Fig. 2-4a. - Alignement de l'ombre de l'index vert sur l'échelle des hauteurs.

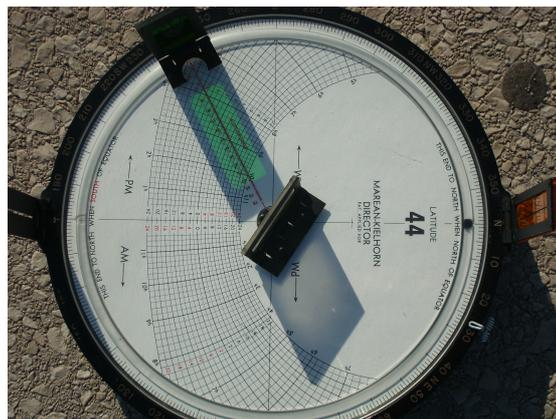


Fig. 2.4b. - Détermination du nord vrai. Lorsque l'ombre de l'axe de l'index vert et l'échelle des hauteurs sont superposés, la ligne Nord-Sud indique le nord vrai (et est donc une vraie ligne méridienne).

3. Construction du Marean-Kielhorn Director

On trouvera en annexe une reproduction fidèle de l'aspect général du tympan de cet instrument. Le dessin⁵ a été obtenu à partir du système de composition de textes scientifiques LaTeX avec l'extension TikZ⁶ permettant de faire des dessins vectoriels.

On s'est servi de la méthode de construction décrite dans le chapitre XI de l'ouvrage de R. D'Hollander (*op. cit.*). On y trouve une méthode de construction des projections des parallèles et méridiens célestes, ainsi que la construction de l'échelle des hauteurs. Il n'apparaît pas utile de faire une *n*-ième description : le *Marean-Kielhorn Director* est lui-même l'astrolabe horizontal d'Oughtred. On peut toutefois proposer un résumé des formules qui ont été utilisées dans le programme LaTeX/TikZ pour obtenir le tracé des cercles à la même échelle que l'instrument que nous avons en main. Cela aidera à la lecture du code source. Le programme délivré tel quel permet d'imprimer des tympan pour des latitudes impaires par exemple, ou encore de proposer facilement une représentation de la superposition de l'échelle des hauteurs sur le tympan, comme si l'on avait l'instrument en main (à condition toute fois de pouvoir compiler le fichier source)...

Tableau des principales formules utilisées dans le code source LaTeX/TikZ.

(Le tracé est réalisé dans le repère orthonormé Oxy , avec Ox vers l'est et Oy vers le nord)

		Code TikZ
<i>Cercles limitant le tracé général</i>		
Diamètre du cercle horizon	19,07 cm (valeur approchée)	<code>\RHorizon</code>
Diamètre du cercle extérieur (diamètre du disque de latitude φ)	21,315 cm (valeur approchée)	<code>\RExterieur</code>

⁵ Le code source (« *Marean-Kielhorn_Modifié.tex* »), muni de commentaires est disponible dans la version CD-Rom de Cadrans-Info. La limite du traitement par TikZ des dimensions d'une figure est de 5 mètres. Cette limite est dépassée pour certains rayons des cercles des parallèles célestes et/ou des méridiens, d'où les messages d'avertissement qui apparaissent lors de la compilation du fichier source, mais cela n'empêche pas de créer le fichier de sortie PDF. Ce problème n'a pas encore été corrigé dans cette première version du fichier source, ce qui entraîne des tracés incomplets pour de faibles latitudes. Le code source proposé tel quel n'est donc pas optimisé et demanderait à être amélioré afin de tenir compte de toutes les latitudes.

⁶ D'après son auteur Till Tantau, « TikZ ist kein Zeichenprogramm »... TikZ est un langage de programmation pour graphiques.

<i>Points remarquables</i>		
Zénith du lieu	Origine du repère : (0,0)	
Ordonnée du Pôle Nord céleste	$R_{Horizon} \times \tan\left(\frac{90^\circ - \varphi}{2}\right)$	\yPole

<i>Échelle de hauteur :</i>		
Ordonnée pour h=0°	$R_{Horizon} \times \tan 45^\circ$	\Zh
Ordonnée pour h quelconque dans l'intervalle [0° ; 90°].(Limité à h= 75° sur l'instrument)	$R_{Horizon} \times \tan\left(45^\circ - \frac{h}{2}\right)$	\yZh

<i>Méridiens célestes (Cercles horaires)</i>		
Ordonnée de I ; point par où passe la droite contenant les centres des projections des parallèles célestes (cercles horaires). Distance ZI.	$R_{Horizon} \times \tan \varphi$	\zi
Distance du point I au pôle. Distance PI.	$\frac{R_{Horizon}}{\cos \varphi}$	\ipole
Point de passage du cercle horaire H sur la droite passant par I.	$\frac{R_{Horizon}}{\cos \varphi} \times \tan \frac{AH}{2}$	\iH
Abscisses des centres des cercles horaires sur la droite passant par I située à la distance \zi.	$\frac{R_{Horizon}}{\cos \varphi} \times \frac{1}{\tan AH}$	\xiC
Rayon du cercle horaire d'angle horaire AH.	$\frac{R_{Horizon}}{\cos \varphi} \times \left(\frac{1}{\tan AH} + \tan \frac{AH}{2}\right)$	\RcercleH
Coordonnées des différents centres des cercles horaires.	(\xiC ; -\zi)	CentreH

<i>Parallèles célestes (cercles de déclinaison)</i>		
Centre du cercle de déclinaison δ .	$R_{Horizon} \times \frac{\cos \varphi}{\sin \varphi + \sin \delta}$	\zC
Rayon du cercle de déclinaison δ .	$R_{Horizon} \times \left(\frac{\cos \varphi}{\sin \varphi + \sin \delta} + \tan\left(\frac{\varphi - \delta}{2}\right)\right)$	\RCercledd
Position du centre du cercle de déclinaison δ .	(0; \zC)	Centredd

4. Applications numériques

Proposons quelques exercices sur l'utilisation du *Marean-Kielhorn Director* par la résolution de problèmes liés au triangle sphérique de position ZPS. On cherchera à extraire le maximum de précision, c'est pourquoi on utilisera les tables de correction, exprimée en dixième de degré, à apporter à la hauteur mesurée et/ou à l'azimut relevé par l'instrument. Placées en annexe, elles ont été reproduites d'après les tables du manuel d'instruction [Air Instruments, 1945].

Chaque exemple est détaillé et est abordé indépendamment des autres exemples au risque de créer des répétitions (qui ne seront pas forcément inutiles). L'azimut (noté Z) est compté depuis le nord (vrai). L'interpolation de l'azimut ne pourra être inférieure au quart de degré ($\frac{1}{4}^\circ$). L'angle horaire (noté AH) est exprimé en heures et minutes avec entre parenthèses la valeur angulaire correspondante. L'interpolation de l'angle horaire ne pourra pas se faire mieux que le $\frac{1}{4}$ de dix minutes de temps vrai. La déclinaison du soleil (noté δ ou ϵ pour sa valeur extrême)

sera utilisée arrondie au degré près ; arrondie au $\frac{1}{2}$ de degré lorsqu'elle est interpolée entre deux arcs-diurnes suffisamment séparés. Les heures des événements sont données en Temps Universel (TU). Les vérifications proposées sont obtenues à partir des valeurs calculées par le serveur public de l'IMCCE⁷.

Les problèmes sont choisis en fonction des 5 éléments du triangle sphérique de position ZPS. On se donne 3 éléments et on recherche les deux autres, dont principalement l'azimut. Le tableau suivant résume les différents cas traités⁸ minutieusement.

	Données	Résultat(s)
Problème 1a	$\varphi(N), \delta, h$	Z, AH
Problème 1b	$\varphi(S), \delta, h$	Z, AH
Problème 2	$\varphi(N), AH, h$	Z, δ
Problème 3	$\varphi(N), \delta, AH$	Z, h
Problème 4	$\varphi(N), \varepsilon, h=0^\circ$	Z, AH
Problème 5	$\varphi(N), -\varepsilon, h=0^\circ$	Z, AH
Problème 6	$\varphi(S), \delta, h=0^\circ$	Z, AH

Problème 1a. Déterminer l'azimut du soleil l'après-midi du 2 septembre 2012 à Nice (latitude= $43^\circ 43' N$, longitude= $7^\circ 16' E$) sachant qu'une mesure avec l'instrument a donné une hauteur de 52° à 12h20min TU.

Solution

La valeur entière et paire de la latitude la plus proche de celle de Nice est $\varphi = 44^\circ$. On installe le tympan de latitude 44 ; le tympan précédent est remplacé dans la pile. Comme il s'agit d'une latitude nord, le texte « This end to north when north of equator » doit être placé du côté du N de la graduation en azimut.

Les éphémérides de l'année 2012 indiquent que le 2 septembre à 14h20min légales la déclinaison du soleil est de $+7^\circ 39'$. On choisit $\delta = +7.5^\circ$, soit les $\frac{3}{4}$ de l'intervalle [$+6^\circ ; +8^\circ$]. Par rotation du plateau en plexiglas on amène la graduation 52° de l'échelle de hauteur sur la ligne de 8° de déclinaison. Puis on ajuste finement le plateau jusqu'à ce que le trait de la graduation 52° représente approximativement les $\frac{3}{4}$ de l'intervalle des déclinaisons paires [$+6^\circ ; +8^\circ$]. L'extrémité de l'échelle de hauteur indique l'azimut $Z \approx 201^\circ$. Pour information, l'angle horaire est de 12h50min ($+12.5^\circ$).

Avec une différence de latitude de $\frac{1}{4}^\circ$, la table n°1 donne une correction de $+0.2^\circ$ sur la hauteur : donc $h \approx 52.2^\circ$.

Vérification

Les éphémérides proposent⁹ :

Heure=12h20minTU, Angle horaire=12h49min, déclinaison= $+7^\circ 39'$,
 $Z=200^\circ 22'$; $h=+52^\circ 21'$.

Problème 1b. Déterminer l'azimut du soleil le matin du 22 février 2013 à Rio-de-Janeiro, Brésil (latitude= $22^\circ 54' 20'' S$, longitude= $43^\circ 13' 35'' O$) sachant qu'une mesure a donné une hauteur de 45° à 12h05min TU.

Solution

On installe le tympan de latitude 24 ; le tympan précédent est remplacé dans la pile. Comme il s'agit d'une latitude sud, le texte « This end to south when north of equator » doit être placé du côté du N de la graduation en

⁷ Consulter le site web de l'IMCCE, rubrique « les éphémérides des corps du système solaire » à l'adresse : <http://www.imcce.fr/fr/ephemerides/phenomenes/rts/index.php>.

⁸ Si l'on ne tient pas compte de l'angle à l'astre, angle ZSP, on peut résoudre une dizaine de problèmes différents (soit le nombre de combinaisons sans répétition de 3 éléments pris parmi 5 éléments). Ici, on étudie seulement 3 d'entre eux. Le cas dominant, en se plaçant du point de vue du marin, est celui où l'on connaît la latitude, la date et la hauteur du soleil, et où l'on cherche son azimut.

⁹ Valeurs arrondies à la minute d'arc et à la minute de temps. Elles sont extraites à partir de la feuille de résultats obtenue sur le site web : http://www.imcce.fr/fr/ephemerides/formulaire/form_ephepos.php.

azimut. (Le tympan est à l'envers, mais on tient l'instrument normalement c'est-à-dire avec l'origine des azimuts (N) en haut).

Les éphémérides nautiques indiquent que le 22 février la déclinaison du soleil varie de $-10^{\circ}12.8'$ (0h) à $-9^{\circ}50.8'$ (24h). On choisit $\delta = -10^{\circ}$. Comme $\delta < 0$, on lit les chiffres rouges : l'arc diurne est entre le zénith du lieu et l'équateur. Par rotation du plateau en plexiglas on amène la graduation 45° de l'échelle de hauteur sur la ligne de 10° de déclinaison. On ajuste finement le plateau jusqu'à une bonne coïncidence compte-tenu de l'épaisseur de la ligne de l'échelle des hauteurs. L'extrémité de cette échelle indique un azimut de 81° . Pour information, l'angle horaire est de 09h (-45°). Avec une différence de latitude de 1° et avec un azimut de l'ordre de 80° , la table n°1 donne une correction de -0.2° sur la hauteur. La table n°2, donne une correction de $+0.9^{\circ}$ sur l'azimut.

L'azimut au moment de l'observation est $Z \approx 81.9^{\circ}$, pour une hauteur corrigée $h \approx 44.8^{\circ}$.

Vérification

Les éphémérides donnent (en arrondissant à la minute d'arc et à la minute de temps) :

22/02/2013, Angle horaire=08h59min, déclinaison= $-10^{\circ}02'$,
 $Z=82^{\circ}03'$, $h=+44^{\circ}59'$.

Problème 2. Déterminer l'azimut et la déclinaison du soleil sachant que l'on a mesuré avec l'instrument une hauteur $h = 18^{\circ}$ à 15h de Temps vrai, à Pau (latitude= $43^{\circ}18'$ N, longitude= $0^{\circ}22'$ O).

Solution

On installe le tympan de latitude 44 ; le tympan précédent est remplacé dans la pile. Comme il s'agit d'une latitude nord, le texte « This end to north when north of equator » doit être placé du côté du N de la graduation en azimut.

On repère l'arc de cercle correspondant à 15h d'angle horaire. Puis, par rotation du plateau en plexiglas on amène la graduation 18° de l'échelle de hauteur à intercepter cette ligne horaire. On ajuste finement le plateau jusqu'à une bonne coïncidence compte-tenu de l'épaisseur de la ligne de l'échelle des hauteurs. L'extrémité de cette échelle indique un azimut de 226° . La déclinaison du soleil est l'arc de cercle qui passe par la graduation 18° de l'échelle de hauteur. Elle est ici non matérialisée car comprise entre les arcs de cercles de déclinaison 14° et 16° marqués en rouge ($\delta < 0$). On estime une déclinaison $\delta \approx -15^{\circ}$. Avec une différence de latitude d'un peu plus de $\frac{1}{2}^{\circ}$, compte-tenu de l'azimut relevé, la table n°1 donne une correction de $+0.4^{\circ}$ sur la hauteur.

L'azimut au moment de l'observation est $Z \approx 226^{\circ}$, avec une hauteur corrigée $h \approx 18.4^{\circ}$, à une date comprise entre le 1 et 4 novembre de l'année en cours.

Vérification

Les éphémérides donnent (en arrondissant à la minute d'arc et à la minute de temps) :

2/11/2010, 14h46 TU, Angle horaire= 15h01', déclinaison= $-14^{\circ}50'$,
 $Z=226^{\circ}25'$, $h=+18^{\circ}39'$.

Problème 3. Déterminer l'azimut et la hauteur du soleil à Nice sachant que le 13 avril l'angle horaire était de 10h30min (latitude= $43^{\circ}43'$ N, longitude= $7^{\circ}16'$ E).

Solution

On installe le tympan de latitude 44 ; le tympan précédent est remplacé dans la pile. Comme il s'agit d'une latitude nord, le texte « This end to north when north of equator » doit être placé du côté du N de la graduation en azimut.

Les éphémérides indiquent que le 13 avril la déclinaison du soleil varie de $+9^{\circ}01.5'$ (0h) à $+9^{\circ}23.2'$ (24h). On choisit $\delta = +9^{\circ}$. Comme $\delta > 0$, on lit les chiffres noirs : l'arc diurne est entre le solstice d'été et l'équateur. δ est impair : on va devoir interpoler entre deux valeurs paires. Par rotation du plateau en plexiglas on cherche à faire couper la ligne horaire de 10h30min par l'échelle de hauteur jusqu'à ce qu'elle passe entre les lignes de 8° et 10° de déclinaison. On ajuste finement le plateau jusqu'à estimation d'une bonne coïncidence. L'échelle de hauteur indique 33° et marque un azimut de $111 \frac{1}{2}^{\circ}$. Avec une différence de latitude de $\frac{1}{4}^{\circ}$, la table n°1 donne une correction de $+0.1^{\circ}$ sur la hauteur du soleil.

L'azimut au moment de l'observation est $Z \approx 111.5^{\circ}$, pour une hauteur corrigée $h \approx 33.1^{\circ}$.

Vérification

Les éphémérides donnent (en arrondissant à la minute d'arc et à la minute de temps) :

13/04/2013, (heure locale=08h01min27sTU), Angle horaire=08h30min, déclinaison=+9°09',
Z=110°59', h=+32°59'.

Problème 4. Déterminer les azimuts puis les angles horaires du lever et du coucher du soleil à Nice (latitude=43°43'N, Longitude = 7°16' E.) le jour du solstice d'été.

Solution

La valeur entière et paire de la latitude la plus proche de celle de Nice est $\varphi = 44^\circ$. On installe le tympan de latitude 44 ; le tympan précédent est remplacé dans la pile. Comme il s'agit d'une latitude nord, le texte « This end to north when north of equator » doit être placé du côté du N de la graduation en azimut.

Au lever et au coucher du soleil, la hauteur est de 0° : on fait alors tourner le plateau jusqu'à ce que le 0° de l'échelle de hauteur se trouve sur le commencement de la ligne solsticiale d'été pour le lever (arc de cercle le plus long situé côté nord), et réciproquement, sur la fin de cette ligne solsticiale pour le coucher. On ajuste jusqu'à coïncidence parfaite aux deux extrémités.

Les mesures donnent, en prenant +24° de déclinaison pour le solstice d'été :

- pour le lever du soleil : $Z_l \approx 55.5^\circ$ et $AH_l \approx 4h20min (-115^\circ)$;
- pour le coucher du soleil : $Z_c \approx 304^\circ$ et $AH_c \approx 19h40min (+115^\circ)$.

Il n'y a pas de correction en azimut.

Vérification

Les éphémérides donnent :

- pour le lever du soleil un azimut de $55^\circ44'$ à 04h19min ;
- pour le coucher du soleil un azimut de $304^\circ16'$ à 19h45min.

Problème 5. Déterminer les azimuts et les heures du lever et du coucher du soleil sur le phare du Tréport ($50^\circ3'53''$ N) au solstice d'hiver.

Solution

La valeur entière et paire de la latitude la plus proche de celle du Tréport est $\varphi = 50^\circ$. On installe le tympan de latitude 50 ; le tympan précédent est remplacé dans la pile. Comme il s'agit d'une latitude nord, le texte « This end to north when north of equator » doit être placé du côté du N de la graduation en azimut.

On fait tourner le plateau en plexiglas jusqu'à ce que la graduation 0° de l'échelle des hauteurs se trouve sur le commencement de la ligne solsticiale d'hiver pour le lever, et réciproquement, sur la fin de cette ligne solsticiale pour le coucher. On ajuste jusqu'à coïncidence parfaite du côté est, puis du côté ouest.

Les mesures donnent, en interpolant $\delta=23^\circ\frac{1}{2}$ entre les déclinaisons rouges 22° et 24° :

- pour le lever du soleil : $Z_l \approx 128^\circ$ et $AH_l \approx 08h05min (-58.75^\circ)$;
- pour le coucher du soleil : $Z_c \approx 232^\circ$ et $AH_c \approx 15h55min (+58.75^\circ)$.

Vérification

Les éphémérides donnent :

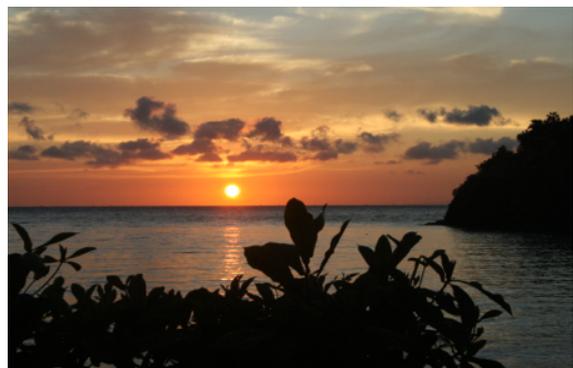
- pour le lever du soleil un azimut de $127^\circ19'$ à 07h58min TU;
- pour le coucher du soleil un azimut de $232^\circ41'$ à 15h59min TU.

Problème 6. Déterminer l'azimut et l'instant du lever du soleil à Amed (latitude= $8^\circ20'$ S, longitude= $115^\circ39'33''$ E, île de Bali, Indonésie), le 21 août 2010.

Solution

Les éphémérides de l'année 2010 indiquent que le 21 août la déclinaison du soleil varie de $+12^\circ07.6'$. (0h) à $+11^\circ47.6'$. (24h). On sélectionne la valeur entière la plus proche de la déclinaison du soleil, soit $\delta = +12^\circ$.

La valeur entière et paire de la latitude la plus proche d'Amed est $\varphi = 8^\circ$ S. On installe le tympan de



Crédit photographique : D. Collin, 21/08/2010.

latitude 8 ; le tympan précédent est remis dans la pile. La latitude étant sud, le texte « This end to north when south of equator » doit être placé du côté du N de la graduation en azimut (cela revient à mettre le tympan à l'envers par rapport aux précédentes positions). En tenant l'instrument avec le Nord (N) en haut, on fait tourner le plateau en plexiglas jusqu'à ce que la graduation 0° de l'échelle des hauteurs se trouve sur la ligne marquée 12 ($\delta > 0$, chiffre noir). On ajuste jusqu'à coïncidence parfaite côté est pour le lever, et côté ouest pour le coucher du soleil.

Les mesures donnent :

- pour le lever du soleil : $Z_l \approx 77^\circ$ et $AH_l \approx 6h08min (-88^\circ)$;
- pour le coucher du soleil : $Z_c \approx 282^\circ$ et $AH_c \approx 17h52min (+88^\circ)$.

Vérification

Les éphémérides indiquent :

- pour l'azimut du lever du soleil : 77.8° à 6h08min (ou 22h25minTU) ;
- pour l'azimut du coucher du soleil : 282° à 17h59min (ou 10h16minTU).

Bien d'autres problèmes peuvent être traités avec le *Marean-Kielhorn Director*, ou à l'astrolabe horizontal. [D'Hollander, *op. cit.*].

5. Aperçu de la précision de l'appareil

(1) Lecture sur l'instrument des différents paramètres intervenant dans l'acquisition de l'azimut du soleil.

(a) Incertitude sur la latitude.

Les tympan (disques cartonnés) correspondent à des latitudes paires et vont de 2 en 2°. La plus grande erreur que l'on peut commettre en latitude est de :

$$\Delta\varphi = 1^\circ.$$

Les tables de correction en annexe permettent de tenir compte de l'erreur en latitude :

- Pour une erreur de 1° pour la détermination de l'azimut (table 2)
- Pour une erreur de $\frac{1}{4}^\circ$, $\frac{1}{2}^\circ$ et 1° pour la correction en hauteur (table 1).

(b) Incertitude sur la déclinaison

Les éphémérides Nautiques publiées par le Bureau des Longitudes, ou encore les éphémérides Astronomiques de la SAF suffisent à déterminer la déclinaison du soleil à partir de la date du jour. La table de correspondance au dos de l'instrument n'est plus très fiable (près de 68 ans ce sont écoulés).

Sur chaque tympan les parallèles célestes sont tracées tous les deux degrés. On interpole assez facilement le degré de déclinaison. On estime que l'erreur que l'on peut commettre est de l'ordre du $\frac{1}{2}^\circ$. D'ailleurs, par construction, il a été pris 24° de déclinaison pour les solstices au lieu de 23°26' (pratiquement 23 $\frac{1}{2}$ °).

On considère alors :

$$\Delta\delta \geq \frac{1}{2}^\circ$$

(c) Incertitude sur la hauteur

Lorsque l'instrument est utilisé comme un sextant.

Les graduations sur la circonférence du tympan ne permettent pas d'espérer une lecture en-dessous du quart de degré, soit 15 min d'arc dans la meilleure des configurations. La pratique rend compte que le demi-degré d'angle et l'arrondi au degré le plus proche sont

les cas les plus fréquents¹⁰, sans oublier que l'échelle des hauteurs ne permet pas d'utiliser (et d'apprécier) des angles inférieurs au demi-degré⁴ ! On ne peut pas espérer faire mieux sachant que cette mesure instrumentale doit être corrigée, en principe, de la parallaxe, de la dépression, des erreurs de collimation (ici superposition des traits « relativement épais » sur l'index translucide central), et des erreurs d'excentricité. D'aucun dira que l'instrument est très grossier - mais ce sera toujours le cas par rapport au sextant de marine. Remarquons que la table 1 (annexe) révèle que la correction maximale que l'on peut ajouter ou soustraire à la hauteur ne dépasse pas 1°. L'erreur que l'on peut commettre sur la lecture de la hauteur est par conséquent de l'ordre du demi-degré.

$$\Delta h \geq \frac{1}{2}^\circ$$

Lorsqu'on utilise l'échelle des hauteurs.

Quelle que soit la précision avec laquelle la hauteur a été mesurée, il ne va pas être possible de la reporter sur l'échelle des hauteurs. L'opérateur ne va pas pouvoir utiliser mieux que la moitié d'une graduation, c'est-à-dire, le demi-degré. Cette appréciation systématique dépend fortement de l'opérateur : elle n'est pas constante. De plus l'espace entre chaque trait de graduation n'est pas régulier : il évolue selon la

formule $R_{\text{Horizon}} \tan\left(45^\circ - \frac{h}{2}\right)$.

(d) *Incertitude sur l'azimut*

Pour les mêmes raisons, on ne peut pas apprécier la lecture de l'azimut sur les graduations extérieures du tympan en-dessous du quart de degré. On ne peut pas faire mieux. Mais cela signifie surtout que l'on obtient l'azimut (ou le cap) avec cette précision de lecture ! L'azimut venant de la combinaison des informations simultanée de la déclinaison, de la latitude et de la hauteur.

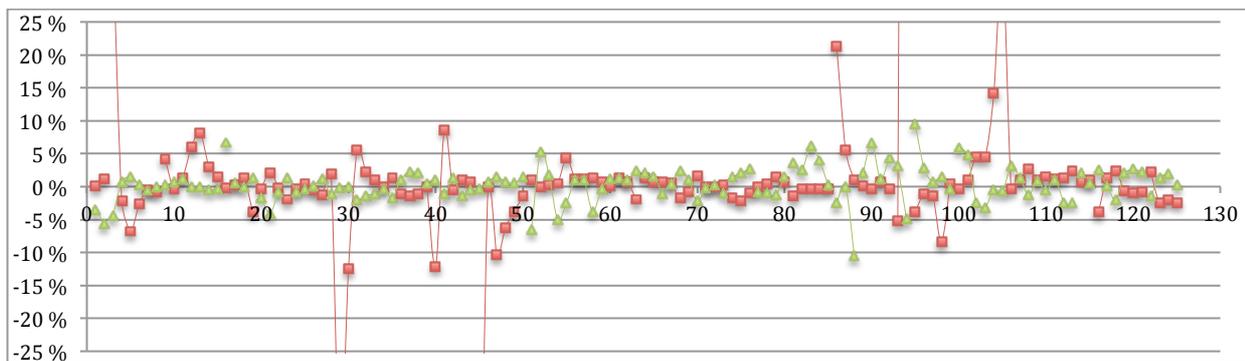
$$\Delta Z \geq \frac{1}{2}^\circ$$

(2) *Aperçu de la précision de l'instrument*

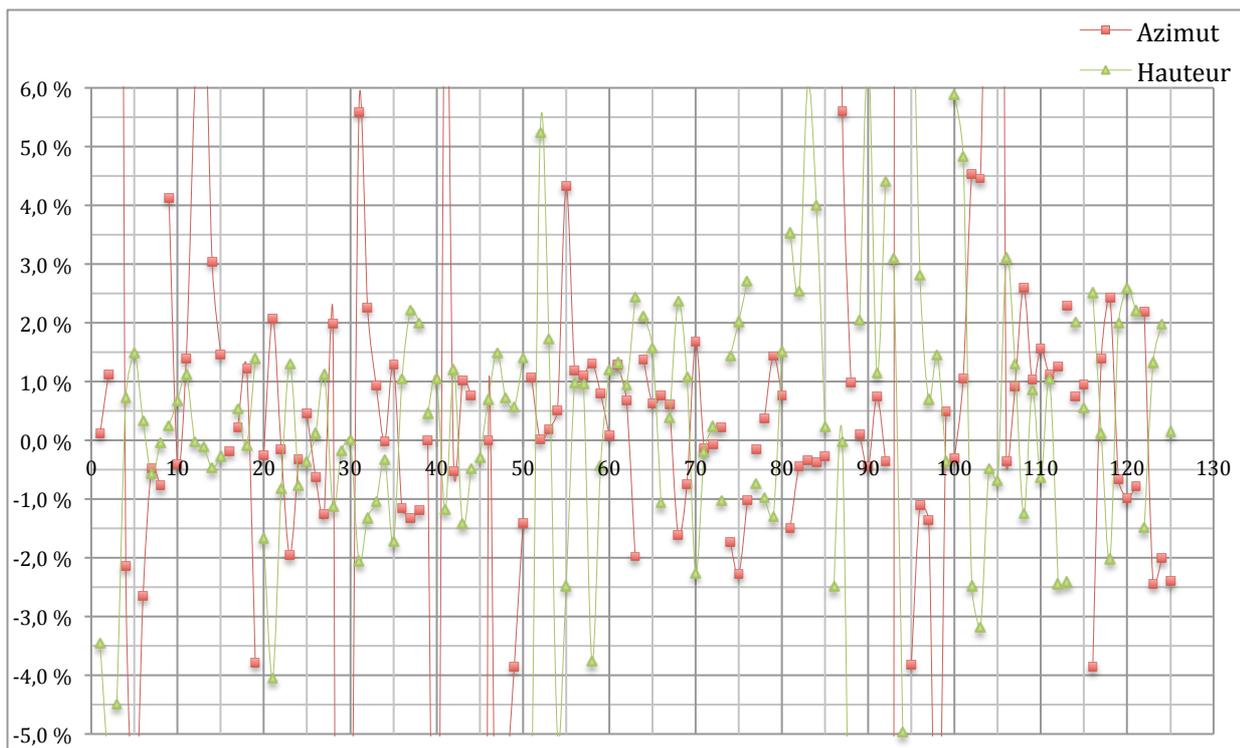
Une statistique sur 143 mesures de hauteur et d'azimut montre que 75.5% ont été estimées correctes et 24.5% ont été rejetées sur la base d'une tolérance de 5% d'erreur relative sur la valeur ($\frac{h_{\text{mesuré}} - h_{\text{théorique}}}{h_{\text{théorique}}}$ et $\frac{Z_{\text{mesuré}} - Z_{\text{théorique}}}{Z_{\text{théorique}}}$ ramené en suite en pourcent). Hormis les 13 premières mesures de hauteur, elles ont été réalisées avec l'aide niveau à bulle placé sur le repère Est (E) (son installation n'est pas permanente, c'est-à-dire qu'on doit le réinstaller sur le côté Est avant chaque mesure). La détermination de chaque azimut c'est faite à partir la hauteur mesurée de cette façon. Les graphes en figure 5 donnent l'aspect général et une idée de la qualité des résultats obtenus.

On ne s'est pas servi dans cet échantillon des tables des corrections de la hauteur et de l'azimut (cf. annexe). Soulignons que la table 1 montre que pour $\frac{1}{4}^\circ$ de différence de latitude, la correction maximale ne dépasse pas en valeur absolue 0.3°.

¹⁰ Consulter le fichier Excel « *Utilisations.xlsx* » mis à disposition dans la version CD-Rom de Cadran-Info.



Graph 1. En abscisse, le numéro de la mesure, en ordonnée la différence relative en %.



Graph 2. Le même que le graph 1 en se limitant à la bande des $\pm 5\%$

Fig. 5 - Différences relatives (%) en azimut et en hauteur.
Une bonne majorité des mesures est compris dans la bande $\pm 5\%$.

Si l'azimut est ainsi déterminé à 5% près, il n'est pas étonnant que le constructeur affirme que l'instrument peut servir à déterminer l'erreur du compas du navire (modèle *Navigator*) !

La question que l'on se pose est alors la suivante :

« Comment est-il possible d'obtenir une mesure relativement correcte sur l'azimut à partir de médiocres mesures sur les 3 autres grandeurs que sont la latitude, la hauteur et la déclinaison du soleil ? ». Les cinq grandeurs intervenant ne sont pas indépendantes les unes des autres.

6. Conclusion

Instrument maniable, de bonne taille assurant un rangement peu encombrant, le *Marean-Kielhorn Director* n'a pas connu le même succès que l'astrolabe classique. Étant lui-même un astrolabe, son histoire est pourtant très éphémère : il n'a pas retenu l'attention des plaisanciers et c'est vite éclipsé de toute instrumentation et recommandation officielle de la marine.

L'instrument est cependant loin de perdre son intérêt pour l'astronome amateur et le gnomoniste puisqu'il apporte une résolution du triangle sphérique de position. Méthode rapide et suffisamment précise pour encore en être étonné. Il fournit facilement, et en toute saison, un almanach complet de même précision qu'un très bon cadran solaire. Il peut d'ailleurs très facilement devenir le cadran simple d'Oughtred pour peu qu'on lui ajoute un gnomon au centre du disque et que l'on permute intégralement les points cardinaux : l'ombre du gnomon interceptant un arc de déclinaison connue et un arc horaire donnera le temps vrai.

Instrument pédagogique par excellence, il permet une résolution rapide dans la recherche du nord vrai ou d'un quelconque cap vrai. Il permet également de connaître les erreurs du compas et de les quantifier ; ce qui est pratiquement passé dans l'ombre depuis son invention. L'ensemble de ses tympans couvrant toutes les latitudes paires du sud au nord rivalise en quantité avec ceux des astrolabes classiques, et fournit une vision de la trajectoire apparente du soleil au-dessus de l'observateur sur quasiment toutes les latitudes. Cela en fait un excellent et remarquable outil pédagogique !

Voilà donc bien un instrument qui arrive à joindre l'utile à l'agréable pour celui qui est encore capable de s'émerveiller de l'astronomie de position. Ultime complication et synthèse des connaissances du mouvement apparent qui mériterait d'être réhabilitée.

Références

Browning E. Marean Jr. & Lloyd V. Kielhorn, (1948), *Navigational instrument*, US patent n°2440827, 4 mai 1948, 3 planches, 14 figures, 6 pages.

Air Instruments, Incorporated, (1945), Boston, Massachusetts (USA), *Manual Instructions - Lifeboat model of the Marean-Kielhorn Director, An Instrument for determining direction at sea*. (Une copie numérisée est disponible dans le CD-Rom « Repository » de la NASS)

Malcolm Barnfield, (2011), *The sundial goes to war*, BBS Bulletin, n°78, vol. 23(ii), June 2011 (part 1) ; n°79, vol.23(iii), September 2011 (part 2).

Raymond D'Hollander, (1999), *L'Astrolabe, histoire, théorie et pratique*, Institut Océanographique, Paris, 1999. (Pages 283-291, pour la description, la construction et l'utilisation de l'astrolabe horizontal d'Oughtred)

Stephens Sasch, (2010), *The Marean-Kielhorn Director*, The Compendium, vol. 17, n°1, mars 2010, p.36.

Fred Sawyer, John Schilke & Nicola Severino, (2009), *Andres Schöner's stereographic Sundial Design*, The Compendium, vol. 16, n°4, déc. 2009, pp. 15-18.

Fred Sawyer, (1997), *William Oughtred's Double Horizontal Dial*, The Compendium, vol. 4, n°1, mars. 1997, pp. 1-5.

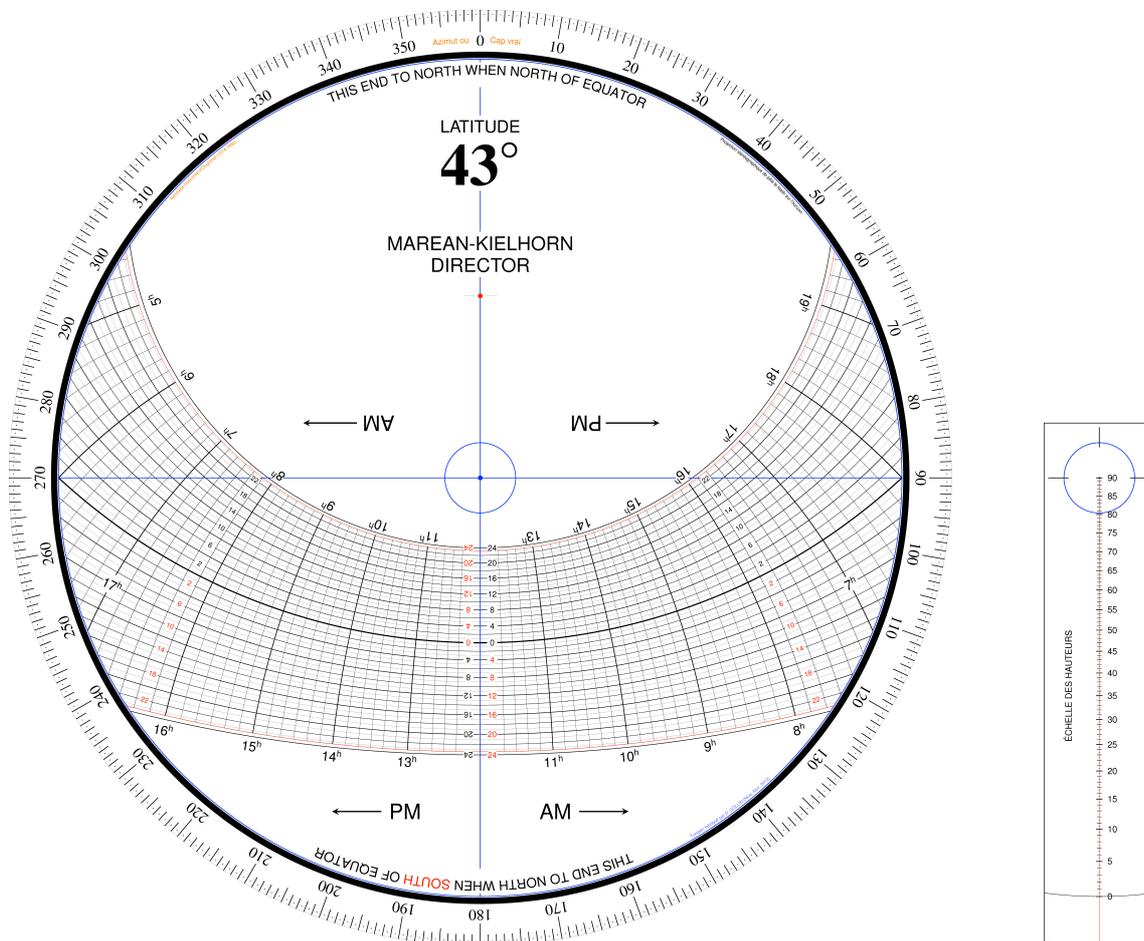
Nicola Severino, (2009), *L'orologiosolare di Oughtred, un secolo prima di Oughtred*, Roccasecca (FR), Italy, fév. 2009.

Philippe Merlin, (2005), *Notice du Double Cadran d'Oughtred*, 6 mai 2005, Observatoire de Lyon.

Annexes

Annexe 1.

Reproduction d'un tympan du *Marean-Kielhorn Director* pour la latitude 43° .



This has been run with Etk Live 2012. This is pdfTeX, Version 3.141526-2.4-1.40.13 (TeX Live 2012) kparsua version 0.1.0.

Les déclinaisons négatives sont en rouge (soleil sous l'équateur céleste).

Le zénith du lieu est au centre du disque, le pôle nord céleste est repéré par un point rouge sur la ligne méridienne.

Sur la collection des tympan d'origine, la valeur de l'azimut n'est pas marquée. Elle est seulement gravée tous les 10° sur le plateau extérieur en bakélite.

On a tracé les arcs de déclinaison tous les degrés, avec en rouge les vrais arcs des solstices ($\delta=23^\circ 26'$). Les arcs horaires sont tracés tous les 10 min de temps vrai, comme dans l'original.

Le repère 90° de l'échelle des hauteurs est à placer au centre du disque (zénith) ; le repère 0° se place sur l'horizon. L'axe de l'échelle des hauteurs, mobile autour du centre du disque, indique l'azimut ou cap vrai.

Annexe 2.

Tables de correction en dixième de degré, extraite du manuel d'instruction de la Air Instruments Incorporated (Boston, USA)

Table 1 – Correction, en dixième de degré, à apporter à la hauteur mesurée par l'instrument selon la différence de latitude et selon l'ordre de grandeur de l'azimut relevé.

DIFF. LAT.	AZIMUT																															
	0°	20°	40°	50°	60°	70°	80°	90°	100°	110°	120°	130°	140°	160°	180°	200°	220°	230°	240°	250°	260°	270°	280°	290°	300°	310°	320°	340°	360°			
1°	-1	-9	-8	-6	-5	-3	-2	0	+2	+3	+5	+6	+8	+9	+1	+9	+8	+6	+5	+3	+2	0	-2	-3	-5	-6	-8	-9	-1			
1/2°	-5	-5	-4	-3	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+3	+4	+5	+5	+5	+4	+3	+3	+2	+1	0	-1	-2	-3	-3	-4	-5	-5			
1/4°	-3	-2	-2	-2	-1	-1	0	0	0	+1	+1	+2	+2	+2	+3	+2	+2	+2	+1	+1	0	0	0	-1	-1	-2	-2	-2	-3			

Table 2 – Correction, en dixième de degré, à apporter à l'azimut mesuré par l'instrument en fonction de l'ordre de grandeur de la hauteur et de l'azimut relevé, lorsque la différence de latitude est de 1°.

HAUTEUR	AZIMUT																	
	10°	30°	50°	70°	90°	110°	130°	150°	170°	190°	210°	230°	250°	270°	290°	310°	330°	350°
0°	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5°	0	0	+1	+1	+1	+1	+1	0	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	0	0
10°	0	+1	+1	+2	+2	+2	+1	+1	0	0	-1	-2	-2	-2	-2	-1	-1	0
15°	+1	+1	+2	+3	+3	+3	+2	+1	+1	-1	-1	-3	-3	-3	-3	-2	-1	-1
20°	+1	+2	+3	+3	+4	+3	+3	+2	+1	-1	-2	-3	-4	-4	-4	-3	-2	-1
25°	+1	+2	+3	+4	+5	+4	+4	+2	+1	-1	-2	-4	-5	-5	-5	-3	-2	-1
30°	+1	+3	+4	+5	+6	+5	+4	+3	+1	-1	-3	-5	-6	-6	-6	-4	-3	-1
35°	+1	+4	+5	+7	+7	+7	+5	+4	+1	-1	-4	-5	-7	-7	-7	-5	-4	-1
40°	+2	+4	+5	+8	+8	+8	+5	+4	+2	-2	-4	-6	-8	-8	-8	-5	-4	-2
45°	+2	+5	+6	+9	+10	+9	+6	+5	+2	-2	-5	-6	-9	-11	-9	-6	-5	-2
50°	+2	+6	+8	+11	+12	+11	+8	+6	+2	-2	-6	-8	-11	-12	-11	-8	-6	-2
55°	+3	+7	+9	+13	+14	+13	+9	+7	+3	-3	-7	-9	-13	-14	-13	-9	-7	-3
60°	+3	+9	+11	+16	+17	+16	+11	+9	+3	-3	-9	-11	-16	-17	-16	-11	-9	-3



☐☐☐ Dans la version numérique, vous trouverez en annexe :

➡ Dans la version numérique, vous trouverez en annexe :
le dossier dessins, le dossier Observations-Mesures,
les tables de corrections.



Image produite par une fente

Gianni FERRARI

On étudie ici la formation de l'image produite sur un plan horizontal ou vertical par les rayons du Soleil passant par une fente formée par deux plans verticaux parallèles entre eux.

Prémisse

Considérons deux éléments solides ayant deux faces planes verticales, parallèles entre eux et placés à une distance inférieure à la dimension des éléments mêmes.

Pour simplifier, j'appellerai « fente » l'espace entre ces deux faces parallèles.

Nous voulons étudier l'effet dû aux rayons du Soleil qui, passant à travers la fente lorsque le Soleil est sur le plan même des faces, produisent sur un écran opaque une figure lumineuse ayant la forme d'une bande ou d'une lame lumineuse puis déterminer les instants où cette bande est illuminé.

Nous supposons être au moment où l'azimut du Soleil est exactement le même que celui de la fente, un cas particulier étant évidemment celui du plan méridien à l'instant du midi vrai.

En supposant, pour le moment, que l'écran est perpendiculaire aux rayons provenant du centre du Soleil, nous chercherons la forme et les caractéristiques de l'image formée sur l'écran.

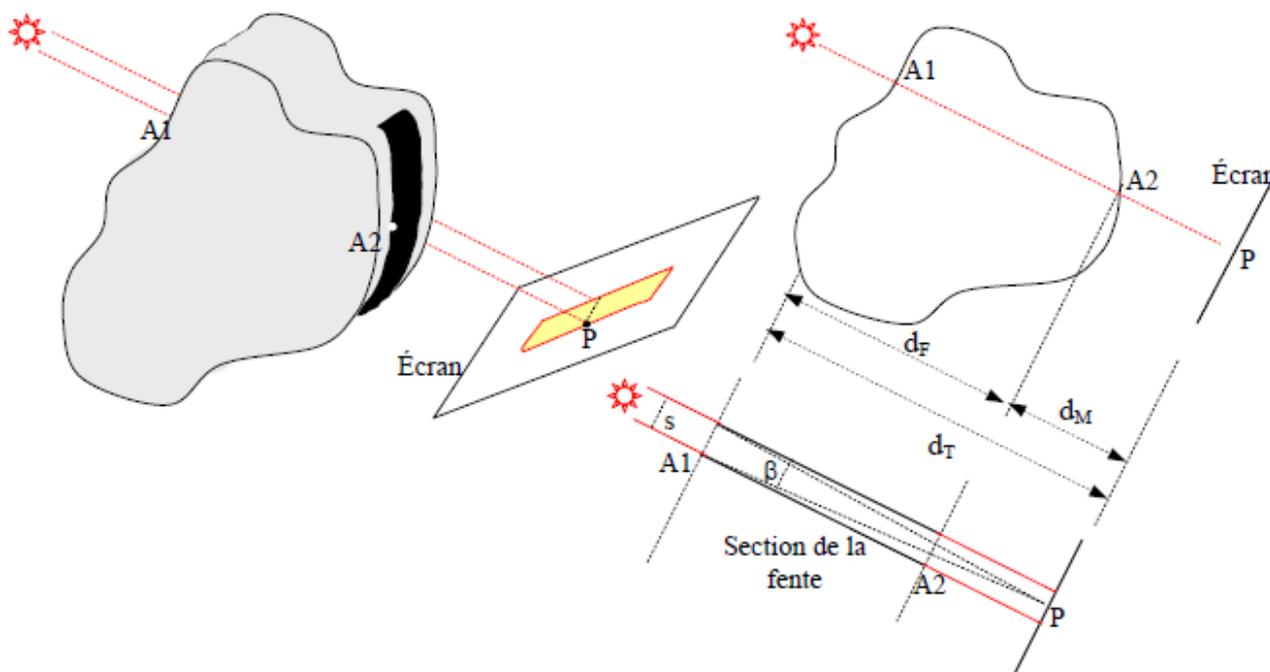


Figure 1. La fente et l'écran.

Un rayon lumineux du Soleil entrera dans la fente au point A1, que j'appelle "entrée", sortira en un deuxième point A2 ("exit") et arrivera à l'écran en un troisième point P (fig. 1).

Etude de l'image sur l'écran dans le cas où l'azimut du soleil coïncide avec celui de la fente

Symboles utilisés :

- Az_F Azimut de la fente, c'est-à-dire du plan parallèle à ses faces ;
- Az_S ou σ Azimut du Soleil ;
- Φ Diamètre angulaire moyen du Soleil = 32' ;
- k Constante, égale à l'inverse du diamètre moyen du Soleil en radians ($\Phi_{\text{rad}} = 1/k$) ;
- s Largeur de la fente, c'est-à-dire distance entre les deux parois qui la délimitent ;
- d_F Longueur de la fente, c'est-à-dire distance parcourue par un rayon de lumière qui, entré d'un côté de la fente, ressort de l'autre côté ;
- d_M Distance entre l'image et la sortie de la fente ;
- $d_T = d_F + d_M$ Distance entre l'image et l'entrée de la fente ;
- $d_0 = k \cdot s$ Distance fondamentale ;
- $s_p = d_T \cdot \Phi = d_T / k$ Diamètre de l'image du Soleil produite sur l'écran par un trou ponctuel ou infime placé à l'entrée de la fente à distance d_T de l'écran ;
- s_T Largeur totale de la bande lumineuse produite ;
- $\beta = \frac{s}{d_T}$ Angle, en radians, sous lequel un observateur, placé en un point P sur l'écran, voit l'"entrée" de la fente, étant supposé que la largeur de la fente est petite par rapport à la distance d_T ;
- $\alpha = \frac{s}{d_F}$ Angle, en radians, sous lequel un observateur, placé à la sortie de la fente, voit l'"entrée" de la fente même ;
- J_0 Illumination en plein soleil de l'écran normal aux rayons du Soleil.

L'étude se divise en trois cas en fonction de la valeur du rapport entre les distances d_T et d_0 .

Cas avec $d_T < d_0$ c'est-à-dire avec $s_p < s$; $s > d_T/107.5$; $\beta > \Phi$

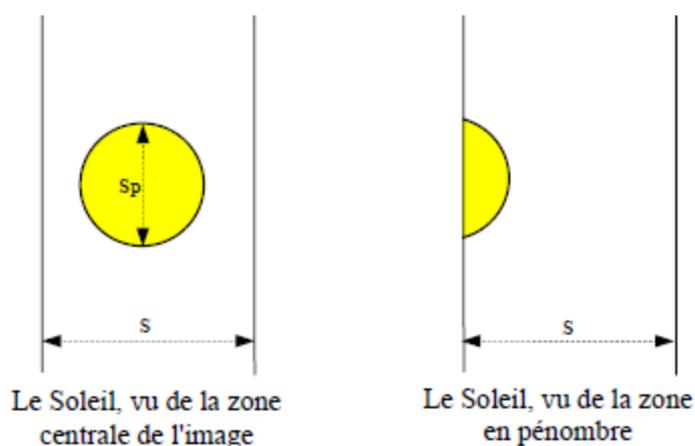


Figure 2 : Le disque du Soleil vu de l'écran.

Sous l'angle β , l'"entrée" de la fente est vue à partir de n'importe quel point de l'image. Il y a alors une zone centrale plus grande que le diamètre apparent Φ du disque solaire de la bande

lumineuse (entre Q1 et Q2 - fig 3) à partir de laquelle un observateur peut voir la totalité du disque du Soleil avec un éclairage J_0 égal à celui d'un point illuminé en plein soleil.

A l'extérieur de cette zone centrale, entre les points B1 et Q1 et, B2 et Q2 (fig. 3), il ya deux bandes latérales de pénombre, parce que, de ces points, un observateur peut voir seulement une partie du disque solaire. L'image dans son ensemble est alors comprise entre les points B1 et B2 de la section.

Nous avons :

Largueur de la zone centrale de l'image avec la luminosité maximale = $s - s_p = s - \frac{d_T}{k}$

Éclairement de la zone centrale = J_0

Largueur des bandes latérales de pénombre = $s_p - \frac{d_F}{2 \cdot k} = \frac{d_M + d_T}{2 \cdot k}$

Largueur totale de l'image = $s_T = s + s_p - \frac{d_F}{k} = s + \frac{d_M}{k}$

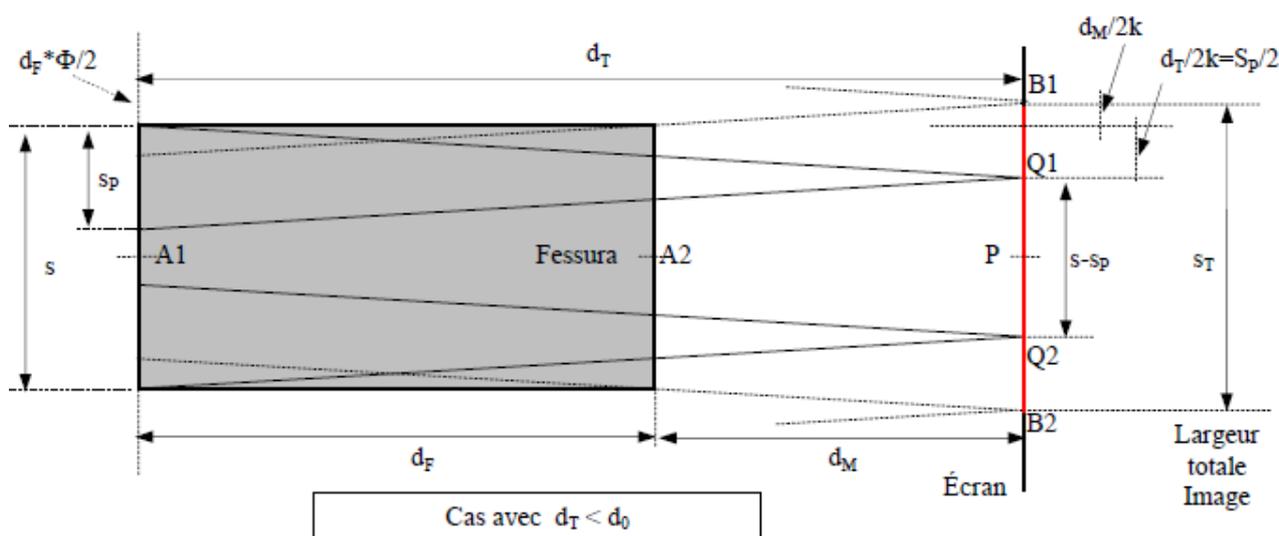


Figure 3. Section de la fente pratiquée dans un plan parallèle aux rayons du Soleil

Comme vous pouvez voir :

– La largeur de la zone centrale de la bande lumineuse de l'image, dans laquelle l'éclairement est égal à celui de l'écran exposé en plein soleil, diminue avec l'augmentation de d_T , tandis que le point s'éloigne de la sortie de la fente.

La zone centrale disparaît lorsque $d_T = k \cdot s = 107.5 \cdot s$, c'est-à-dire lorsque la distance "externe" d_M devient $d_M = k \cdot s - d_F$, où d_F est la "longueur" de la fente.

– La largeur des deux bandes latérales de pénombre, à travers laquelle l'illumination passe de la valeur maximale à zéro¹, augmente également, tandis que le point s'éloigne de la fente.

Notez que cette largeur ne dépend pas de celle de la fente.

Il convient enfin considérer que la largeur de la bande de pénombre observable dépend de plusieurs conditions telles que l'éclairage indirect, les caractéristiques de la surface de l'écran, etc : dans de bonnes conditions la partie visible est d'environ 60-80 % de la largeur théorique.

¹ La valeur d'éclairement serait nulle s'il n'y avait pas d'éclairement indirect dû au ciel, dont l'intensité dépend des conditions météorologiques, des bâtiments environnants, etc. Cet éclairage s'ajoute toujours aux valeurs théoriques données dans les formules et sa valeur affecte la partie visible de la pénombre. Dans le cas où la fente produit une image dans un environnement fermé, nous avons toujours une bonne visibilité.

De plus :

– Si $d_T = d_0 = 107.5 \cdot s$ la largeur de la zone centrale de la luminosité maximale est nulle et les bandes de pénombre ont une largeur = $s - d_F/2 \cdot k$;

– Si $d_F = d_T$, c'est-à-dire si $d_M = 0$ et la fente est longue jusqu'à l'écran, la largeur de la pénombre est minimale = $d_F/2 \cdot k = d_F/215$, tandis que la largeur totale de l'image est égale à celle de la fente ;

– Si $d_F = 0$, c'est-à-dire si la fente est réduite à une ouverture rectangulaire dans un plan, la largeur totale de la pénombre = s_p , c'est-à-dire égale au diamètre de l'image produite sur l'écran par un trou punctiforme, alors la largeur de la zone centrale est = $s - s_p$ et la largeur totale de l'image = $s + s_p$.

Exemple :

Largeur de la fente $s = 5$ mm ; trajectoire du rayon lumineux à l'intérieur de la fente $d_F = 100$ mm ; distance de l'écran à partir du point de sortie $d_M = 200$ mm ; $d_T = 300$ mm.

Nous pouvons calculer $s_p = 2,79$ mm et $d_0 = 537$ mm.

Donc, $d_T < d_0$ et $\beta = s/d_T = 57.3' > \Phi$

L'image présente une zone centrale de luminosité constante et maximale large de 2,2 mm avec deux bandes de pénombre de 2,32 mm, pour une dimension totale égale à 6,86 mm.

Cas avec $d_T = d_0$ c'est-à-dire avec $s_p = s$; $d_T = 107.5 \cdot s$; $\beta = \Phi$;

Depuis l'angle β , sous lequel l'"entrée" de la fente est vue à partir d'un point dans l'image, laquelle est égale au diamètre apparent Φ du disque du Soleil, la zone centrale de la bande lumineuse, qui a un éclairement J_0 égal à celui d'une point en plein soleil, se réduit à un point central.

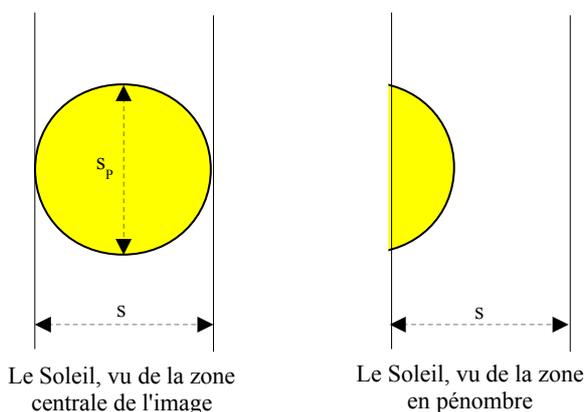


Figure 4. Le disque du Soleil vu de l'image.

Aux bords de ce point, entre les points B_1 et P et entre P et B_2 (fig. 5), il ya deux bandes latérales de pénombre d'où un observateur peut voir seulement une partie du disque solaire.

Nous avons les relations :

Largeur de la zone centrale de l'image avec une luminosité maximale = 0

Éclairement dans de la zone centrale = J_0

Largeur des bandes de pénombre = $s_p - \frac{d_F}{2 \cdot k}$

Largeur totale de l'image

$$s_T = s + \frac{d_M}{k}$$

Si $d_F = 0$, c'est-à-dire si la fente est réduite à une ouverture rectangulaire sur un plan, la largeur de la pénombre = s est la même que la largeur de la fente, et le diamètre de l'image du Soleil se réduit à un point sur l'écran.

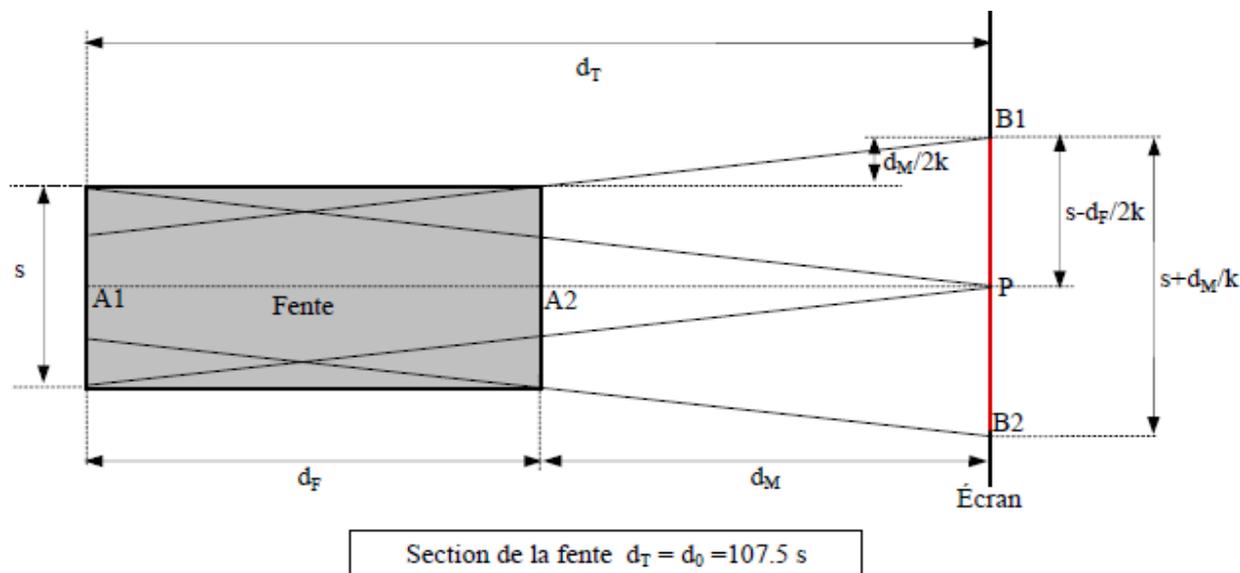


Fig. 5 - Section de la fente avec un plan parallèle aux rayons du soleil et avec un plan normal à ceux-ci.

Cas avec $d_T > d_0$ c'est-à-dire avec $s_p > s$; $s > d_T/107.5$; $\beta < \Phi$

Depuis un angle β plus petit que le diamètre apparent Φ du disque du Soleil, toute la bande est vue dans la pénombre et son éclairement est toujours inférieur à sa valeur en plein soleil J_0 .

La bande lumineuse est formée d'une zone centrale avec un éclairement relativement constant et de deux bandes dans lesquelles la lumière atteint la valeur zéro.

A partir des points de la zone centrale, entre les points Q3 et Q4 (fig. 7), un observateur peut voir au-delà de l'ouverture de la fente seulement une « tranche » de l'image du Soleil (fig. 6): pour cette raison l'éclairement est maximal au centre de la zone et diminue en s'éloignant de celle-ci.

l'extérieur de cette zone centrale, entre B1 et Q3 et entre B2 et Q4 (fig. 7), un observateur peut voir une partie du disque solaire, d'une largeur inférieure à celle de la fente : l'éclairement de la zone de pénombre s'annule dans les points limites B1 et B2.

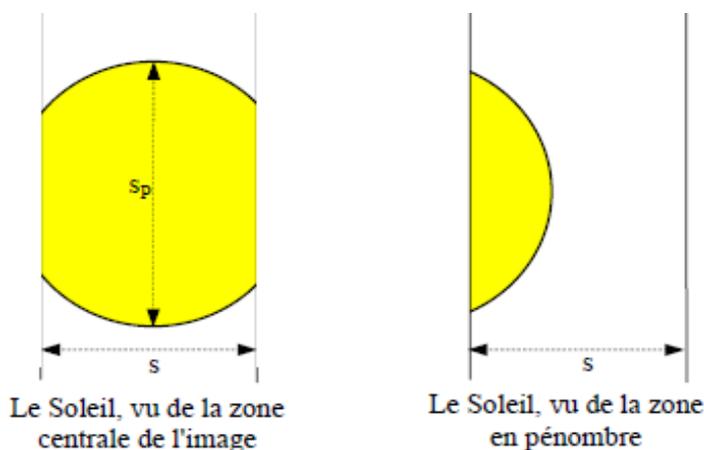


Fig. 6. Le disque du Soleil vu de l'image.

Nous avons les relations :

Largeur de la zone centrale de l'image	$= s_p - s = d_T/k - s$
Largeur des bandes de pénombre	$= s - \frac{d_F}{2 \cdot k}$
Largeur totale de l'image	$= s + \frac{d_M}{k}$

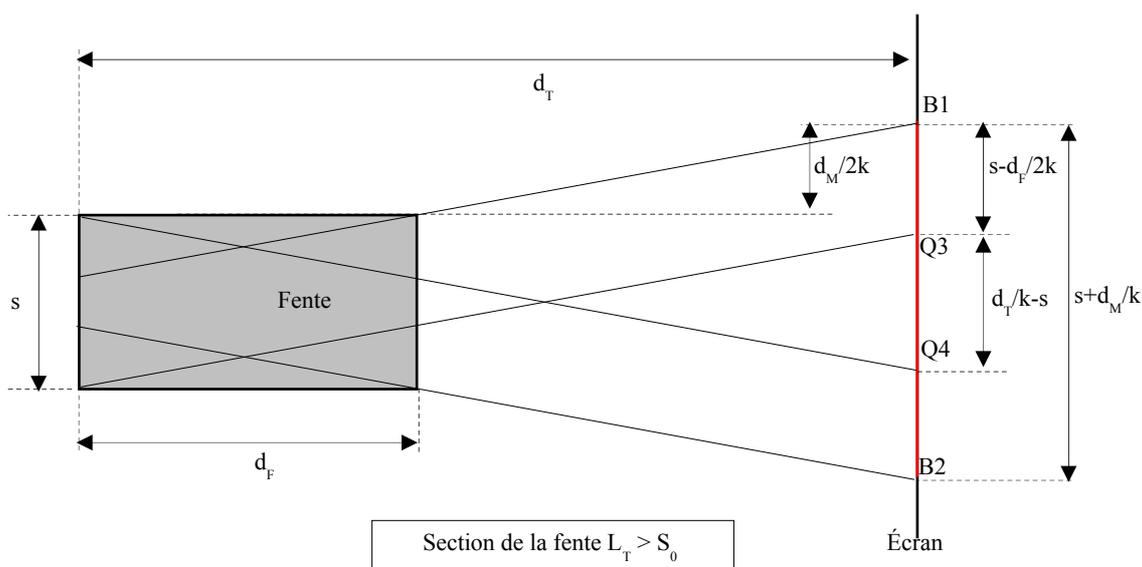


Fig. 7. Section de la fente avec un plan parallèle aux rayons du soleil et avec un plan normal à ceux-ci.

Les formules montrent que :

- la largeur de la zone centrale de la bande lumineuse dans lequel l'éclairement est au maximum augmente avec d_T , c'est-à-dire lorsque le point s'éloigne de la sortie de la fente ;
- La largeur des deux bandes latérales de pénombre est constante et ne dépend que de la largeur et de la "longueur" de la fente.

De plus:

- Si $d_F = 0$, c'est-à-dire si la fente est réduite à une ouverture rectangulaire sur un plan, la largeur de la pénombre est égale à la largeur de la fente.

Exemple :

Largeur de la fente $s = 5$ mm ; trajet du rayon lumineux à l'intérieur de la fente $d_F = 100$ mm ; distance de l'écran du point de sortie $d_M = 600$ mm; $d_T = 700$ mm. Nous obtenons $s_p = 6,5$ mm et $d_0 = 537$ mm.

Donc $d_T > d_0$, $s_p > s$ et $\beta = s/d_T = 24.5' < \phi$

L'image a une zone centrale large de 1,5 mm, avec deux bandes latérales large de 4,5 mm, pour une dimension totale de 10,6 mm.

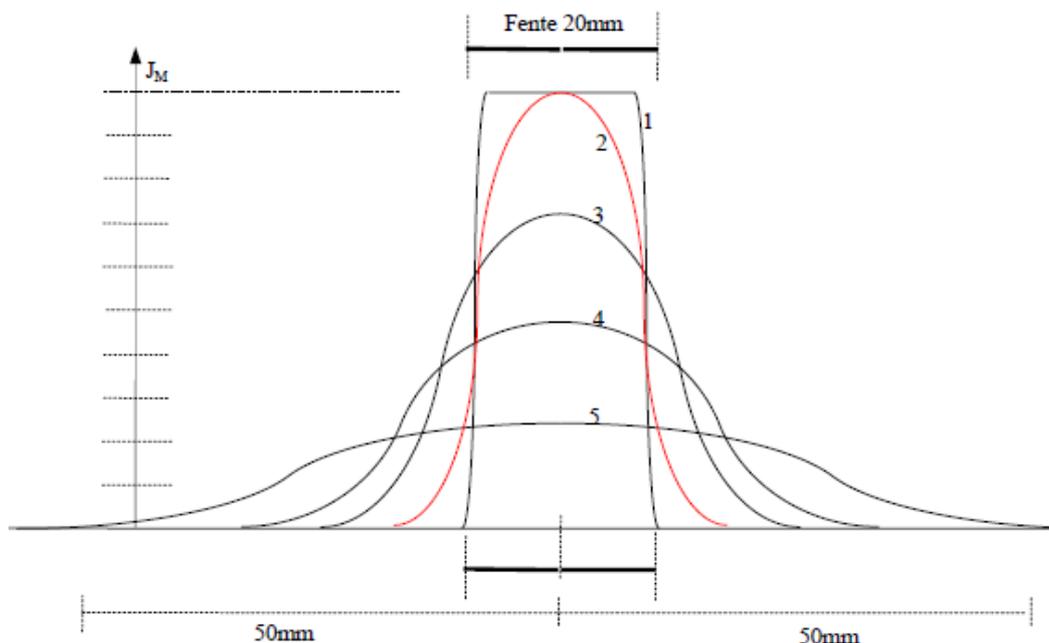


Figure 8 - Évolution de l'éclairage

Exemple :

La fig. 8 montre l'évolution des courbes de l'éclairage et de la largeur de la bande illuminée en fonction de la distance d_M du point de sortie de la fente.

Largeur de la fente $s = 20$ mm ; trajet du rayon lumineux à l'intérieur de la fente $d_F = 500$ mm ; $d_0 = 2150$ mm.

	$d_M = 0$	$d_M = 1650$	$d_M = 3000$	$d_M = 5000$	$d_M = 10000$
Courbe	1	2	3	4	5
Larg. Zone centrale	15.3	0	12.6	31.6	77.6
Éclair. Zona centrale	J_{Max}	J_{Max}	$0.73 J_{Max}$	$0.48 J_{Max}$	$0.26 J_{Max}$
Larg. pénombre	2.3	17.7	17.7	17.7	17.7
Larg. tot. image	20.0	35.4	48.0	67.0	113.0

Il convient de noter que non seulement les bandes de pénombre ne sont visibles qu'en partie (environ 60-80 %), mais aussi que la valeur d'éclairage perçue n'est pas proportionnelle à la valeur numérique de l'intensité, mais varie en fonction des propriétés de notre vision (loi logarithmique de Fetchner).

Image produite par une fente verticale sur un plan horizontal.

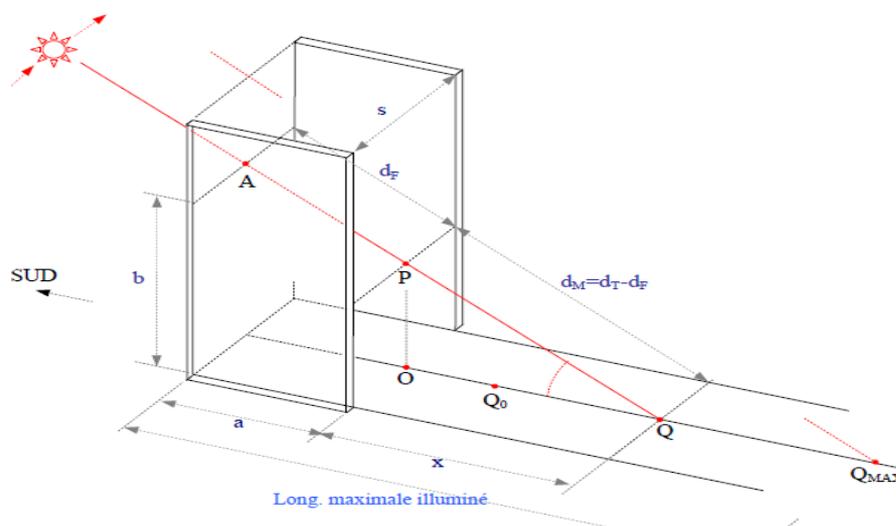


Fig. 9. Fente verticale et image dans le plan horizontal.

Supposons que les deux éléments solides, avec des faces planes parallèles qui délimitent la fente sont deux parois verticales de largeur a et hauteur b_{MAX} .²

Un dispositif de ce type peut être utilisé pour déterminer l'instant où le Soleil atteint un azimut donné, comme, par exemple, la direction d'un lieu distant, ou, si le plan de la paroi est parallèle à celui du méridien, pour déterminer l'instant de midi vrai. Pour simplifier je suppose être toujours dans ce second cas.

Dans un court intervalle de temps centré autour du midi, l'azimut du Soleil sera égal à celui de la fente, par conséquent ses rayons, après le passage à travers la fente, formeront une bande lumineuse sur le plan horizontal.

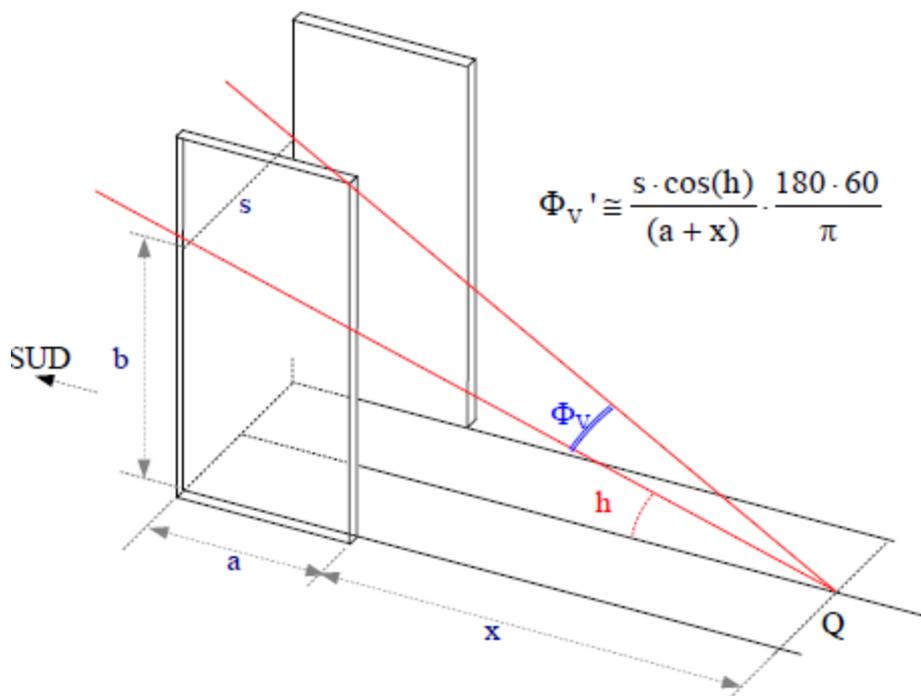


Fig. 9b. La fente « vue » par un point dans le plan horizontal.

Si nous connaissons les valeurs de la hauteur h du Soleil et de la largeur s de la fente, nous pouvons calculer les caractéristiques de l'image: la largeur de la zone éclairée, la largeur de la zone centrale, la valeur d'éclairement – qui varie avec le point Q sur l'image considérée, c'est-à-dire de sa distance x de la sortie de la fente (fig. 9b).

On peut facilement déduire les formules suivantes :

$$b = (x + a) \cdot \tan(h) \quad d_F = \frac{a}{\cos(h)} \quad d_T = \frac{a + x}{\cos(h)} = \frac{b}{\sin(h)}$$

Appelons Q_0 le point Q lorsque x augmente jusqu'à ce que $d_T = d_0 = k \cdot s$, alors nous avons $x_{Q_0} = k \cdot s \cdot \cos(h) - a$.

Afin que Q_0 soit à l'extérieur de la fente il faut que $x_{Q_0} > 0$, alors $a < k \cdot s \cdot \cos(h)$; si ce n'est pas le cas il n'y aura jamais dans la zone centrale de la bande lumineuse un éclairement maximal.

En d'autres termes, si nous voulons un éclairement maximal à la sortie de la fente en toutes saisons de l'année, il faut que $\frac{a}{s} < k \cdot \cos(h_{MAX})$.

² Pour simplifier je suppose que la fente est "couverte", c'est-à-dire, fermée à la partie supérieure. C'est le cas par exemple des fentes à l'intérieur d'éléments solides.

Par exemple, dans une localité avec $\varphi = 45^\circ$ et $h_{MAX} = 68,5^\circ$, puisque $k = 107,4$, au solstice d'été on aura $s > \frac{a}{39.4}$ et à l'équinoxe $s > \frac{a}{76}$. Avec $a = 100$ on aura alors $s > 2,53$ mm.

Quand on passe des points O à Q₀, et quand ensuite x passe de 0 à x_{Q0}, nous avons $d_T < d_0$ et :

$$\begin{aligned} \text{Largeur de la zone centrale} &= s - s_p = s - \frac{1}{k \cdot \cos(h)} \cdot (a + x) = s - \frac{(a + x)}{k \cdot \sin(\varphi - \delta)} \\ \text{Éclairement} &J = J_0 \cdot \sin(h) \\ \text{Largeur de la pénombre latérale} &= s_p - d_F \cdot \frac{\phi}{2} = \frac{d_T}{k} - \frac{d_F}{2 \cdot k} = \frac{a + 2 \cdot x}{2 \cdot k \cdot \cos(h)} = \frac{a + 2 \cdot x}{2 \cdot k \cdot \sin(\varphi - \delta)} \end{aligned}$$

Quand : $x > x_{Q0}$ alors $d_T > d_0$ et donc :

$$\begin{aligned} \text{Largeur de la zone centrale} &= s_p - s = \frac{1}{k \cdot \cos(h)} \cdot (a + x) - s = \frac{(a + x)}{k \cdot \sin(\varphi - \delta)} - s \\ \text{Éclairement} &J = J_0 \cdot \left[1 - \frac{2 \cdot \beta_{\text{rad}}}{\pi} + \frac{\sin(2 \cdot \beta)}{\pi} \right] \cdot \sin(h) \quad \text{avec } \cos(\beta) = \frac{s}{d_T} \cdot k \\ \text{Largeur pénombre latérale} &= s - \frac{a}{2 \cdot k \cdot \cos(h)} = s - \frac{a}{2 \cdot k \cdot \sin(\varphi - \delta)}, \text{ constante lorsque } x \text{ varie.} \end{aligned}$$

La largeur totale de l'image est, dans chaque cas, égale à $s + \frac{x}{k \cdot \cos(h)} = s + \frac{x}{k \cdot \sin(\varphi - \delta)}$

Exemple:

Largeur de la fente $s = 5$ mm, largeur $a = 100$ mm; latitude = 45° , $h_{max} = 6,5^\circ$ (solstice d'été).

Alors $s > \frac{a}{k \cdot \cos(h)} = 2,53$ mm le point Q₀ est donc à l'extérieur de la fente et une partie de l'image est complètement éclairée par le Soleil (voir l'exemple précédent).

Le jour où la déclinaison du Soleil = $+10^\circ$, nous avons au contraire $h = 55^\circ$ et $x_{Q0} = 208,3$ mm et les valeurs suivantes :

	X = 0	X = 100	X = 200	X = 208	X = 300	X = 4 00	X = 500
d _T	174.3	348.7	523.0	537.0	697.4	871.7	1046.1
d _F	174.3	174.3	174.3	174.3	174.3	174.3	174.3
Larg. Zone centrale	3.38	1.75	0.13	0.0	1.5	3.1	4.7
Éclair. Zona centrale	0.82 J ₀	0.82 J ₀	0.82 J ₀	0.82 J ₀	0.71 J ₀	0.60 J ₀	0.51 J ₀
Larg. pénombre	0.81	2.43	4.05	4.18	4.18	4.18	4.18
Larg. tot. image	5.0	6.61	8.24	8.36	9.9	11.5	13.0
Angle de visibilité	98.6'	49.3'	32.9'	32.0'	24.6'	19.7'	16.4

À la sortie de la fente ($x = 0$) l'image est aussi large que la fente elle-même, et dans la zone centrale l'éclairement est égal à 82 % de celui d'une surface placée perpendiculairement aux rayons du Soleil.

La zone en pleine lumière est d'environ 70 % de la largeur de la fente.

En s'éloignant de la sortie, la zone éclairée décroît tandis que les bandes de pénombre augmentent ; l'illumination de la zone centrale est encore maximum (à partir d'un point central de cette zone tout le disque du Soleil est encore visible).

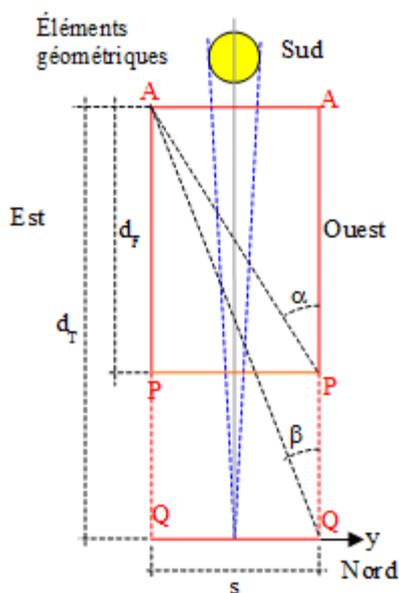
Aspect et évolution de la bande lumineuse produite par une fente verticale sur un plan horizontal

L'aspect de la bande lumineuse lorsque le Soleil s'approche du plan méridien, son éclairement, ses dimensions (longueur, largeur), son déplacement au fil du temps et la durée de son apparition, tous ces éléments varient largement en fonction de la hauteur du Soleil, et donc de la latitude du lieu, du jour, ainsi que de la largeur et de la profondeur de la fente, de la distance entre la sortie de la fente et le point de la bande observé.

Tâchons de rendre plus compréhensible l'évolution du phénomène.

En fonction de la distance x (fig. 9), nous pouvons avoir deux conditions différentes :

1) Si cette distance est petite (inférieure à la valeur $x_{Q0} = k \cdot s \cdot \cos(h) - a$, précédemment trouvée), le phénomène comporte différentes phases qui se succèdent dans le temps et qui sont schématiquement représentées dans les diagrammes des fig. 10 et 10b.



Chaque figure représente une section de la fente pratiquée avec un plan perpendiculaire au plan méridien passant par le Soleil et par la ligne droite APQ (fig. 9) : en haut se trouve l'entrée de la fente ; correspondant au point P, sa sortie ; dans la partie inférieure (point Q), le point d'intersection des rayons avec le plan horizontal.

◀ Fig. 10. Les éléments géométriques.

La largeur s de la fente a été augmentée pour améliorer la visibilité des détails.

- Quand le soleil approche du méridien, à l'ouest de la fente commence à apparaître une bande faiblement lumineuse qui s'élargit progressivement, tandis que son intensité augmente (fig. 10b-I). D'un point de cette bande, il ne serait possible de voir qu'une partie du disque solaire augmentant avec le temps, il y aurait donc une zone de pénombre.
- Immédiatement après apparaîtrait aussi, au milieu de la zone obscure, une mince bande entièrement illuminée qui grandirait en s'élargissant vers l'est (fig. 10-II).
- La zone éclairée cesserait de croître en largeur et commencerait à se déplacer vers l'est, ainsi que les bandes latérales en pénombre (fig. 10-III-IV). Cette phase se produirait lorsque l'azimut du Soleil entre $-\Phi/2$ et $+\Phi/2$ et donc pendant le temps nécessaire au disque solaire pour passer devant la fente.
- A midi la figure formée par la bande lumineuse et les deux bandes en pénombre est symétrique (fig. 10 - V). La largeur de la bande lumineuse est toujours inférieure à la largeur s de la fente.

Le phénomène se poursuivrait selon le même principe jusqu'à ce qu'il se termine.

Comme nous l'avons déjà vu, le phénomène se produit de la manière décrite si du point Q, situé à une distance x de la fente, on peut voir la totalité du disque du Soleil, c'est-à-dire si $x < k \cdot s \cdot \cos(h) - a$.

Par exemple, avec $s = 20 \text{ mm}$, $a = 500 \text{ mm}$, $\varphi = 45^\circ$, nous avons :

- pour le solstice d'été $x < 287 \text{ mm}$,
- pour les équinoxes $x < 1019 \text{ mm}$,
- pour le solstice d'hiver $x < 1500 \text{ mm}$.

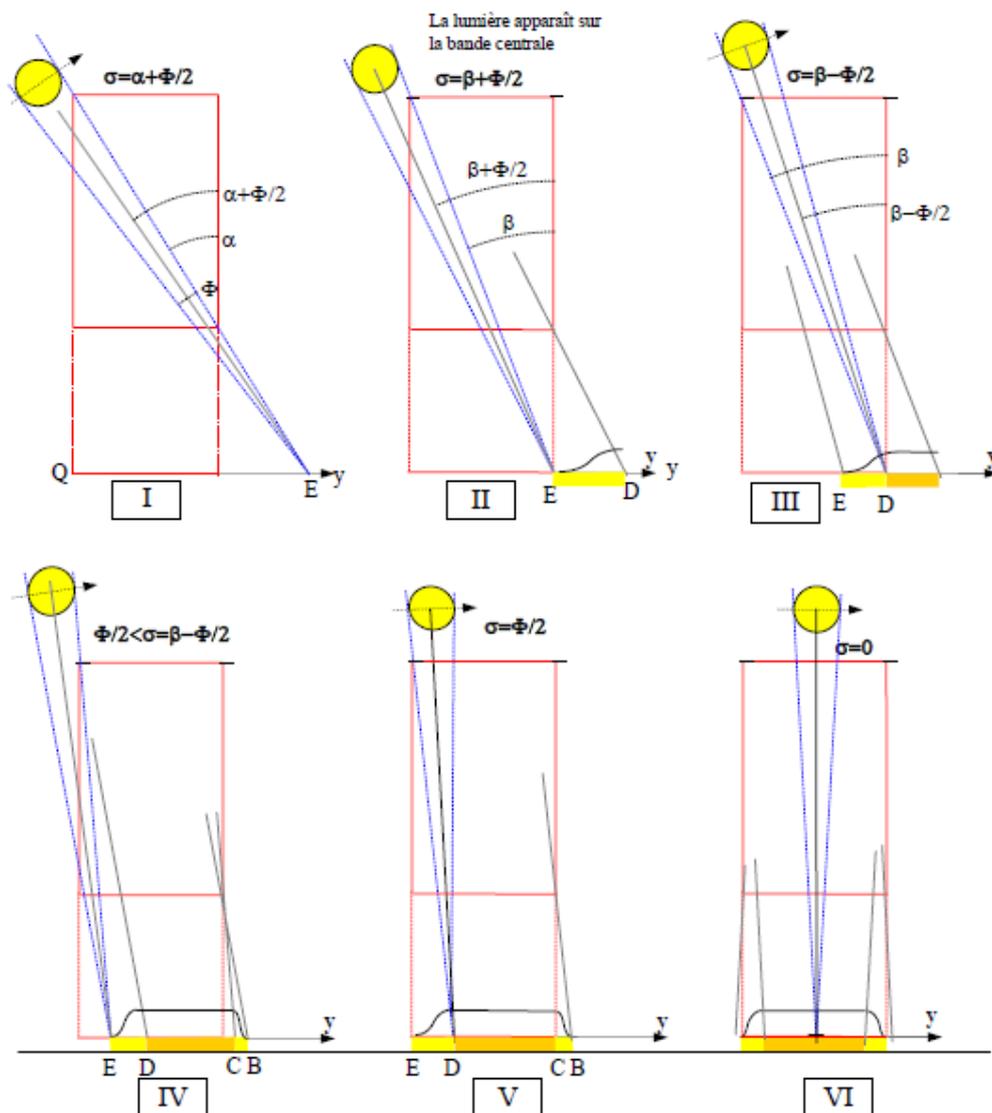
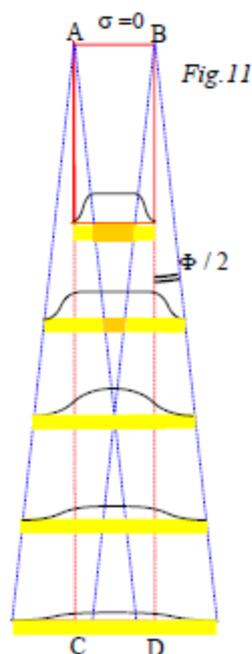


Fig. 10b. Les différentes phases du phénomène.

2) Si la distance x est supérieure aux valeurs indiquées ci-dessus, il n'y a plus de bande centrale complètement éclairée par le Soleil : la bande est complètement en pénombre et son éclairement diminue en s'éloignant du point de sortie (fig. 11).

Diagrammes temporels

Pour représenter les changements de la bande lumineuse en un point Q à une distance x de la sortie, nous pouvons représenter les limites des zones de pénombre et de pleine lumière lorsque l'azimut du Soleil change ou, plus exactement, dans un intervalle de temps centré à midi.



Dans les diagrammes de fig. 12 et 13 nous avons en abscisses les instants à partir de midi et en ordonnées (y sur la fig. 10) les distances à partir de l'axe central de la fente.

La fig.12 montre l'exemple d'une fente avec $s = 20$ mm, $a = 500$ mm, pour un localité où $\varphi = 45^\circ$ aux jours des équinoxes ; le point considéré est situé à une distance $x = 500$ mm de la sortie.

Dans le diagramme :

- La zone en forme de losange est la bande en pleine lumière ; le point en question commence à être éclairé environ 140 s avant midi (Az-Soleil = 50') et atteint sa largeur maximale environ 45 s (Az-Soleil = 16'); la bande illuminée (segment BC) est d'environ 35 % de la largeur de la fente, c'est-à-dire 7mm.
 - La largeur de la bande reste maximale pendant environ 90 s (ΔT en fig.12).
 - La durée du phénomène avec pleine lumière est au contraire de 280 s ($\Delta Az=100'$).
 - La bande centrale est accompagnée de deux bandes de pénombre de largeurs inégales, qui s'élargissent vers l'extérieur de la largeur de la fente (segments AB et CD).
- À midi, la largeur totale est d'environ 1,3 fois celle de la fente (26 mm). Cette bande de pénombre se rétrécit lorsque l'on s'éloigne du midi et disparaît après 320 s.
 - Sur la ligne médiane EF se situent les moments où le phénomène se produit au centre de la fente (toujours à une distance x). En E débute le phénomène et en F il se termine.

$$S = 20 ; a = 500 ; x = 500 ; \delta = 0^\circ ; \varphi = 45^\circ$$

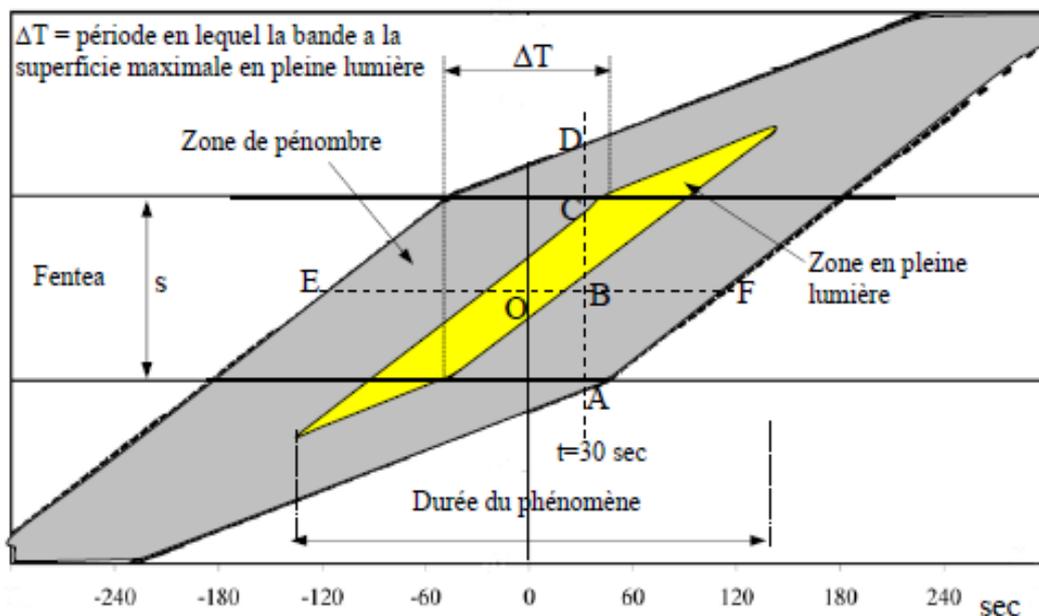


Fig. 12. Le diagramme temporel en secondes.

Les fig. 13 et 14 représentent les diagrammes relatifs à l'exemple précédent lorsque la distance x, à partir de la sortie de la fente, prends les valeurs $x = 0,200, 500$ et 1000 mm .

Les valeurs en l'ordonnée représentent les distances des bords de la fente.

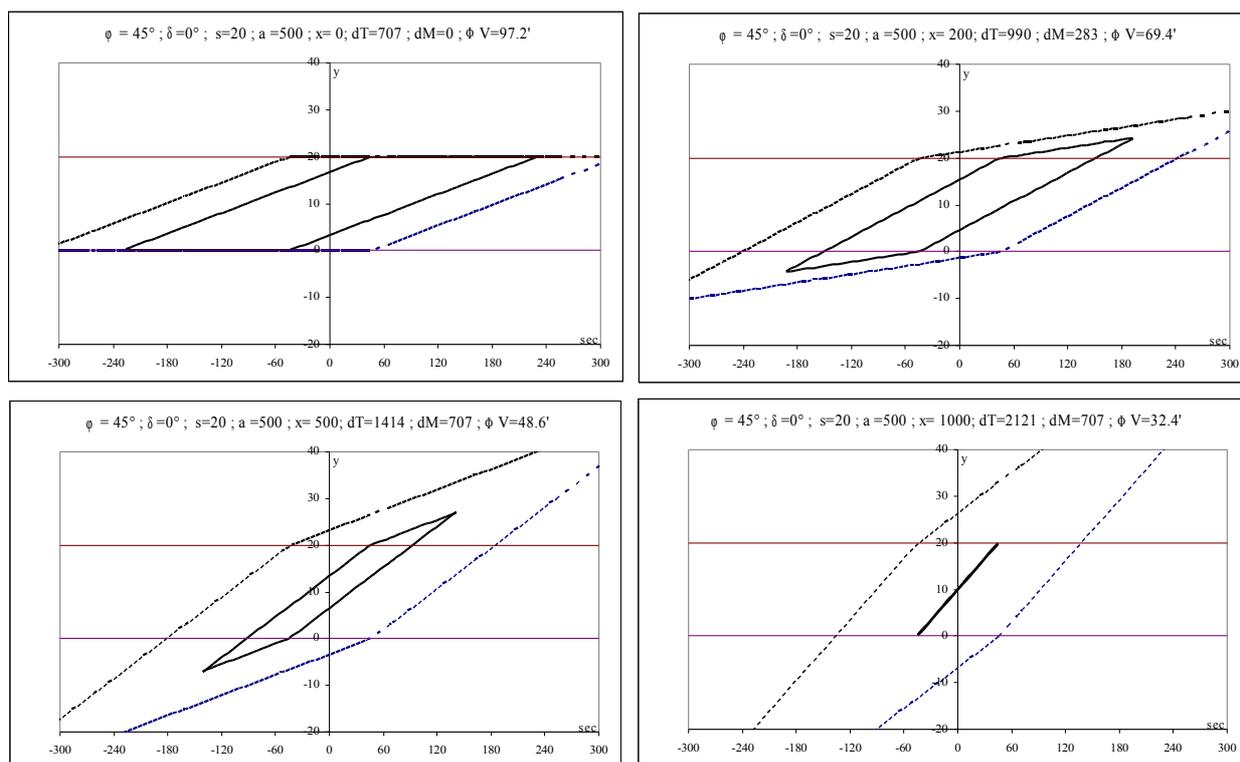


Fig. 13 – Les diagrammes temporels en fonction de la distance x

Dans le diagramme avec $x = 0$, c'est-à-dire à la sortie de la fente, on peut voir que la largeur de la bande lumineuse est égale, à l'évidence, à celle de la fente.

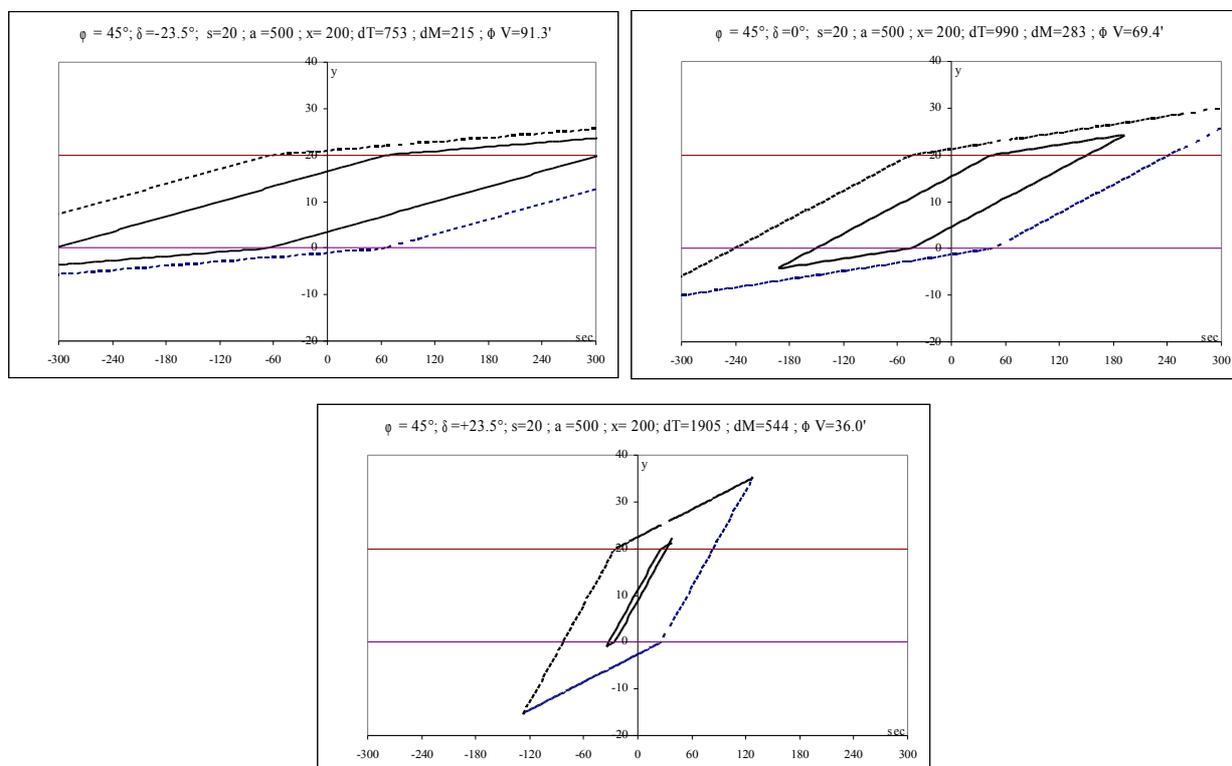


Fig. 14. Les diagrammes temporels en fonction de la déclinaison du Soleil.

Dans les autres images on peut observer comment, si nous nous éloignons, c'est-à-dire si x augmente, la bande centrale en pleine lumière diminue de plus en plus en largeur, tandis que les bandes de pénombre s'élargissent sur les côtés.

Le dernier diagramme montre la disparition de la zone de pleine lumière lorsque la valeur de $k \cdot s \cdot \cos(h) - a$ est égale à 1 019 mm.

Dans la figure 14 sont dessinés les diagrammes du même exemple (distance 200 mm) en fonction de la déclinaison du Soleil au solstice d'hiver, aux équinoxes et au solstice d'été.

Vous pouvez voir que la plus mauvaise situation se produit au solstice d'été, en raison de la hauteur élevée du Soleil, le trajet des rayons à l'intérieur de la fente est beaucoup plus grand.

La largeur de la zone centrale en pleine lumière est : $s - 2 \cdot \tan\left(\frac{\Phi}{2}\right) \cdot d_T \cong s - \frac{d_T}{k} = s - \frac{a + x}{k \cdot \sin(\phi - \delta)}$

Largeur de la bande de lumière à la sortie de la fente

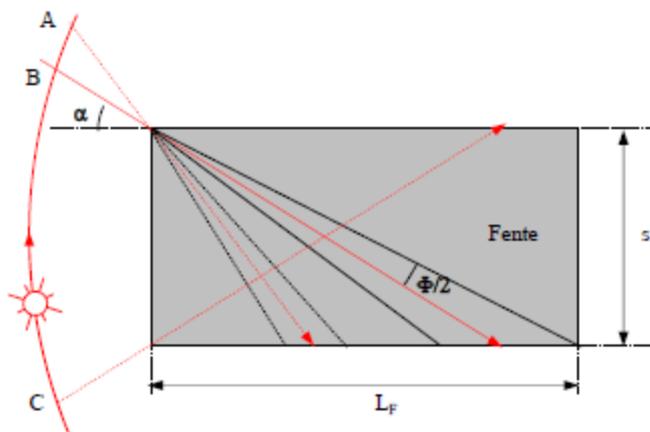


Figure 15. Passage du Soleil devant la fente - Vue de dessus.

Comme nous l'avons vu, les rayons de lumière commencent à sortir de la fente lorsque

$$\tan\left(\alpha - \frac{\Phi}{2}\right) = \frac{s}{d_F}$$

Nous avons en conséquence une bande lumineuse durant la période considérée, car le centre du Soleil se déplace du point C au point B de la fig.15.

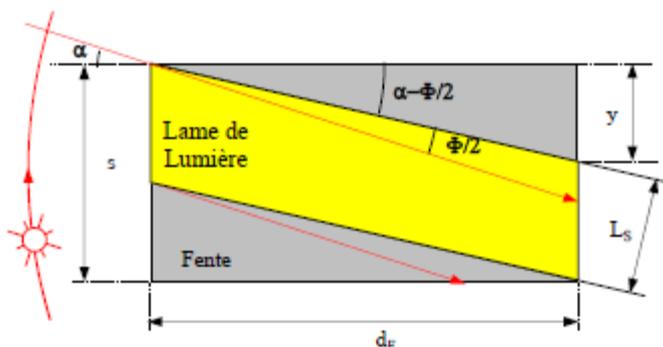


Figure 16. La lame de lumière - Vue de dessus.

A partir de $y = d_F \cdot \tan(\alpha - \Phi / 2)$, on peut facilement calculer la largeur de la bande de lumière L_S au bord de sortie de la fente (fig. 16) :

$$L_S = \left[s - d_F \cdot \tan(\alpha - \Phi / 2) \right] \cdot \cos(\alpha) = \left[s - \frac{a}{\cos(h)} \cdot \tan(\alpha - \Phi / 2) \right] \cdot \cos(\alpha)$$

Cette relation est valide si $|\alpha| \geq \frac{\Phi}{2}$; pour des valeurs inférieures de α , la fente est entièrement éclairée et la largeur de la bande de lumière est égal à s .

Durée des différentes phases

Soient α l'angle sous lequel un observateur situé à la sortie de la fente voit l'entrée ; β l'angle sous lequel on voit la même entrée du point Q sur le plan horizontal (voir fig. 9b) et σ l'azimut du centre du disque solaire. Nous avons alors :

$$\tan(\alpha) = \frac{s}{d_F} = \frac{s}{a} \cdot \cos(h) \quad \text{ou, si } s \text{ est petit} \quad \alpha_{\text{rad}} \approx \frac{s}{a} \cdot \cos(h) ;$$

$$\tan(\beta) = \frac{s}{d_T} = \frac{s}{a+x} \cdot \cos(h) .$$

Nous obtenons alors les formules suivantes :

- Début / fin de la pénombre

$$\text{instant t1 lorsque } \sigma = \pm \left(\alpha + \frac{\Phi}{2} \right)_{\text{rad}} \quad \text{d'où } \sigma^\circ = \pm \left[\frac{180}{\pi} \cdot \frac{s}{a} \cdot \sin(\varphi - \delta) + \frac{\Phi^\circ}{2} \right] ;$$

- Instant où est visible la moitié du disque solaire

$$\text{instant t2 lorsque } \sigma = \pm \alpha \quad \text{d'où } \sigma^\circ = \pm \left[\frac{180}{\pi} \cdot \frac{s}{a} \cdot \sin(\varphi - \delta) \right] ;$$

- Début / fin de pleine lumière

$$\text{instant t3 lorsque } \sigma = \pm \left(\beta - \frac{\Phi}{2} \right)_{\text{rad}} \quad \text{d'où } \sigma^\circ = \pm \left[\frac{180}{\pi} \cdot \frac{s}{a+x} \cdot \sin(\varphi - \delta) - \frac{\Phi^\circ}{2} \right] ;$$

- Début de la période avec un maximum de lumière

$$\text{instant t4 lorsque } \sigma = \pm \frac{\Phi}{2} \quad \text{d'où } \sigma^\circ = \pm \frac{\Phi^\circ}{2} ,$$

avec des valeurs symétriques pour la sortie des différentes phases.

Notez qu'il y a pleine lumière seulement lorsque $\beta_{\text{rad}} = \frac{s}{a+x} \cdot \sin(\varphi - \delta) > \frac{1}{k}$, les formules qui donnent t3 et t4 ne s'appliquent que si cette condition est remplie.

Pour déterminer les temps de début et de fin des différentes phases du phénomène, nous devons trouver les valeurs de l'angle horaire du Soleil.

Si les angles α et β sont suffisamment petits (inférieur à $3-4^\circ$) et si la fente a une valeur non nulle d'azimut, nous pouvons utiliser la relation approchée suivante :

$$\Delta \omega \cong \frac{\cos(h) \cdot \cos(AZ_F)}{\cos(\delta) \cdot \cos(\omega)} \cdot \frac{\Delta AZ_S}{[1 - \cos(\varphi) \cdot \sin(AZ_F) \cdot \tan(h) \cdot \tan(\omega)]} ,$$

où AZ_F est l'azimut de la fente, ω , δ et h , les coordonnées du Soleil au moment où son azimut = AZ_S et ΔAZ_S et la variation de celle-ci.

Si la fente est dirigée exactement vers le sud, c'est-à-dire dans le plan même du méridien, la relation devient :

$$\Delta \omega^\circ \cong \frac{\sin(\varphi - \delta)}{\cos(\delta)} \cdot \Delta AZ_S^\circ \quad \text{et} \quad \Delta t_{\text{sec}} \cong \frac{\sin(\varphi - \delta)}{\cos(\delta)} \cdot 240 \cdot \Delta AZ_S^\circ .$$

Il convient de noter que, contrairement à ce que beaucoup croient, le Soleil ne met pas toujours 4 minutes de temps pour se déplacer de 1° en azimut.

Par exemple, dans un lieu où $\varphi = 45^\circ$, le Soleil, pour se déplacer de 1° en azimut à proximité de midi, met : 1 min 36 s au solstice d'été, 2 min 49 s aux équinoxes et 4 min 3 s au solstice d'hiver.

Les jours de l'année où le déplacement du Soleil de 1° en azimut est, à midi, exactement de 4min, sont ceux dans lesquels sa déclinaison est $\delta = \frac{\varphi - 90}{2}$ ($\delta = -22.5^\circ$)

Les moments de début / fin des différentes phases sont alors :

- pénombre $t_1 \cong \pm \frac{\sin(\varphi - \delta)}{\cos(\delta)} \cdot 240 \cdot \left(\frac{180}{\pi} \cdot \frac{s}{a} \cdot \sin(\varphi - \delta) + \frac{\Phi^\circ}{2} \right) ;$
- Soleil à moitié visible $t_2 \cong \pm \frac{\sin(\varphi - \delta)}{\cos(\delta)} \cdot 240 \cdot \left(\frac{180}{\pi} \cdot \frac{s}{a} \cdot \sin(\varphi - \delta) \right) ;$
- pleine lumière $t_3 \cong \pm \frac{\sin(\varphi - \delta)}{\cos(\delta)} \cdot 240 \cdot \left(\frac{180}{\pi} \cdot \frac{s}{a+x} \cdot \sin(\varphi - \delta) - \frac{\Phi^\circ}{2} \right) ;$
- pleine lumière avec largeur maximale $t_4 \cong \pm \frac{\sin(\varphi - \delta)}{\cos(\delta)} \cdot 240 \cdot \frac{\Phi^\circ}{2} .$

Exemple :

Avec $s = 20$ mm, $a = 500$ mm, $x = 500$ mm, $\varphi = 45^\circ$ et $\delta = 0^\circ$ nous avons : $t_1 = 320,3$ s, $t_2 = 275,0$ s., $t_3 = 149,2$ s. et $t_4 = 45,3$ s.

Le phénomène dure 10 min 40 s et la bande en pleine lumière dure environ 5min. La bande a une largeur maximale (environ 7 mm) pendant une minute et demie.

A noter que la durée de la phase de pénombre ne dépend pas de la distance x , mais seulement de la hauteur du Soleil.

Dimension de la fente

Il ressort de la fig. 9, que $d_{TMax} = \frac{b_{Max}}{\sin(h)} = \frac{b_{Max}}{\cos(\varphi - \delta)}$.

Si nous voulons avoir la bande centrale en pleine lumière il faut que $d_{TMax} < k \cdot s$ et donc que soit valide l'inégalité $\frac{b_{Max}}{\cos(\varphi - \delta)} < k \cdot s$ (1)

À partir de $\tan(h) = \frac{b_{Max}}{a+x}$, nous avons alors $x = b_{Max} \cdot \tan(\varphi - \delta) - a$.

Si nous voulons que la bande lumineuse sorte de la fente il faut que $x > 0$ et donc nous aurons utiliser la formule $b_{Max} > \frac{a}{\tan(\varphi - \delta)}$ (2)

Ces deux inégalités restreignent l'ensemble des couples possibles (a, b) pour avoir la bande avec une zone lumineuse centrale sortant de la fente.

En représentant (1) et (2) sur un plan (a, b), nous obtenons le graphique de la fig.17, dans lequel est mise en évidence la zone "admise".

Évidemment le graphique devrait être complété pour le couple (δ , φ) désiré.

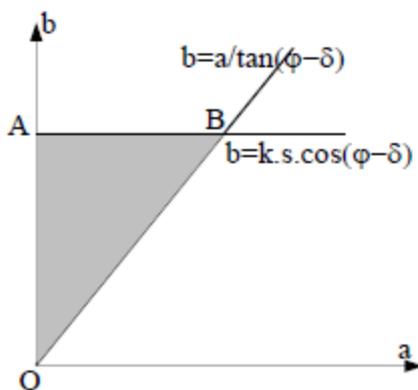


Fig. 17. Graphique a, b.

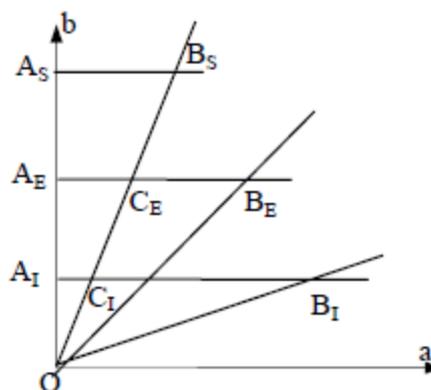


Fig. 18.

Un point sur le segment OB correspond à un couple (a, b) pour lequel on a $x = 0$, c'est-à-dire pour lequel la bande touche la sortie de la fente. Un point sur le segment AB correspond, au contraire, à une valeur pour laquelle, toujours pour la valeur donnée de δ , on a la zone en pleine lumière.

Si nous marquons dans le même graphe les zones « admises » au solstice et aux équinoxes, alors nous obtenons la fig. 18

On peut voir par exemple, que pour avoir une bande complètement illuminée au solstice d'hiver, nous devons prendre les valeurs (a, b) dans la région OA_1B_1 . Si nous voulons avoir simultanément les mêmes conditions au solstice d'été, nous devons nous limiter à la région plus petite OA_1C_1 .

Un critère pour un dimensionnement correct est, par exemple, d'obtenir qu'au solstice d'été la bande lumineuse sorte de la fente ou atteigne un point situé à une distance x assez petite.

Cela signifie prendre le couple (a, b) sur le segment OB; ou à peu près, c'est-à-dire avec $x = b_{Max} \cdot \tan(\varphi - \varepsilon) - a$ où d'habitude $\varepsilon = 23,5^\circ$.

Un exemple complet

Dans un lieu de latitude $\varphi = 46^\circ$ nous voulons utiliser une fente pour indiquer midi au solstice d'été, grâce à la bande lumineuse qui sort de la fente (c'est-à-dire avec $x \geq 0$). Nous voulons une hauteur maximale $b = 2\,000$ mm.

Avec $x = 0$ dans la $x = b_{Max} \cdot \tan(\varphi - \varepsilon) - a$, on obtient la valeur maximale de $a = 2000 \cdot \tan(46 - 23.5) = 828$ mm

La largeur s de la fente doit satisfaire à l'inégalité (1) $\frac{b_{Max}}{\cos(\varphi - \delta)} < k \cdot s$, à partir de laquelle nous

avons $s > \frac{b}{k \cdot \cos(\varphi - \delta)} = 20.2$ mm. En prenant par exemple les valeurs $a = 800$ et $s = 25$ mm.

la bande lumineuse s'étend à partir de $x = 0$ jusqu'à $x_{Max} = \frac{b_{Max}}{\tan(h)} - a = b_{Max} \cdot \tan(\varphi - \delta) - a$, avec

- au solstice d'été $x_{Max} = 29$ mm (avec $a = 828$ et $s = 2,20$ nous aurions obtenu $x_{Max} = 0$);
- aux équinoxes $x_{Max} = 1\,271$ mm ;
- au solstice d'hiver $x_{Max} = 4\,549$ mm.

Avec $x_{Q0} = k \cdot s \cdot \cos(h) - a = k \cdot s \cdot \sin(\varphi - \delta) - a$, nous pouvons calculer les distances x des points où termine la bande en pleine lumière aux solstices et aux équinoxes.

Si $x_{Q0} < x_{Max}$ alors toute la bande est toujours en plein soleil et nous obtenons les valeurs :

- au solstice d'été $x_{Q0} = 228 \text{ mm}$ - car il est $> x_{Max}$ cette valeur est incorrecte ;
- aux équinoxes $x_{Q0} = 1\,131 \text{ mm}$;
- au solstice d'hiver $x_{Q0} = 1\,715 \text{ mm}$.

Les durées des différentes phases, au solstice d'été, aux équinoxes et au solstice d'hiver, sont :

- | | | | |
|--------------------|------------|------------|---------------|
| - pénombre | 3 min 10 s | 8 min 56 s | 15 min 53 s ; |
| - demi-soleil | 2 min 17 s | 7 min 24 s | 13 min 42 s ; |
| - pleine lumière | 1 min 23 s | 5 min 52 s | 11 min 30 s ; |
| - lumière maximale | 53 s | 1 min 32 s | 2 min 10 s. |

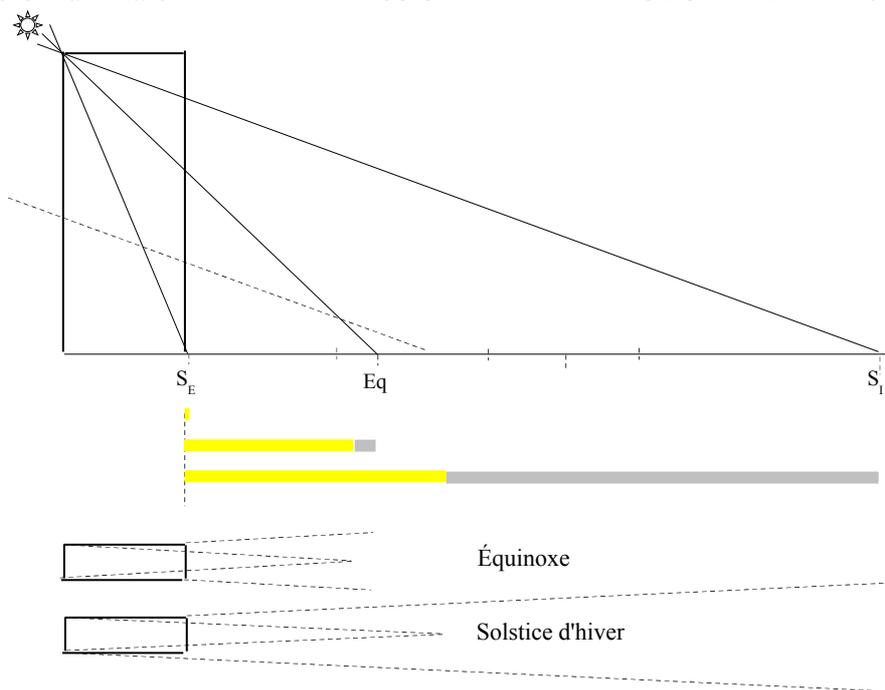


Figure 19. Exemple - Sections de la fente.

Quand le soleil est au méridien, les largeurs des différentes zones sont données par les relations ci-dessous : la première lorsque $x < x_{Q0}$, la seconde quand il n'y a plus de zone en pleine lumière.

$$\text{Largeur de la zone centrale} = s - \frac{(a + x)}{k \cdot \sin(\varphi - \delta)} = \frac{(a + x)}{k \cdot \sin(\varphi - \delta)} - s ;$$

$$\text{Largeur pénombre latérale} = \frac{a + 2 \cdot x}{2 \cdot k \cdot \sin(\varphi - \delta)} = s - \frac{a}{2 \cdot k \cdot \sin(\varphi - \delta)} ;$$

$$\text{Largeur totale de l'image} = s + \frac{x}{k \cdot \sin(\varphi - \delta)} .$$

Avec ces formules on peut calculer les valeurs indiquées dans le tableau suivant :

x	pénombre latérale	zone centrale	largeur totale
0	6.0	14.6	25
200	7.8	12.0	27.6
500	11.6	8.2	31.5
1000	18.1	17.0	37.9
2000	19.8	11.2	50.9

Exemple :

En un lieu où $\varphi = 45^\circ$ nous avons une fente verticale large de 5 cm, profonde de 100 cm et formant un azimut $Az_F = 30^\circ$.

Nous voulons étudier l'image un jour où la déclinaison du Soleil est $\delta = + 10^\circ$.

Il est facile de calculer les valeurs $h = 51,59^\circ$ et $\omega = 18,39^\circ$ qui correspondent à l'heure locale 13 h 13 min.

À partir de ces formules, on obtient $\alpha_F = 2.86^\circ$ tandis que la variation globale de l'azimut qui concerne le phénomène est $\Delta Az_S = 2 \cdot \alpha_F + \phi = 6.26^\circ$.

En utilisant la relation déjà donnée
$$\Delta \omega \cong \frac{\cos(h) \cdot \cos(Az_F)}{\cos(\delta) \cdot \cos(\omega)} \cdot \frac{\Delta Az_S}{[1 - \cos(\varphi) \cdot \sin(Az_F) \cdot \tan(h) \cdot \tan(\omega)]}$$

nous trouvons une variation $\Delta \omega = 4,23^\circ$, ce qui nous permet de calculer le temps nécessaire pour que les rayons du soleil traversent la fente, soit 16,9 min.

Si la fente est dans le plan méridien ($Az = 0^\circ$) la durée du phénomène est de 14,6 min.

Il convient de noter que confondre la variation de l'azimut avec celle de l'angle horaire conduirait à une durée de 25,0 min, très différente de la valeur correcte.

Etude d'une bande de lumière

Quelquefois il est nécessaire de contrôler ou de calculer une "bande de lumière" pour illuminer, en certaines circonstances, un point ou une zone donnée d'une paroi verticale. En général, une fente est formée dans une paroi d'un local où se trouve la «cible», souvent constituée par une image, une statue ou une peinture.

Dans ces cas, la fente est souvent assez grande, car elle n'est pas utilisée pour déterminer un instant, et la bande de lumière qu'elle produit est clairement visible.

Les considérations que nous avons faites précédemment sont toujours valables, même si les effets de la pénombre sont maintenant négligeables.

Pour expliquer la façon de procéder, prenons un exemple complet.

Nous voulons créer un bande de lumière pour illuminer une image située sur la paroi d'une chambre orientée sud. L'image est située à une hauteur de 100 cm du sol, large de 60 cm et haute de 100 cm.

La paroi de la chambre dans lequel on veut pratiquer la fente est dans la direction nord-sud, sa face extérieure est tournée vers l'ouest et son épaisseur est de 40 cm (fig. 20).

La distance entre le centre de l'image et la paroi est de 200 cm.

Nous voulons que la bande illumine l'image au début de l'après-midi du 10 décembre, lorsque le Soleil a une déclinaison $\delta = - 23,0^\circ$. En un lieu où $\varphi = 46^\circ$.

Après avoir examiné les valeurs de l'azimut et de la hauteur du Soleil dans les premières heures de l'après-midi le jour voulu et les dimensions de la chambre, nous avons décidé de fixer l'instant central du phénomène à 14 h 30 m, heure locale. Nous obtenons les valeurs suivantes :

heure 14,0 TL	$\omega = 30,0^\circ$	$Az = 28,6^\circ$	$h = 15,8^\circ$
heure 14,5	37,5°	35,1°	13,1°
heure 15,0	45,0°	41,3°	9,9°

Avec ces valeurs, il est possible de calculer la position à donner à la fente. La largeur s de la fente influence tant la largeur de la zone qui sera illuminée que la durée du phénomène.

Par exemple avec une largeur de 6 ou 8 cm on obtient les valeurs résumées dans le table suivante :

s-cm	Az-1	Az- 2	h1	h2	t ₁	t ₂	Δt	x ₁	x ₂	y ₁	y ₂	a-1	a-2
6	30.7	40.7	15.0	10.2	14h09m	14h57m	48m	-31	+45	92.1	113	78.3	61.3
8	29.5	43.0	15.5	8.9	14h01m	15h08m	64m	-39	65	90	120	81.3	58.7
0	35.1		13.1		14h30m			0		100		69.5	

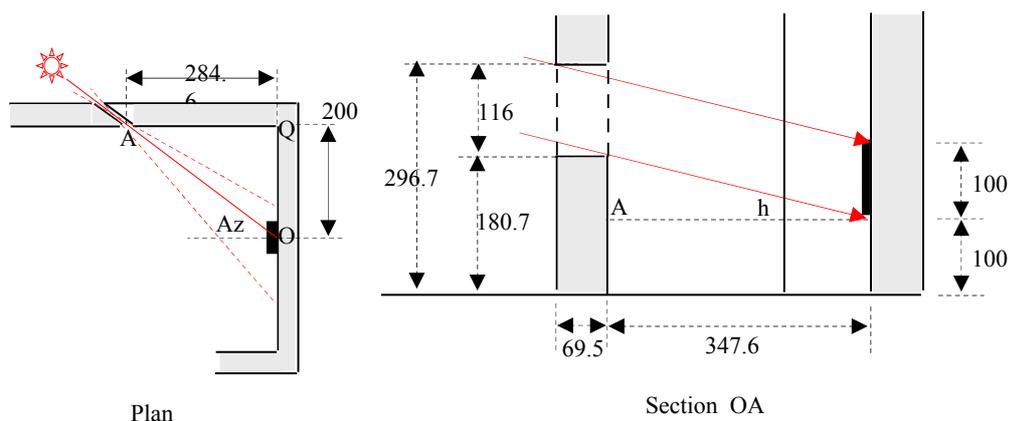


Figure 20. Exemple - Sections de la fente.

Les valeurs x indiquées dans le table sont les distances horizontales de la bande au centre O , au début et à la fin du phénomène ; les valeurs y sont les distances verticales de l'extrémité inférieure de la bande lumineuse, mesurée à partir du sol ; les valeurs a sont les longueurs de la fente pour les rayons ayant un azimut différent.

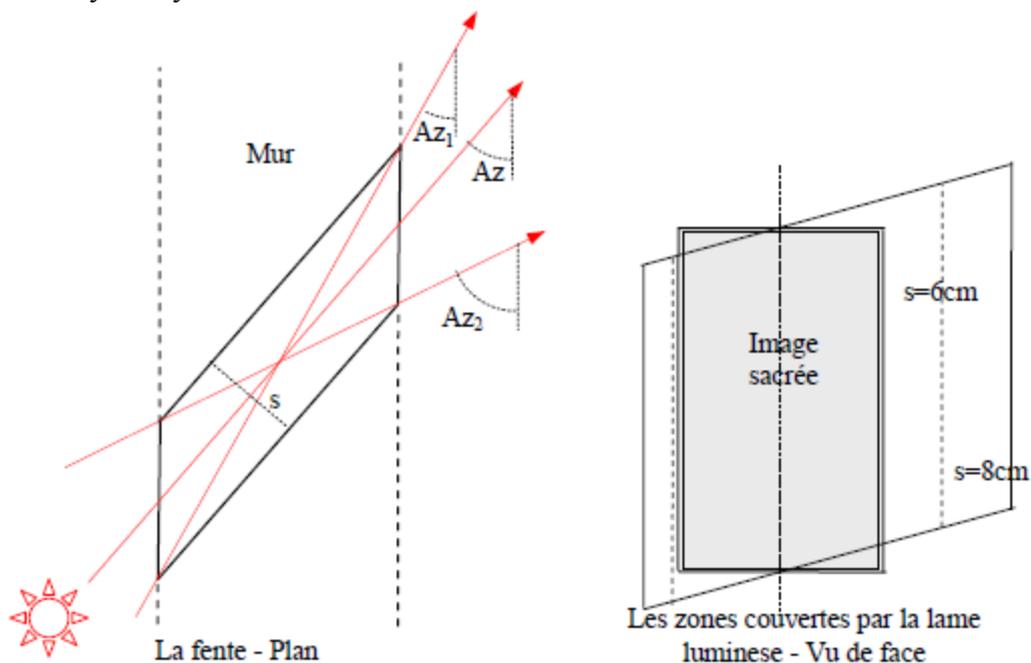


Figure 21. Détails.

Dans la fig. 21 sont représentées la vue en plan de la fente avec les directions extrêmes des rayons sortants et les zones couvertes par la bande de lumière autour de l'image sacrée. Comme on peut le noter pour obtenir une meilleure couverture, la fente devrait être prolongée vers le bas.

NOTE

L'exemple ci-dessus n'est pas inventé, mais se réfère à une bande de lumière obtenue avec une fente ouverte dans le mur d'un petit oratoire construit contre l'aile ouest de la Villa dei Conti Secco in Abano (Nord de l'Italie) au milieu du XVIII^e siècle (fig. 22).

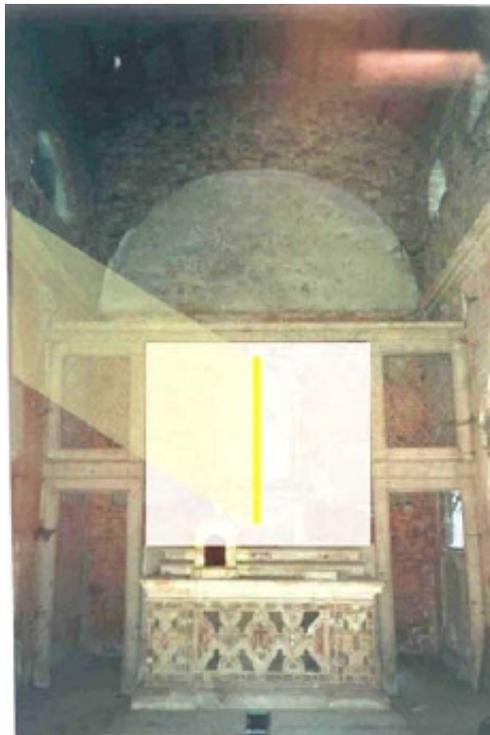
La bande était destinée à illuminer, presque certainement, une image de Notre-Dame de Lorette, à qui l'oratoire était dédié, au début de l'après-midi du 10 décembre (fête de Notre-Dame de Lorette). La fente est actuellement fermée.

En raison de la grande largeur de la fente et de sa forme, la bande apparaît sur le mur avec une zone centrale toujours complètement illuminée.

Cette zone centrale est large d'environ 25-28 mm avec $s = 6$ cm, et 45-49 mm avec $s = 8$ cm.



La fente-fenêtre de l'oratoire en restauration.
Vue de l'intérieur.



La bande lumineuse
"reconstruite".

Fig. 22. La « sortie » de la fente de l'oratoire d'Abano.

Conclusion

L'exemple que nous avons choisi, celui d'une fente avec faces verticales pour indiquer le moment où le Soleil a une valeur donnée d'azimut ou pour indiquer midi, n'épuise pas les possibilités d'application de ce dispositif dans le champ gnomonique : il suffit de considérer le comportement analogue d'une fente qui produit une bande lumineuse, ou d'un style, qui produit une ombre ayant les mêmes caractéristiques géométriques.

Nous pouvons alors imaginer des applications avec :

- une fente disposée parallèlement à l'équateur céleste pour indiquer les jours des solstices ;
- des cadrans solaires azimutaux horizontaux avec une fente pouvant tourner autour d'un axe vertical, au lieu d'un style vertical ;
- des cadrans solaires équatoriaux avec des fentes étroites situées en un ou plusieurs plans horaires ;

Si nous réduisons à des valeurs très faibles l'"épaisseur" ou la "profondeur" de la fente, nous obtenons des éléments qui, pour simplifier, nous pouvons appeler "entailles". Celles-ci peuvent remplacer les styles et les tiges présentés dans différents cadrans solaires.

Exemples d'applications :

- remplacer le style polaire d'un cadran solaire classique;
- remplacer la tige d'un cadran solaire monofilaire;
- remplacer les fils d'un cadran bifilaire fait par exemple sur le plancher d'une zone couverte par deux surfaces mates, chacune avec une "entaille" (fig. 23) ;

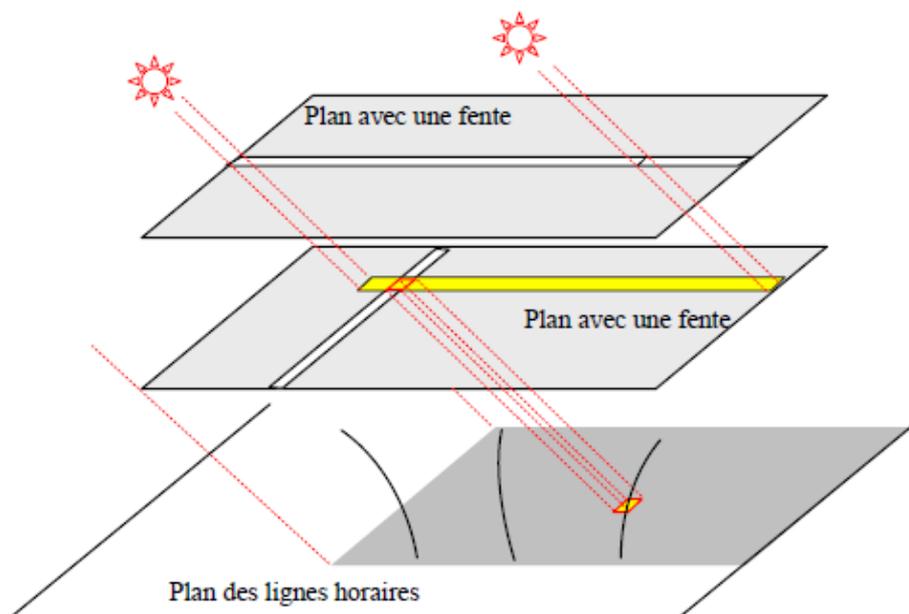


Figure 23 - Schéma d'un cadran bifilaire avec deux fissures

Enfin, un "fente" peut être réduite à la forme d'un "tube" étroit (rectangulaire, circulaire ou d'une autre section) qui, fixé avec une orientation convenable, peut indiquer seulement un instant lors de jours particuliers de l'année. La forme de la tache lumineuse et sa durée d'éclairement peuvent être facilement déterminées grâce aux relations exposées dans cette présente étude.

Gianni Ferrari – 28 Février 2013



Des compas solaires sur le site de Michel Lalos



http://michel.lalos.free.fr/cadran_solaires/doc_cadran/cadran_navigation/cs_navigation.html



Réflexion du Soleil par miroirs

Gianni FERRARI

Le phénomène de flash de lumière que nous voyons quand les rayons du Soleil sont réfléchis par un miroir est étudié en tenant compte de surfaces réfléchissantes simples, mais ayant des formes diverses. Sont recherchées l'intensité de la « lueur », sa visibilité et sa durée, et la façon dont la dimension et la forme des surfaces réfléchissantes influencent ces variables.

INTRODUCTION

Je pense que, quand nous étions enfants, nous avons tous joué avec un miroir pour refléter les rayons du Soleil ou dans une maison éloignée, ou dans les yeux d'un ami, ou d'une personne inconnue, et je crois aussi que presque tout le monde a vu le flash de lumière réfléchi ou par la vitre d'une fenêtre qui s'ouvrait ou par le pare-brise d'une voiture sur une route de montagne sinueuse.

Ce simple phénomène a également été utilisé pendant de nombreux siècles pour envoyer des informations ou des messages entre des tours d'observation.

Au cours des dernières années, on a trouvé enfin quelques applications, disons moins « exigeantes », pour créer de nouveaux types de cadrans solaires ou pour indiquer l'instant de midi ou encore une direction particulière¹ du Soleil.

Je pense en particulier aux cadrans solaires proposées au XVII^e Seminario Italiano di Gnomonica (16 avril 2011) par l'ingénieur Tonino Tasselli² et au miroir que le Dr Giancarlo Bonini et ses collègues ont installé sur le méridien passant par Perinaldo (Imperia, Italie du Nord), de sorte que l'on peut voir un flash de lumière lorsque le Soleil passe à travers ce méridien particulier.³



*Le phare sur le méridien de Cassini
(Perinaldo – Italie) - Le miroir*

Distance de Perinaldo 13500m
Différence de hauteur de Perinaldo 1400m
Hauteur de la place 2000m
Cylindre avec un rayon de 50cm
une longueur de 100cm

¹ Par exemple la direction de la Mecque ou la direction opposée. Il est évident que, pour notre hémisphère, le miroir doit être positionné vers le nord du point d'observation.

² Tonino Tasselli - Orologi a riflessione con specchi cilindrici "Atti del XVII Seminario di Gnomonica" Pescia, Aprile 2011, p. 155-163.

³ Cette installation (voir l'image) a été appelé "Phare sur le méridien de Cassini" parce que Perinaldo est la ville où est né le célèbre astronome Gian Domenico Cassini, concepteur et maître d'œuvre de la grande ligne méridienne de San Petronio à Bologne. Voir le site <http://www.astroperinaldo.it/>.

Dans cet article, je propose de faire une brève étude du phénomène avec quelques surfaces réfléchissantes simples ayant des formes différentes, de rechercher l'intensité de la « lueur », sa visibilité et sa durée et de quelle manière la dimension de ces « miroirs » influence ces quantités.

1 – GENERALITES

Nous voulons placer un élément réfléchissant en un point Q de telle sorte que la lumière du Soleil réfléchi soit visible à un instant donné en un second point P (point cible) appartenant au plan méridien (fig. 1).

Dans ce qui suit, nous supposons que le miroir est parfaitement réfléchissant et négligerons toujours les effets de la courbure de la Terre, de la réfraction et de l'absorption atmosphérique.

Données :

- Latitude
- Distance entre les points P et Q
- Différence de hauteur entre les points P et Q
- Magnitude du Soleil
- Diamètre apparent du Soleil
- correspondant à $1/107,4$ rad
- ΔAz (correspondant au diamètre du Soleil)
- Max déclinaison du Soleil
- Hauteur du Soleil
- Azimut du Soleil
- Inclinaison du miroir plan
- Par rapport à la verticale (plan vertical $i = 0^\circ$)
- Flux lumineux du Soleil
- Flux lumineux réfléchi par le miroir

- φ°
- a** mètres
- b** mètres
- 26.7
- $\Phi_{\text{Soleil}} = 32'$
- $\Phi_{\text{Soleil}} / \cos(h)$
- $\delta_{\text{Max}} = 23,45^\circ$
- h
- Az
- i
- F_{Soleil}
- F_{mr}

Toutes les dimensions linéaires seront exprimées en mètres.

Géométrie du système

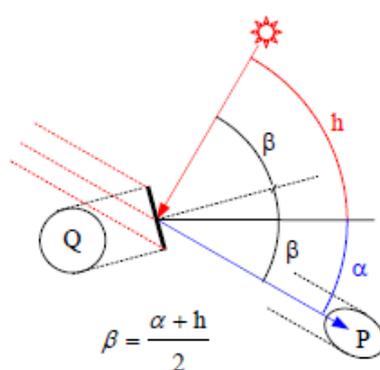
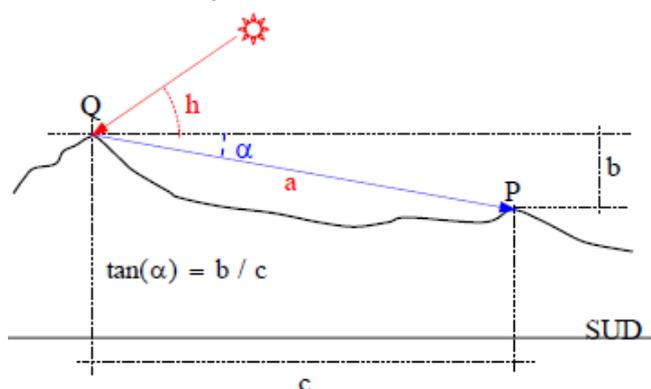


Fig. 1.

2 – MIROIR PLAN

Visibilité de l'élément réfléchissant

Pour vérifier la visibilité de l'élément réfléchissant, je suppose, pour simplifier, qu'il est formé par une surface circulaire de diamètre d_{Mr} mètres et positionné de manière que, à un instant donné, les rayons réfléchis soient dirigés exactement vers la cible P.

Dans ce cas, le miroir est vu en P comme une petite ellipse, avec les axes de dimensions angulaires égales, à Φ_{Soleil} et $k \cdot \Phi_{\text{Soleil}}$, radians où $k = \cos(\beta)$ et β est l'angle entre le rayon et la normale au miroir (fig. 2).

Cette ellipse est entièrement éclairée par le Soleil si $\Phi_{\text{Mr}} < \Phi_{\text{Soleil}}$ ⁴.

Dans ce cas, le miroir sera vu de P sous un angle de Φ_{Mr} radians et le flux lumineux réfléchi par rapport à celui qui vient directement du Soleil est donné par :

$$\frac{F_{\text{Mr}}}{F_{\text{Soleil}}} = k \cdot \left(\frac{\Phi_{\text{Mr}}}{\Phi_{\text{Soleil}}} \right)^2 \quad \text{avec} \quad \Phi_{\text{Mr}} = \frac{d_{\text{Mr}}}{a} \text{ rad} \quad \text{et} \quad \Phi_{\text{Soleil}} = \frac{1}{107.4} \text{ rad}$$

Si Φ_{Mr} est inférieur à environ 5' d'arc, environ 1/700 rad, le miroir sera vu comme un élément quasiponctuel, tandis que nous devrions distinguer sa forme avec des valeurs de Φ_{Mr} plus élevées⁵.

Nous cherchons maintenant à obtenir, avec une bonne approximation, la luminosité de l'image réfléchie exprimée dans l'échelle des magnitudes stellaires.

Si nous nous souvenons de la loi de Pogson⁶, nous constatons que le miroir en Q est perçu par l'observateur en P comme un élément brillant (une étoile) avec la magnitude m_{Mr} , donnée par :

$$m_{\text{Mr}} = m_{\text{Soleil}} + 2.5 \cdot \log \left(\frac{F_{\text{Soleil}}}{F_{\text{Mr}}} \right) = m_{\text{Soleil}} - 2.5 \cdot \log(k) + 5 \cdot \log \left(\frac{\Phi_{\text{Soleil}}}{\Phi_{\text{Mr}}} \right) \quad \text{c'est-à-dire par}$$

$$m_{\text{Mr}} \cong -36.9 - 2.5 \cdot \log(k) + 5 \cdot \log \left(\frac{a}{d_{\text{Mr}}} \right) \quad \text{valable si} \quad k \cdot \Phi_{\text{Mr}} < \Phi_{\text{Soleil}}$$

Exemples

Avec $d_{\text{Mr}} = 20\text{cm}$, $a = 100\text{m}$, $b=0$, $h=60^\circ$ il serait $k=0.867$ et $m_{\text{Mr}} = -23.2$, légèrement moins que la luminosité du Soleil. Le miroir serait vu par l'observateur en P comme une ellipse d'axes $412.3'' \times 357.3''$ ⁷

Avec un miroir de diamètre 0,5m à une distance de 10 km serait $\Phi_{\text{Sp}} = 10.3''$ et $m_{\text{Mr}} = -15.2$, près de 20 000 fois plus brillante que Vénus au maximum de sa luminosité.

Un miroir d'un diamètre de 50 cm à une distance de 40 m serait vu de la taille de $43' \times 37'$ et contiendrait toute l'image du Soleil : la formule ci-dessus donne un résultat incorrect et une plus faible magnitude (lumineuse) que celle du Soleil.

Dans le cas où le miroir a une forme non circulaire, par exemple rectangulaire, la valeur de m_{Mr} peut être calculée de la manière suivante :

si A_{Mr} est l'aire de la surface réfléchissante, l'angle sous lequel elle peut être vue à partir du point P est donnée par :

$$\Psi_{\text{Mr}} = \left(\frac{k \cdot A_{\text{Mr}}}{a^2} \right) \text{sr} \quad \text{tandis que la surface du disque solaire sera vu sous l'angle}$$

$$\Psi_{\text{Soleil}} = \frac{\pi}{4} \cdot (\Phi_{\text{Soleil}})^2 = \frac{1}{14696} \text{sr}$$

⁴ Si $k \cdot \Phi_{\text{Mr}} \geq \Phi_{\text{Soleil}}$ alors la totalité de l'image du Soleil est visible dans le miroir.

⁵ En raison de la luminosité de l'image, sa forme ne sera guère visible sans un filtre assombrissant jusqu'à des valeurs de Φ_{Mr} d'au moins 10-15' (1/300-1/200 rad).

⁶ La *formule de Pogson* exprime formellement la mesure de la luminosité d'un objet céleste par la relation $m = -2.5 \cdot \log_{10}(F) + C$ dans laquelle m est appelé "*magnitude apparente*" de l'objet, F étant le flux lumineux provenant de l'objet et C une constante.

⁷ La valeur recherchée peut être obtenue aussi d'une manière différente. Le miroir présente une surface ayant la même brillance que celle du Soleil, dans un rapport égal au rapport entre la surface solaire et celle du miroir, c'est-à-dire $(1920 \times 1920) / (412.4 \times 357.3)$, 1920 étant le diamètre du Soleil en secondes d'arc.

Puisque $\frac{F_{Mr}}{F_{Soleil}} = \left(\frac{\Psi_{Mr}}{\Psi_{Soleil}} \right)$ nous avons $m_{Mr} = m_{Soleil} + 2.5 \cdot \log \left(\frac{\Psi_{Soleil}}{\Psi_{Mr}} \right) = -37.12 + 2.5 \cdot \log \left(\frac{a^2}{k \cdot A_{Mr}} \right)$

Exemple : Avec un miroir circulaire d'un diamètre de 0,5 m, placé à 13,5 km, $h = 60^\circ$ et $b = 0$, on obtient $\Phi_{Mr} = 7.6''$ e $m_{Mr} = -14.5$. Soit la même valeur qu'avec un miroir de 20 x 100 cm. ayant la même surface.

Orientation du miroir plan

Le réflecteur et la "cible" étant sur le même méridien, pour observer le phénomène au midi local d'un jour donné, nous devrions orienter le miroir vers le sud, avec une inclinaison i par rapport à la verticale qui dépendrait de la hauteur du Soleil à midi et de la géométrie du système.

Lorsque P a une hauteur inférieure à celle du miroir (fig. 2) nous avons :

$$h_{Soleil} = 90 - \varphi + \delta \quad \beta = \frac{h + \alpha}{2} = \frac{90 - \varphi + \delta + \alpha}{2} \quad i = \beta - \alpha = \frac{90 - \varphi + \delta - \alpha}{2}$$

Si, au contraire, P est situé au-dessus du miroir Q (Fig. 3) nous avons:

$$h_{Soleil} = 90 - \varphi + \delta \quad \beta = \frac{90 - \varphi + \delta - \alpha}{2} \quad i = \beta + \alpha = \frac{90 - \varphi + \delta + \alpha}{2}$$

Évidemment, si P et Q ont la même hauteur ($\alpha=0$) $i = \frac{90 - \varphi + \delta}{2}$

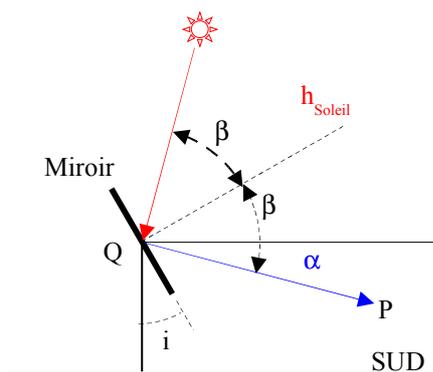


Fig. 2

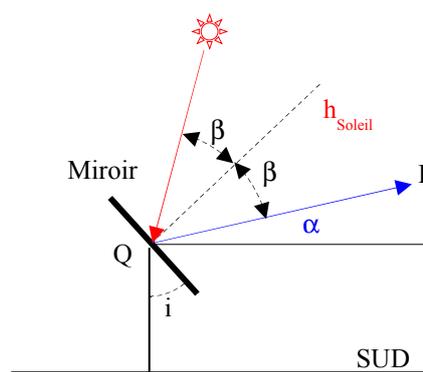


Fig. 3

Exemple : Avec un miroir de diamètre de 0,2 m placée en un lieu de latitude = 46° , à une distance de 100 m de P et 20 m au-dessous (fig. 2), nous aurions : $\varphi = 46^\circ$; $\alpha = 11,54^\circ$ et les valeurs extrêmes de l'inclinaison seraient: $i_{\text{été}} = 27,9^\circ$ e $i_{\text{hiver}} = 4,5^\circ$.

Si le miroir est 20 m plus haut (fig. 3), on aurait $i_{\text{été}} = 39,5^\circ$ et $i_{\text{hiver}} = 16,0^\circ$

Pour voir tous les jours la lumière solaire réfléchi par le miroir, il est nécessaire de changer l'angle du miroir, c'est-à-dire d'avoir un système motorisé qui le modifie de manière appropriée.

Durée du phénomène

Les rayons du Soleil commencent à être réfléchis dans la direction de P à l'instant où le bord occidental du disque solaire est exactement sur la normale du miroir, c'est-à-dire sur le méridien (fig. 4).

La fin du phénomène, vue par l'observateur en P, se produira plutôt quand le disque solaire aura complètement franchi le méridien, le bord oriental du disque passera au méridien.

La durée du phénomène est donc égale au temps mis par le disque solaire pour franchir la ligne nord-sud.

Parce que le diamètre du Soleil est d'environ 0,5° ; est généralement admis que ce temps est égal à 2 minutes, mais ce n'est pas entièrement correct.

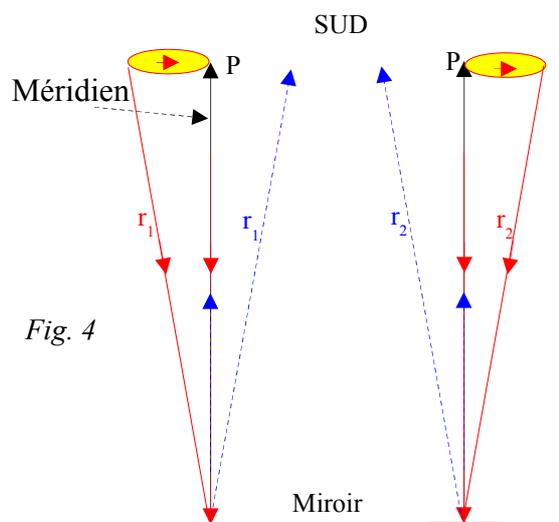


Fig. 4

La valeur de T est indépendante de la latitude et est égal à :

- aux solstices $T = 139 \text{ s}$
- aux équinoxes $T = 128 \text{ s}$

Pour le calcul de la durée du phénomène on peut utiliser la relation approchée suivante

$$T \approx \frac{\Phi_{\text{Soleil}}}{\cos(\delta)} \cdot 240 \text{ sec} \quad (\text{voir l'annexe})$$

Une inclinaison du miroir dans la direction est-ouest ne change pas la durée du phénomène, mais ne produit que une image étirée de la lumière réfléchie.

3 - MIROIR CYLINDRIQUE

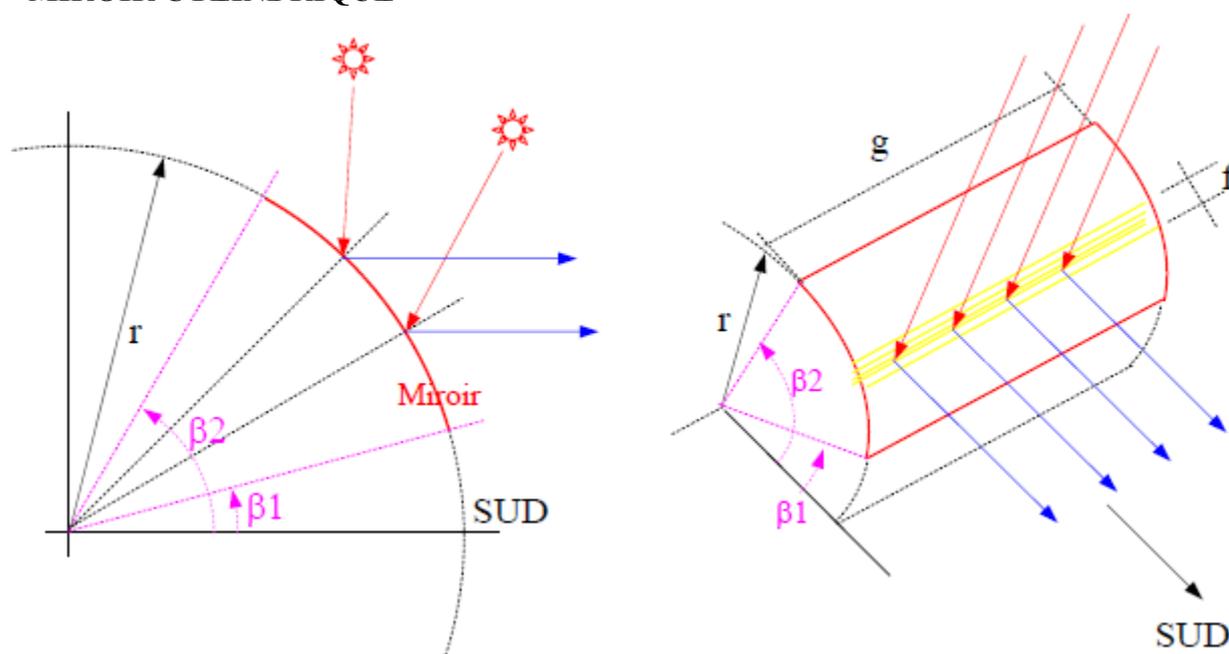


Fig. 5

Pour obtenir une lumière réfléchie visible n'importe quel jour de l'année, nous considérerons un miroir cylindrique disposé avec son axe dans le sens est-ouest (fig. 5).

De cette façon, l'inconvénient est que le flux lumineux réfléchi vers l'objectif P est fortement diminuée.

La zone du cylindre à partir de laquelle les rayons réfléchis arrivent à l'objectif a une longueur égale à g et largeur $f = \frac{r}{107.4}$ où r est le rayon du cylindre.

La surface réfléchissante concernée est alors donnée par : $A_{Mr} = g \cdot \frac{r}{107.4}$ et donc, comme déjà constaté, $m_{Mr} = -37.12 + 2.5 \cdot \log\left(\frac{a^2}{k \cdot A_{Mr}}\right)$ où a est la distance entre P et Q.

Exemple : Avec un cylindre de rayon $r = 0,5$ m, longueur $g = 1$ m et $k = 0,866$, nous avons $f = 1/214,8$ m.

Donc $A_{Mr} = 1/214,8$ m² et enfin, avec $a = 10$ km, $m_{Mr} = -10,9$.

Évidemment, pour augmenter la luminosité du point lumineux, nous devons augmenter la dimension du cylindre.

La partie de la surface cylindrique affectée par le phénomène, et donc nécessaire, est comprise entre les deux plans passant par l'axe du cylindre qui forment les angles β_1 et β_2 avec le plan horizontal passant par l'axe (fig. 5).

Les valeurs de ces angles (en supposant $\alpha = 0^\circ$) sont :

$$\beta_1 = \frac{h_{\text{Soleil-Minimum}}}{2} = \frac{90^\circ - \varphi - 23.45^\circ}{2} \quad \text{et}$$

$$\beta_2 = \frac{h_{\text{Soleil-Maximum}}}{2} = \frac{90^\circ - \varphi + 23.45^\circ}{2}$$

La zone cylindrique concernée sous-tend alors un angle au centre égal à 23.45° , environ 1/15 de la circonférence.

Exemple : pour un lieu avec $\varphi = 46^\circ$ nous avons les valeurs $\beta_1 = 10,3^\circ$ e $\beta_2 = 33,7^\circ$.

Avec $r = 50$ cm elle a une largeur d'environ 20 cm.

4 - SURFACE RÉFLÉCHISSANTE TOROÏDALE

Pour augmenter la durée du phénomène, et aussi pour le rendre visible dans une large zone autour du point P, on peut penser à réaliser le miroir sur une surface toroïdale (fig. 6 et 7).

Dans ce cas, il faut déterminer non seulement la luminosité de l'éclair, mais aussi la longueur du tore pour obtenir la durée souhaitée.

Durée du phénomène

Si nous voulons que le phénomène dure T minutes, il est nécessaire qu'il commence T/2 minutes avant le midi vrai, quand l'angle horaire du Soleil est égal à $\Delta\omega = T/8^\circ$.

En supposant, pour simplifier, la hauteur h du Soleil constante et égale à sa valeur au méridien, nous aurons $h = 90^\circ - \varphi + \delta$, et nous pouvons obtenir la valeur de ΔAz en utilisant la formule :

$$\sin(\Delta Az) = \frac{\cos(\delta) \cdot \sin(\Delta \omega)}{\cos(h)} \quad (\text{voir l'annexe}).$$

L'angle au centre du tore sous-tendu par la surface concernée sera alors : $\gamma = 2 \cdot \Delta Az$ ⁸.

⁸ Avec une bonne approximation, on peut négliger l'effet du diamètre solaire.

Il faut souligner que la durée du phénomène augmente fortement lorsque la déclinaison du Soleil diminue.

Avec une surface comme celle de l'exemple (arc du tore de 6°) la durée du phénomène, au solstice d'hiver, est égale à environ 25 minutes.

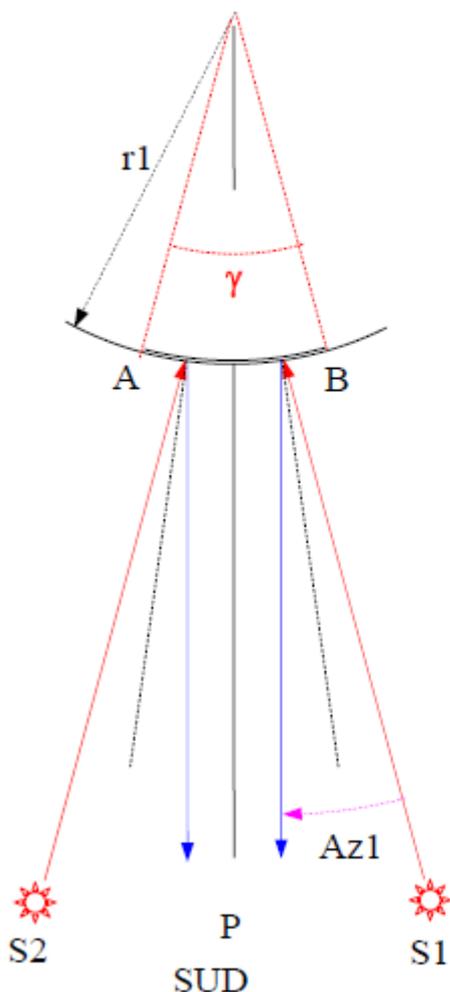


Fig. 6.

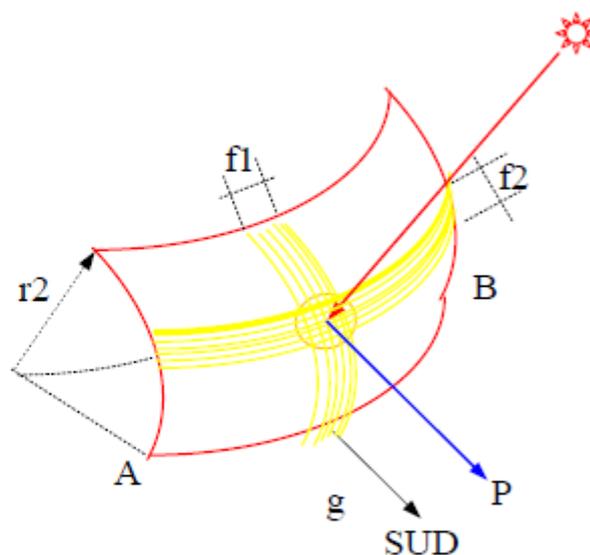


Fig. 7.

Exemple : Avec $\varphi = 46^\circ$, si nous voulons au solstice d'été une durée du phénomène de 10 minutes, $\Delta\omega$ devra être $\Delta\omega = 1,25^\circ$ et $\Delta Az = 3^\circ$. L'arc du tore sous-tend un angle γ d'environ $\gamma = 6^\circ$. Avec un tore de 2 m de rayon, l'arc ne serait que d'environ 20 cm.

Si nous voulons rendre le flash visible sur une période de temps très longue, les formules précédentes ne sont plus valables, car il n'est plus possible de considérer la hauteur du Soleil constante et égale à celle de midi.

Nous devons déterminer la valeur h de la hauteur du Soleil au début (ou à la fin) de la période, avec la formule classique :

$$\sin(h) = \sin(\varphi) \cdot \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\Delta\omega)$$

puis il faut calculer la valeur de ΔAz avec la formule :

$$\sin(\Delta Az) = \frac{\cos(\delta) \cdot \sin(\Delta\omega)}{\cos(h)}$$

Exemple : Toujours avec $\varphi = 46^\circ$, nous voulons, au Solstice d'été, que la lumière réfléchie soit visible pendant une durée de 1 heure, centrée autour de midi. Nous avons : $h = 67,45^\circ$, $\Delta\omega = 7,5^\circ$; $\Delta Az = 18,2^\circ$ et $\gamma = 36,4^\circ$.

Avec un rayon de tore de 2 m l'arc serait d'environ 130 cm.

Au solstice d'hiver, la durée du phénomène avec cette surface serait de 2 h 28 m.

Luminosité du flash

La zone de la surface à partir de laquelle les rayons réfléchis arrivent à l'observateur (fig. 7), présente une forme approximativement elliptique (fig. 7) avec des axes f_1 et f_2 tels que :

$$f_1 = \frac{r_1}{107.4} \quad f_2 = k \cdot \frac{r_2}{107.4}$$

où r_2 est le rayon du cercle qui engendre le cylindre du tore et r_1 est le rayon de l'anneau.

La surface réfléchissante est alors donnée par $A_{Mr} = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{r_1 \cdot r_2}{(107.4)^2}$ et

$$m_{Mr} = -37.12 + 2.5 \cdot \log\left(\frac{a^2}{k \cdot A_{Mr}}\right) \quad \text{où } a \text{ est, comme toujours, la distance entre P et Q.}$$

Exemple : Avec un tore construit à partir d'un cercle de rayon $r_2 = 0,5\text{m}$, dont le centre décrit un cercle de rayon $r_1 = 2\text{ m}$, la surface réfléchissante est seulement de $0,7\text{ cm}^2$.

Avec $a = 1\ 000\text{m}$ et $k = 0,866$ nous avons $m_{Mr} = -11,5$.

Évidemment, pour augmenter la luminosité de l'éclair, nous devrions augmenter la dimension de la figure.

Surface utile

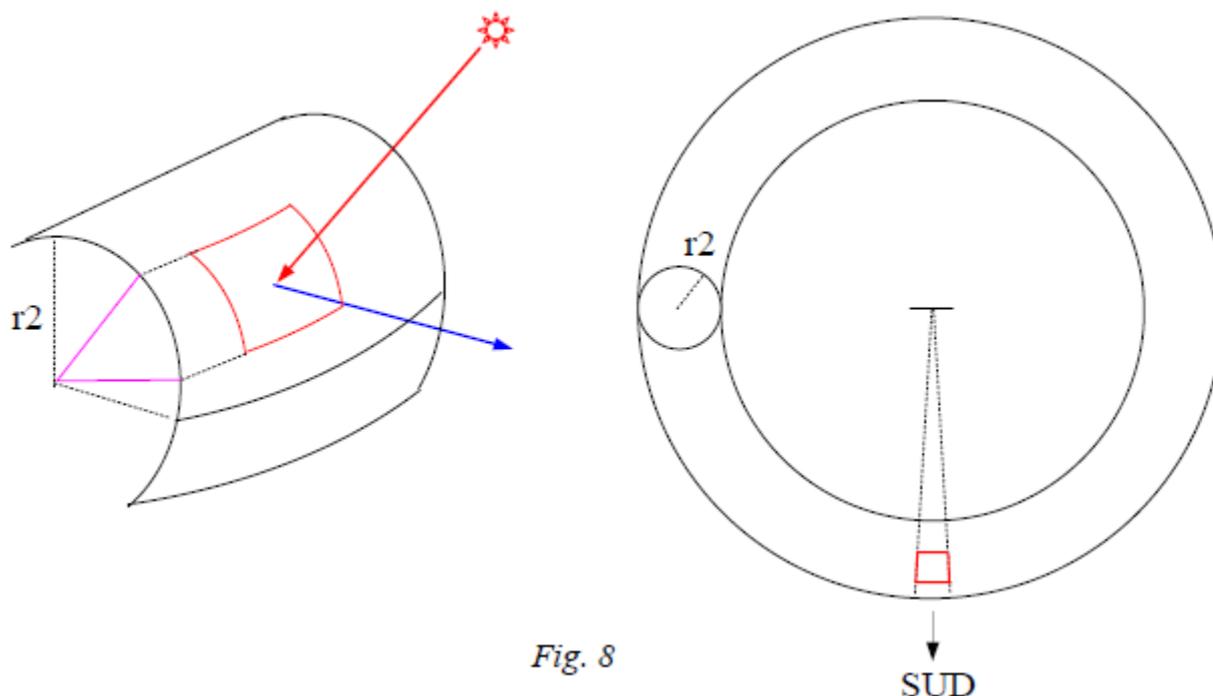


Fig. 8

La zone utile de la surface est délimitée par l'arc du tore, qui a la longueur mentionnée précédemment, et par l'arc du cercle avec l'amplitude $(\beta_2 - \beta_1)$ décrite dans le cas d'une surface cylindrique (fig. 8).

Exemple : En utilisant les valeurs des exemples ci-dessus : $\varphi = 46^\circ$; $r_1 = 2$ m; $r_2 = 0,5$ m, pour une durée, au solstice d'été de $T = 10$ minutes, la zone intéressée du tore serait d'environ 20×20 cm.

Avec $T = 1$ heure, les dimensions seraient de 20×120 cm.

5 - MIROIR EN FORME DE SPHÈRE

Avec un miroir plan, ou cylindrique, ou torique, la tache lumineuse n'apparaît que pendant un certain temps autour de midi vrai. Avec une surface réfléchissante sphérique, l'image réfléchie peut être observée en toute saison, à tout moment de la journée.

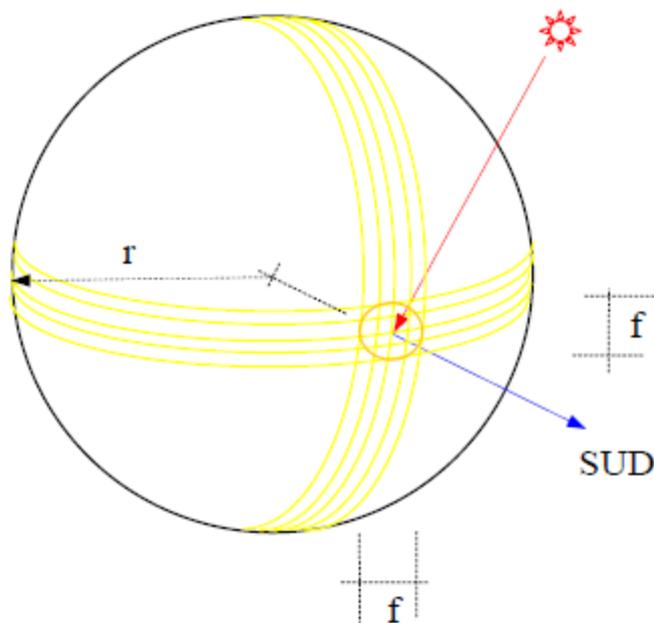


Fig. 9.

L'intensité lumineuse de l'éclair devient, dans ce cas, encore moindre que dans les cas des cas précédents.

La surface réfléchissante "active" est d'environ
$$A_{Mr} = \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{r}{107.4} \right)^2 .$$

Par exemple avec une sphère de 10 cm de rayon (environ un ballon de football), avec les valeurs habituelles, la zone réfléchissante est très petite (inférieure à un cm^2). A une distance de 100 m, elle serait vue comme un objet de magnitude $m_{Mr} = -11,5$. À une distance de 2 km, sa magnitude serait $m_{Mr} = -5,0$, visible avec des jumelles, mais à peine à l'œil nu en plein jour.

6 – MATERIEL

Le miroir doit être solide et éventuellement à l'abri du vandalisme. Les éléments réfléchissants plan, peuvent être réalisés avec des feuilles de verre d'au moins 1 cm d'épaisseur montées sur un cadre métallique rigide, ou avec des plaques en acier inoxydable de bonne épaisseur afin de ne pas avoir de déformation pouvant produire des réflexions anormales.

Dans le cas d'une surface cylindrique, torique ou sphérique, l'acier inoxydable est, à mon avis, la seule solution possible.

Dans le cas de surfaces non planes, le système peut être construit soit en revêtant d'la surface d'un modèle en bois, en béton ou en plastique, soit en soudant de petites plaques planes sur une structure métallique.

ANNEXE

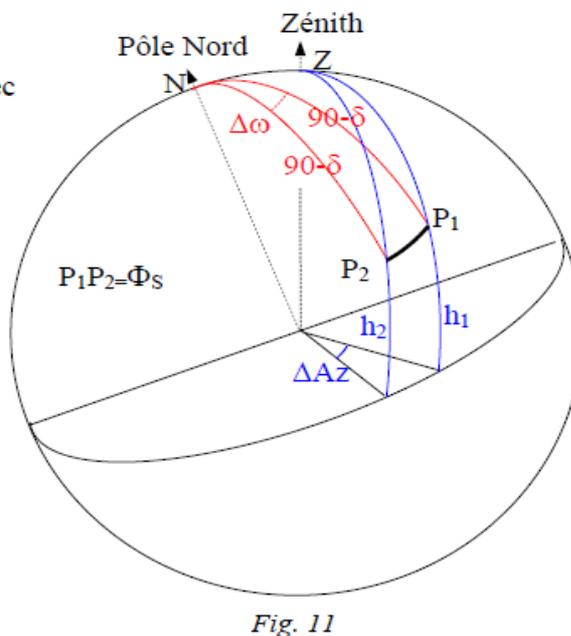
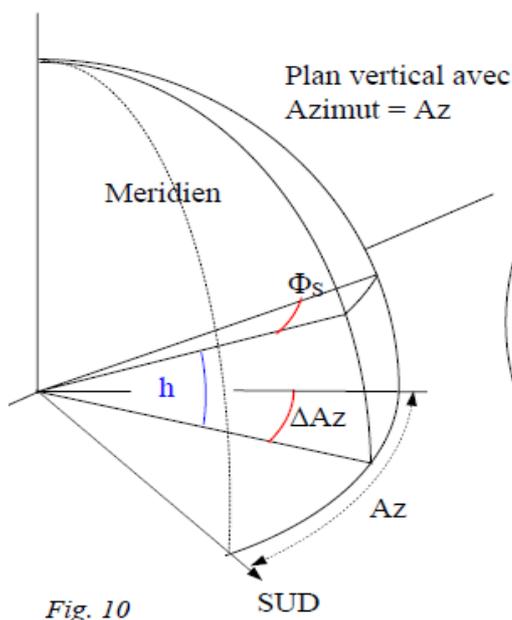
Symboles :

- Latitude	φ
- Heure de temps vrai (après-midi)	H
- Angle horaire	ω
- Déclinaison du Soleil	δ
- Hauteur du centre du Soleil à midi	h
- Azimut du centre du Soleil à midi	Az
- Diamètre solaire (moyenne)	$\Phi_{\text{Soleil}} = 0,533^\circ$
- ΔAz (correspondant)	$\Phi_{\text{Soleil}} / \cos(h)^9$
- Durée de passage	T

Calcul exact de la variation de l'azimut du Soleil quand il traverse un plan vertical.

Comme le Soleil traverse un plan vertical quelconque (fig. 10), il se déplace, avec une bonne approximation, sur un arc de parallèle P1P2 (fig. 11).

Même si l'arc P1P2 ne fait pas partie d'un grand cercle de la sphère, car l'angle $\Delta\omega$ est petit (environ $0,5^\circ$), nous pouvons, avec une bonne approximation, considérer les triangles NP_1P_2 et ZP_1P_2 comme deux triangles sphériques.



Depuis P1 et P2, extrémités du diamètre du disque solaire, $P_1P_2 = \Phi_{\text{Soleil}}$, nous avons les relations:

$$\begin{aligned} \cos(P_1P_2) &= \cos(\Phi_s) = \sin(h_1) \cdot \sin(h_2) + \cos(h_1) \cdot \cos(h_2) \cdot \cos(\Delta Az) \text{ et} \\ \cos(P_1P_2) &= \cos(\Phi_s) = \sin^2(\delta) + \cos^2(\delta) \cdot \cos(\Delta \omega) \end{aligned} \quad (1)$$

⁹ Puisque Φ_{Soleil} est assez petit dans cette formule, on peut supposer que h est constante et égale à sa valeur centrale.

à partir desquelles on peut obtenir :

$$\cos(\Delta Az) = \frac{\sin^2(\delta) + \cos^2(\delta) \cdot \cos(\Delta \omega) - \sin(h_1) \cdot \sin(h_2)}{\cos(h_1) \cdot \cos(h_2)}$$

Puisque Φ_{Soleil} est petit, on peut négliger la différence entre h_1 et h_2 . Ainsi, nous obtenons :

$$\cos(\Phi_s) = \sin^2(h) + \cos^2(h) \cdot \cos(\Delta Az) \quad \text{et} \quad \cos(\Delta Az) = \frac{\cos(\Phi_s) - \sin^2(h)}{\cos^2(h)}$$

Si successivement nous développons en suite les termes $\cos(\Delta Az)$ et $\cos(\Delta \omega)$, en négligeant les termes supérieurs, nous aurons la formule suivante qui donne des résultats approximatifs :

$$\Delta Az \cong \frac{\Phi_s}{\cos(h)}$$

De même, on peut dériver les formules

$$\cos(\Delta \omega) = \frac{\cos(\Phi_{\text{Soleil}}) - \sin^2(\delta)}{\cos^2(\delta)} \quad \Delta \omega \cong \frac{\Phi_s}{\cos(\delta)} \quad \text{et} \quad T = \frac{\Phi_{\text{Soleil}}}{\cos(\delta)} \cdot 240 \text{ sec}$$

ainsi que $\Delta Az \cdot \cos(h) \cong \Delta \omega \cdot \cos(\delta)$

Temps mis par le disque solaire pour traverser un plan vertical quelconque – Calcul exact

Considérons un plan vertical passant par le zénith et par le centre du disque solaire à une heure H du jour (par commodité, dans l'après-midi) (fig. 10).

Nous voulons déterminer le temps T nécessaire pour que le disque solaire à traverser ce plan ¹⁰.

Avec les formules classiques pour le triangle fondamental, nous pouvons calculer la hauteur du Soleil à l'instant considéré et l'azimut du plan :

$$\omega = 15 \cdot (H - 12)^\circ$$

$$\sin(h) = + \sin(\delta) \cdot \sin(\omega) + \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) \cdot \cos(\varphi)$$

$$\cos(Az) = \frac{- \sin(\delta) \cdot \cos(\varphi) + \cos(\delta) \cdot \sin(\varphi) \cdot \cos(\omega)}{\cos(h)}$$

$$\sin(Az) = \frac{+ \cos(\delta) \cdot \sin(\omega)}{\cos(h)} \quad (a1)$$

Si la hauteur est négative, cela signifie que le Soleil est sous l'horizon.

Pour des valeurs positives de δ et des valeurs élevées de ω nous devons calculer Az en utilisant les deux équations (a1) qui donnent le sinus et le cosinus; dans les autres cas, il suffit d'utiliser seulement la dernière formule.

Nous avons alors :

$$\left. \begin{array}{l} \text{azimut du bord oriental du Soleil} \end{array} \right\} \quad Az_1 = Az - \frac{\Phi_{\text{Soleil}} / 2}{\cos(h)} \quad (a2)$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{azimut du bord occidental du Soleil} \end{array} \right\} \quad Az_2 = Az + \frac{\Phi_{\text{Soleil}} / 2}{\cos(h)}$$

En utilisant les valeurs trouvées, on peut calculer les angles horaires ω_1 e ω_2 des deux bords. Le temps de passage est la différence $T = 4 \cdot (\omega_2 - \omega_1)$ minutes .

¹⁰ Exemples d'applications : détermination du temps nécessaire pour que le Soleil se « cache » derrière l'angle d'une maison ; calcul du temps pour qu'un mur vertical s'illumine, c'est-à-dire le temps de passer de l'ombre à la lumière, etc.

Pour calculer exactement les valeurs des angles horaires ω_1 et ω_2 , on doit trouver les valeurs des hauteurs h_1 et h_2 correspondantes avec les formules suivantes :

$$B = \frac{\sin(\delta) \cdot \sin(\varphi)}{1 - \cos^2(\varphi) \cdot \sin^2(Az)}, \quad C = \frac{\sin^2(\delta) - \cos^2(\varphi) \cdot \cos^2(Az)}{1 - \cos^2(\varphi) \cdot \sin^2(Az)} ; \quad (3)$$

$$\sin(h) = + B \pm \sqrt{B^2 - C} ;$$

et enfin les valeurs des angles horaires ω_1 et ω_2 avec les formules suivantes :

$$\cos(\omega) = \frac{\sin(h) - \sin(\delta) \cdot \sin(\varphi)}{\cos(\delta) \cdot \cos(\varphi)} \quad \text{et} \quad \sin(\omega) = \frac{\cos(h) \cdot \sin(Az)}{\cos(\delta)} \quad (4)$$

Évidemment, si nous connaissons déjà la valeur de l'azimut du plan vertical nous pouvons utiliser directement les formules (a2).

Il est à noter que la durée de passage au méridien est donnée, avec une bonne approximation, par

$$T \approx \frac{\Phi_{\text{Soleil}}}{\cos(\delta)} \cdot 240 \text{ sec}$$

Exemple 1 :

Déterminer le temps mis par le disque solaire pour traverser le plan vertical où il se trouve à l'heure de H = 16, le 1er mai ($\delta = +15^\circ$) dans un lieu de latitude $\varphi = 46^\circ$.

Avec (1) nous obtenons :

$$\begin{aligned} \omega &= 60,00^\circ \\ h &= 31,44^\circ \\ Az &= 78,67^\circ \\ [\Phi_{\text{Soleil}} / \cos(h)]/2 &= \Delta Az = 0,3126^\circ \\ Az_1 &= 78,356^\circ & h_1 &= 31,709^\circ & \omega_1 &= 59,6114^\circ \\ Az_2 &= 78,982^\circ & h_2 &= 31,179^\circ & \omega_2 &= 60,3901^\circ \end{aligned}$$

Le passage dure T = 3,11, minutes soit 187 s.

Exemple 2 :

Déterminer le temps mis par le disque solaire pour traverser le plan vertical est-ouest le jour du solstice d'été ($\delta = +23.45^\circ$) dans un lieu de latitude $\varphi = 46^\circ$.

$$\begin{aligned} Az &= 90^\circ \\ \omega &= 65,2354^\circ \text{ le centre du disque solaire passe à 16 h 20 m 56 s} \\ h &= 33,59^\circ & \Delta Az &= 0,64^\circ \\ Az_1 &= 89,68^\circ & h_1 &= 33,896^\circ & \omega_1 &= 64,7911^\circ \\ Az_2 &= 90,32^\circ & h_2 &= 33,278^\circ & \omega_2 &= 65,6811^\circ \end{aligned}$$

Le passage dure T = 3,56 minutes soit 214 sec. Pour un un lieu de latitude = 30° le temps de passage serait de 422 sec

Exemple 3 :

- Passage au méridien
- à l'époque des solstices ($\delta = 23.45^\circ$) T = 149,5 s
- à l'époque des Equinoxes T = 128,0 s

Gianni Ferrari février 2012 gfmerid@gmail.com

Nota : Cet article est une version développée et traduite d'un rapport présenté au XVII^e Séminaire italien de gnomonique – Avril 2011





Equation du temps et soleils fictifs

Jacques GAPAILLARD¹

Si l'on néglige quelques petites irrégularités dont les astronomes se sont avisés au Xx^e siècle, la rotation axiale de la Terre peut être regardée comme uniforme en première approximation. Mais le gnomoniste n'en reste pas là. Il sait que le « jour solaire vrai » est de durée variable au long de l'année.

Le soleil moyen

En un lieu donné à la surface de la Terre, situé entre les cercles polaires, l'*heure solaire de temps vrai*, ou *heure solaire vraie*, est déterminée toute l'année à partir du passage du Soleil au méridien. Si la position apparente du Soleil était fixe par rapport aux étoiles, l'heure ainsi obtenue varierait uniformément de façon satisfaisante, si l'on néglige les petites irrégularités de la rotation terrestre. En réalité, le Soleil se déplace parmi les étoiles en parcourant l'écliptique, mais la même régularité serait encore observée si son mouvement apparent s'opérait de manière que le point d'intersection de son cercle horaire avec l'équateur céleste progressait à vitesse constante sur celui-ci. Or il n'en est rien, et ceci pour deux causes principales qui avaient été clairement identifiées par Ptolémée au II^e siècle de notre ère. La première est l'excentricité de l'orbite terrestre (ou de l'orbite apparente du Soleil) qui produit une inégalité appelée *prostaphérèse* par Ptolémée, et depuis *équation du centre*. La seconde cause est l'obliquité de l'écliptique, responsable d'une autre inégalité nommée *réduction à l'équateur*.

La vie civile s'est longtemps accommodée de l'heure solaire vraie (jusqu'en 1826 en France), mais ce n'était pas le cas des astronomes qui lui avaient substitué une *heure de temps moyen*, heure locale définie à partir du passage d'un *soleil moyen* fictif au méridien du lieu. Ils appellent *équation du temps* la différence, positive ou négative, entre l'heure de temps moyen et l'heure solaire vraie. D'après ce que nous avons dit, pour que ce soleil imaginaire assure la régularité de l'heure de temps moyen, il suffirait qu'il se déplace à vitesse constante sur l'équateur céleste. C'est en effet ainsi que se comporte le soleil moyen. Mais les astronomes veulent aussi que l'heure de temps moyen ne s'écarte pas trop de l'heure solaire vraie. Nous verrons que cette exigence sera satisfaite par une liaison simple entre la position du soleil moyen et les deux inégalités de l'heure solaire vraie indiquées plus haut.

Une définition approximative de la position du soleil moyen

La position du soleil moyen sur l'équateur céleste est définie par son ascension droite, c'est-à-dire par la mesure de l'arc, orienté dans le sens direct, qui le sépare du point vernal γ . Nous nous bornerons ici au premier stade du développement de la théorie classique du mouvement apparent du Soleil, d'où résulteront des approximations de la position du soleil moyen et de l'équation du temps.

La théorie² se développe du point de vue géocentrique, et il est important de noter que,

¹ Centre François Viète, université de Nantes, auteur du livre *Histoire de l'heure en France* Ed Vuibert-Adapt

² Voir, par exemple, A. Danjon, *Astronomie générale*, Paris, Sennac, 1959, ch. 3.

dans ce premier stade, sont négligées à la fois la précession des équinoxes et l'avance du périhélie du Soleil. Ainsi, point vernal et périhélie sont ici considérés comme des points fixes. D'autre part, le mouvement orbital de la Terre autour du Soleil est regardé comme purement képlérien, sans aucune perturbation gravitationnelle, de sorte que le mouvement du Soleil relativement à la Terre sera également képlérien.

On s'intéresse au repérage du Soleil par sa longitude sur l'écliptique (mesure de l'arc, orienté dans le sens direct, qui le sépare du point vernal). Le mouvement orbital du Soleil est régi par l'équation de Kepler $u - e \sin u = M$, où u est l'anomalie excentrique, e l'excentricité, et $M = n(t - t_0)$ l'anomalie moyenne, produit du moyen mouvement sidéral $n = 2\pi / A$ (où A est l'année sidérale) par le temps écoulé depuis l'époque t_0 du passage du Soleil au périhélie. La longitude moyenne du Soleil est alors $\lambda_m = \varpi + M$, où ϖ désigne la longitude du périhélie, et la longitude vraie λ_v du Soleil se décompose selon $\lambda_v = \lambda_m + C$. Dans cette égalité, le terme correctif C de la longitude, par rapport à sa valeur moyenne, est l'équation du centre, qui s'exprime sous la forme d'un développement dont voici quelques termes :

$$C = (2e - \frac{1}{4}e^3 + \frac{5}{96}e^5 + \dots) \sin M + (\frac{5}{4}e^2 - \frac{11}{24}e^4 + \frac{17}{192}e^6 + \dots) \sin 2M + \dots$$

Il en résulte l'expression approchée $C \approx 2e \sin M$ qui montre que C est approximativement de période annuelle puisque la longitude moyenne augmente de 2π en un an.

Ensuite, on passe de l'écliptique à l'équateur céleste où l'ascension droite vraie α_v du Soleil est liée à sa longitude vraie et à l'obliquité de l'écliptique ε par $\tan \alpha_v = \cos \varepsilon \tan \lambda_v$. L'ascension droite vraie s'obtient alors sous la forme $\alpha_v = \lambda_v + R = \lambda_m + C + R$, où $C + R$ apparaît comme un terme correctif par rapport à la longitude moyenne λ_m qui fait ainsi figure d'ascension droite moyenne : $\alpha_m = \lambda_m$. C'est cette coordonnée qui définit la position du soleil moyen S_m sur l'équateur céleste.

Le terme $R = \alpha_v - \lambda_v$ est la réduction à l'équateur, dont voici les premiers termes du développement où l'on a posé $f = \tan^2(\varepsilon/2)$:

$$R = -f \sin 2\lambda_v + \frac{1}{2}f^2 \sin 4\lambda_v - \frac{1}{3}f^3 \sin 6\lambda_v + \dots$$

$$= -f \sin 2(\varpi + M) - 4ef \sin M \cos 2(\varpi + M) + \frac{1}{2}f^2 \sin 4(\varpi + M) + \dots \approx -f \sin 2(\varpi + M),$$

de sorte que R est à peu près de période semestrielle. Quant au terme $E = \alpha_v - \alpha_m = C + R$, c'est l'équation du temps dont une expression approchée est $E \approx 2e \sin M - f \sin 2(\varpi + M)$, et qui est donc sensiblement de période annuelle.

L'équation du temps

D'après ce qui précède, et par définition, l'équation du temps est, à chaque instant, la différence entre les ascensions droites vraie et moyenne du Soleil, et elle se décompose en la somme de l'équation du centre et de la réduction à l'équateur.

L'approximation $E \approx 2e \sin M - f \sin 2(\varpi + M) \approx 459 \sin M - 591 \sin 2(\varpi + M)$ en secondes d'heure (après conversion de e et f , comptés en radians, à raison de 12 heures pour

π radians), indique les variations de E dont les valeurs sont à peu près comprises entre -16 min 30 s (vers le 3 novembre) et 14 min 15 s (vers le 11 février), avec un maximum local et un minimum local respectivement d'environ 6 min 30 s (vers le 26 juillet) et -3 min 40s (vers le 14 mai). D'autre part, E s'annule quatre fois dans l'année, vers les 16 avril, 15 juin, 2 septembre et 25 décembre. Il est difficile de donner des indications générales plus précises car E n'est pas exactement périodique et, de plus, les années bissextiles peuvent décaler les dates. La figure 1, extraite de l'*Astronomie générale* d'André Danjon³, où les dates diffèrent souvent d'un jour de celles indiquées ci-dessus, représente les variations de E et de ses composantes C et R . L'équation du temps est un peu plus souvent positive (52,6 % du temps) que négative.

Une première dérivation par rapport au temps permet d'estimer la *variation diurne* ΔE de E , ou excès du *jour vrai* (intervalle entre deux passages consécutifs du Soleil au méridien) sur le *jour moyen* (intervalle entre deux passages consécutifs du soleil moyen au méridien, soit 24 heures). On obtient $\Delta E \approx 7,9 \cos M - 20,4 \cos 2(\varpi + M)$ en secondes d'heure, valeur qui reste comprise entre -22 s et 31 s. La durée du jour vrai varie en effet entre environ 23 h 59 min 39 s (vers le 17 septembre) et 24 h 0 min 30 s (vers le 23 décembre). La marche d'une horloge étant supposée réglée sur le temps moyen, et ses aiguilles étant mises un jour à l'heure vraie, ΔE est la quantité dont il faudrait la retarder (algébriquement) chacun des jours

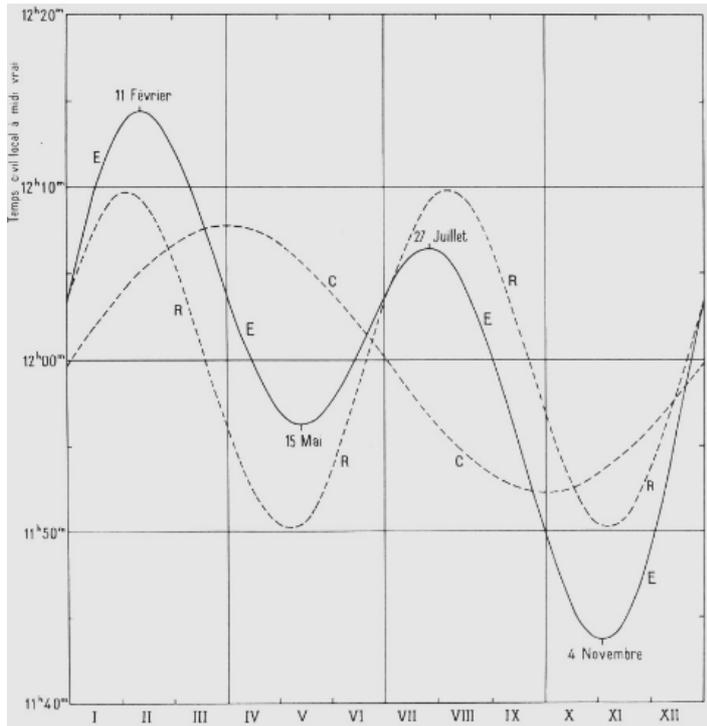


Fig. 1

suivants si l'on voulait qu'elle continue à indiquer approximativement l'heure vraie.

Enfin, une seconde dérivation par rapport au temps, donne la *variation* $\Delta(\Delta E)$ du jour vrai ou excès d'un jour vrai sur le précédent, $\Delta(\Delta E) \approx -0,14 \sin M + 0,70 \sin 2(\varpi + M)$ en secondes d'heure. Cette variation est très faible puisqu'elle reste comprise entre $-0,83$ s et $0,86$ s.

Le signe de l'équation du temps

Telle que nous avons défini l'équation du temps, son signe est celui qui a été adopté par les astronomes français peu après le début du XIX^e siècle. Auparavant, elle était prise avec le signe opposé, comme le fait encore Louis-Benjamin Francœur⁴ en 1812. Mais deux ans plus tard, Jean-Baptiste Delambre⁵ a rompu avec l'ancienne tradition, que les Anglo-Saxons et les Allemands continuent à suivre. On peut donner de cette divergence l'explication suivante.

³ A. Danjon, *op. cit.*, p. 68.

⁴ L.-B. Francœur, *Uranographie ou Traité élémentaire d'astronomie*, Paris, 1812, p.75.

⁵ J.-B. Delambre, *Astronomie théorique et pratique*, 3 vol., Paris, Courcier, 1814, vol. 2, p. 205.

De façon générale, au sujet d'un paramètre p dont les variations sont irrégulières, les astronomes conviennent d'appeler *équation* la quantité $p_v - p_m$ dont la valeur réelle ou vraie p_v s'écarte de sa valeur moyenne p_m . Nous avons vu l'exemple de l'équation du centre, $C = \lambda_v - \lambda_m$, mais le cas de l'équation du temps mérite une attention particulière.

Sans entrer dans les détails⁶, rappelons qu'en un lieu donné et à un instant donné, l'angle horaire H d'un point A de la sphère des fixes, son ascension droite α et le temps sidéral T sont liés par $H = T - \alpha$. Si nous prenons pour point A successivement le soleil vrai et le soleil moyen, d'angles horaires H_v et H_m , nous obtenons respectivement l'heure de temps vrai τ_v et l'heure de temps moyen τ_m :

$$\tau_v = 12\text{h} + H_v = 12\text{h} + T - \alpha_v, \quad \tau_m = 12\text{h} + H_m = 12\text{h} + T - \alpha_m.$$

Par suite, $E = \alpha_v - \alpha_m = \tau_m - \tau_v$ (*), ce qu'on exprime souvent par la formule

$$\text{temps moyen} = \text{temps vrai} + E,$$

de sorte qu'en un lieu donné et en heure de temps moyen, nous avons chaque jour : heure du midi vrai = 12 h + E . Autrement dit, E est l'avance (algébrique) du midi moyen sur le midi vrai.

D'après ce qui précède, lorsque l'équation du temps est positive, par exemple, le midi moyen précède le midi vrai, ce qu'on peut visualiser de la façon suivante. Dans ce cas, en effet, l'ascension droite du Soleil est supérieure à celle du soleil moyen. Aux environs de midi, un observateur « verrait » donc, sur la sphère céleste, le cercle horaire du soleil moyen à l'ouest de celui du Soleil, si bien que le plan méridien de cet observateur, entraîné d'ouest en est par la rotation de la Terre, rencontrerait le soleil moyen avant de passer par le Soleil. Ce qui est une façon de dire que le midi moyen précéderait le midi vrai, et c'est évidemment l'inverse qui se produit lorsque l'équation du temps est négative.

La formule (*) montre aussi que la définition de l'équation du temps par $E = \alpha_v - \alpha_m$, quand on privilégie la considération de l'ascension droite du Soleil, est bien conforme à la convention des astronomes, mais que ce n'est plus le cas lorsqu'on s'intéresse directement à l'heure locale, ce qui, après tout, est bien normal s'agissant de l'équation du temps. C'est ce dernier point de vue, conduisant à une équation du temps $\bar{E} = \tau_v - \tau_m = \alpha_m - \alpha_v = -E$, qui prévalait autrefois en France, et qui subsiste au moins chez les astronomes anglo-saxons et germaniques de sorte que leur équation du temps est l'opposée de la nôtre.

Le soleil moyen obtenu par la méthode des deux soleils fictifs

Nous avons vu comment, avec la simplification consistant à négliger la précession et l'avance du périhélie, la théorie du mouvement apparent du Soleil conduit à une première approximation de la position du soleil moyen. Ce résultat a été obtenu en deux temps : la définition de la longitude moyenne qui joue ensuite le rôle d'ascension droite moyenne du Soleil. À ces deux étapes correspondent les deux phases d'une méthode de localisation du soleil moyen.

⁶ A. Danjon, *op. cit.*, p. 41.

Considérons (fig. 2) un *premier soleil fictif* S' qui parcourt l'écliptique de manière que sa longitude soit $\lambda_{S'} = \lambda_m$. Alors, à l'époque t_0 du passage du Soleil à son périégée, on a $M = C = 0$, si bien que $\lambda_{S'} = \lambda_m = \varpi = \lambda_v$, ce qui signifie que S' se trouve lui aussi au périégée ; la même coïncidence de S' avec le Soleil se produit également à l'apogée de ce dernier. De plus, l'égalité $\lambda_{S'} = \lambda_m = \varpi + M = \varpi + n(t - t_0)$ montre que le mouvement de S' est uniforme. Ainsi, la considération de ce premier soleil fictif S' , qui parcourt l'écliptique d'un mouvement uniforme et coïncide avec le Soleil au périégée, corrige

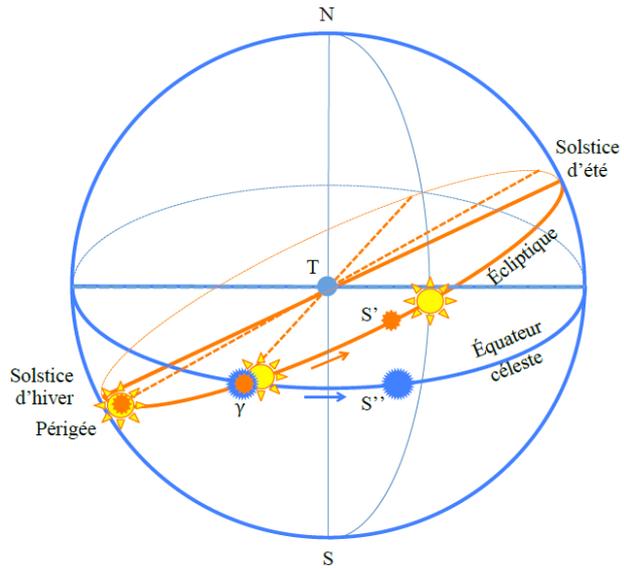


Fig. 2

l'inégalité correspondant à l'équation du centre.

Oubliant le Soleil lui-même, on envisage maintenant un *second soleil fictif* S'' , sur l'équateur céleste celui-ci, et d'ascension droite $\alpha_{S''} = \lambda_m (= \alpha_m)$. Alors S'' coïncide avec S' à l'équinoxe de printemps (point γ) et à l'équinoxe d'automne, et son mouvement est uniforme sur l'équateur céleste puisque $\alpha_{S''} = \lambda_m = \varpi + n(t - t_0)$. Ce second soleil fictif S'' corrige ainsi l'inégalité correspondant à la réduction à l'équateur, et il n'est autre que le soleil moyen S_m défini plus haut.

L'origine historique de la méthode

Cette méthode de définition du soleil moyen possède ses lettres de noblesse puisqu'elle figure déjà chez Laplace à la fin du XVIII^e siècle, sous une forme que l'on peut appeler *méthode des trois soleils*, le premier soleil étant le Soleil lui-même :

« [...] On imagine un second soleil mû uniformément sur l'écliptique, et traversant toujours aux mêmes instans que le vrai soleil, le grand axe de l'orbe solaire, ce qui fait disparaître l'inégalité du mouvement propre du soleil. On fait ensuite disparaître l'effet de l'obliquité de l'écliptique, en imaginant un troisième soleil passant par les équinoxes, aux mêmes instans que le second soleil, et mû sur l'équateur, de manière que les distances angulaires de ces deux soleils, à l'équinoxe du printemps, soient constamment égales entr'elles ».⁷

Il semble que ce soit ce texte de Laplace qui constitue l'acte de naissance de la méthode des deux soleils fictifs, bien que l'expression « soleil fictif » n'y figure pas. Elle ne sera employée qu'un demi-siècle plus tard par Arago qui signe ainsi le second acte de naissance de la méthode :

« Au moment où le Soleil passe au périégée, [...] on imagine qu'un soleil fictif en parte et se meuve dans le cercle écliptique avec une vitesse angulaire uniforme et égale à la vitesse angulaire moyenne du soleil réel [...]. A l'instant où le Soleil moyen fictif qui parcourt l'écliptique, passe par ce point [l'équinoxe de printemps], on imagine qu'un second soleil fictif

⁷ P.-S. Laplace, *Exposition du système du monde*, 1796, p. 35-36.

parte de cet équinoxe doué de la même vitesse angulaire et se meuve dans le plan de l'équateur [...]. C'est ce Soleil qui règle définitivement le temps moyen.⁸»

C'est cette définition du soleil moyen, par la cinématique précise d'une combinaison de deux mouvements circulaires uniformes, qui constitue la méthode des deux soleils fictifs.

Une méthode jugée trop difficile

L'introduction du soleil moyen, et par suite celle du temps moyen, par la méthode des deux soleils fictifs, a connu un grand succès pédagogique entre les milieux des XIX^e et XX^e siècles. Cependant, certains la trouvent trop compliquée pour les élèves... et pour leurs professeurs ! C'est en effet ce que pense Henri Bouasse, bien connu pour ses propos polémiques :

« Nous retrouvons donc les deux *soleils moyens* dont parlent les *Cosmographies élémentaires*, au grand désespoir des malheureux gosses qui n'y peuvent rien comprendre, pas plus que leurs professeurs du reste.⁹»

Au moins en ce qui concerne les professeurs, nous voulons bien le croire, car si la plupart des cosmographies scolaires exposent correctement la méthode, quelques auteurs portent fâcheusement à la faute, comme on le voit sur les extraits qui suivent.

« Pour expliquer cette équation [du temps], on suppose trois Soleils : l'un le Soleil vrai ; le deuxième, parcourant l'écliptique uniformément ; le troisième partant de l'équinoxe en même temps que les deux autres, parcourant l'équateur [...]. C'est ce troisième Soleil dont la marche mesure le temps moyen : tantôt il devance le Soleil vrai, tantôt il le suit, mais il l'atteint quatre fois dans l'année, aux environs des équinoxes et des solstices.¹⁰

Pendant que ce premier soleil fictif parcourt la circonférence de l'écliptique [...], on suppose un second soleil fictif parcourant la circonférence de l'équateur [...] ; on suppose que les deux soleils fictifs passent ensemble aux points équinoxiaux et solsticiaux.¹¹»

D'autres, partageant sans doute avec Bouasse l'opinion que la méthode est trop compliquée, croient pouvoir la simplifier en faisant l'économie de l'un des deux soleils fictifs, comme dans cette cosmographie scolaire où l'on peut lire :

« On imagine un soleil fictif se déplaçant sur l'équateur céleste de manière que la vitesse angulaire du rayon vecteur terre-soleil soit constante et qu'aux deux équinoxes le soleil fictif coïncide avec le soleil réel.¹²»

La même erreur avait déjà été commise par plusieurs dictionnaires encyclopédiques.

À l'inverse, c'est le second soleil fictif dont se passe cet auteur d'un ouvrage de vulgarisation :

« [...] On imagina que l'écliptique était parcouru, non par le Soleil *vrai*, père du temps *vrai*, mais par un Soleil *moyen*, père du temps *moyen*, dont la vitesse est toujours la même d'un bout à l'autre de l'année [...].¹³»

⁸ F. Arago, *Annuaire du Bureau des longitudes pour 1851*, 1850, p. 343-344.

⁹ H. Bouasse, *Astronomie théorique et pratique*, Paris, Delagrave, 1921, p. 336.

¹⁰ E. Cortambert, *Éléments de cosmographie* 2^e éd. 1859, p. 62.

¹¹ J.-L. Legras, *Cours élémentaire de cosmographie*, 1890, p. 54.

¹² V. Lespinard, R. Pernet, J. Gauzit, *Cosmographie*, classe de mathématiques élémentaires, Lyon, Desvigne, 1956, p. 55.

¹³ P. Rousseau, *La Terre, ma patrie*, Paris, Fayard, 1947, p. 90.

À propos du pseudo-soleil moyen de la cosmographie scolaire, on peut se demander pourquoi les astronomes ne se sont pas arrêtés à cette définition naturelle qui relie simplement le soleil moyen au soleil vrai et assure la régularité du temps moyen. En dehors du fait que ce pseudo-soleil moyen n'aurait plus de lien direct avec l'équation du centre et la réduction à l'équateur, cette solution présenterait un autre inconvénient. Nous savons que le premier soleil fictif passe au point vernal avant le soleil vrai, et cette avance est la valeur de l'équation du temps le jour de l'équinoxe de printemps, soit environ 7,5 minutes. Ce temps représente donc aussi l'avance constante qui serait, sur l'équateur céleste, celle du pseudo-soleil moyen sur le soleil moyen (en ascension droite : $7,5 \text{ min} \approx 1,9^\circ$). L'heure de temps moyen définie par le passage au méridien de ce pseudo-soleil moyen retarderait ainsi de 7,5 minutes sur l'heure de temps moyen habituelle. Il suffit alors de se reporter à la figure 1 pour voir que cette heure de temps moyen porterait bien mal son nom puisque c'est seulement du 11 janvier au 21 mars, ou à peu près, qu'elle serait en avance sur l'heure vraie.

Une méthode jugée incorrecte

Comme il a été souligné plus haut, la méthode des deux soleils fictifs ne peut prétendre à la précision exigée par les astronomes dans l'élaboration de la position du soleil moyen qui définit le temps moyen. C'est dans cet esprit rigoriste qu'André Danjon la juge sévèrement, car il fait évidemment allusion à cette méthode lorsqu'il écrit :

« L'introduction du temps moyen à l'aide du soleil moyen est traditionnelle dans notre enseignement élémentaire, mais elle constitue un cercle vicieux, que tous les sophismes dont on l'entoure ne suffisent pas à dissimuler. Parlerait-on d'un mobile animé d'un mouvement uniforme si l'on n'avait, a priori, l'idée d'un temps uniforme ? Et du reste, qu'est-ce qu'un mouvement uniforme dont l'élongation ne peut être comptée à partir d'une origine invariable ?¹⁴ »

Dans une cosmographie scolaire qu'il avait publiée antérieurement, il écrivait déjà dans le même sens :

« Il faut se garder de définir le soleil moyen comme un mobile décrivant l'équateur céleste d'un mouvement uniforme. Comme cela impliquerait l'existence d'une origine déterminée dans le plan de l'équateur, laquelle ne peut pas exister en raison de la précession des équinoxes, une telle définition n'a aucune signification. Le soleil moyen ne peut être défini correctement que par l'expression de son ascension droite.¹⁵ »

Il est vrai que la considération de l'ascension droite équivaut à prendre en compte la précession. Cependant, dans le même ouvrage, à propos de l'équation du centre, André Danjon évoque un « mobile fictif [décrivant] l'écliptique d'un mouvement uniforme », lequel n'est autre que le premier soleil fictif. La difficulté est que ce mouvement uniforme devrait être compté par rapport au périhélie du Soleil, c'est-à-dire relativement à une origine variable puisque le périhélie n'est pas fixe...

Il convient donc d'observer une certaine indulgence à l'égard de cette méthode des deux soleils fictifs qui ne se rencontre pas seulement dans les ouvrages de vulgarisation ou élémentaires. Des auteurs comme Aimé Laussedat, Robert Bourgeois, Charles Wolf et Benjamin Baillaud l'ont utilisée dans leurs cours d'astronomie¹⁶, avec plus ou moins de

¹⁴ A. Danjon, *op. cit.*, p. 67.

¹⁵ A. Danjon, *Cosmographie*, classe de mathématiques, Paris, Hatier, 1948, p. 133.

¹⁶ A. Laussedat, *Cours d'astronomie et de géodésie*, École polytechnique, année 1865-1866, p. 146-147 ; R.

précautions. La méthode des deux soleils fictifs ne doit pas être jugée comme si elle prétendait donner la position correcte du soleil moyen telle que savent l'établir les astronomes, même si l'apparente précision de son mécanisme et l'absence de précautions dans les textes élémentaires peuvent le laisser croire. Elle ne localise le soleil moyen qu'en première approximation, mais elle n'est pas de pure fantaisie. Au contraire, nous avons vu qu'elle ne fait que traduire en termes cinématiques simples ce que dit la théorie du mouvement apparent du Soleil au premier stade de son développement. Présentée pour ce qu'elle est, elle peut jouer un rôle pédagogique et, à ce titre, elle mérite quelque considération.

La méridienne du temps moyen

Supposons que nous superposons des photographies prises en un même lieu de latitude moyenne dans l'hémisphère nord, en direction du sud, à midi moyen local, ceci pendant une année et à intervalles d'environ une dizaine de jours, par exemple. Supposons aussi que l'axe optique de l'appareil soit plus précisément dirigé vers l'intersection de l'équateur et du méridien local célestes. Supposons enfin que le champ de l'appareil et le choix des jours de prises de vues soient tels que le Soleil figure sur chacune des

photographies. Le résultat serait un ensemble de soleils esquissant dans le ciel une lemniscate, si l'on désigne ainsi, de façon générale, une courbe en forme de huit. Sans qu'on en sache la justification, le terme *analemme* est assez récemment apparu pour nommer cette lemniscate céleste, appelée « méridienne de temps moyen » par André Danjon¹⁷. Nous reviendrons sur le tracé qu'il en donne (fig. 3), obtenu en portant l'opposé de l'équation du temps en abscisses et la déclinaison du Soleil en ordonnées. Cependant, pour une raison de lisibilité, Danjon a choisi, en abscisses, une unité double de celle des ordonnées, comme on le voit en convertissant les heures en degrés, de sorte que l'allure de la lemniscate ou méridienne céleste est en réalité celle d'un huit vertical deux fois moins large par rapport à sa hauteur que sur la figure 3.

Revenons à l'expérience photographique ci-dessus et supposons qu'au même lieu, à l'instant de chaque prise de vue, et sur un mur vertical où serait établie une méridienne, on marque l'emplacement du repère solaire. Les différents points ainsi obtenus au long de l'année s'inscriraient sur une nouvelle lemniscate, projection conique de la lemniscate céleste, le sommet

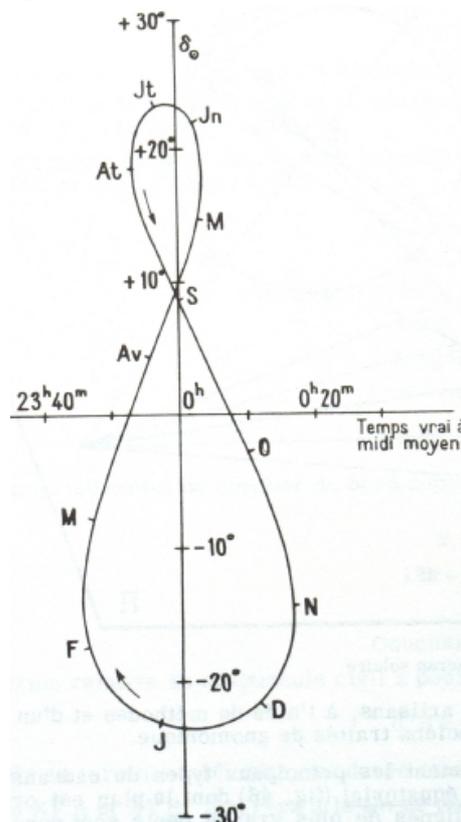


Fig. 3

du cône étant l'extrémité du style de la méridienne ou ce qui en tient lieu. Cette lemniscate murale, dont la forme varie en fonction de la latitude du lieu et de l'orientation de la méridienne, est la *méridienne du temps moyen* inventée par Jean-Paul Grandjean de Fouchy dans les années 1730. Les premières étaient tracées sur des méridiennes horizontales dont

Bourgeois, *Cours d'astronomie et de géodésie*, École polytechnique, année 1921-1922, p. 225 ; C. Wolf, *Cours d'Astronomie et de Géodésie*, professé à la Sorbonne, 1891, p. 227 et 237 ; B. Baillaud, *Cours d'astronomie*, 1896, p. 105 et 107-108.

¹⁷ A. Danjon, *op. cit.*, p. 76.

nous ne nous occuperons pas ici.

La méridienne du temps moyen est traversée par la ligne méridienne que l'on appelle aussi *méridienne du temps vrai* pour la distinguer de l'autre. Cependant, même dans le cas où la méridienne est orientée plein sud (méridienne non déclinante), et contrairement aux premières apparences, cette courbe ne présente aucune symétrie. De plus, son point double est proche de la ligne méridienne mais se trouve hors de celle-ci, légèrement à gauche. Le repère solaire y passe vers les 14 avril et 30 août, jours où, à la fois, la déclinaison du Soleil et l'équation du temps reprennent sensiblement les mêmes valeurs ($\delta_D \approx 9^\circ$, et autour de 45 s).

Les méridiennes équipées d'une méridienne du temps moyen permettent de repérer le midi vrai et le midi moyen local. Le midi moyen est l'instant où le repère solaire traverse la méridienne du temps moyen. Comme cet événement se produit quotidiennement deux fois (en dehors des solstices et des passages au point double), des indications placées le long de la courbe (mois ou saisons) indiquent à l'utilisateur quelle est sa partie utile à l'époque de l'observation, comme on le voit sur la méridienne



Fig. 4

non déclinante de l'hôtel de ville de Rennes tracée avant 1764 (fig. 4). Les secteurs de la méridienne du temps moyen situés à gauche de la ligne méridienne correspondent à une équation du temps positive (le midi moyen précède le midi vrai), et inversement à droite. L'équation du temps, notion abstraite, prend corps avec la méridienne du temps moyen qui l'expose dans la rue.

Camille Flammarion et la méridienne du temps moyen

À la page 24 de l'*Astronomie populaire* (1880) de Camille Flammarion se trouve une méridienne du temps moyen (fig. 5) présentée comme le détail d'une méridienne (verticale non déclinante) figurant à la même page. L'ennui est qu'un détail révèle qu'une telle méridienne du temps moyen ne peut être tracée sur aucun mur. Ce détail gênant est que la ligne des équinoxes, trajectoire du repère solaire aux équinoxes, traverse la méridienne exactement à mi-hauteur.

En un lieu situé entre le tropique du Cancer et le cercle polaire arctique (latitude φ , telle que $\varepsilon < \varphi < 90^\circ - \varepsilon$, où $\varepsilon \approx 23^\circ 26'$ est l'obliquité de l'écliptique), la figure 6 représente, dans le plan méridien de la méridienne, les rayons issus du (centre du) Soleil et passant par l'extrémité Σ du style, aux solstices d'hiver (ΣH) et d'été (ΣE), aux équinoxes (ΣQ), et aussi les jours des passages du repère solaire par le point double de la méridienne du temps moyen (ΣD). Par parenthèse, au sujet de la restriction en latitude, notons que la méridienne du temps moyen ne se présente pas sous la forme d'une lemniscate dans la zone intertropicale ni dans les zones polaires. Les deux relations

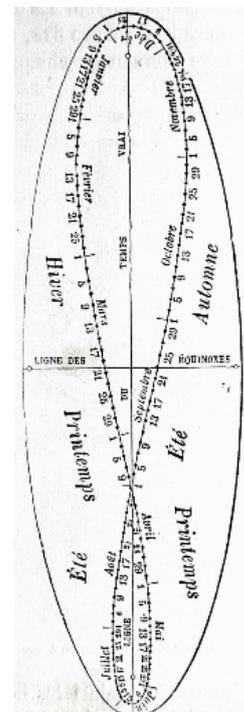


Fig. 5

suivantes précisent la localisation des points Q et D :

$$\frac{QH}{QE} = \frac{\sin(\varphi - \varepsilon)}{\sin(\varphi + \varepsilon)} < \cos 2\varepsilon \approx 0,684, \quad \frac{DH}{DE} = \frac{\sin(\varepsilon + \delta_D) \sin(\varphi - \varepsilon)}{\sin(\varepsilon - \delta_D) \sin(\varphi + \varepsilon)} < \frac{\sin(\varepsilon + \delta_D)}{\sin(\varepsilon - \delta_D)} \cos 2\varepsilon \approx 1,471.$$

Le point Q ne peut donc jamais se trouver au milieu de EH, et pas davantage le point D dans une position aussi basse que sur la figure 5. En fait, Flammarion a emprunté, sans le dire, ce « détail de la méridienne », comme il intitule cette figure, au *Cours élémentaire d'astronomie* de Charles Delaunay (4^e éd., 1864, p. 360). Malheureusement, il ne s'agit pas d'un détail de la méridienne murale, également empruntée à Delaunay (p. 357), mais d'un appareil gnomonique, sorte de méridienne sphérique représentée et décrite dans le même ouvrage (p. 359). Inadvertance ou désinvolture ? Toujours est-il que cette figure, correcte chez Delaunay, ne l'est plus chez Flammarion.

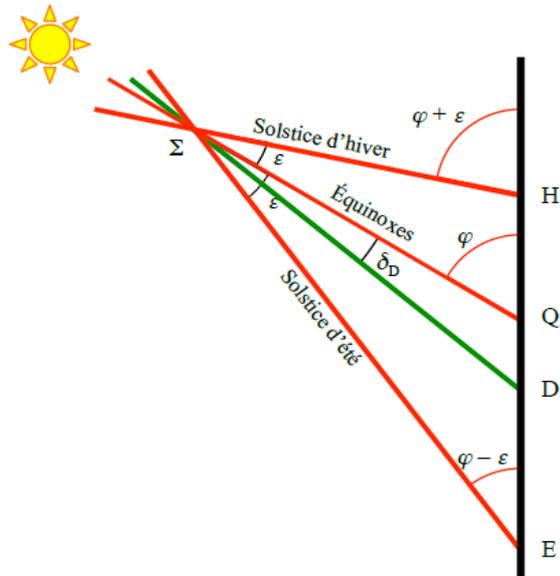


Fig. 6

Précisions sur la méridienne céleste d'André Danjon

La méridienne céleste est décrite par Danjon comme une courbe tracée sur la sphère céleste locale. Cependant, il la représente par la courbe plane de la figure 3, obtenue point par point en portant, pour chaque jour, en abscisses le temps vrai à midi moyen, c'est-à-dire l'opposé de l'équation du temps, et en ordonnées la déclinaison du Soleil. Puis, en parlant de cette courbe de la figure 3, il ajoute : « On peut en tracer la perspective sur le cadran solaire, ce qui permet de déterminer par lecture directe l'instant du midi moyen local ». C'est donc un mode d'obtention de la méridienne du temps moyen qui est ici indiqué. Cependant, et abstraction faite du défaut d'échelle signalé plus haut, il est impossible, en toute rigueur, d'obtenir une méridienne du temps moyen par projection de la courbe tracée par Danjon.

Pour le comprendre, il faut faire appel à une notion que l'on rencontrait autrefois dans les cours de mathématiques spéciales : le *birapport* de quatre points alignés, appelé avant le milieu du XX^e siècle *rapport anharmonique*. Le birapport de quatre points alignés A, B, C, D distincts, pris dans cet ordre (mais qui peuvent être disposés dans un ordre quelconque sur leur droite d'alignement,) est le rapport de rapports (d'où son nom) :

$$(A, B, C, D) = \frac{\overline{CA}}{\overline{CB}} : \frac{\overline{DA}}{\overline{DB}}.$$

L'intérêt de cette notion est que le birapport se conserve par projection centrale sur un plan (en fait sur une droite) (fig. 7), ce qu'on peut établir par similitude. (Dans le cas d'une projection parallèlement à une direction, c'est une conséquence directe du théorème de Thalès.)

Considérons maintenant les quatre points H, E, Q, D que nous avons distingués sur la ligne méridienne du cadran.

Des formules données plus haut nous déduisons :

$$(H, E, D, Q) = \frac{\overline{DH}}{\overline{DE}} : \frac{\overline{QH}}{\overline{QE}} = \frac{\sin(\varepsilon + \delta_D)}{\sin(\varepsilon - \delta_D)}$$

Mais les points homologues H', E', Q', D' sur la figure tracée par Danjon sont tels que :

$$(H', E', D', Q') = \frac{\overline{D'H'}}{\overline{D'E'}} : \frac{\overline{Q'H'}}{\overline{Q'E'}} = \frac{\varepsilon + \delta_D}{\varepsilon - \delta_D}$$

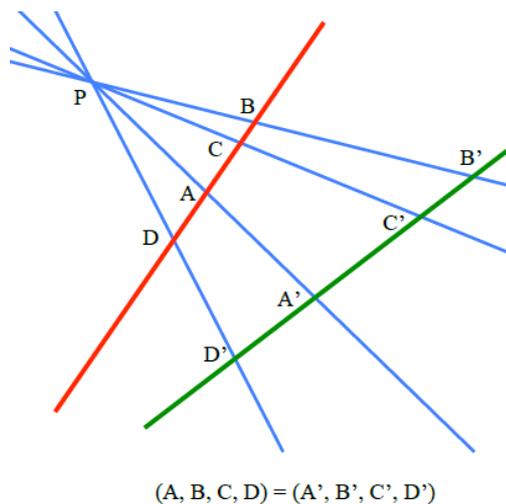


Fig. 7

Il est donc impossible d'obtenir une méridienne du temps moyen par projection d'une courbe telle que celle tracée par Danjon. L'erreur est d'avoir, d'une certaine manière, développé la sphère locale sur le plan, en déroulant le méridien local sur l'axe des ordonnées. Il fallait projeter la méridienne céleste sur un plan, ce que fait l'appareil photographique. En se limitant à regarder ce qui se produit dans le plan méridien, on voit alors sur la figure 8, que les segments tels que QS ne sont pas de longueurs proportionnelles à la déclinaison δ mais à $\tan\delta$. C'est donc $\tan\delta$, et non δ , qu'il aurait fallu porter en ordonnées. De cette manière, en revenant aux birapports considérés plus haut, nous aurions obtenu :

$$(H', E', D', Q') = \frac{\tan\varepsilon + \tan\delta_D}{\tan\varepsilon - \tan\delta_D} = \frac{\sin(\varepsilon + \delta_D)}{\sin(\varepsilon - \delta_D)}$$

et l'égalité $(H', E', D', Q') = (H, E, D, Q)$ souhaitée aurait été vérifiée.

Un cas curieux : celui de la méridienne de Monge à Mézières

Entre 1780 et 1784, Gaspard Monge a fait tracer une méridienne (fig. 9¹⁸) à l'École royale du génie de Mézières où il était professeur¹⁹. Cette grande méridienne non déclinante existe toujours mais elle présente quelques erreurs et, surtout, un défaut particulièrement surprenant.

Comme on le voit sur la figure 1, en valeurs absolues, le minimum absolu de E (en novembre) dépasse son maximum absolu (en

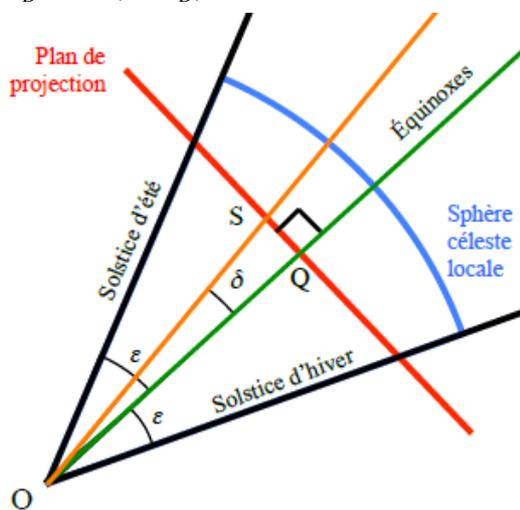


Fig 8

¹⁸ *Portefeuille des élèves*, École polytechnique, 1^e division, s. d., planche 27.

¹⁹ Cochard, « Restitution de la méridienne et de la courbe du temps moyen tracées par Monge sur le mur de l'École du génie de Mézières, aujourd'hui la préfecture des Ardennes », *Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences*, t. 109, 1889, p. 134-135.

février) et, au contraire, c'est le maximum local de E (en juillet) qui dépasse son minimum local (en mai). Il résulte de là que, sur une méridienne non déclinante, la boucle supérieure de la méridienne du temps moyen est plus renflée à droite de la ligne méridienne qu'à gauche, tandis que c'est le contraire pour la boucle inférieure. Or, c'est l'inverse sur la méridienne de Monge dont la méridienne du temps moyen est symétrique, par rapport à la ligne méridienne, de celle qui aurait dû être tracée. Autrement dit, par rapport à un système d'axes rectangulaires orientés de façon habituelle, l'axe des ordonnées coïncidant avec la ligne méridienne, c'est comme si l'on avait porté E en abscisses au lieu de $-E$.

À propos de cette méridienne défectueuse, Andrée Gotteland écrit : « Un certain nombre d'erreurs sont à noter qui s'expliquent par le fait qu'elle a été reproduite à l'envers par le dessinateur. Il est évident que Monge n'aurait pas commis toutes ces erreurs. »²⁰ Nous avons bien envie, en effet, de disculper le célèbre géomètre d'une faute aussi fâcheuse, mais c'est peut-être aller un peu vite, et Denis Savoie ne dit rien en ce sens²¹.

Il est intéressant, comme le fait d'ailleurs Andrée Gotteland, de rapprocher cette méridienne d'une autre qui présente le même défaut. Cette dernière, aujourd'hui disparue²², a été déterminée par Pierre Méchain, le 27 fructidor an VIII

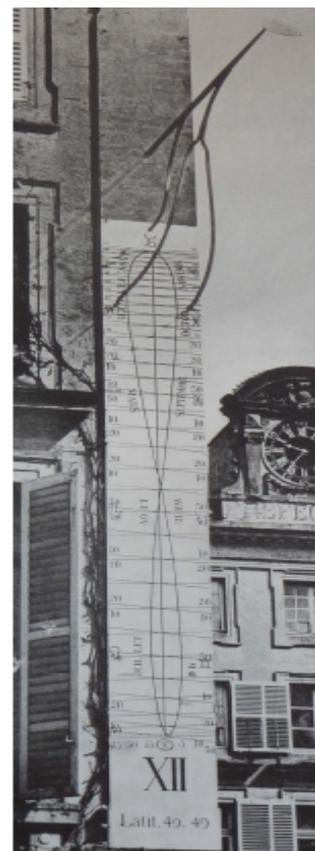


Fig. 9

(14 septembre 1800), pour orner l'École polytechnique lorsque celle-ci était installée à l'hôtel de Lassay attenant au palais Bourbon. Elle aurait été tracée par Louis-Joseph Girard et réalisée par le sculpteur François Aubertin, selon une épure (fig. 10) dont une reproduction accompagne un mémoire²³ de Frédéric Louis Lefrançois, alors élève à l'École polytechnique.

L'épure révèle que cette méridienne était légèrement déclinante occidentale. Son emplacement n'est pas connu avec précision, mais sa latitude devait être proche de $48^{\circ} 51' 43''$. Compte tenu de cette latitude (φ), l'inclinaison (η) de la ligne des équinoxes sur la ligne méridienne (à peu près 82°) montre que celle (α) de la méridienne sur la direction est-ouest était d'environ 9° ($9^{\circ} 15,5'$) ($\sin \alpha = \tan \varphi / \tan \eta$).

Or, sur une méridienne déclinante, la méridienne du temps moyen est déformée par rapport à ce qu'elle serait si la méridienne était orientée plein sud, comme on le voit sur la méridienne nantaise de la place de la Bourse (fig. 11) qui est fortement déclinante orientale. À l'inverse de cet exemple, sur une méridienne déclinante occidentale c'est la partie gauche de la méridienne du temps moyen qui se trouve dilatée par rapport à l'autre. Les renflements oriental et occidental de la boucle supérieure pourraient alors voir inversées les valeurs

²⁰ A. Gotteland, *Les Méridiennes du monde et leur histoire*, [Paris], Le Manuscrit, 2008, t. 1, p. 270-271.

²¹ D. Savoie, « l'aspect gnomonique de l'œuvre de Fouchy : la méridienne de temps moyen », *Revue d'histoire des sciences*, t. 61, 2008, p. 41-51, cf. p. 49-50.

²² A. Gotteland, *Les Cadran solaires et méridiennes disparus de Paris*, Paris, CNRS Editions, 2002, p. 110-111.

²³ F. Lefrançois, « Mémoire Sur la gnomonique », *Journal de l'École polytechnique*, cahier 11, t. 4, 1802, p. 261-271.

relatives de leurs amplitudes, mais on peut vérifier que la méridienne en question est très insuffisamment déclinante pour cela. À la latitude considérée, c'est seulement au-delà d'une inclinaison d'environ 35° sur la direction est-ouest que cette inversion se produirait. De toute façon, pour la boucle inférieure, le phénomène ne ferait qu'accentuer le déséquilibre qui s'observe déjà dans le cas non déclinant où la partie gauche est plus renflée que la droite, et ce n'est pas ce que nous voyons sur l'épure.

Girard avait été recruté comme dessinateur chargé de dresser des épures de géométrie descriptive sur lesquelles travaillaient les élèves de l'École polytechnique. Il avait donc été formé par Monge à cet effet et était ainsi, d'une certaine façon, l'un de ses élèves. Quant à Lefrançois, c'était vraiment un élève de Monge. Ajoutons que Lefrançois s'embrouille lorsqu'il écrit, dans son mémoire, qu'au 1^{er} prairial an IX (21 mai 1801) le midi moyen précède le midi vrai de 3 min 48 s alors que c'est le contraire.

Voilà donc Monge directement ou indirectement impliqué dans deux cas de méridiennes inversées. Faut-il n'y voir qu'une coïncidence ? Peut-être. Il est quand même permis de se demander pourquoi, après avoir correctement calculé la méridienne de Mézières, il en aurait laissé installer une version fausse.

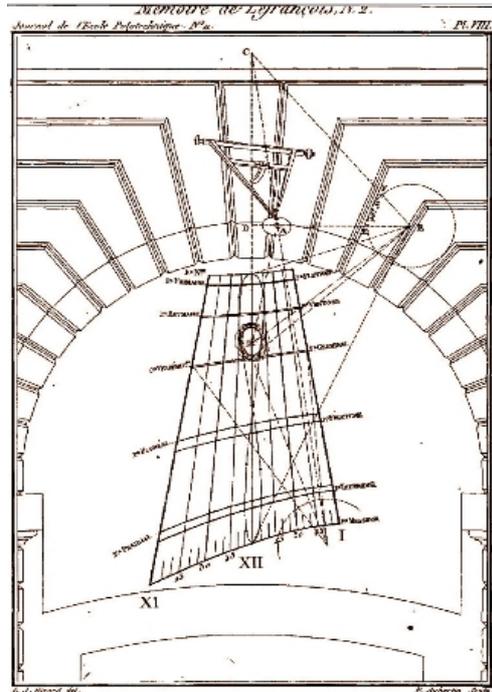


Fig. 10

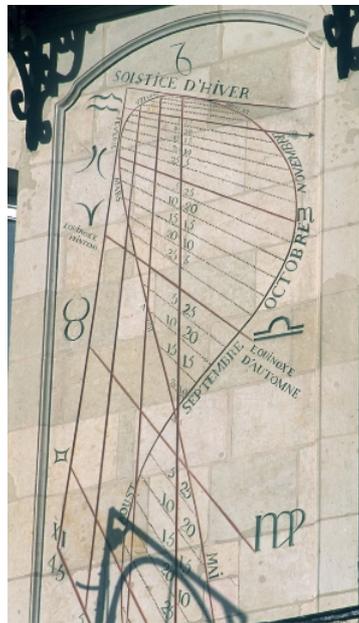


Fig. 11 (photo : Olivier Sauzereau).





Analemme à Jully

Claude GARINO

Au cours de l'année 2012, un cadran solaire analemme a été installé sur le site du château de Jully dans le département de l'Yonne. A priori c'est le premier cadran de ce type existant dans le département, la commission des cadrans solaires en recensant une centaine en France. Les lecteurs de Cadran-Info sachant pour la plupart ce qu'est un cadran analemme, le but de cet article n'est pas d'en donner la théorie ni le fonctionnement mais plutôt de montrer dans un but pratique et pédagogique, les difficultés rencontrées lors de l'installation et de préciser les remèdes apportés.

Localisation

La commune de Jully se trouve à une dizaine de kilomètres de la vallée de l'Armançon et du canal de Bourgogne, entre Tonnerre (Yonne) et Montbard (Côte-d'Or) ; Ancy-le-Franc célèbre pour son château renaissance est à 10 km à l'ouest. Constituée de cinq hameaux principaux et de fermes isolées (145 habitants) cette commune vit essentiellement de l'agriculture. Le territoire se trouve à l'est d'une côte qui s'étend sur le Châtillonnais. Au pied de cette côte se trouve une petite butte témoin (altitude 275 m) qui porte le site qui va nous intéresser.

Latitude : 47° 47' 9'' N

Longitude : 4° 16' 43'' E

La butte du château de Jully, un lieu chargé d'histoire



Au X^e siècle, un château fut construit sur la butte par un comte de Tonnerre. En 1114, le futur saint Bernard, entré deux ans plus tôt à Cîteaux, fondateur de l'abbaye de Clairvaux, installa dans les bâtiments un prieuré de bénédictines sous la dépendance de l'abbaye de Molesme (située à 25 km au nord de Jully). Le prieuré devint rapidement l'un des plus importants de Champagne et accueillit notamment la propre sœur de Bernard, Hombeline, comme prieure. Il essaima en plusieurs lieux, particulièrement à

Tart-l'Abbaye, maison mère des religieuses cisterciennes. La guerre de Cent Ans l'affaiblit et il ferma au début du XV^e siècle. Les bâtiments furent alors utilisés en ferme jusqu'au début du XX^e siècle. Après une période d'abandon, le site, devenu propriété de la commune, fut restauré au cours de ces vingt dernières années grâce aux efforts de la municipalité et de l'Association pour la sauvegarde et l'animation du château de Jully. Les bâtiments conservent des fenêtres à meneaux du XVI^e siècle. Un calvaire installé en 1945 rappelle le passé monastique du lieu.

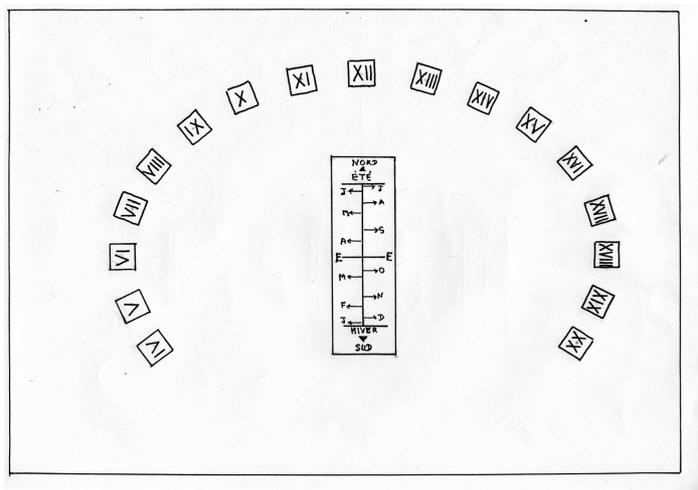
Le projet

Le site étant le siège de diverses manifestations publiques organisées par l'association ou par la commune, et le signataire de ces lignes étant à la fois président de l'association et membre de notre commission, l'idée d'un cadran solaire fut proposée.

Bien entendu le bâtiment n'en a jamais possédé ; un cadran posé sur la façade exposée au sud-est n'aurait pas été éclairé toute la journée ; un horizontal ou un équatorial installé sur un piédestal aurait été trop fragile voire dangereux ou l'objet de déprédations (le site sert aussi à des réunions privées : repas, mariages...). Rapidement s'imposa le projet d'un cadran analemmatique à style humain celui-ci ayant en outre l'avantage de faire participer l'utilisateur, qui ne se contente pas de regarder l'ombre portée par un style métallique comme dans la plupart des cadrans solaires. Il fut soumis au conseil municipal qui l'accepta immédiatement à la fin de l'année 2011.

Le cadran de July

Le grand axe de l'ellipse mesure 4 m, taille raisonnable sachant que l'on utilise l'ombre d'une personne. Les plots VI et XVIII heures se trouvent donc à 2 m du centre.



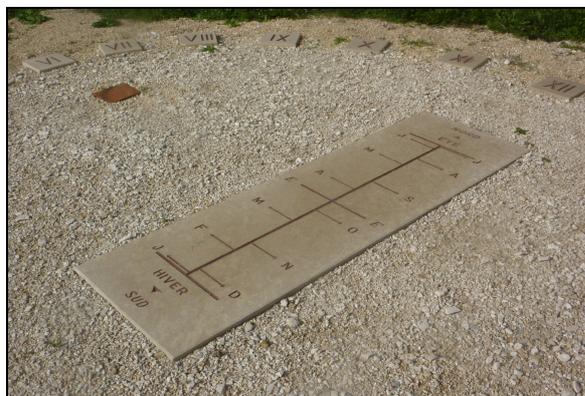
Les heures solaires locales sont indiquées de IV à XX heures pour la période du solstice d'été. Les plots cubiques mesurent 20 cm sur 20 cm.

Le plot horaire XII se trouve à 1,48 m du centre sur l'axe méridien, bien entendu au nord puisque au midi solaire le Soleil est au sud et que l'on a le Soleil dans le dos.

Les foyers de l'ellipse sont à 1,34 m du centre.

La dalle centrale mesure 0,50 m sur 1,60 m. Les solstices sont

à 58 cm du centre. Des lettres repèrent le 1^{er} de chaque mois (J pour janvier, F pour février...) ; au centre, deux lettres E repèrent les équinoxes.



Le cadran a été calculé par Claude Garino et réalisé en pierre de Massangis (localité du département non loin d'Avallon) par un tailleur de pierre, Didier Saucourt, qui habite au pied même de la butte ! Il a été financé moitié par la commune et moitié par l'association.

L'installation

Le premier travail fut de déterminer l'emplacement exact du futur cadran en tenant compte de divers impératifs d'utilisation du site et de l'éclairage maximum afin qu'il n'y ait aucun obstacle (lever et coucher du soleil vers le 21 juin).



Il fallut ensuite déterminer la direction de la méridienne. Le terrain herbeux fut d'abord découvert sur le futur tracé de cette ligne. On utilisa l'ombre d'un fil à plomb (de maçonnerie) porté par un trépied haut de trois mètres environ.

1^{er} problème : l'opération n'a pas pu être faite en décembre ou janvier lorsque le Soleil est au plus bas, ce qui aurait donné une ombre plus longue quoique plus floue. Le repérage a été effectué à plusieurs dates aux mois de mars et d'avril au midi solaire vrai, à 15 secondes près, d'où une ombre pratiquement égale à la hauteur du fil.

2^e problème : un fil trop fin donne une ombre peu visible malgré le sable qui a été répandu. Une cordelette de 4 mm a finalement été utilisée. Un compromis serait à trouver...

3^e problème : le fil peut bouger avec le vent ; le fait de placer le plomb dans un seau d'eau réduit un peu les oscillations mais pas complètement ! Des jalons (piquets de fer ou pointes à chevrons) ont été installés au sol sur l'ombre ; étant alignés à environ un centimètre près, une moyenne pouvait être faite, et deux jalons définitifs ont été installés au sud et au nord de la zone occupée par le futur cadran, une cordelette tendue entre eux.



Enfin, au mois de mai, nous avons procédé à l'installation proprement dite. Le terrain étant en très légère pente en direction du sud (dénivelé d'environ 10 à 15 cm), nous avons choisi de poser d'abord le plot XII situé au nord puisque c'est de ce fait le point le plus élevé. Une perpendiculaire à la méridienne (seconde cordelette) passant par le centre du cadran fut placée à 1,48 m.

Les plots VI et XVIII ont été placés sur cette ligne à 2 m du centre (sur chacun des 17 plots le centre fut tracé au crayon). Une règle de maçon de 4 m et un niveau à bulle ont permis de placer les trois premiers plots dans un plan horizontal.

Les formules classiques donnent les valeurs x (depuis l'axe méridien) et y (depuis l'axe ouest-est) plus la valeur de la distance depuis le centre (théorème de Pythagore), ce qui permet de placer correctement les autres plots en commençant par les plots VI d'un côté et XVIII de l'autre. Chaque plot, est scellé au ciment soit sur une base soit dans une excavation, en s'assurant en permanence que les faces supérieures soient toutes dans le même plan horizontal.



Autre difficulté : les plots doivent être disposés sur une ellipse, mais celle-ci n'a pas été tracée, par exemple, selon la méthode dite des jardiniers, à l'aide d'une corde longue de la valeur du grand axe et attachée aux foyers. Le tracé aurait immédiatement disparu puisque



qu'il faut creuser pour mettre en place les plots, donc cela ne sert à rien ! De ce fait chaque plot a été orienté simplement visuellement pour qu'il soit dirigé vers le centre le plus harmonieusement possible vis-à-vis de ses voisins...

A la fin d'une journée de travail les derniers plots furent installés (photo ci-contre). Le lendemain, la dalle centrale (dont la face inférieure est une « croûte » de pierre) fut simplement posée sur un lit de sable, bien entendu toujours dans le plan des plots.

Quelque temps après la surface laissée libre fut remblayée de concassé fin, puis recouverte par une couche de sable.

Photo prise le 29 juillet à 11 h, heure légale, soit 9 h 11 en heure solaire (9 h 11 + 6 min (eqt) – 17 min (longitude) + 2 h (été)).



L'inauguration

Le cadran fut inauguré avec le Soleil le samedi 15 septembre 2012, à l'occasion des Journées européennes du patrimoine en présence de M. Roland Raverat, maire de Jully, M. Alain Henry, conseiller général d'Ancy-le-Franc, qui coupa le ruban, et d'une nombreuse assistance : maires, représentant de l'office de tourisme, habitants de Jully et des communes voisines.

La réalisation d'un tel cadran, qui pose plus de problèmes pratiques lors de son installation que lors du calcul (trois formules seulement : deux pour les plots, une pour la dalle) ou de la fabrication fut, pour nous une expérience enrichissante.



Nous ne pensons pas avoir fait trop d'erreurs en procédant de cette façon, sachant que nous aurions pu choisir de placer la dalle centrale en premier, puis le plot XII pour les raisons ci-dessus évoquées.

Le cadran analemmatique de Jully sera dorénavant un attrait supplémentaire pour un site rénové et vivant.



Plaute tonne contre les cadrans solaires

L'auteur latin Plaute (254-184 av. J.-C) reproche aux cadrans solaires de porter atteinte à sa vie domestique. Il manifeste son mécontentement par ces vers :

« Les dieux confondent l'homme qui, le premier, trouva
Le moyen de distinguer les heures ! Puissent-ils le confondre aussi
Le misérable qui en ce lieu mit un cadran solaire,
Afin de découper et hacher mes journées.
Lorsque j'étais enfant, mon cadran était mon ventre,
Combien plus sûr et plus précis que tous ceux d'aujourd'hui.
Il me signifiait l'heure de passer à table,
Quand toutefois j'avais à manger.
Mais aujourd'hui, même lorsque j'ai de quoi,
Je n'ai le droit de m'y mettre que si le Soleil est de cet avis,
Et la plupart des gens, ratatinés de faim,
Se traînent dans les rues ! »

Il faudra attendre encore quelques siècles pour que les cadrans solaires retrouvent grâce se ressaisissent en proposant une fonction plus spirituelle cette fois-ci : celle d'indiquer les heures de prières. Plaute aurait probablement applaudi !

Joseph Theubet



Bloc gnomonique à Jussey

Maurice KIEFFER et Francis REYMANN

Découverte et description d'un bloc gnomonique à Jussey (70 500, Haute-Saône)

Le bloc gnomonique de Jussey a été trouvé dans une étable et c'est l'œil averti du gendre d'un ami gnomoniste qui a identifié l'objet.

Malgré son piètre état de conservation, 16 cadrans ont pu être répertoriés sur son pourtour et sur le dessus. Ainsi, comme pour tout bloc de ce type, il y avait toujours un cadran qui informait sur l'heure et même la date, quelles qu'elles soient.

Si quelques tracés et orientations de plans semblent indiquer une latitude d'installation de l'ordre de 51° , cette valeur peut difficilement être confirmée, mais, quelles que soient les connaissances gnomoniques de son auteur, il devait néanmoins être passionné par ce sujet pour réaliser une œuvre aussi complète.

Nous remercions chaleureusement madame Ansel d'y avoir prêté attention et de l'avoir mis à notre disposition pour étude.

Quelques photos



1. La face sud.



2. Le vertical principal et les restes du polaire cylindrique creux.

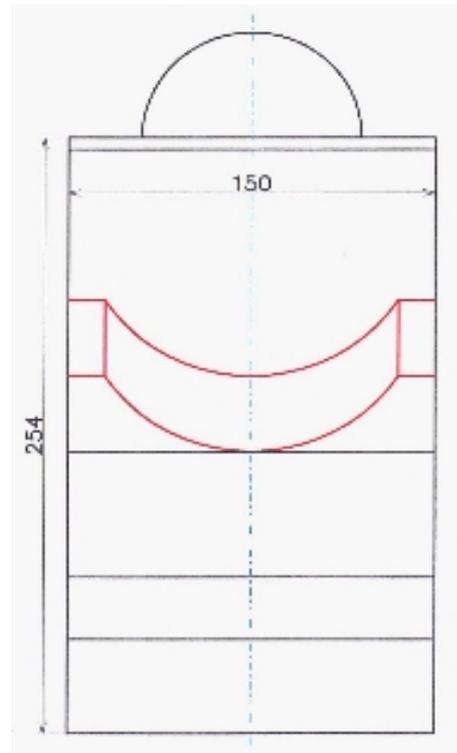
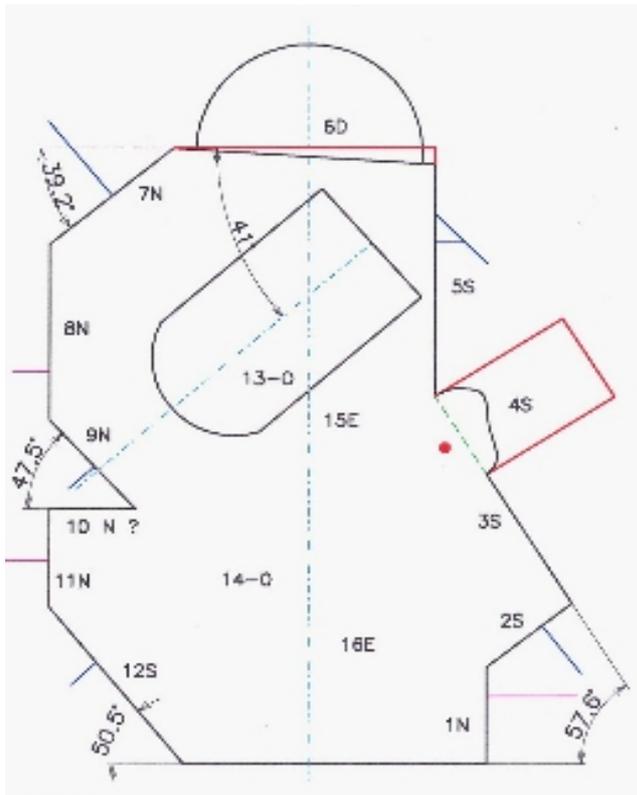


3. La face est.

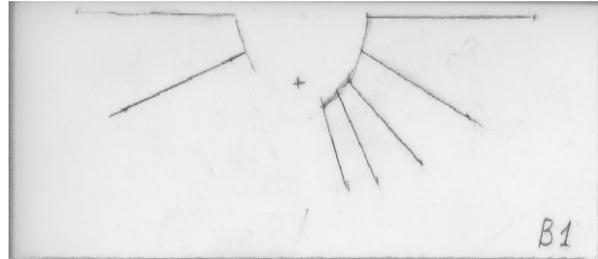


4. Le dessus et la face nord.

Repérage et numérotation des cadrans

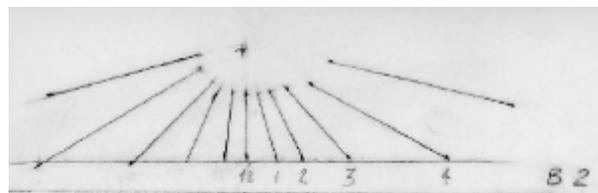


1° Sud - vertical



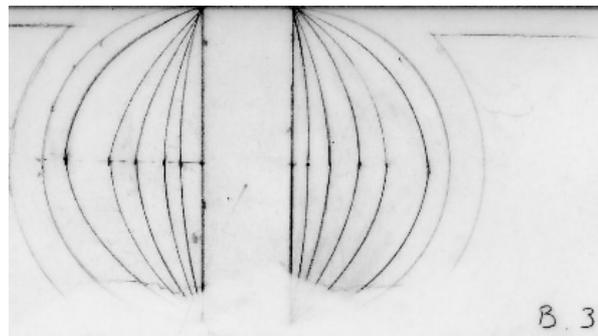
Implantation d'un style droit visible,
13 lignes horaires (7 visibles).

2° Sud - cadran équatorial automne - hiver



Implantation d'un style polaire visible,
13 lignes horaires tracées (11 visibles).

3° Sud - 2 demi-scaphés polaires



La partie médiane forme le style polaire.

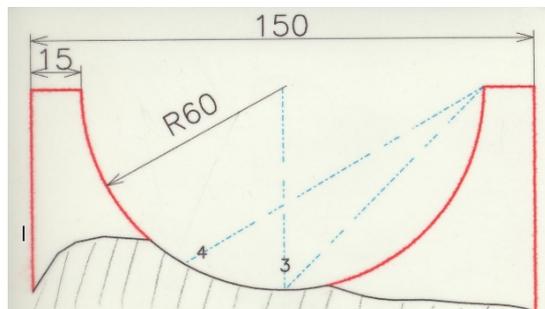
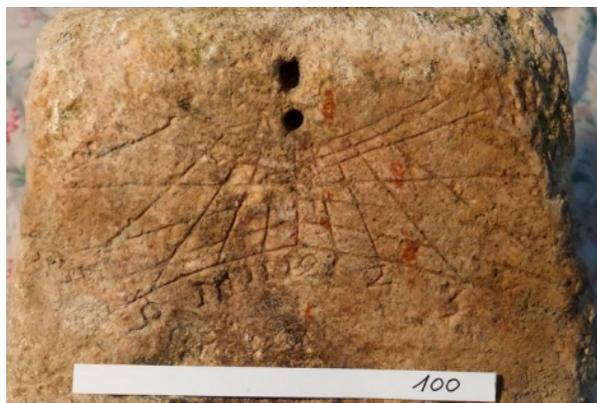
Le premier quart sphérique à gauche donne les heures du matin, et celui de droite les heures de l'après-midi.

Les lignes horaires sont encore visibles.

4° Sud - cadran polaire cylindrique creux très abîmé



5° Sud - vertical méridional

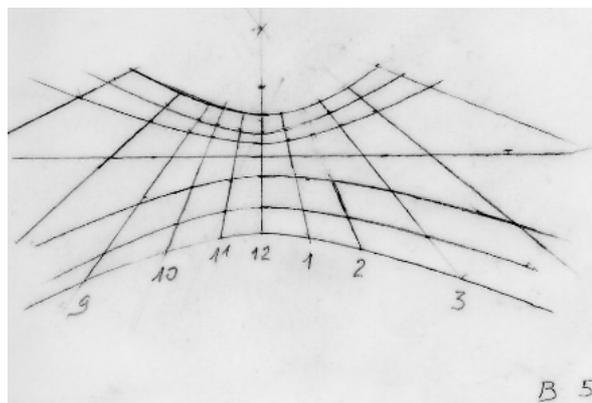


Le matin, le style est formé par l'arête est, l'après-midi par l'arête ouest.

L'ombre des arêtes décrit un champ angulaire double de celui du Soleil.

▲ Les lignes horaires de 6 h à 18 h sont visibles ainsi que les 7 lignes zodiacales. Les points d'ancrage du style polaire et de la jambe de force sont visibles. ►

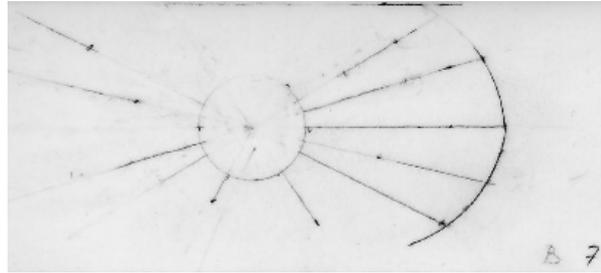
6° Dessus – Demi hémisphérique



La gravure est asymétrique!

◀ Point d'implantation d'un style visible.

7° Nord - Cadran équatorial printemps - été



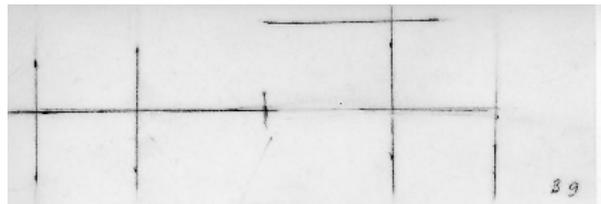
Point d'implantation du style visible
17 lignes des heures (11 sont visibles).

8° Nord - cadran vertical septentrional



Point d'implantation du style (droit !) visible.
Le tracé des 2 heures matinales est visible

9° Nord - Cadran polaire septentrional



Point d'implantation du style visible.
2 x 2 lignes horaires et une ligne équinoxiale.

10° Nord ?- cadran horizontal ?

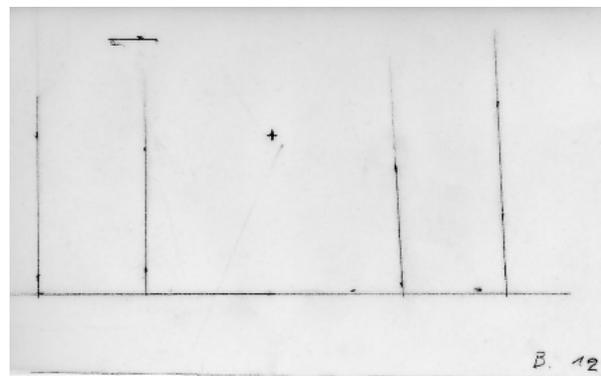


11° Nord - cadran vertical septentrional



Point d'implantation du style visible.

12° Nord - cadran polaire septentrional



Point d'implantation du style visible.
2 x2 lignes horaires.

13° Ouest - cadran oriental en creux
(1/2 cylindrique Nord-Sud)



Le style est formé par l'arrête.

14° Ouest - cadran oriental plan



Point d'implantation du style, lignes d'heure et zodiacales visibles.

15° Est - cadran oriental en creux
(1/2 cylindrique Nord-Sud)

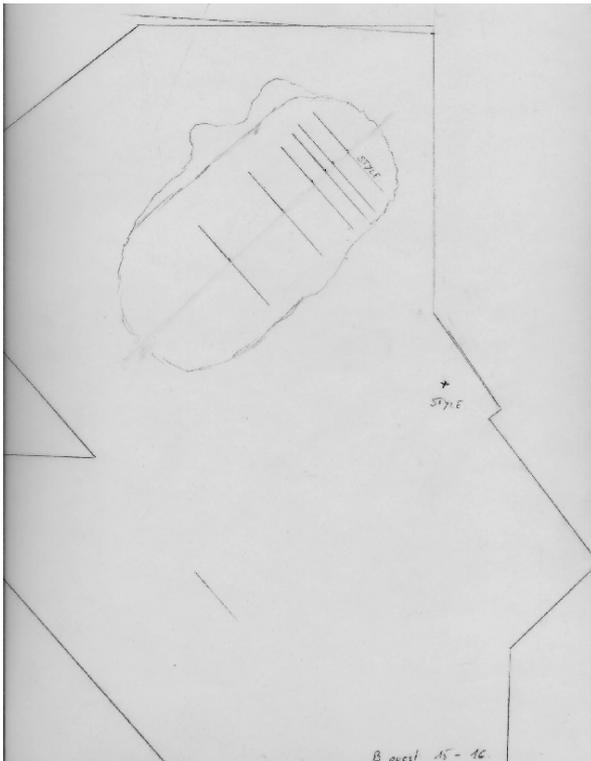


Le style est formé par l'arrête.

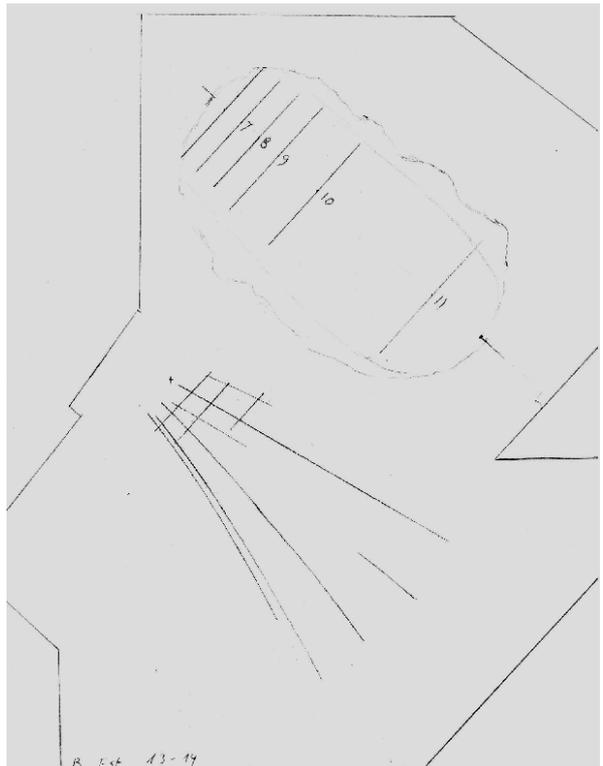
16° Est - cadran occidental plan



Point d'implantation du style visible.
Lignes d'heure et zodiacales ?



Croquis des cadrans 13 et 14.

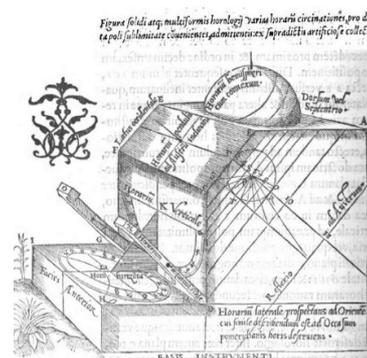


Croquis des cadrans 15 et 16.

D'après messieurs Denis Savoie et Paul Gagnaire ce bloc daterait approximativement du XVII^e siècle. Malheureusement il n'est pas possible de déterminer pour quelle latitude il a été calculé. Le tracé du cadran vertical est asymétrique et les pentes des cadrans polaires et équatoriaux ont des angles différents.

Comme le souligne Monsieur Denis Savoie dans l'article *La construction des cadrans solaires antiques* dans le Dossiers d'Archéologie n° 354 :

« À côté des ouvrages très techniques de Vitruve et de Ptolémée qui ne s'adressaient qu'à une élite, des directives sommaires devaient circuler pour tracer les cadrans dont la fonction décorative était la plus importante. Il est frappant de constater que plus de vingt siècles après, la situation n'a pas beaucoup changé ».



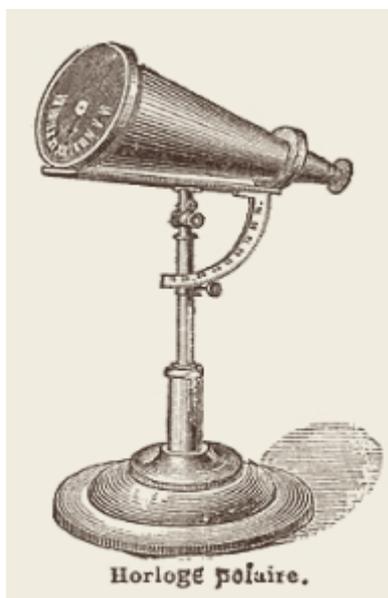
Oronce Fine « De solaribus » 1532.

⇒ Dans la version numérique, vous trouverez en annexe :

le fichier "BLOC GNOMONIQUE JUSSEY" offre des photos en grand format



"Horloge polaire" d'après le Dictionnaire encyclopédique Trousset 1886 - 1891.



Horloge polaire : instrument inventé par sir Charles Wheatstone (1849) pour faire connaître l'heure au moyen de la lumière polarisée.

La lumière passe dans un polariscope; une plaque de sélénite ou d'un autre cristal à double réflexion est interposée entre le polariseur et l'analyseur ; pour produire interférence et coloration. Dès que l'analyseur est mis en rotation, la couleur passe par toute l'échelle des teintes. (Voy. Lumière.)

La lumière céleste se polarisant à angles droits, par rapport aux rayons du soleil, on emploie pour analyseur un prisme de Nicol, placé de façon que son axe soit parallèle à celui de la terre ; on le fait tourner de façon à changer sa position relativement au plan de polarisation.



Cadran de Maure-de-Bretagne

Michel LAMBALIEU

Une énigme gnomonique (presque) résolue grâce à la commission des cadrans solaires.

Un ami historien, spécialiste du compagnonnage, à la recherche d'informations sur un cadran solaire qu'il avait vu représenté sur Internet, mais dont il avait perdu les références, m'en a communiqué la photographie par courriel et demandé de l'aider à le retrouver ! Cette photographie, malheureusement, ne comportait pas d'informations sur les caractéristiques géographiques et la date de la prise de vue comme beaucoup d'appareils photos numériques le permettent désormais (ce qui est bien pratique pour les recherches !).



Serge Grégori m'avait confirmé ne pas avoir répertorié ce cadran dans notre base. Je me souvenais cependant du superbe cadran présenté sur le site de l'association Tempora (« cadrans de la Passion » en particulier). Ainsi, peu armé, en ai-je été réduit à des hypothèses hardies en espérant que la commission pourrait m'aider à compléter ce que

j'avais trouvé...et imaginé ! et, de ce fait, rendre à César ce qui appartient à César. Eh bien voilà qui est presque fait, car il y a encore des interrogations, mais sur des détails du cadran lui-même !

La photo ci-dessus, a été prise quasiment face au cadran, ce qui est bien pratique pour la suite des mesures à effectuer, et offre la possibilité de le vérifier en reproduisant le tracé des cercles concentriques figurant sur la table, le centre étant situé à l'intersection de la ligne de midi et de l'arc diurne Gêmeaux-Lion.

Après examen de ce cadran, malheureusement amputé de son style et pratiquement d'une moitié de la table, on ne peut tout d'abord qu'être frappé par la qualité et la précision de la partie principale du tracé, mais également par des détails surprenants qui pourraient laisser penser que deux personnes auraient œuvré sur ce cadran, (ce serait surprenant mais erroné, j'y reviendrai).

Il s'agit d'un cadran horizontal, gravé sur un schiste ardoisier très probablement, suivant l'observation au niveau de ses cassures, de forme octogonale comme beaucoup de ceux réalisés par le passé et comme le confirment l'étendue de la gravure et le sens de décroissance et de croissance des chiffres gravés.

Je n'ai pu identifier, sur la photo que j'ai reçue, l'année de sa réalisation : 1724 ou 1726 ?, gravée dans le cadre qui entoure une inscription assez longue dont je propose une traduction ci-après. A noter que dans ce texte certaines consonnes (n ou m) sont figurées par un signe au-dessus des voyelles et que le & remplacerait « et » du pluriel, pratique courante chez les copistes. L'avis d'un spécialiste serait bien utile sur ce point !

Voici le texte latin :

« Hic mome(n)ta, horae, me(n)ses scribitu(et) orbis, spatium cuiq(ue) videre licet, sed pu(n)ctu(m) mortis nescimus qua(n)do futuri : nam nasci una dies videt una mori ».

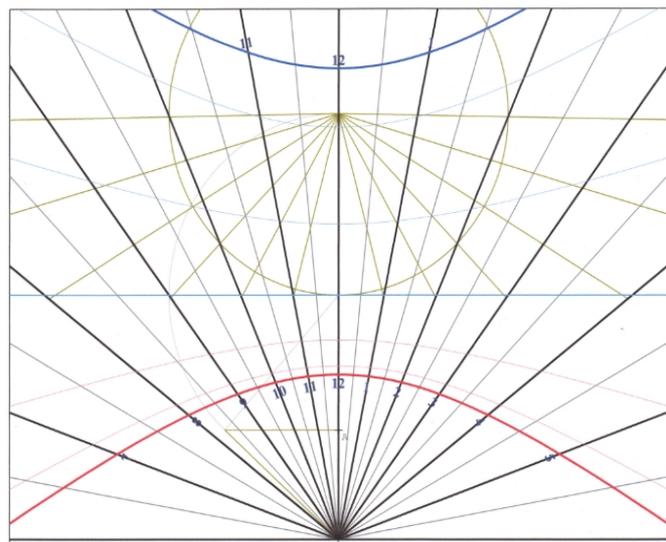
Traduction suggérée:

« Ici sont écrits les moments, les heures, les mois du monde. Ici il est permis à chacun de voir l'étendue de la vie (ou autre, du fait des gravures géographiques : où chacun peut y voir l'étendue du monde); mais nous ignorons quand sera le moment de notre mort. Un jour nous a vu naître et un autre mourir »

Les lignes horaires sont parfaitement gravées et convergent, si on les prolonge, au centre du fleuron d'une couronne ducale, (reconnaissable à ses huit fleurons identiques). Il en est de même de la ligne des six heures du matin et du soir qui passe en outre par l'axe d'un compas et tangente parfaitement, de façon élégante, la grande branche d'une équerre, marque des symboles des compagnons tailleurs de pierre « passants », dont l'identification figure sur les rôles d'Avignon de 1735, 1773-1869. Dans la même veine, on trouve en périphérie un autre symbole bien connu, celui des nœuds dits « lacs d'amour ». Il s'agit donc de toute évidence de l'œuvre d'un compagnon compétent dans la gravure, mais également dans le tracé préalable sur l'ardoise.

Les arcs diurnes sont parfaitement représentés et agrémentés des symboles et des noms des signes du zodiaque prouvant une connaissance astronomique remarquable.

Une ligne « horaire » particulière attire le regard. Elle est figurée en pointillé et porte l'inscription « agis (va ?) ». Si l'on mesure les angles au sommet, c'est-à-dire, cette fois-ci, sur le point du fleuron central, tant des lignes horaires que de cette ligne particulière, on note avec intérêt que cette ligne pointillée fait un angle au sommet de 48° avec la ligne de midi et que les lignes horaires s'en déduisent parfaitement si on considère cette ligne comme étant le rabattement du style sur la table du cadran à l'aide de l'angle de la latitude du lieu. En effet, outre les calculs traditionnels, on peut très simplement



Epure fournie par le logiciel *Shadows*

vérifier la qualité du tracé en superposant sur cette photo le tracé de l'épure fournie par le logiciel *Shadows* pour un tel cadran horizontal de latitude 48 degrés nord. Il peut s'agir, semble-t-il, de la méthode utilisée pour réaliser ce tracé de l'épure semblable à celle dont il est dit qu'elle est due à Dom Bedos de Celles, celui de l'académie des sciences de Bordeaux, célèbre pour son traité de gnomonique pratique, mais publié en 1760, soit quarante ans après la réalisation du présent cadran !

C'est pourquoi il est étonnant a priori de constater que les graduations du cercle bordant celui des heures sont particulières, resserrées vers le haut. En outre, les indications des directions géographiques apparaissent fantaisistes (Mississippi et Kebec par exemple, entre Mexique et Martinique ; mélange de directions de ville et de pays, etc.) mais la découverte de l'origine véritable de ce cadran et l'étude géographique dont je parlerai plus loin pourraient expliquer cette apparente bizarrerie.

La valeur de l'angle au sommet étant de 48°, celle-ci m'a interpellé et suggéré que nous pourrions situer le cadran dans la Sarthe, terre de nombreux compagnons du Devoir : 48° est en effet la latitude du Mans, qui s'enorgueillit de posséder à l'abbaye de la Couture un cadran dû, dit-on, à Dom François Bedos de Celles, (également bien connu comme facteur d'orgue), suite aux séjours fréquents qu'il fit au Mans et aux contacts avec les Bénédictins de la congrégation de Saint-Maur. Ce cadran ducal si bien tracé aurait-il été commandé par ou pour le duc Louis Auguste I^{er} de Bourbon ? La question reste ouverte à ce stade. La suite ci-après de l'histoire prouve que cette hypothèse n'est pas fondée !

A partir de là, et sans autres sources de référence ni réponses, il m'a fallu m'arrêter avant que mon imagination ne prenne le pas sur la vérité, qui s'est révélée différente, sauf pour la latitude déterminée de 48°. Celle-ci peut se situer néanmoins en Bretagne. C'était tout ce que j'avais de certain jusqu'au 13 octobre 2012, méconnaissant jusqu'à ce jour-là, la richesse des travaux des membres de la commission !

Le lendemain de notre réunion automnale, j'ai eu la surprise et le plaisir de recevoir un courriel de notre ami Denis Schneider qui, à l'occasion d'une recherche dans *Les cadrans solaires de Bretagne* de Jean-Paul Cornec et Pierre Labat, autres membres de la commission, découvre dans ce livre la photographie du fameux cadran en question, dont je lui avais parlé. Le cadran se trouve situé à Maure-de-Bretagne ! (latitude donnée 47° 58') : je progressai !

Les auteurs datent ce cadran de 1752 et proposent (pages 182-183) une interprétation géographique intéressante concernant la couronne portant les gravures du nom des villes et de leur longitudes. Ils donnent une interprétation, d'une part, de l'origine choisie (rotation par rapport à l'île de Fer, origine à l'époque des mesures de longitudes, pour l'amener à coïncider avec Maure-de-Bretagne) et, d'autre part de l'irrégularité du tracé dans l'espacement des angles qui a pour objectif de privilégier la lisibilité des destinations. Je vous renvoie à leur livre pour plus de détails.

Ce cadran n'a pu être réalisé que sur commande. En effet, qu'en est-il de la présence de la couronne ducale ? Il semblerait curieux qu'elle soit uniquement accidentelle ou esthétique, l'absence d'autorisation pouvant à l'époque se révéler dangereuse pour l'auteur.

Qui donc en fut le commanditaire ? Nous sortons là de l'étude du cadran solaire lui-même, mais son histoire vaut la peine d'être approfondie. La Société archéologique et historique d'Ille-et-Vilaine consultée pour poursuivre la recherche sur l'origine de la commande de ce superbe cadran me renvoie aux auteurs. Jean-Paul Cornec, sollicité, m'a répondu ceci : « La présence d'une couronne ducale est difficile à expliquer. Ce cadran remonte au 18^e siècle, époque à laquelle il n'y a plus de duc de Bretagne. De plus Maure relevait d'un comte. Mais jusqu'en 1701 le comté était propriété de la famille de Rochechouart de Mortemart qui portait le titre de duc. Le comté fut donc vendu en 1701. Le nouveau propriétaire céda le comté de Maure à sa fille, qui avait épousé un marquis. C'est d'ailleurs peut-être une couronne de marquis qui figure sur le cadran ; la couronne y est tellement stylisée qu'elle peut être confondue avec celle d'un duc. Dans ce cas, ce serait Jean-Baptiste de Rosnyvinen (décédé en 1719) ou son fils Guillaume qui serait le commanditaire. A défaut d'armoiries sur le cadran cela reste une hypothèse. Dernier problème : ce cadran a déménagé avec son propriétaire en un lieu inconnu. »

Fin (provisoire) de l'histoire ?

Cette série de recherches en vue d'approfondir la connaissance de notre passé caractérise bien l'atmosphère d'entraide amicale qui règne au sein de notre commission. Cette enquête valait la peine d'être contée.





Logiciel cadrans horizontaux bifilaires

Eric MERCIER et Dominique COLLIN

Nous présentons un logiciel permettant de dessiner les cadrans solaires horizontaux bifilaires à fils quelconques. Ce programme est basé sur des algorithmes originaux incluant notamment un filtre permettant de fournir des images de la table du cadran directement utilisables. En fonction du choix des six paramètres d'entrée, il existe une quasi-infinité de dessins possibles.

Un nouveau logiciel de dessin des cadrans solaires horizontaux bifilaires à fils quelconques

1) INTRODUCTION

Le cadran bifilaire a été inventé par Michnik en 1923¹. Le cadran de cet auteur était horizontal et il possédait 2 fils qui répondaient à 3 critères : (1) parallèles au plan du cadran, (2) rectilignes, (3) orientés pour l'un dans la direction est-ouest et pour l'autre dans la direction nord-sud. L'heure était indiquée sur la table du cadran par le croisement des ombres des deux fils. Cette idée de base a donné lieu à de nombreux développements dont l'arborescence a été synthétisée par D. Collin (2007). Un de ces développements correspond à une famille de

cadrans, toujours horizontaux, mais avec des fils qui, bien que restant rectilignes, prennent une orientation et une inclinaison quelconques. L'étude analytique de cette configuration a été menée par D. Collin (2005) et, à cette occasion, un logiciel de traçage a été développé sous GÉOPLAN². Certaines propriétés des arcs diurnes et des lignes horaires ont été mises en évidence à cette occasion, mais, pour différentes raisons, l'aspect purement graphique du tracé n'a été qu'effleuré.

Nous avons souhaité reprendre l'étude de ce type de cadran et, notamment, illustrer la grande variabilité des tracés envisageables. Ce travail a été rendu possible par le développement d'un nouveau logiciel dont le principe sera présenté ici.

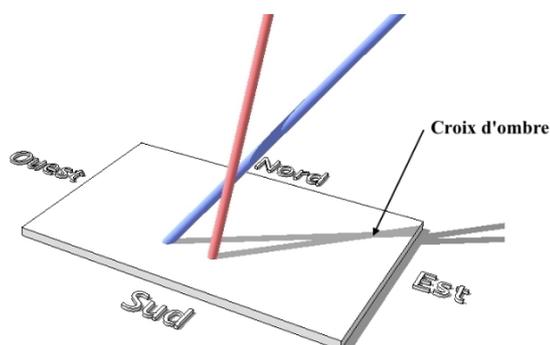


Fig. 1 Exemple de cadran horizontal bifilaire à fils quelconques. L'heure est indiquée sur la table par le croisement des ombres des fils (gnomons). Le diamètre de ceux-ci a été exagéré pour faciliter la compréhension des schémas.

2) LE CADRAN HORIZONTAL BIFILAIRE A FILS QUELCONQUES

La figure 1 illustre un exemple de cadran horizontal bifilaire à fils quelconques. Collin (2005) a montré qu'une fois le point d'origine du cadran défini (c'est le pied du fil n°1), il

¹ La traduction de ce travail a été publiée par D. Collin. Elle est disponible dans l'annexe du CD Cadran-info N°15 (Traductions_TOME_1.pdf)

² *Geoplan-Geospace*, distribué par le CRDP de Reims, est un logiciel de géométrie dynamique créé par le CREEM (Centre de recherche et d'expérimentation pour l'enseignement des mathématiques). Il est téléchargeable sur le site de l'AID-CREEM : <http://www.aid-creem.org/>.

suffisait de six paramètres pour décrire totalement la géométrie d'ensemble (fig. 2 et tableau 1).

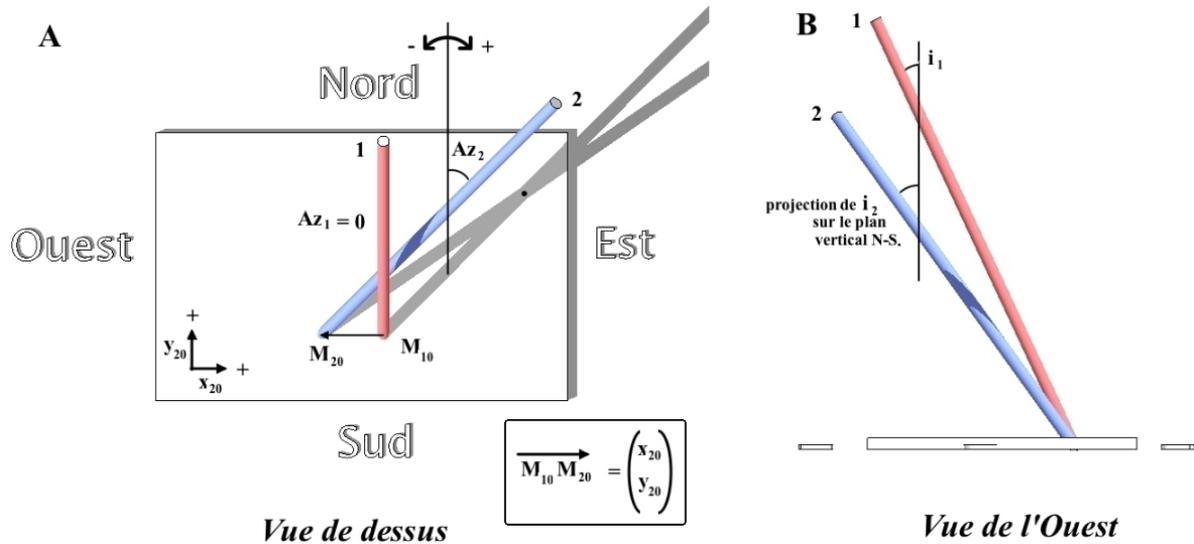


Fig. 2 Vue de dessus (A) et vue d'un des côtés (B) permettant d'illustrer les 6 paramètres fondamentaux de la définition géométrique du cadran (même cadran que la figure 1). Voir tableau n°1. Les conventions de signes pour Az_1 , Az_2 , x_{20} et y_{20} sont indiquées sur la figure ; i_1 et i_2 sont positifs. Les couleurs des fils (gnomons) seront conservées tout au long de l'article. Dans cet exemple Az_1 et y_{20} sont nuls.

Paramètres :	Description :
<input checked="" type="checkbox"/> Paramètres angulaires :	
Az_1	Azimet du premier gnomon, compté positivement depuis le nord vers l'est.
Az_2	Azimet du deuxième gnomon, compté positivement depuis le nord vers l'est.
i_1	Distance zénithale du gnomon 1.
i_2	Distance zénithale du gnomon 2.
<input checked="" type="checkbox"/> Paramètres métriques:	
x_{20}	Abscisse de l'implantation du deuxième gnomon
y_{20}	Ordonnée de l'implantation du deuxième gnomon

Tableau 1 Les six paramètres définissant les systèmes bifilaires étudiés (voir Collin 2005).

3) LE PROGRAMME DE DESSIN ET SON PRINCIPE

Pour réaliser le programme informatique de dessin des tracés du cadran solaire, nous nous sommes intéressés aux « piliers » qui tiennent les fils en place. Nous supposons qu'il s'agit de piliers verticaux. Ces piliers peuvent se trouver n'importe où sur la table si bien qu'il suffit de fixer (presque) arbitrairement une des coordonnées de leur base (x ou y) pour que, en connaissant les 6 paramètres fondamentaux et à partir de simples relations trigonométriques, il soit facile d'en déduire l'autre (fig. 3A et 3B).

De la même façon, une fois les bases des piliers connues (M_1 et M_2), il est facile de calculer, par trigonométrie, la hauteur (z_1 et z_2), et donc de les définir complètement. Ceux-ci apparaissent, sur le plan gnomonique, comme des styles droits. Il existe plusieurs algorithmes pour calculer, à une date et à un instant donnés de la journée, le point d'ombre de tels styles droits (Dallet 2008, Ziegeltrum 2010 ...). A titre d'exemple, le code de Massé (1997-2012), que nous avons retenu, fonctionne selon le schéma de la figure 4. Ce code, que nous avons

intégré comme routine dans notre programme, permet donc de calculer les coordonnées des points M'_1 et M'_2 de la figure 3C à un instant donné. A ce stade, il est assez facile de calculer les équations des droites passant respectivement par M_{10} et M'_1 , et M_{20} et M'_2 , et par la suite les coordonnées du point P qui correspond à l'intersection de ces droites.

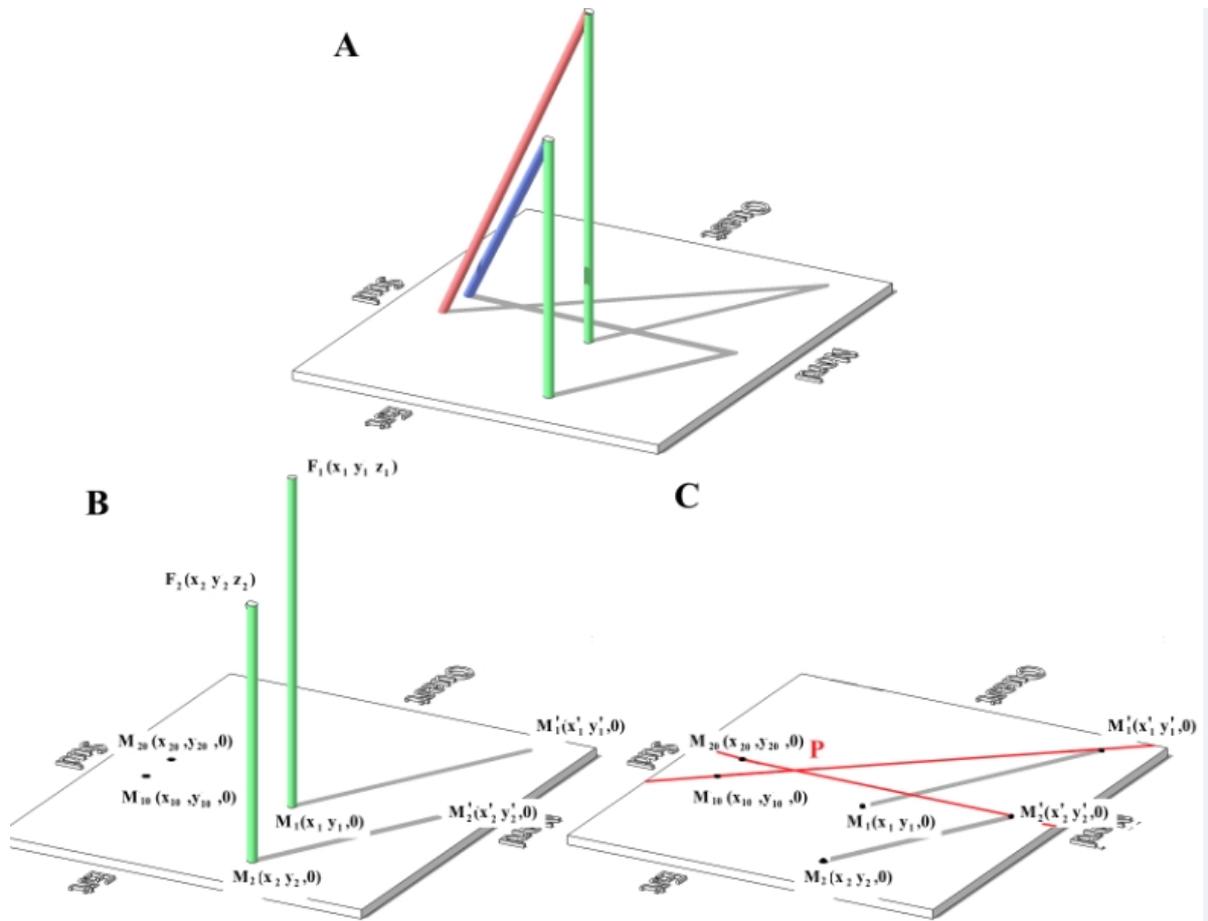


Fig. 3 Les étapes du calcul de la croix d'ombre P dans le programme présenté ici (explications dans le texte, la nomenclature est conforme avec Collin (2005).

Ces droites qui passent par M_{10} et M'_1 , et M_{20} et M'_2 sont en fait les droites porteuses des ombres des fils et le point P est le point que nous cherchons : croix d'ombre du cadran à l'instant considéré. Il suffit ensuite de répéter le calcul à chaque instant du jour à des dates choisies pour dessiner les arcs diurnes et, chaque jour de l'année à des heures choisies, pour dessiner les courbes en « 8 ».

Ce programme a été écrit en FUTUREBASIC5. Il s'agit d'un éditeur / débogueur / traducteur qui génère du code C, lequel est automatiquement compilé par les outils Apple fournis dans la suite pour développeurs du système d'exploitation (Mac OS X). On obtient donc en définitive une « application » autonome exécutable sur les Macintosh³.

Le programme de dessin ainsi présenté, et qui tient un peu de l'« œuf de Christophe Colomb », échappe complètement à l'analyse formelle qu'a menée précédemment l'un d'entre nous (Collin, 2005). Il est donc important de valider cette nouvelle approche en comparant les tracés obtenus avec ceux précédemment établis.

³ FUTUREBASIC5 est un langage de programmation et un logiciel freeware (programme gratuit) pour ordinateur Macintosh (système OS X) qui peut être téléchargé, avec la documentation correspondante, sur : <http://4toc.com/fb/index.htm>.

C'est ce que nous allons envisager maintenant.

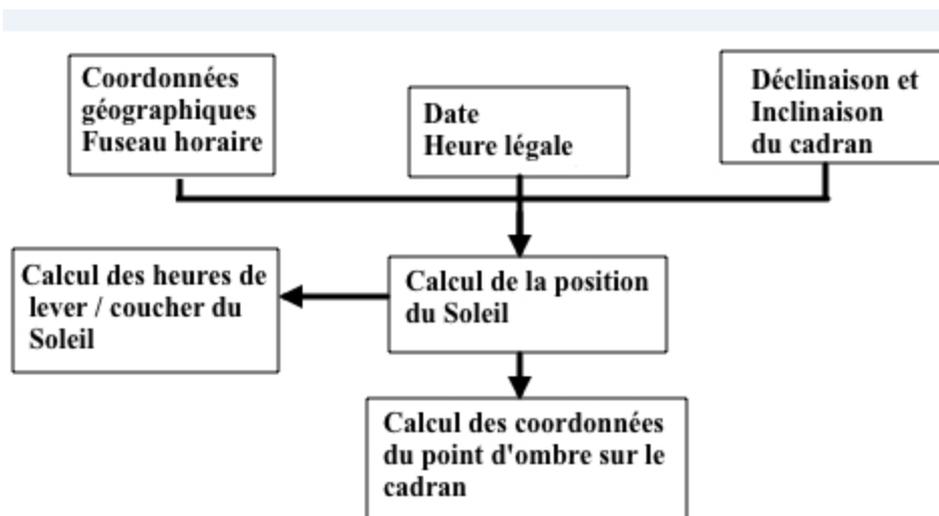


Fig. 4 Organigramme simplifié du programme d'Yvon Massé (1997-2012) utilisé pour le calcul des points d'ombre des piliers soutenant les fils du cadran. Dans les cas étudiés, la déclinaison et l'inclinaison du cadran sont nulles. La routine de calcul du lever / coucher du Soleil, non intégrée dans le programme originel de Y. Massé (« Ephéméride pour gnomoniste ») est tiré d'un autre code du même auteur (« Calcul des heures de passage au méridien / lever / coucher du Soleil »).

4) VALIDATION ET RESULTATS

Les figures 5A et 5B permettent de comparer une figure originale de Collin (2005) avec une sortie brute de notre programme ; la concordance est remarquable dans ce cas de figure comme dans tous ceux qui ont été testés. Vu le type d'approche numérique complètement différente qui sous-tend ces deux programmes, la similitude systématique des formes que nous constatons, valide, selon nous, les deux approches.

5) PROBLEME DES POINTS FANTÔMES ET INTERPRETATION DES TRACÉS

L'analyse des tracés des figures 5A et 5B est délicate pour au moins une partie des courbes. Cela est dû à la présence de tracés parasites qui ne correspondent à aucune réalité physique, encombrant le dessin, et qu'il est nécessaire de supprimer pour analyser les tracés. Ce sont ces points que nous avons baptisés « points fantômes ». Ce type de point apparaît systématiquement dans les dessins de cadrans issus de programmes informatiques fonctionnant selon un principe similaire au nôtre (mise en boucle de calculs de position des points d'ombre). Pour faire disparaître ces points dans les dessins des cadrans horizontaux à style (polaire ou droit), il suffit classiquement d'empêcher le dessin de ceux qui correspondent à des instants avant le lever du Soleil (il est sous l'horizon et donc sous le cadran) et après le coucher (pour des raisons symétriques). Cela revient à ne pas considérer les ombres résultant d'alignements du type :

Soleil / cadran / pointe du style

pour ne retenir que les alignements du type :

Soleil / pointe du style / cadran

Ce type de filtre avait déjà été utilisé dans les tracés des figures 5A et 5B. Dans le cas des cadrans bifilaires, apparaissent de nouveaux alignements qui, de la même façon, ne correspondent pas à une ombre réelle engendrant autant de familles d'ombres fantômes. :

Soleil / fil 1 / cadran / fil 2

Soleil / fil 2 / cadran / fil 1
 Soleil / cadran / fil 1 / fil 2

etc

En pratique, l'apparition de ces points fantômes résulte du fait que, dans le calcul de la position du point P (fig. 3C), l'algorithme considère l'intersection de deux droites (ou « lignes »), alors qu'il n'y a que des demi-droites d'ombre qui devraient être concernées⁴. Nous avons donc introduit un second filtre qui permet d'obtenir le tracé réel du cadran (fig. 5C). Ce filtre est basé sur une analyse géométrique 2D d'un système de 2 demi-droites (fig. 6) et, particulièrement, sur la recherche des caractéristiques de ce système qui conditionnent l'intersection, ou non, de ces demi-droites.

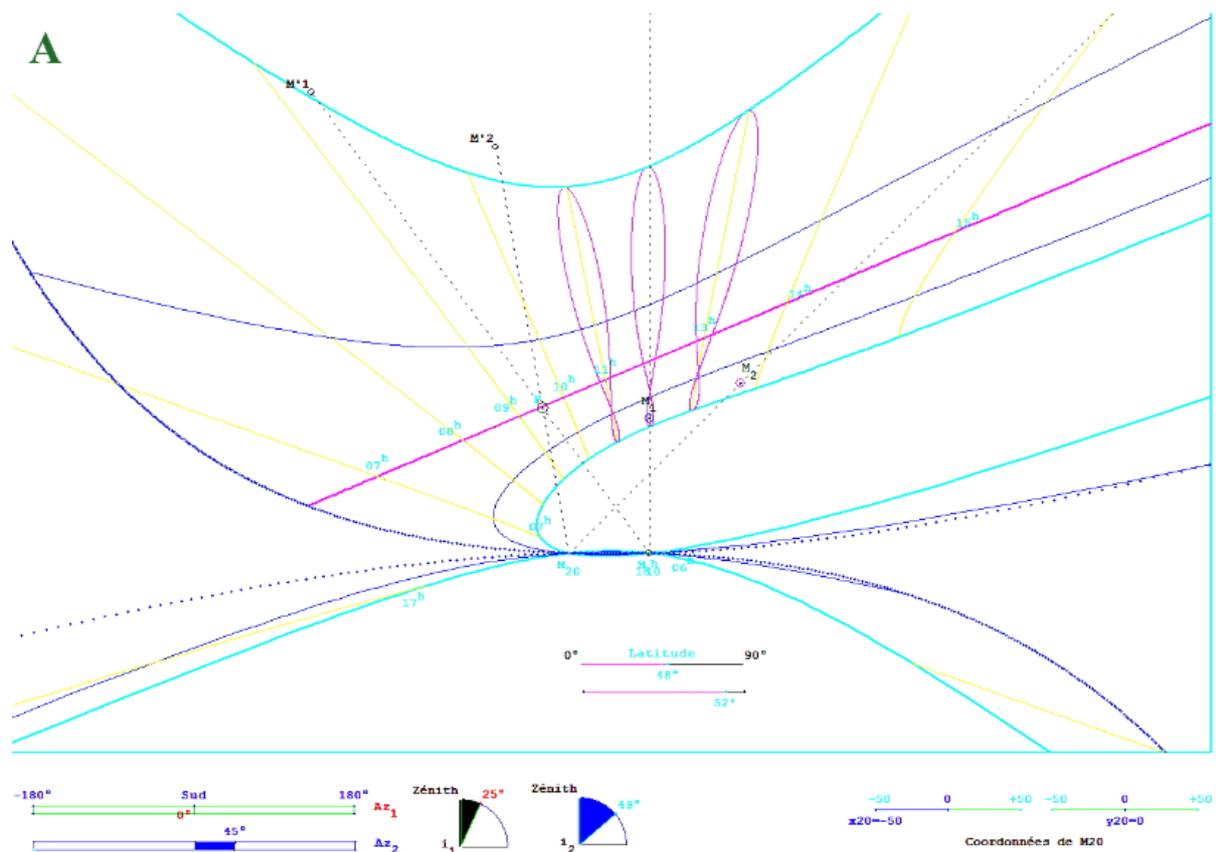


Fig. 5A Négatif (au sens photographique du terme) de la figure 8-6 de Collin (2005). Ce cadran correspond à celui des figures 1 et 2. Les valeurs numériques des 6 paramètres fondamentaux sont les suivantes :

$Az_1=0^\circ$ et $Az_2=45^\circ$; $i_1=25^\circ$ et $i_2=49^\circ$; $x_{20}=-50$ et $y_{20}=0$.
 Par ailleurs : latitude = $48^\circ 52'$ ($48,87^\circ$), longitude = 0° , fuseau = 0.

⁴ Il s'agit en fait de segments, mais nous les assimilons à des demi-droites limitées par M_{10} et M_{20} car les points M'_1 et M'_2 sont considérés comme éloignés (fig. 6).

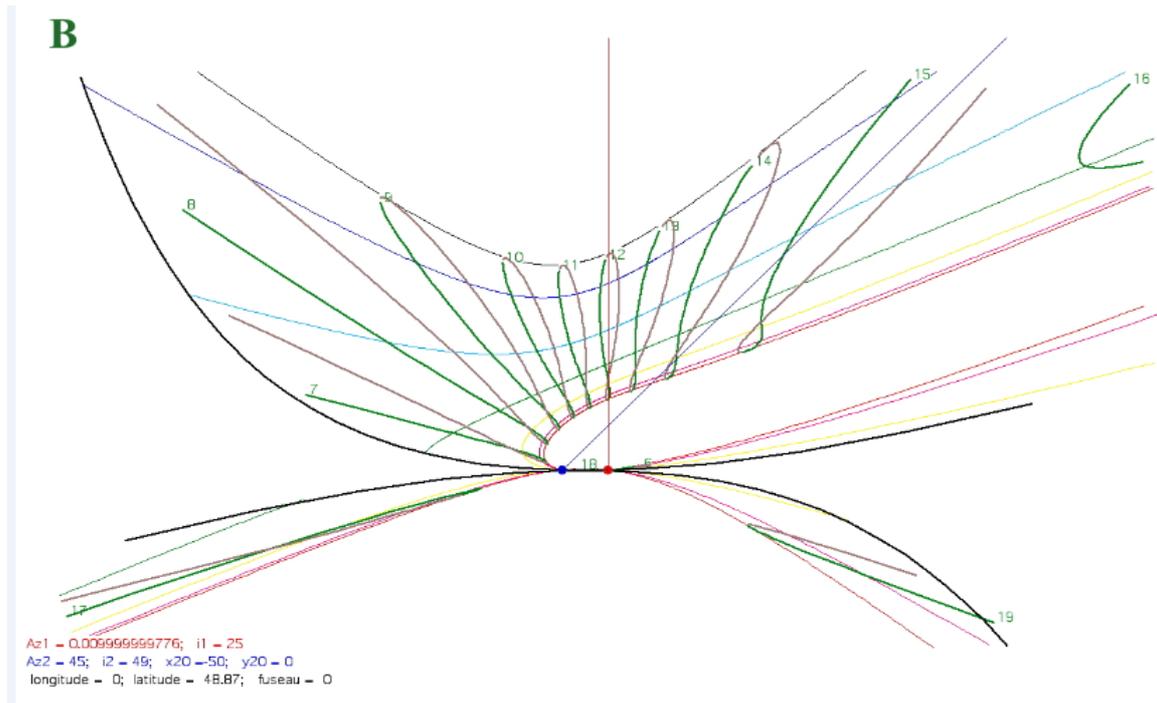


Fig. 5B Sortie graphique du programme présenté, pour les mêmes paramètres. Les arcs de déclinaison correspondent aux changements de signe du zodiaque (couleurs froides pour l'hiver, chaudes pour l'été ; la ligne d'équinoxe est en vert). Sur les « 8 » horaires, le vert correspond à la période solstice d'hiver => s. d'été ; le marron, au reste de l'année. Les traits noirs en gras correspondent, comme les traits bleus gras de la figure 5A, aux heures de lever du Soleil + ½ heure et de coucher du Soleil -½ heure. Les droites rouge et bleu correspondent à la projection des fils sur la table du cadran (même couleur que sur les figures 1, 2 et 3A).

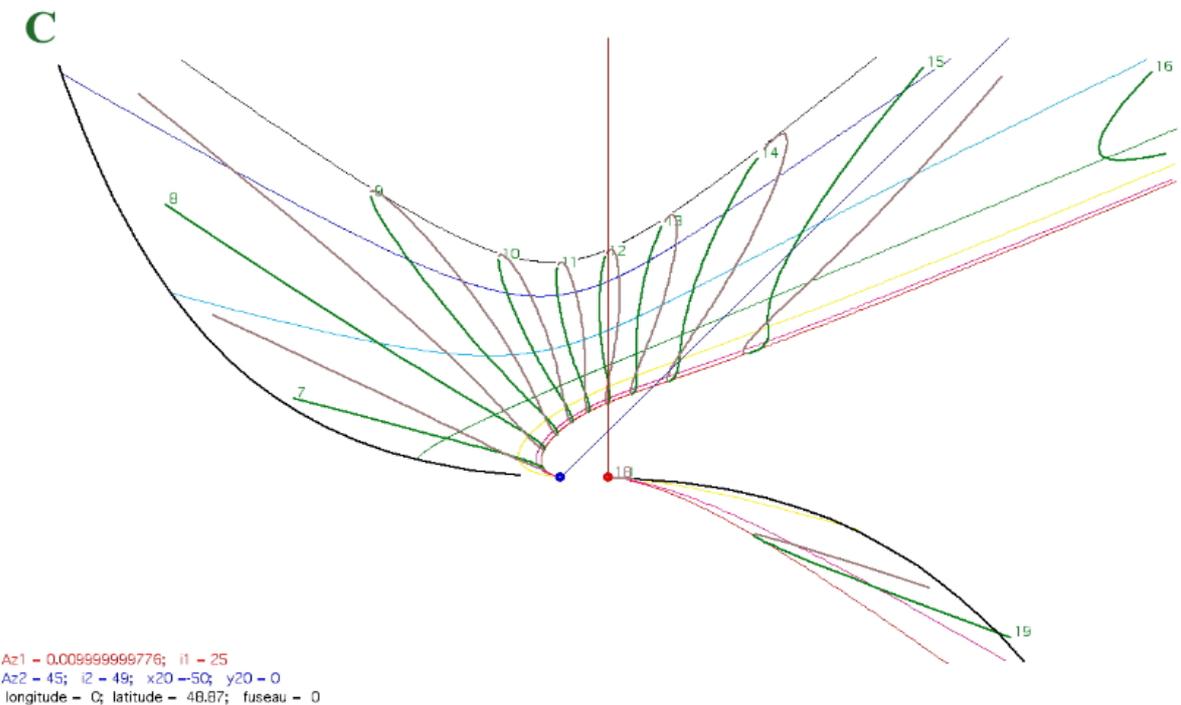


Fig. 5C Idem à 5B mais avec les tracés fantômes supprimés (voir explications dans le texte).

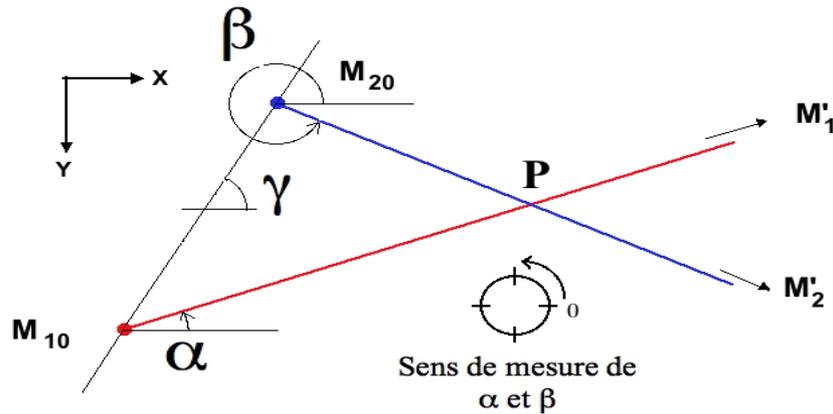
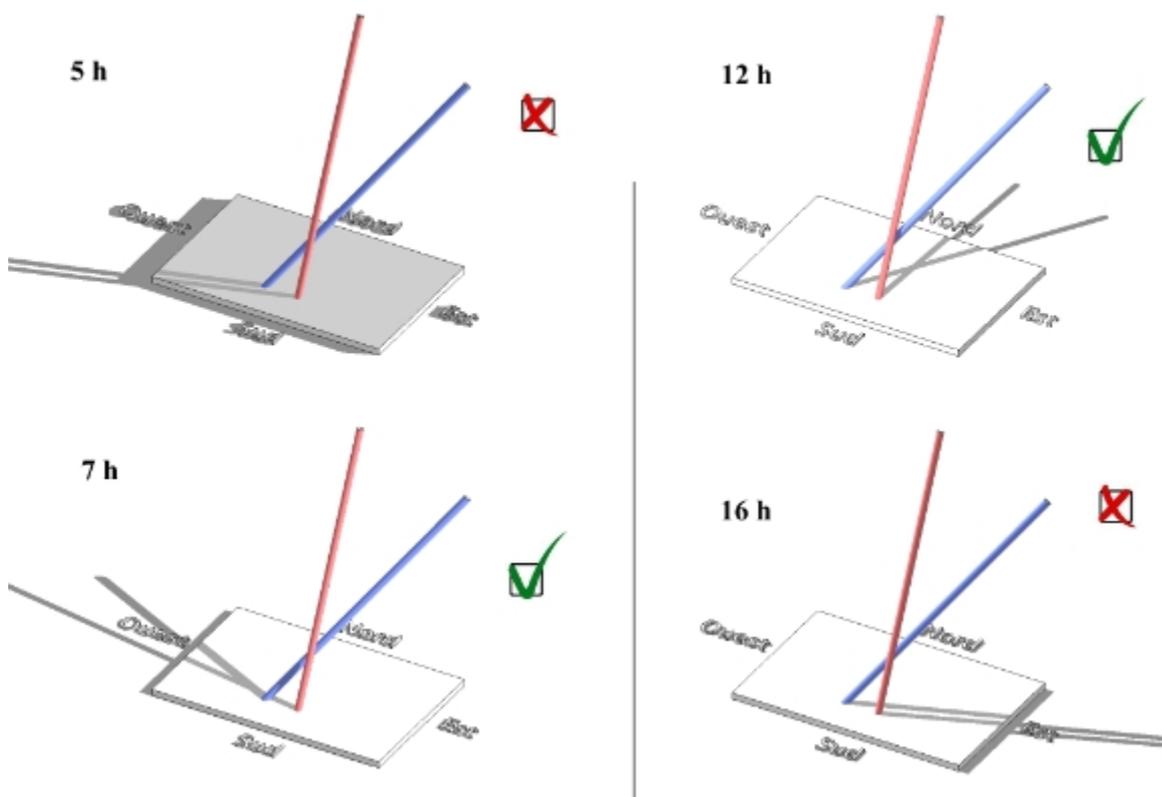


Fig. 6 Présentation de l'analyse géométrique 2D permettant d'identifier les cas où les demi-droites d'ombre $[M_{20} M'_2]$ et $[M_{10} M'_1]$ se coupent effectivement. Les données d'entrée sont les coordonnées de M_{10} et M_{20} ainsi que les angles α et β . La donnée de sortie est une information binaire (OUI ou NON) indiquant si les demi-droites se coupent ou non. Le code est fourni en annexe du CD ; il est probable qu'il existe une solution plus simple mais comme le temps de calcul n'est pas significativement augmenté par ce filtre, nous n'avons pas cherché à l'optimiser totalement.

Après le passage des deux filtres mentionnés, la principale caractéristique du cadran consiste en l'existence de deux domaines isolés : un grand domaine principal et un petit domaine qui correspond, dans cet exemple, à des soirées d'été (voir la couleur des courbes du zodiaque sur la figure 5C par exemple). La séparation en deux parties du tracé constitue un cas de figure exceptionnel pour un cadran solaire. Cette spécificité est expliquée sur la figure 7. On remarquera que, dans l'exemple proposé, la croix d'ombre ne parcourt le petit domaine qu'en soirée, et entre les équinoxes de printemps et d'hiver (voir aussi vidéo en annexe). En fonction de la configuration du cadran, d'autres possibilités apparaissent (voir infra).



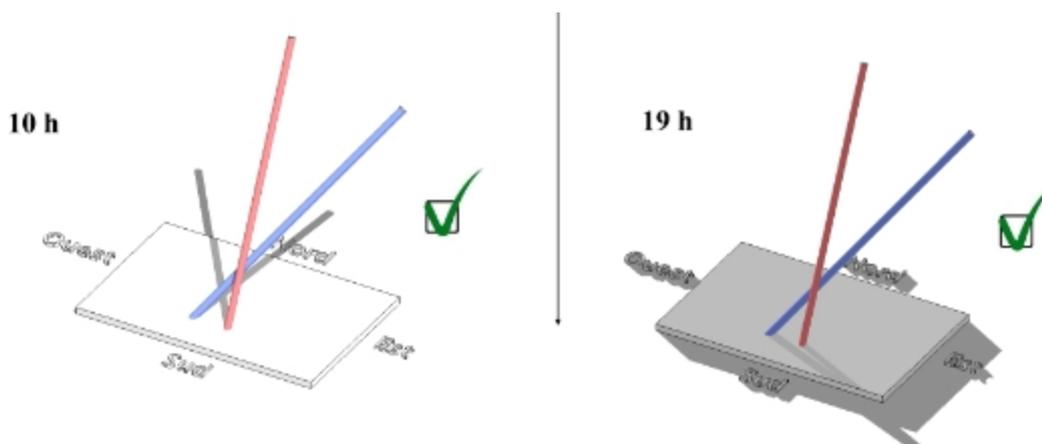


Fig.7. Simulation des ombres des fils, et de la croix d'ombre, au cours d'une journée proche du solstice d'été sur le cadran de la fig.1. Au matin, il n'y a pas de croix, elle apparaît quand le Soleil franchit l'axe E-W. Cette croix parcourt le cadran jusqu'au milieu de l'après-midi ou les ombres des fils ont tendance à se paralléliser. La croix ne réapparaît qu'en soirée, après que le Soleil a franchi une nouvelle fois l'axe E-W. A une date proche du solstice d'hiver, le Soleil ne franchit jamais l'axe E-W et la croix d'ombre n'atteint jamais le petit domaine.

6) INFLUENCE DES DIFFERENTS PARAMETRES

Le dessin de ce genre de cadran solaire est contrôlé par 6 paramètres fondamentaux en dehors des coordonnées géographiques. Si l'on considère que les angles peuvent varier par incrément de 5° seulement, et les distances par incrément de 50 pixels, on peut générer près de 780 millions de combinaisons de paramètres, soit autant de cadrans solaires *a priori* différents pour un seul lieu... nous ne les avons pas tous testés⁵ ! D'un autre côté, ce qui intéresse l'utilisateur qui souhaiterait réaliser un cadran bifilaire à fils quelconques : c'est de calculer un tracé qui corresponde aux caractéristiques suivantes :

- le tracé est optimisé par rapport à la surface de la table du cadran (ni trop grand ni trop petit)
- la proportion de surface utile (parcourue par la croix d'ombre au cours de l'année) est de l'ordre de celle souhaitée
- la position de la zone d'« aveuglement gnomonique » (période sans croix d'ombre) est à l'endroit souhaité.

Dans les lignes qui suivent nous allons essayer de dégager quelques règles correspondant à ces contraintes⁶. Dans ce qui va suivre, nous utiliserons une version simplifiée du logiciel qui dessine des lignes d'heure (temps vrai) et non des courbes en « huit ».

L'analyse de la figure 7 suggère que, plus la distance entre les deux points les plus proches des fils est faible, moins la période de l'« aveuglement gnomonique » sera longue. A la limite, quand les fils se touchent, il n'y a pas d'aveuglement, et le tracé est celui d'un cadran à style droit, le croisement des fils matérialisant le sommet de ce style. La minimisation de la distance en question est fonction de trois paramètres qui sont :

(1) l'écartement des points M_{10} et M_{20} . (2) l'existence d'un croisement de la projection des fils sur le plan horizontal et la distance de ce croisement avec les points M_{10} et M_{20} (3) la différence entre i_1 et i_2 . Dans les huit premiers exemples que nous étudierons (fig. 8), nous ferons en sorte que ces valeurs restent faibles de façon à minimiser la zone d'aveuglement.

⁵ Les auteurs seront reconnaissants aux utilisateurs du programme qui les feraient profiter de toutes observations originales.

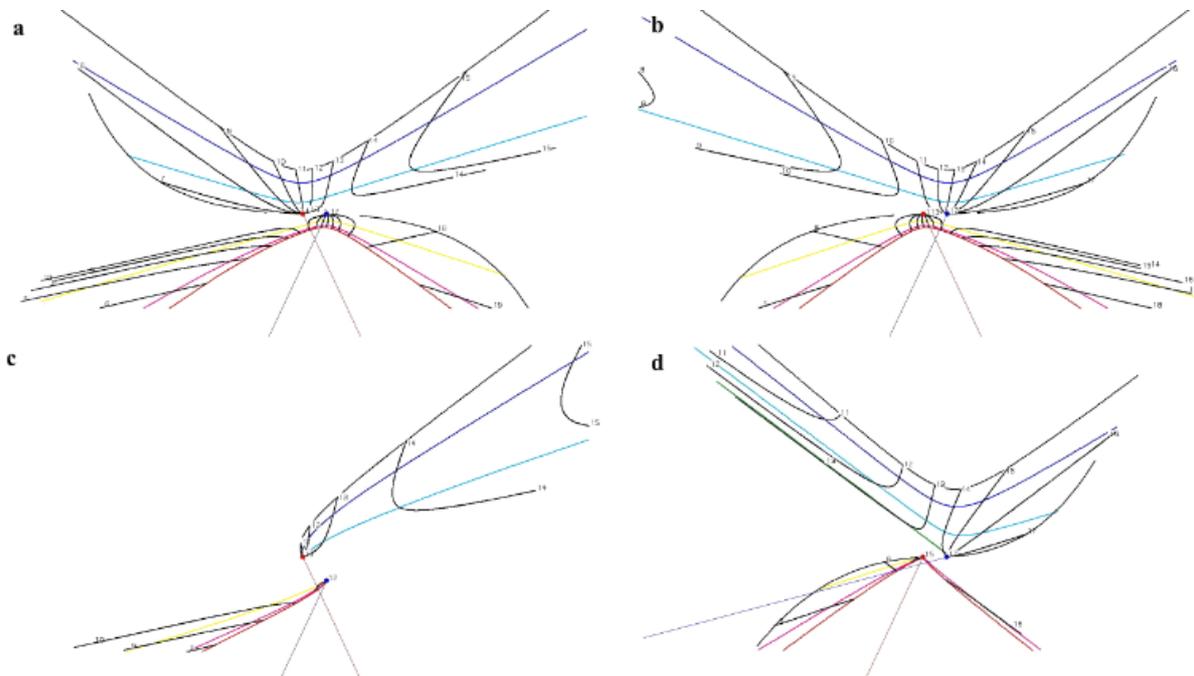
⁶ Idem note 4.

Par ailleurs, il faut noter que le rapport x_{20} / y_{20} est un rapport d'échelle ; le modifier, toutes choses égales par ailleurs, change la taille du cadran et non sa forme.

Dans l'exemple (a) les fils sont grossièrement inclus dans le plan équatorial⁷; sans surprise, la zone d'aveuglement correspond à l'équinoxe dont le tracé (en vert) a disparu. On notera une légère dissymétrie du tracé. Elle dépend de la différence entre la distance zénithale des deux fils. Il suffit de permuter les valeurs de i_1 et i_2 pour inverser la dissymétrie (b). Dans cette situation, toute modification des paramètres semble augmenter la zone d'aveuglement. C'est le cas si y_{20} n'est plus nul (c) ou si les fils subissent une rotation dans le même sens (d). Par contre, la combinaison de ces deux modifications se fait sans perte d'informations significative (e) ; on note seulement que la zone d'aveuglement quitte l'équinoxe pour devenir oblique, et parallèle au segment $[M_{10}M_{20}]$.

Quand les fils sont orientés vers le nord (f), on est dans un cas de figure similaire à celui que décrivent les figures 5 et 7. On signalera toutefois que la rotation d'ensemble du système filaire provoque, comme précédemment (e), une rotation de la zone d'aveuglement (g). On notera également que le rapprochement des fils (obtenu ici en rapprochant le point de croisement de la projection de fils sur le plan horizontal (h) permet l'apparition d'un troisième domaine, analogue au second évoqué dans le commentaire de la figure 7.

Il est clair que les lignes qui précèdent ne prétendent pas épuiser la question (d'autres exemples de tracé et de leurs évolutions en réponse à la modification d'un des 6 paramètres, sont proposés dans le diaporama fourni dans le CD). Ainsi, et à titre d'illustration des lacunes importantes qui demeurent dans notre analyse, le tracé de la figure 8i, qui n'est pas inintéressant, a été établi en ne respectant aucune des règles qui semblaient se dégager des considérations précédentes : les fils divergent, $[M_{10}M_{20}]$ est grand et l'écart entre i_1 et i_2 est important...



⁷ Des droites non sécantes ne peuvent être dans le même plan, il s'agit donc d'une approximation. En fait les projections des angles i_1 et i_2 dans le plan N-S vertical sont réparties de part et d'autre de la valeur de la latitude.

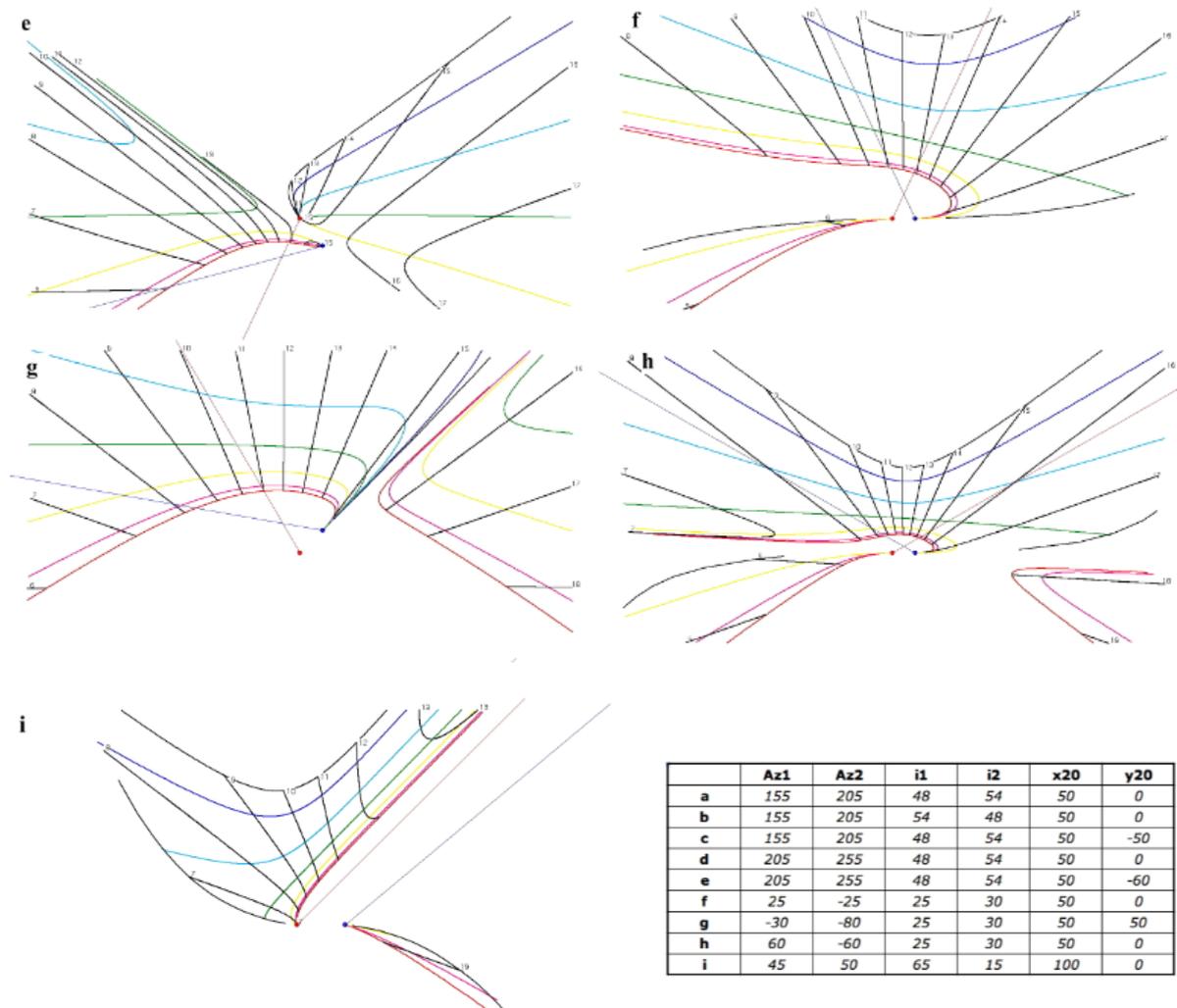


Fig. 8 . Quelques exemples de tracés de cadrans bifilaires à fils quelconques (temps vrai) à la latitude de 49°. Le tableau résume les valeurs utilisées (voir d’autres exemples sur le CD).

7) REMARQUES SUR LES LIGNES HORAIRES ET LES ARCS DIURNES.

A partir des représentations précédentes des figures horaires (fig. 5 et 8) se pose naturellement la question de la forme géométrique que peuvent prendre les lignes horaires et les arcs diurnes. Il a été établi que des discontinuités apparaissent (zone d’aveuglement), tirant essentiellement leur origine des gnomons produisant au cours de la journée des ombres parallèles. C’est au voisinage de ces discontinuités que les lignes horaires sont fortement déformées. En règle générale, les lignes horaires ne sont plus concourantes, bien que les figures 8g et 8h montrent que c’est encore possible et donc que certaines heures sont encore des lignes droites. L’étude initiale de ce type de cadran (Collin, 2005) a démontré que la ligne de midi est une conique (ou une droite lorsque la conique est dégénérée). C’est ce que l’on peut apercevoir dans les figures 8 : (a), (b), (c), (d) et (i). Qu’en est-il alors des autres lignes horaires ? Aucune démonstration rigoureuse n’a pu encore être établie à leur propos. On peut seulement se risquer à conjecturer (ou parier) que, puisque la ligne de midi est une section conique et qu’elle fait partie de la famille des lignes horaires, alors les lignes horaires⁸ prennent toutes les allures possibles d’une section conique. Les exemples sont nombreux si bien qu’il est difficile de ne pas émettre cette conjecture. Il faudrait mener une analyse numérique : puisque l’on sait tracer la figure complète, on a parfaitement accès aux

⁸ Que penser de l’aspect des lignes horaires de 16 h et 17 h de la figure 8e, ou des lignes horaires de 11 h, 13 h, 14 h de la figure 8d, ou encore de 14h et 15h de la figure 8a ?

coordonnées des points, et en particulier à l'ensemble des coordonnées des points d'une même ligne horaire. Il suffirait alors de traiter cet ensemble de coordonnées pour confirmer ou infirmer cette conjecture. C'est un travail laborieux qu'il faudrait envisager de mener à terme.

Qu'en est-il des arcs diurnes ? La difficulté est tout autre et plus profonde. Les arcs diurnes sont des courbes algébriques et peuvent prendre toutes les allures des courbes jusqu'au degré 4. La discontinuité du tracé due à la disposition des gnomons ne suffit pas à expliquer le changement de la nature des arcs diurnes. Par exemple, les figures 8f et 8h suggèrent la présence de sections coniques entre les équinoxes et le solstice d'hiver. Par contre, en été, les arcs diurnes ne sont plus des sections coniques mais des courbes de plus haut degré, et ce, bien avant l'apparition d'une quelconque discontinuité dans le tracé. L'allure de l'arc diurne est liée à la valeur simultanée des 6 paramètres. L'analyse s'arrête là par défaut de moyens ou de connaissance de méthodes permettant de déterminer la nature géométrique des arcs diurnes. De même, il est pour l'instant impossible de dire à l'avance ce que sera tel ou tel arc diurne. Il n'y a pas de raison de penser que le problème est sans solution ; il suffit de songer au cas des lignes horaires temporaires, par exemple. La nature de ces lignes est restée très longtemps inconnue avant que l'on parvienne enfin à savoir ce qu'elles sont vraiment⁹.

8) PERSPECTIVES ET CONCLUSIONS

Dans le cadre de l'analyse que nous venons de présenter, le cadran originel de Michnik (1923) apparaît comme un cas particulier avec certaines valeurs des paramètres fondamentaux. C'est également le cas pour les cadrans de la même famille étudiés par Collin (2002) (orientations filaires quelconques mais inclinaisons nulles). Par contre, pour l'instant la table du cadran est toujours horizontale.

Cette étude doit être comprise comme un travail introductif, nous n'avons pas le sentiment d'avoir clos le dossier du cas étudié. En rendant public l'algorithme (fig. 3) et logiciel (ce dernier est inclus dans le CD), nous espérons voir apparaître, d'ici peu, d'autres contributions sur le sujet. Parallèlement, nous menons un nouveau développement sur les cadrans verticaux déclinants à fils quelconques, suite logique de la présente étude.

REFERENCES :

- ° Collin D. (2002) Les cadrans solaires bifilaires à gnomons rectilignes quelconques *Observations & Travaux*, n°55, 12-31.
- ° Collin D. (2005) Vers une finalisation des cadrans bifilaires à fils rectilignes, *Cadran-Info* n°13, annexe.
- ° Collin D. (2007) Cadrans bifilaires (1923 à 2007), *Cadran-Info* n°16, p. 6-10.
- ° Dallet P. J. (2008) Calculs « cadran plan à style ponctuel », *Cadran-Info* n°18, p. 67-71.
- ° Massé Y. (1997-2012) Codes en Basic « *Ephéméride pour gnomoniste* » et « *Calcul des heures de passage au méridien / lever / coucher du soleil* » <http://yvon.masse.perso.sfr.fr/gnomon/>
- ° Michnik H. (1923) Theorie einer Bifilar-Sonnenuhr, *Astronomische Nachrichten*, 217 (5190), p. 81-90.
- ° Ziegeltrum F. (2010) *Traité abrégé de gnomonique*, auto-édition, 117 p.

⁹ Dossier sur les lignes horaires temporaires : *Cadran-Info* n° 21, 22 et 23.

⇒  **Dans la version numérique, vous trouverez en annexe :**

- le dossier "Bifilaire pour CD" comprenant :
- figures originales du présent article ;
 - figures (+ négatifs) n° 8-1 à 8-15 de Collin (2005) ;
 - code en FutureBasic5 (facilement adaptable à tous langages de programmation) de la routine du second filtre d'élimination des points fantômes ;
 - une vidéo (formats .flv et .m4v) présentant la géométrie du cadran de la fig. 8-6 de Collin (2005) et des figures 1, 2, 5 et 7 du présent article, avec deux simulations d'éclairement journalier à des dates proches des deux solstices ;
 - l'application Macintosh (exécutable) décrite dans l'article
 - un diaporama (format .pdf) illustrant quelques exemples de l'évolution du tracé en réponse à la modification progressive de certains paramètres.



Les trois singes de Ouchy (Suisse)

Envoyé par J. Theubet les trois singes du parc situé à côté du musée olympique de Lausanne, dans le quartier de Ouchy.

"Ne voir que d'un oeil, savoir se taire, entendre que d'une oreille, oui mais... être toujours à l'heure".



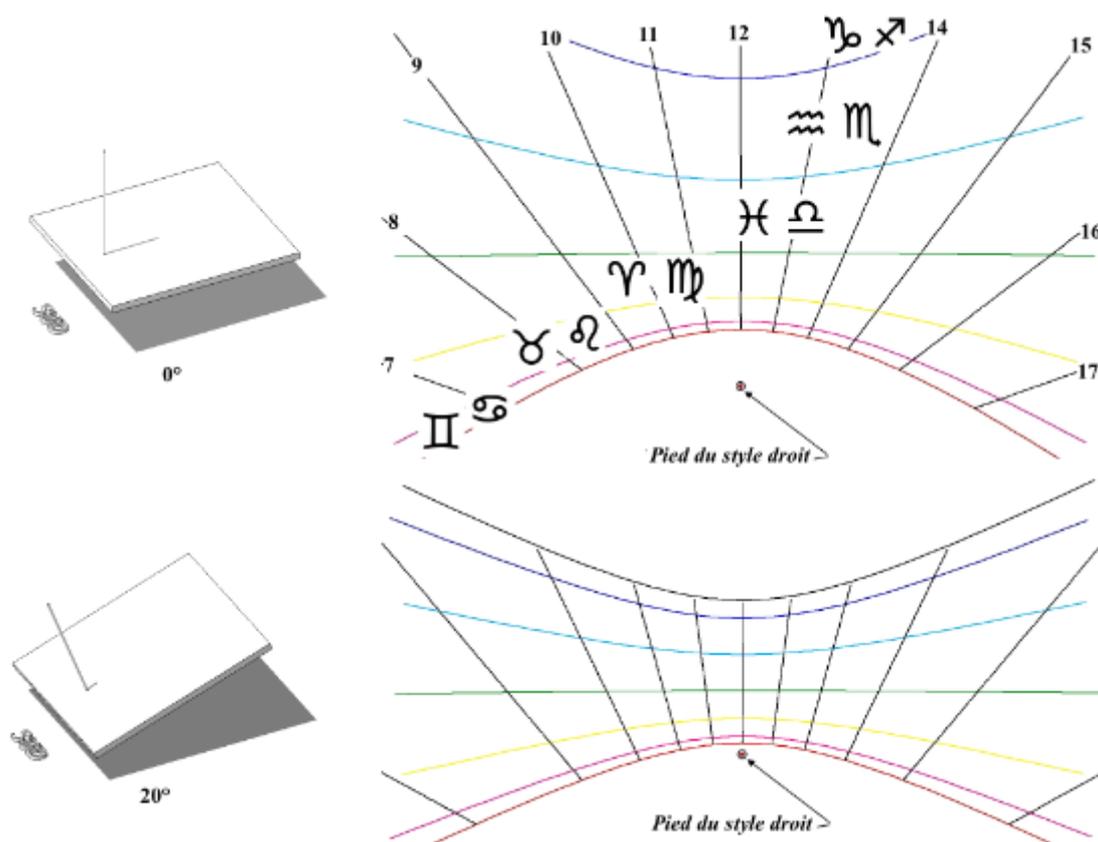
L'expérience de Flammarion et sa comparaison avec le modèle numérique

Flammarion nous propose de prendre le jour du solstice d'été à midi, un cadran horizontal à style droit et de l'incliner progressivement vers le sud de façon que l'ombre diminue. A partir du moment où le basculement a commencé, le tracé du cadran horizontal est devenu faux et Flammarion n'y fait d'ailleurs plus jamais allusion.

Dans mon expérience numérique, il est facile de calculer et de redessiner un cadran méridional incliné à style droit pour chaque étape du basculement (fig.1). Très vite, l'ombre disparaît : le style pointe la direction du Soleil. Le mouvement de basculement doit se figer 3 ou 4 [sic] degrés après cette étape, c'est-à-dire quand une petite ombre orientée vers le sud est apparue.

Dans les conditions de l'expérience, et selon Flammarion, l'inclinaison devrait être proche de $28,34^\circ$. C'est cette valeur, que j'ai retenue pour l'expérience numérique car elle est cohérente avec le dessin du cadran obtenu (base du style proche, mais au nord de l'arc du solstice d'été, et donc ombre courte vers le sud à midi le jour de ce solstice). Nous avons alors un dispositif qui devrait permettre d'illustrer la rétrogradation de l'ombre.

Tout de suite une constatation : le cadran calculé pour ce cadran incliné méridional ne se présente pas avec des arcs diurnes en « Z » et des lignes d'heures qui se croisent. C'est dommage, mais je m'y attendais un peu, la rétrogradation de l'ombre étant un phénomène qui ne saute pas aux yeux !



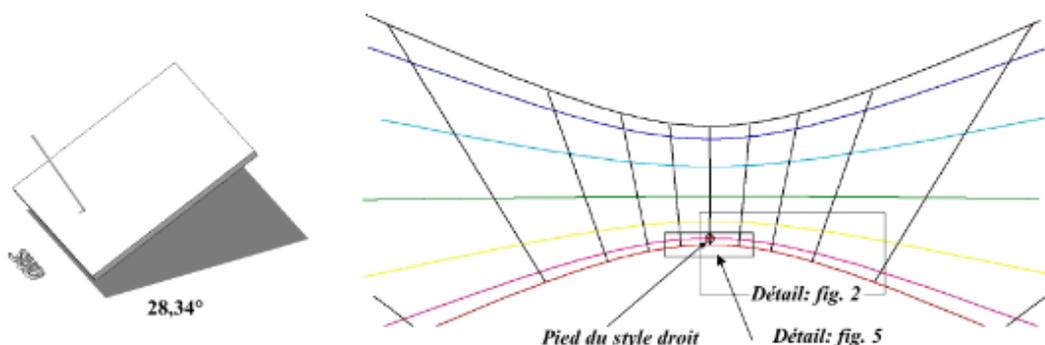
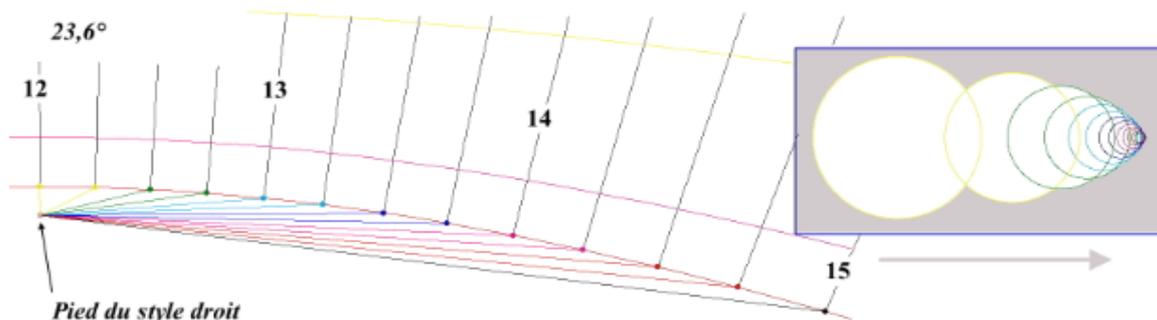


Fig.1 . La mise en place du dispositif de l'expérience et le dessin du cadran correspondant à chaque étape.

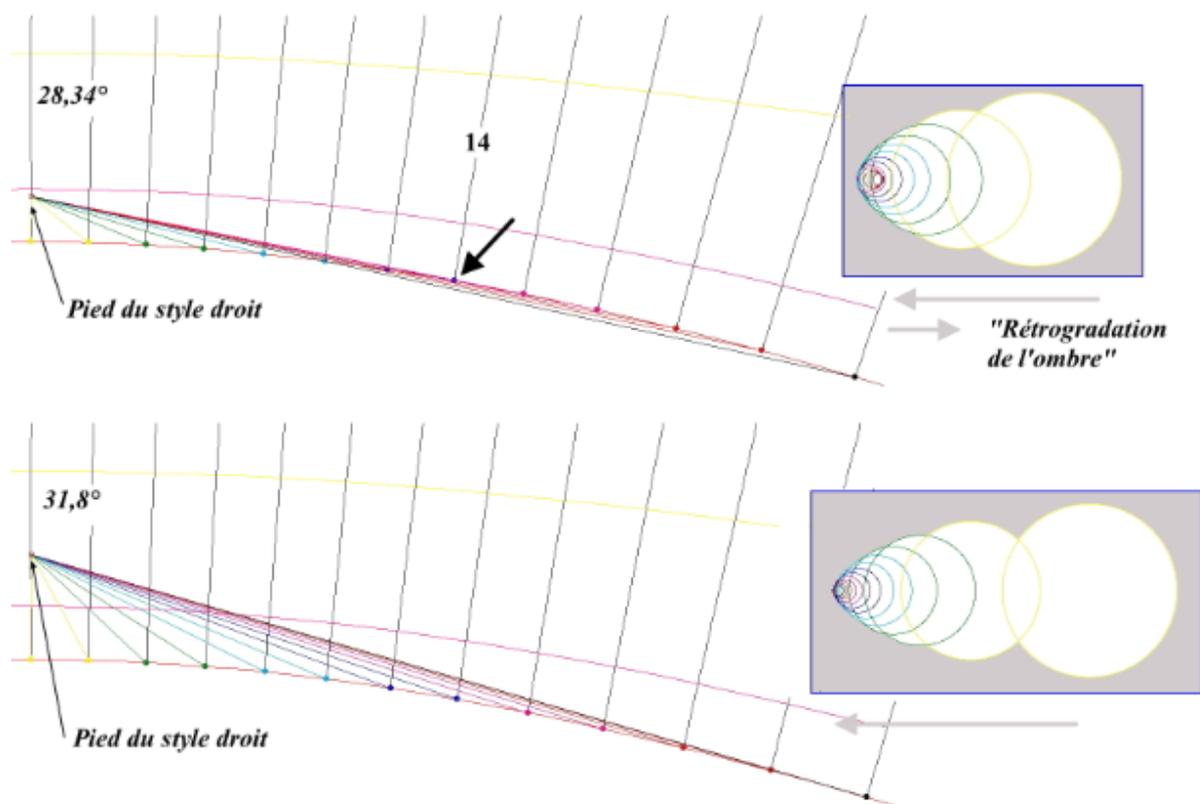
Flammarion nous dit que c'est l'ombre du début d'après-midi de ce jour de solstice qui va présenter une rétrogradation. Pour suivre ce phénomène, nous allons concentrer notre attention sur la partie correspondante du cadran² (fig. 2 localisée sur la fig.1). Cette figure montre un extrait de trois cadrans calculés pour trois configurations différentes ; un cadran avec une inclinaison critique de 28,34° et, pour comparaison, deux cadrans avec d'autres inclinaisons (une plus forte et une plus faible) où la rétrogradation ne devrait pas avoir lieu.

Sur ces trois cadrans, le programme a calculé des lignes horaires tous les quarts d'heure et a tracé, en couleur, les ombres du style pour ces différents instants. Chacune de ces ombres joint la base du style avec l'intersection de l'arc diurne du solstice d'été et la ligne horaire correspondante. Sur la figure, j'ai fait ajouter par le programme un petit disque à la pointe de l'ombre ; il s'agit d'une image très approximative de ce que serait l'ombre d'une bille fichée au sommet du style.

La figure 2 illustre la dynamique de l'ombre dans chacun de nos trois cadrans, les couleurs nous aident à appréhender la chronologie des étapes illustrées. Imaginons trois observateurs situés au niveau des styles et regardant le déplacement des ombres.



² En fait, le phénomène est symétrique le matin, mais je ne reproduis ici que l'expérience de Flammarion.



soit toujours dans le même sens, soit en présentant une rétrogradation.

- dans le cas du cadran trop faiblement incliné ($23,6^\circ$), l'observateur va voir, entre 12 h et 15 h, la pointe l'ombre s'éloigner (la tache sommitale diminuer) mais surtout l'ombre tourner vers la droite (la valeur angulaire croît ; tableau 1) ;
- dans le cas du cadran trop fortement incliné ($31,8^\circ$), l'observateur va voir aussi, entre 12 h et 15 h, la pointe de l'ombre s'éloigner (la tache sommitale diminuer), mais, cette fois, l'ombre va tourner vers la gauche (la valeur angulaire décroît ; tableau 1) ;
- enfin, dans le cas du cadran ayant, selon Flammarion, la bonne inclinaison, la pointe de l'ombre va toujours s'éloigner, mais l'ombre va d'abord aller vers la gauche, puis vers la droite ; l'inversion se fait vers³ 14 h \pm ¼ h ; ce résultat est conforme à la description de Flammarion ; c'est ce phénomène que l'on appelle la « rétrogradation de l'ombre ».

Notons que, dans les conditions de latitude de l'expérience, et contrairement à ce qui se passe dans la zone intertropicale (Savoie 1997), le Soleil ne passe pas deux fois au même azimut au cours de l'après-midi ; c'est l'ombre et elle seule qui, sur son plan incliné, parcourt ce drôle d'itinéraire (tableau 1).

³ Le calcul réalisé avec un pas de temps plus fin permet de fixer l'inversion à 14 h 01 \pm 01 s. Flammarion avait obtenu 14 h 12. Cette différence est en fait non significative, l'ombre demeurant très proche de sa valeur limite (différence inférieure à $0,1^\circ$) pendant 33 minutes (13 h 47 à 14 h 20).

Heure	Azimut du Soleil	Orientation de l'ombre		
		Inclinaison du cadran		
		23,6°	28,34°	31,8°
12 h 0	0,00	0,00	180,00	180,00
12 h 15	7,98	62,61	130,61	151,71
12 h 30	15,78	76,58	114,07	133,40
12 h 45	23,27	82,24	107,64	122,97
13 h 0	30,33	85,53	104,57	116,83
13 h 15	36,90	87,84	102,95	113,00
13 h 30	42,97	89,66	102,09	110,52
13 h 45	48,56	91,19	101,68	108,87
14 h 0	53,71	92,56	101,56	107,77
14 h 15	58,45	93,82	101,63	107,05
14 h 30	62,83	95,01	101,85	106,60
14 h 45	66,90	96,15	102,18	106,37
15 h 0	70,71	97,27	102,59	106,30

Tableau 1 . Détail des résultats de calculs entre 12 h et 15 h (l'azimut est calculé dans le plan de l'horizon ; l'orientation de l'ombre est donnée dans le plan du cadran). Trois inclinaisons du cadran (idem figure 2) sont envisagées, en vert les données d'orientation décroissante, en rouge les données croissantes.

Commentaires et extensions de l'expérience

Chacun comprendra l'intérêt de la modélisation (expérience numérique) qui permet, quand le programme est validé, de recommencer l'observation à une date et à une heure données autant de fois que souhaité, et ce, après avoir éventuellement changé la valeur d'un paramètre. Dans le cas présent, l'expérience originale de Flammarion a pu être reproduite avec ses paramètres originaux, ce qui valide le modèle informatique et, par voie de conséquence, les autres expériences numériques que j'ai réalisées (autres inclinaisons du cadran), ou que je vais être conduit à tenter (autres dates, autres périodes de la journée⁴).

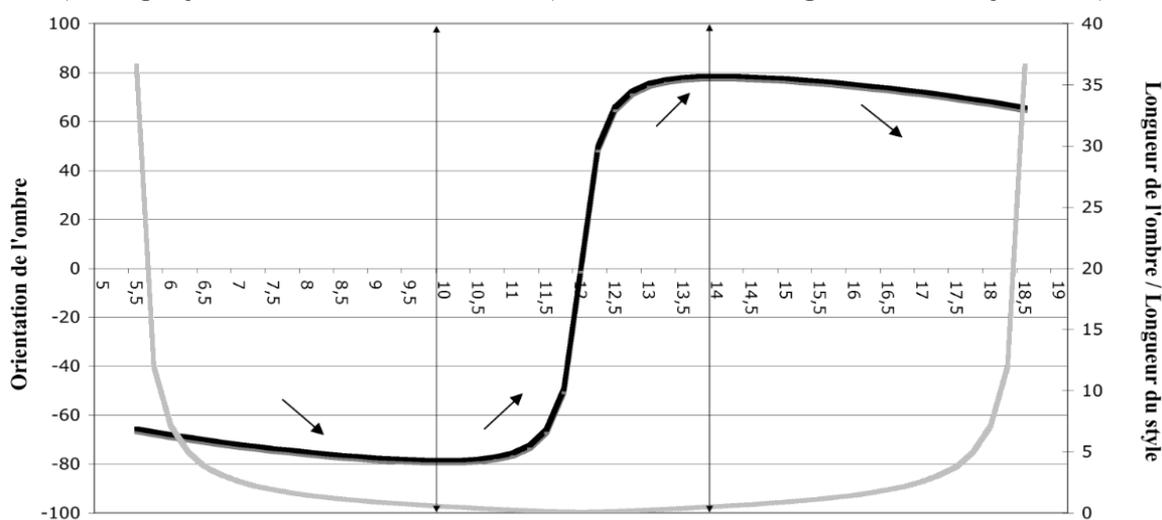


Fig.3 . Evolution de la longueur de l'ombre (en gris) et de son orientation au cours de la journée dans les conditions de l'expérience. La rétrogradation a lieu de 10 h à 14 h et l'on constate que le phénomène est symétrique par rapport à midi.

⁴ Et même, pourquoi pas, d'autres lieux, mais ce n'est pas l'objet ici.

1) Ainsi, la figure 3 illustre le phénomène sur la journée. La rétrogradation a lieu de 10 h à 14 h et l'on constate que le phénomène est symétrique par rapport à midi. Le changement de direction a l'air brutal sur la figure, mais il n'a lieu que quand l'ombre est très petite. Sur le cadran, la modification de trajectoire de l'ombre demeure très discrète.

2) Dans le compte rendu de l'expérience de Flammarion, l'un des paramètres est fixé de façon assez arbitraire ; c'est l'inclinaison du cadran qui doit être « de 3 ou 4 » degrés de plus que la position où l'ombre disparaît. Il serait intéressant de se poser la question des limites dans lesquelles peut jouer ce paramètre. La figure 4 représente l'orientation de l'ombre le matin (le phénomène étant symétrique) en fonction de l'inclinaison du cadran. On constate que :

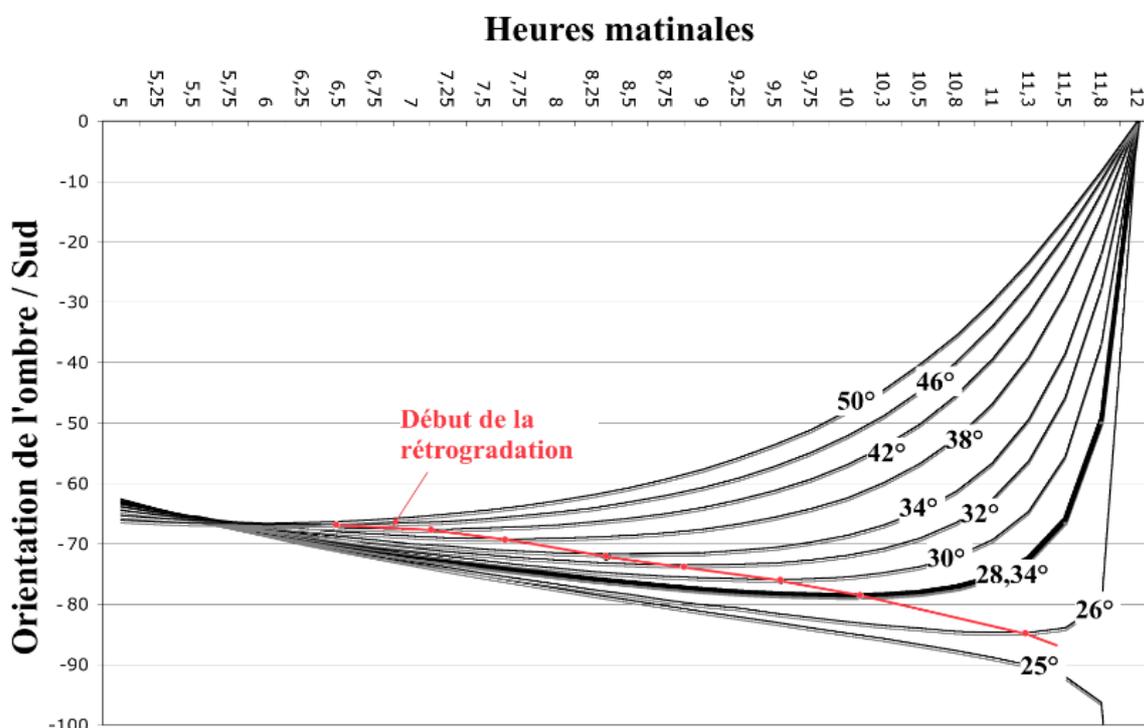


Fig.4 . Evolution de l'orientation de l'ombre le matin, en fonction de l'inclinaison du cadran.

La courbe en gras est la même que la partie gauche de la courbe de la figure 3.

- quand l'inclinaison est de 25°, il n'y a pas de rétrogradation, l'ombre tourne dans le sens des aiguilles d'une montre ; la rétrogradation ne va commencer qu'avec une inclinaison de 25,37°, c'est-à-dire quand le style est dans l'alignement du Soleil (latitude – déclinaison = 25,37°) ;
- à 26° d'inclinaison, on observe la rétrogradation : elle commence vers 11 h 15 (et se termine vers 12 h 45) et elle correspond à un déplacement de l'ombre de - 87,7° à + 87,5° ;
- avec des inclinaisons plus importantes, la rétrogradation commence plus tôt (9 h 30 à 30° ; 7 h 15 à 42° etc... et son ampleur est plus faible respectivement 2 x 75,9° et 2 x 67,6°) ;
- à 50° d'inclinaison du cadran, elle disparaît ; alors que précédemment l'ombre tournait dans le sens des aiguilles d'une montre, avec un épisode de plus en plus long de rétrogradation ; à partir de cette inclinaison toute sa trajectoire se fait dans le sens

inverse des aiguilles d'une montre.

On remarquera également que, dans la figure 2, j'avais pris une inclinaison de $31,8^\circ$ pour illustrer l'absence de rétrogradation ; en fait, on constate que la rétrogradation a lieu, mais de 8 h 45 à 15 h 15, soit en dehors des limites de la figure 2 ; elle n'est donc pas identifiable sur celle-ci.

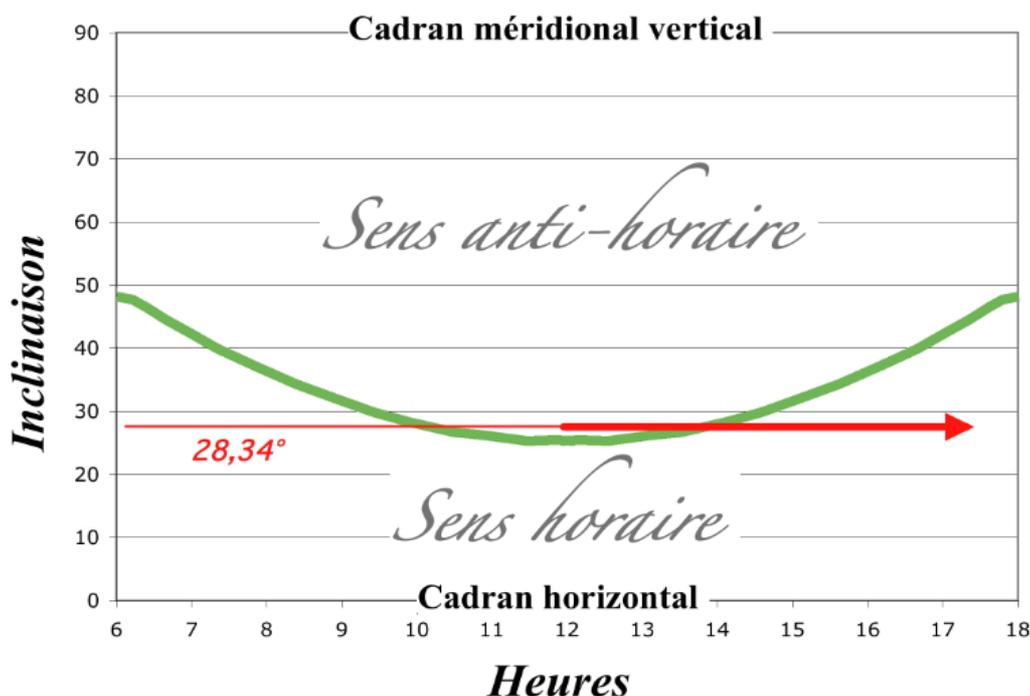


Fig. 5 . Sens de rotation de l'ombre selon l'inclinaison du cadran méridional **au solstice d'été** à Jusivy. Le passage d'un sens à l'autre se fait progressivement, cette zone intermédiaire est le domaine de la rétrogradation de l'ombre. Plus on s'éloigne du solstice, plus la limite s'horizontalise.
La flèche rouge en gras indique l'expérience de Flammarion (1885).

Ces observations peuvent être analysées, sur le plan qualitatif, de la manière suivante : sur les cadrans verticaux ; l'ombre tourne dans le sens antihoraire dans l'hémisphère Nord ; sur les cadrans horizontaux, c'est l'inverse. Au solstice d'été, si on incline un cadran pour aller d'une position extrême à l'autre, le changement de sens de rotation n'est pas homogène sur la journée: la zone de transition constitue le domaine de la rétrogradation de l'ombre (fig. 5).

3) On peut aussi se demander sur quelle période de l'année la rétrogradation est visible à Jusivy, dans les conditions de l'expérience, c'est-à-dire avec un cadran incliné à $28,34^\circ$. Les simulations des ombres sur le cadran (fig. 6) montrent que la rétrogradation va se manifester dès que le Soleil passe, à midi, dans l'alignement du style, c'est-à-dire vers le 21 mai dans les conditions choisies par Flammarion. Bien sûr, la rétrogradation ne dure alors que quelques minutes. Le 26 mai, sa durée est d'environ 2 heures et elle augmente progressivement pour atteindre environ 4 heures le jour du solstice. Corrélativement l'ampleur de cette rétrogradation diminue pour passer, du 26 mai au 21 juin, de la valeur de $2 \times 84,1^\circ$, à celle de $2 \times 78,5^\circ$. Si l'on traçait une figure équivalente à la figure 5 pour d'autres périodes de l'année,

on constaterait que la limite s'horizontaliserait progressivement pour s'aplatir complètement un mois avant le solstice et après-celui-ci.

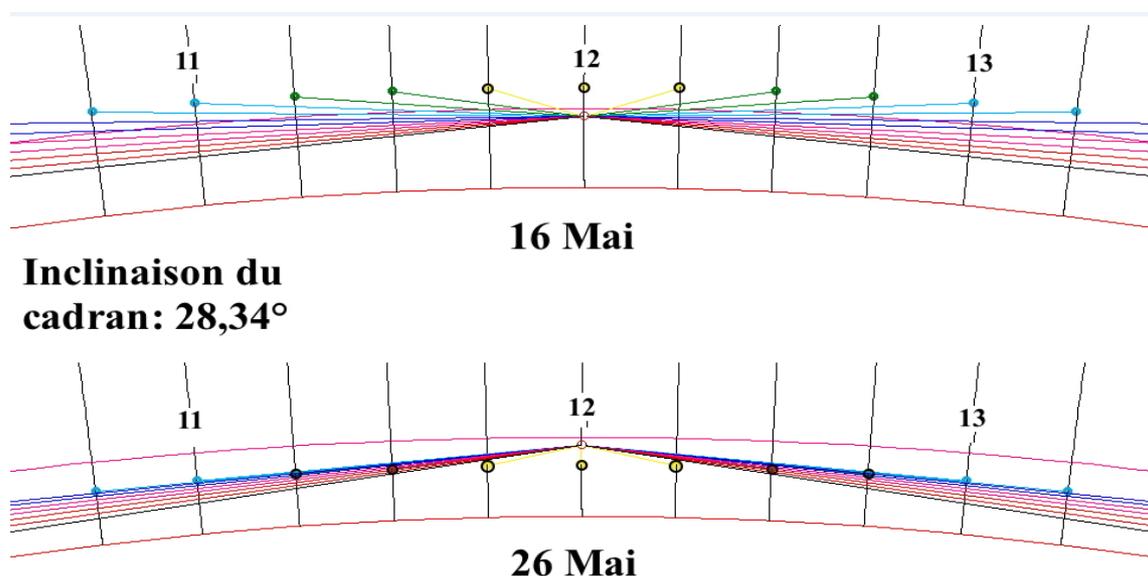


Fig. 6 . Positions des ombres les 16 et 26 mai sur des agrandissements de la région centrale du cadran solaire incliné à 28,34° (localisation fig.1). Les taches d'ombre sommitale sont situées sur l'arc diurne correspondant à la date. On constate que la rétrogradation est visible à la condition que, à midi, le soleil passe au nord du style.

La rétrogradation est donc un phénomène que l'on peut observer à Jusivy dans des conditions moins strictes que ne l'avait laissé entendre Flammarion. Avec l'inclinaison de cadran qu'il avait choisie, elle est observable environ un mois avant et un mois après le jour du solstice d'été. Ce jour-là, le cadran tolère une inclinaison variant de (environ) 25,5° à 49°. Cela dit, il est évident que les conditions fixées par Flammarion constituent un excellent compromis.

Conclusions

Sur le plan du résultat, il apparaît que la rétrogradation de l'ombre est un phénomène lent et (très) discret que seul un observateur attentif, patient et situé au niveau du style a une chance d'observer (voir par exemple la vidéo proposée dans le CD qui reproduit les conditions de l'expérience originale). On sait que, dans la zone intertropicale, il est inutile d'incliner le cadran pour obtenir la rétrogradation à la bonne période (Flammarion 1885, Gheury 1907, Savoie 1997) ; c'est en quelque sorte le plan horizontal qui est inclinée vers le sud par rapport à nos régions. Il en découle que tout piquet respectant la verticale locale peut servir à mettre en évidence la rétrogradation. Dans son article de 1885, Flammarion s'interroge sur le fait qu'aucun voyageur n'ait mentionné le phénomène :

« Il est singulier que l'on n'ait jamais remarqué le fait sous les tropiques ; il faut croire qu'on n'a jamais eu la curiosité d'y observer un cadran solaire horizontal à style vertical [sic] ».

En fait, vu la nature, la lenteur et la discrétion du phénomène, il me semble qu'il n'y a pas de quoi être pas surpris...

Bien que consacré par l'usage, le terme « rétrogradation » paraît un peu abusif ; ce n'est pas l'ombre qui rétrograde, mais son sens de rotation. Le terme a donc, dans ce contexte, une acception strictement astronomique.

Pour terminer et puisque l'on peut difficilement écrire sur la rétrogradation de l'ombre sans évoquer Ezéchias, le cadran d'Achaz, et le miracle d'Isaïe, je dirais un peu comme une boutade, que le plus grand miracle contenu dans l'anecdote biblique est le fait qu'Ezéchias, agonisant dans son lit, ait pu observer et quantifier le phénomène, ou au moins qu'il ait pu se convaincre de sa réalité !

Références

- ° Delmotte G. (1923) Cadran solaire Flammarion à rétrogradation, *l'Astronomie*, p. 408-409.
- ° Flammarion C. (1885) Le cadran solaire à rétrogradation de l'Observatoire de Juvisy et le miracle d'Isaïe, *l'Astronomie*, p. 321-329.
- ° Gheury E.J. (1907) Notes sur la rétrogradation de l'ombre, *Bull. Soc. Belge Astronomie*, 12, 187-196.
- ° Guillemin E. (1885) Théorie, formules et épures de la rétrogradation de l'ombre, *l'Astronomie*, p. 329-340.
- ° Ozaman J. (1778) *Récréations mathématiques et physiques*, tome III.
- ° Parisot J. P. (1985) La rétrogradation de l'ombre dans les cadrans solaires analemmatiques, *Journal of the History of Astronomy*, XVI, p. 43 - 48.
- ° Salibi K. (2010) Sundial Experiments in Abha, Saudi Arabia : Biblical Jerusalem was in that Vicinity : (<http://kamalsalibi.blogspot.fr/2010/07/sundial-experiments-in-abha-saudi.html>).
- ° Savoie D. (1997) *Gnomonique moderne*, Editions SAF.
- ° Savoie D. (2004) *Les cadrans solaires*, Editions Belin.
- ° Rohr R. R. J. (1986) *Les cadrans solaires (histoire, théorie, pratique)*, Editions Oberlin.

⇒ Dans la version numérique, vous trouverez en annexe :

- le dossier "Retrogradation E_Mercier" comprenant :
 - ° figures originales de l'article (grand format),
 - ° l'article de Flammarion (1885) pour comparaison,
 - ° vidéo de la modélisation de l'expérience originale montrant que c'est difficile à voir ! (à passer au ralenti !).





Cadran sur calotte sphérique

Jean PAKHOMOFF

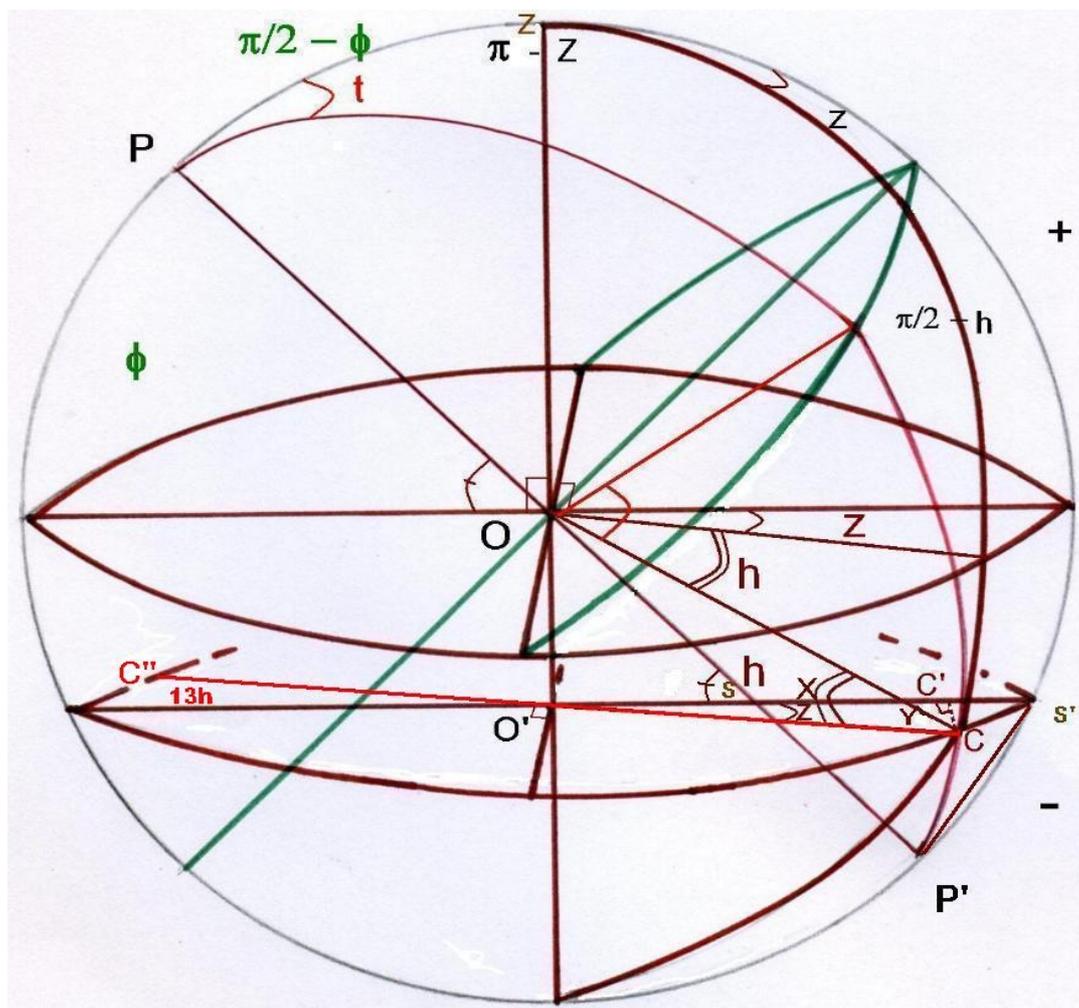
Etude théorique d'un cadran solaire tracé sur le périmètre d'une calotte sphérique.

Tracer un cadran solaire sur le périmètre d'une calotte sphérique revient à trouver les coordonnées horizontales de l'intersection du vertical et du cercle horaire choisi sur le cercle au sommet de la calotte.

Nous aurons à nous servir dans ce travail de la formule :

$$\operatorname{tg} t = \sin Z / (\operatorname{tg} h \cos \phi + \cos Z \sin \phi) \quad (1)$$

où, t est l'angle horaire choisi, h la hauteur de l'intersection du cercle horaire et du vertical, Z l'azimut de celle-ci et ϕ la latitude.



Soit donc une sphère céleste de centre O, d'axe polaire OP. Soit un horizon O de latitude ϕ .

Un cercle horaire PC correspondant à l'angle horaire t coupe le vertical ZC en C sur la calotte, dont le plan horizontal est O'C'C.

Cette calotte est arbitrairement choisie de façon que $OO' = z$.

On aura $z / O'C = \text{tg } h$, où h sera la hauteur sur la sphère du point C. Dans notre cas de figure, le point C étant sous l'horizon, la hauteur doit être comptée négativement. Ainsi, dans le triangle paralactique PZC, on a $ZC = \pi / 2 - h$ (avec $h < 0$).

$$\text{Donc } O'C = z / \text{tg } OCO' = z / \text{tg } (\pi / 2 - h - \pi / 2) = z / (-h).$$

Le problème essentiel est de trouver l'azimut Z. A partir de la formule (1) nous pouvons écrire :

$$\text{tg } t \text{ tg } h \cos \phi + \text{tg } t \cos Z \sin \phi = \sin Z.$$

En élevant au carré les deux membres de cette équation et après développement il vient :

$$\cos^2 Z (\text{tg}^2 t \sin^2 \phi + 1) + \cos Z (2 \text{tg}^2 t \text{ tg } h \sin \phi \cos \phi) + \text{tg}^2 t \text{ tg}^2 h \cos^2 \phi - 1 = 0.$$

$$X^2a + Xb + C = 0.$$

ce qui est une équation du second degré, donnant deux racines dont l'une répond à la question.

Exemple chiffré :

$h = -30^\circ$, $\phi = 43^\circ$, $t = 15^\circ$ (1 heure de l'après-midi). On trouve alors :

$$a = 1,03339424 \quad b = -0,0413509 \quad \text{et } C = -0,9871991$$

ce qui nous donne : $Z = 4,2918^\circ$ et $Z = 163,25^\circ$. La valeur à retenir est 4,2918 car sous l'horizon l'angle d'azimut devient plus petit que l'angle horaire.

En projetant c sur O'C' on trouve :

$$O'C' = O'C \cos Z = z \cos Z / \text{tg } h = X$$

$$CC' = O'C \sin Z = z \sin Z / \text{tg } h = Y$$

Si on choisit un rayon de la sphère origine égal à 0,5 m avec les paramètres ci-dessus on obtient :

$$z = OC \sin h = 0,5 \sin -30 = -0,25$$

$$O'C = z / \text{tg } (h) = -0,25 / -0,57735 = 0,433 \text{ m}$$

$$O'C' = X = 0,4317 \text{ m et } CC' = Y = 0,0324 \text{ m}$$

On fera ces calculs pour chaque heure de façon à positionner les " points d'heure ".

Il faudra en outre prendre le point C'' symétrique de C sur la calotte sphérique par rapport à O pour obtenir le point de 13 h correspondant à l'angle horaire $t = 15^\circ$; on opérera de la même façon pour tous les autres angles horaires.

De même, par symétrie et sans autres calculs, on obtiendra les heures du matin.

Par le point S situé sur O'S' sortira le style faisant un angle ϕ avec l'horizontale dans le plan méridien. On pourra pour cela construire un triangle gabarit SS'P'.

On aura :

$$SP' = PP' - OS = 2R - (R + z / \sin \phi) = R + z / \sin \phi ;$$

$$SS' = O'S' - O'S = O'C - O'S = z / \operatorname{tg} h - z / \sin \phi ;$$

$$P'S'^2 = SP'^2 + SS'^2 - 2 SP' SS' \cos \phi \quad \text{d'où } P'S'.$$

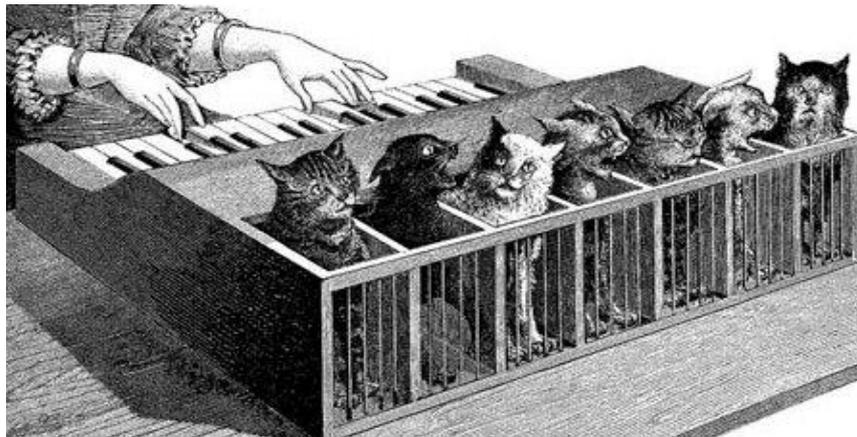
Une fois ce triangle convenablement positionné dans le plan méridien, on fera glisser sur le côté SP' l'axe polaire.

Le 6 septembre 2001



Les chats d'un gnomoniste

Le P. Athanasius Kircher, ingénieur savant jésuite du 16^e siècle, à qui l'on doit la première symphonie de coqs ou les plans de l'orgue divin de la Création originelle, est bien connu des gnomonistes¹ par ses écrits sur cette science. Il était également le sympathique inventeur d'un instrument de musique, destiné à amuser un prince italien blasé, qui ravira les allergiques aux chats :



"Il suffit de sélectionner des chats dont les miaulements naturels varient en hauteur, puis de les ranger côte à côte dans des petites boîtes. Lorsqu'une touche de piano est pressée, le mécanisme abat une aiguille pointue sur la queue du chat adéquat. Il en résulte une mélodie de miaous qui gagne en vigueur à mesure que les chats perdent espoir. Qui ne rirait pas au son d'une telle musique ?"

Depuis le 16^e siècle, bien sûr, les choses ont changé; nous avons inventé la compassion. Enfin, presque.

(via V/e make money not art) communiqué par P. Gagnaire.

1 - *Cadran Info* n° 15 mai 2007 : Gnomonique d'Athanasius Kircher.



Heure et date d'après le Soleil

Jean PAKHOMOFF

Etude de la connaissance de l'heure et de la date par la mesure de la direction et de la hauteur du soleil sur un horizon de latitude donnée.

Soit une sphère céleste de centre O avec le soleil S sur un horizon de latitude ϕ .
Par S passe le cercle horaire O's correspondant à l'angle horaire t donnant avec l'horizon l'angle H. Par S passe aussi le vertical PnS donnant avec l'horizon l'angle d'azimut Z.

Le cercle horaire donne avec l'équateur l'angle SOE égal à δ , la déclinaison du moment.

Par un point O' de l'axe polaire, abaissons une perpendiculaire en A sur la méridienne de façon à obtenir le cadran horizontal O'AO de style OO' égal à l. Le vertical passant par O'A coupe la ligne horaire en P. Le rayon solaire de hauteur h passant par O' vient en P puisque un rayon est la trace de l'intersection du cercle horaire avec le vertical de l'astre.

Projetons P sur la méridienne en P'.

On peut alors écrire que :

$$O'A / AP = \operatorname{tg} h ; \quad AP = l \sin \phi / \operatorname{tg} h ; \quad AP' = AP \cos Z = l \sin \phi \cos Z / \operatorname{tg} h ;$$

$$PP' = AP \sin Z = l \sin \phi \sin Z / \operatorname{tg} h ; \quad OP' = OA + AP' = l \cos \phi + l \sin \phi \cos Z / \operatorname{tg} h$$

$$PP' / OP' = \operatorname{tg} H ; \quad PP' = OP' \operatorname{tg} H, \quad \text{d'où :}$$

$$l \sin \phi \sin Z / \operatorname{tg} h = l \cos \phi \operatorname{tg} H + l \sin \phi \cos Z \operatorname{tg} H / \operatorname{tg} h.$$

En divisant cette dernière égalité par $l \sin \phi$ et en la multipliant par $\operatorname{tg} h$, on obtient :

$$\sin Z = \operatorname{tg} H \operatorname{tg} h / \operatorname{tg} \phi + \cos Z \operatorname{tg} H.$$

En remplaçant $\operatorname{tg} H$ par sa valeur connue $\operatorname{tg} t \sin \phi$ on obtient après simplification :

$$\operatorname{tg} t = \sin Z / (\operatorname{tg} h \cos \phi + \cos Z \sin \phi) ;$$

ce qui permet d'avoir l'heure à partir de l'azimut, de la latitude et de la hauteur.

Connaissant t, passons alors au triangle paralactique PnO'S où

$$PnS = \pi / 2 - h \quad O'S = \pi / 2 - \delta \quad \text{et} \quad PnO' = \pi / 2 - \phi \quad PnO's = t \quad \text{et} \quad O'PnS = \pi - Z.$$

$$\text{On a donc } \sin t / \sin PnS = \sin (\pi - Z) / \sin (\pi / 2 - \delta) \quad \text{ou} \quad \sin t / \cos h = \sin Z / \cos \delta$$

$$\text{et } \cos \delta = \sin Z \cos h / \sin t,$$

ce qui permet de connaître la date à choisir entre deux dates possibles.



Astrolabe solaire

Francis Reymann

Présentation détaillée d'une réalisation par F. Reymann d'un cadran dit astrolabe solaire présenté en réunion de notre commission en octobre 2012.

La maquette ci-contre est un astrolabe solaire : « astrolabe » parce qu'il utilise le principe de la projection stéréographique pour superposer une position sidérale avec des lignes géographiques ; « solaire » parce que le tracé ne reprend que le Soleil.

Cette réalisation présente plusieurs particularités :

- c'est l'horizon qui tourne devant l'astre ;
- la lecture de la trajectoire diurne se fait dans la zone « sous l'horizon » ;
- les coordonnées locales sont tracées pour deux lieux de la Terre.



- C'est l'horizon qui tourne devant l'astre.

Cette disposition sépare bien la position du Soleil, qui évolue sur le rayon vertical supérieur - angulairement à l'équation de temps près - et le mouvement de la Terre, reproduit ici par un mouvement de 24 heures¹.

- La lecture de la trajectoire diurne se fait sous l'horizon.

Pour avoir une trajectoire du Soleil sortant de la convexité de l'horizon (jugée souhaitable au moment de la construction), l'écliptique a été décalé d'une demi-année. La trajectoire nocturne de cette nouvelle date est alors assimilable à la trajectoire diurne sans décalage.

- Les coordonnées locales sont tracées pour deux lieux de la Terre.

Le tracé géographique comprend les lignes caractéristiques (azimut, hauteur) de deux lieux de la Terre. Cette particularité peut participer au « rapprochement » de ces deux lieux, ici Verdun (Meuse) et Yaoundé (Cameroun).

¹ Mouvement d'asservissement.

Dans cette réalisation, le mouvement de 24 heures est automatique. Il est créé par un programmeur électrique du commerce. La régression sidérale se fait manuellement par rotation du disque des dates (fonction calendrier). La mise à jour manuelle s'accompagne d'un réglage manuel de l'équation du temps par superposition de deux repères.

Création d'un « point soleil ».

Ici, un 21 mars. Au long de l'année, le point soleil restera toujours sensiblement sur le segment vertical, angulairement à l'équation de temps près.

L'équipage mobile.

On distingue pour les deux lieux considérés : l'horizon, les trois zones crépusculaires, les hauteurs, les azimuts, les méridiens, les aiguilles horaires qui indiquent l'instant des événements aux heures légales respectives et finalement les 24 fuseaux horaires.

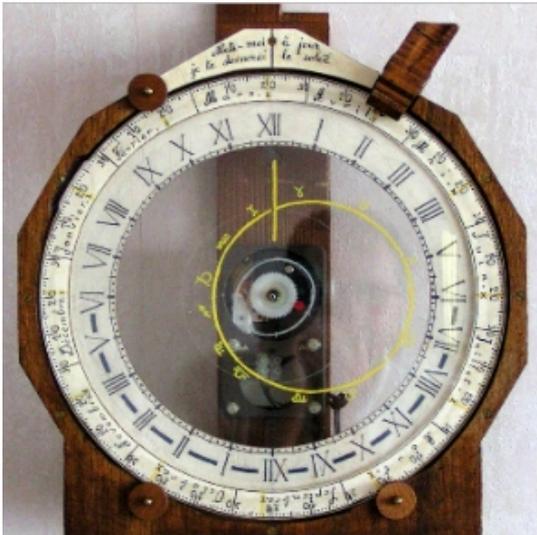
Exemple :

Lever de Soleil un 5 novembre à Verdun.

On est en heure d'hiver et il est 7 h 40 à Verdun (aiguille verte pleine) comme d'ailleurs à Yaoundé (aiguille rouge pleine).

Les fines lignes rouges montrent qu'à ce moment le Soleil est à 20° environ de hauteur et à l'azimut 110° (compté à partir du nord) à Yaoundé.

L'heure d'été française est donnée par l'aiguille évidée.



⇒  Dans la version numérique, vous trouverez en annexe :

la présentation complète « AstrolabeSolaire.ppt »





Généralisation d'analemmatiques

Bernard ROUXEL

Les cadrans analemmatiques sont des cadrans pourvus d'un style rectiligne mobile, l'heure étant lue sur une ellipse (ou un cercle). Nous avons déjà vu qu'il est possible de construire des cadrans analemmatiques avec des styles mobiles de forme arbitraire, l'heure étant lue sur une grande variété de courbes¹.

Quelques mots sur cette généralisation

Nous appellerons “courbes associées”, deux courbes Γ et Γ' dans un espace à trois dimensions avec la propriété suivante : il existe une correspondance Φ entre les points m de Γ et les points m' de Γ' satisfaisant les conditions :

- 1 – le segment mm' est orthogonal à une direction fixe Δ ;
- 2 - la longueur de mm' est constante ($mm' = 1$ par exemple) (fig. 1).

Si l'on considère deux courbes associées par rapport à la direction Δ de l'axe de la Terre, nous pouvons à l'équinoxe graduer en heures la courbe $\Gamma' \varepsilon v$ utilisant les ombres des points de Γ sur Γ' .

Pour un autre jour, cette graduation ne convient pas, mais on remarque que, si l'on translate Γ dans la direction Δ (fig. 2), chaque point m de Γ est translaté en m'' et tous les triangles rectangles $m m' m''$ sont égaux. L'angle δ en m' est constant sur Γ' , et donc pour chaque jour il existe une bonne translation de Γ (associée à la valeur de la déclinaison), pour laquelle la graduation sur Γ' est correcte.

Ainsi à chaque couple de courbes associées correspond un cadran analemmatique généralisé.

Remarque 1 : On peut permuter Γ avec Γ' .

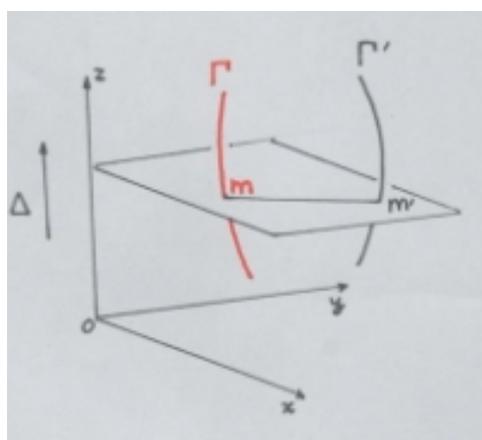


Fig. 1

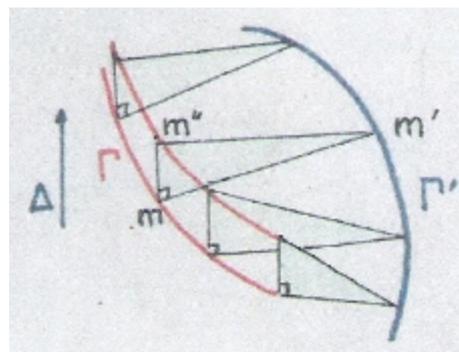


Fig. 2.

¹ B. Rouxel “Analemmatic sundials, a generalization” *The Compendium Journal of the North American Sundial Society* mar. 2004, 11(1), également “*The Analemmatic Sundial Sourcebook*”. F. W. Sawyer N.A.S.S. 2004 et Généralité sur les cadrans analemmatiques dans *Cadran Info* N° 9 de mai 2004.

Remarque 2 : Sur un cadran analemattique classique, à l'équinoxe, le style et l'ellipse forment un couple de courbes associées (Rohr²). Ainsi à chaque couple de courbes associées correspond un cadran analemattique generalisé.

Quelques exemples

On peut construire des couples de courbes associées de la façon suivante : On considère une courbe quelconque Γ et l'on associe à tout point m de Γ un cercle C_m de centre m , de rayon constant et d'axe parallèle à l'axe de la Terre. Quand m décrit Γ , le cercle C_m décrit un secteur circulaire S . Toute courbe Γ' de S peut être associée à Γ .

Nous donnons ci-après quelques exemples de courbes planes associées.

Nous utilisons un repère orthonormé $Oxyz$ avec Γ dans le plan xOz et Γ' dans yOz . L'axe Oz est parallèle à l'axe de la Terre Δ , et xOz est le plan méridien. Si l'équation de Γ est dans le plan xOz , on peut montrer que l'équation de Γ' dans le plan yOz est :

$$z = f(\sqrt{1-y^2})$$

Exemple 1 :

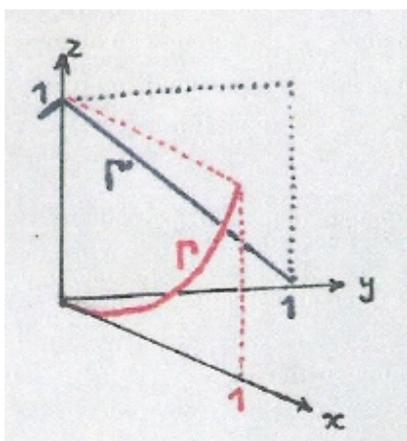


Fig. 3 - Γ portion de cercle.

Γ est une portion de cercle $(z - 1)^2 + x^2 = 1, y = 0$

et en Γ' les lignes droites $z = 1 + y,$
 $z = 1 - y,$ et $x = 0.$

La surface S associée à Γ est un dôme de Bohême, surface algébrique de degré 4.



Fig. 4.

² R. J. Rhor "Les cadrans solaires" Strasbourg Editions Oberlin 1986.

Exemple 2 :

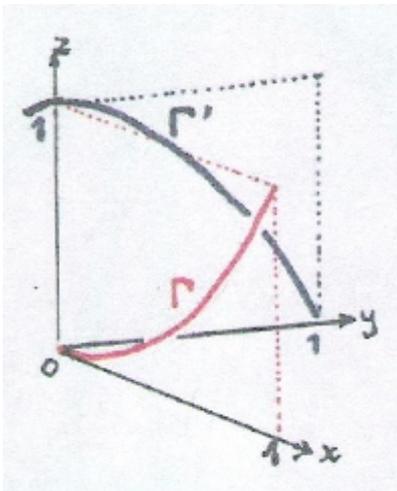


Fig. 5. Γ parabole.

Γ et Γ' sont deux paraboles :

$$\Gamma: z = x^2, y = 0,$$

$$\Gamma': z = 1 - y^2, x = 0.$$

La surface S est une sorte de tube parabolique.

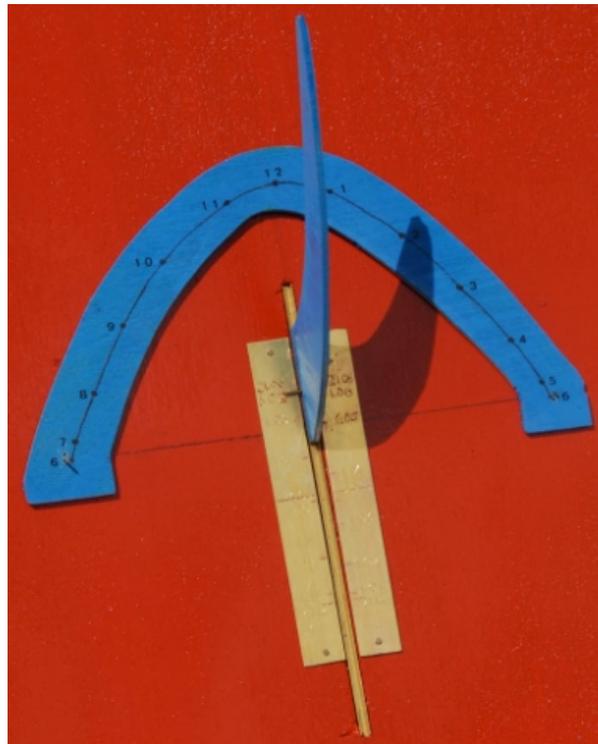


Fig. 6.

Exemple 3 :

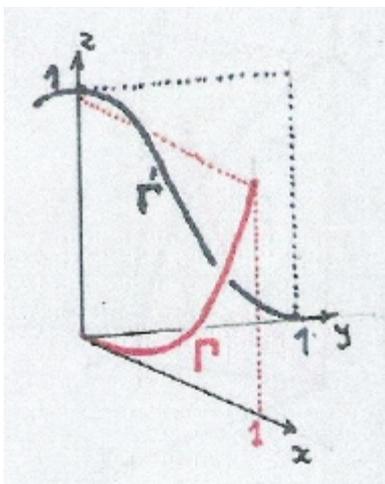


Fig. 7. Γ cubique.

$$\Gamma: z = x^3, y = 0,$$

$\Gamma': z^2 = (1 - y^2)^3, x = 0$, courbe de degré 6.

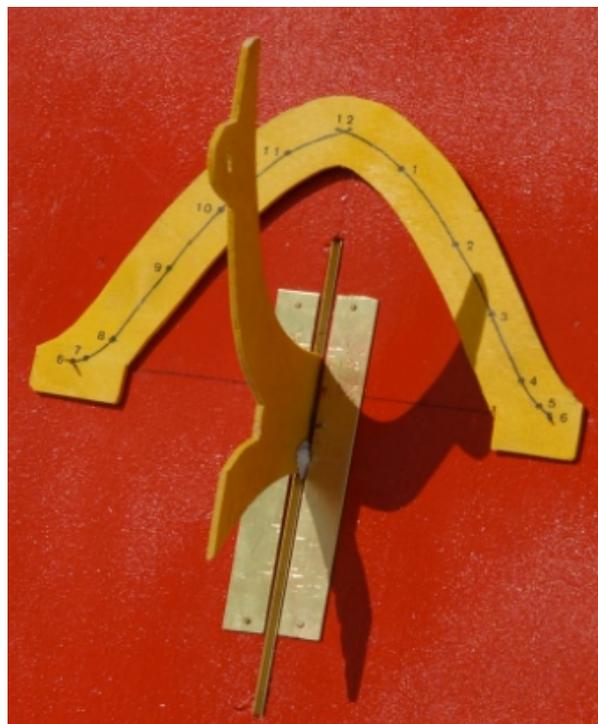


Fig. 8.

Exemple 4 :

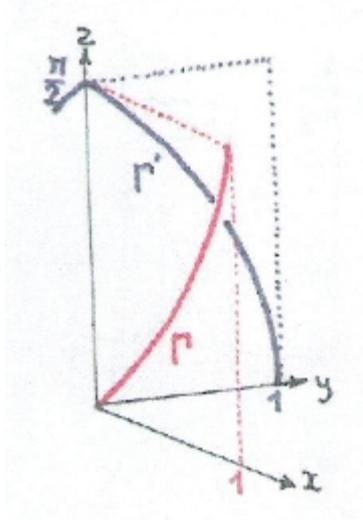


Fig. 9 Γ portion de sinusöide.

Avec les fonctions trigonométriques :

$$\Gamma: \quad x = \sin z, \quad y = 0,$$

$$\Gamma': \quad y = \cos z, \quad x = 0.$$



Fig. 10.

Exemple 5 :

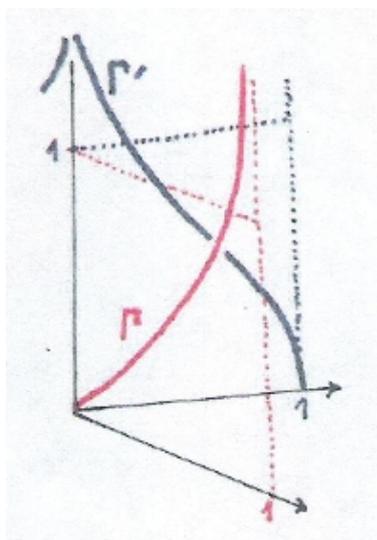


Fig. 11 Γ portion de tangent hyperbolique.

Avec des fonctions hyperboliques :

$$\Gamma: \quad x = \tanh z, \quad y = 0,$$

$$\Gamma': \quad y = 1 / \cosh z, \quad x = 0.$$

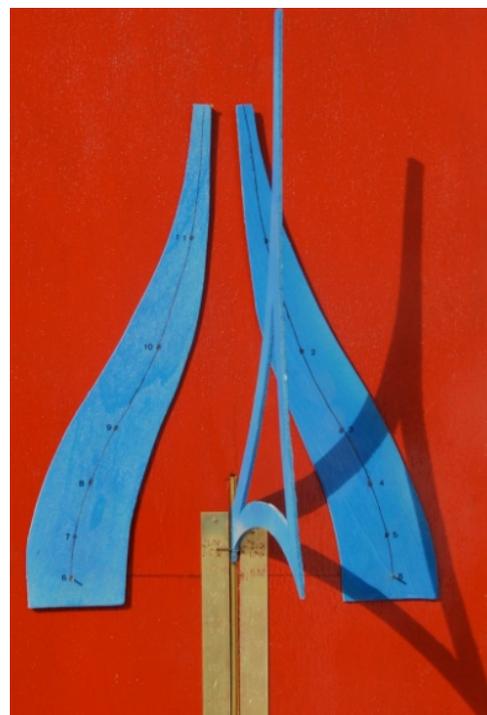


Fig. 12.

Autres exemples :

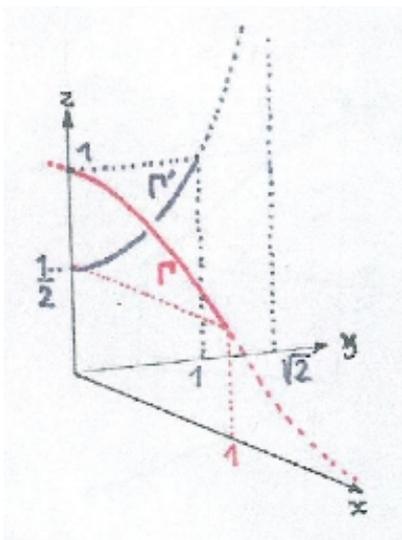


Fig. 13. Γ Cubique de Agnesi.

Cubique d'Agnesi :

$$\begin{aligned} \Gamma: & \quad z = 1/(1 + x^2), \quad y = 0, \\ \Gamma': & \quad z = 1/(2 - y^2), \quad x = 0. \end{aligned}$$

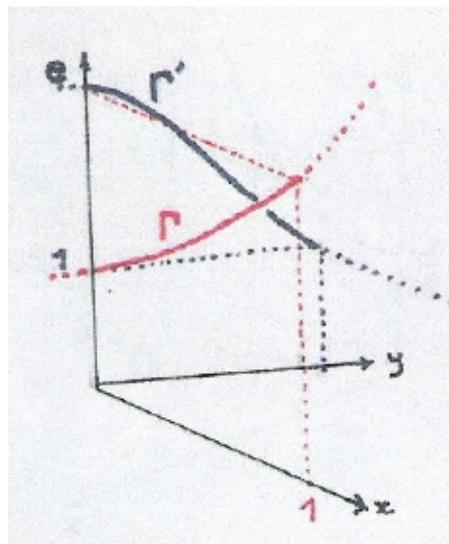


Fig. 14. Γ Exponentielle.

Exponentielle :

$$\begin{aligned} \Gamma: & \quad z = \exp(x^2), \quad y = 0, \\ \Gamma': & \quad z = \exp(1-y^2), \quad x = 0. \end{aligned}$$

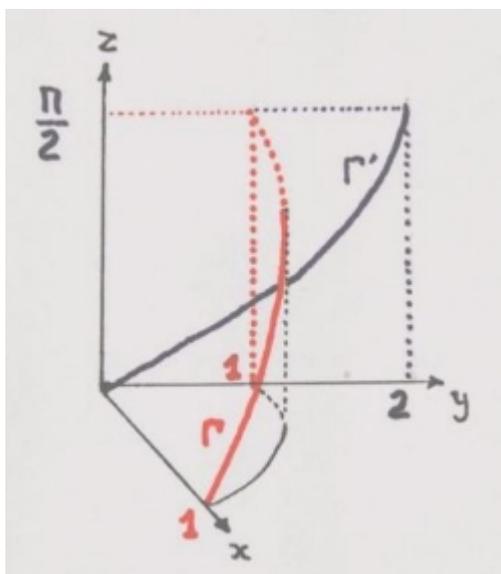


Fig. 15. $-\Gamma$ Courbe gauche.

Courbe gauche :

$$\begin{aligned} \Gamma: & \quad x = \cos u, \quad y = \sin u, \quad z = u, \\ \Gamma': & \quad x = 0, \quad y = 2 \sin u, \quad z = u. \end{aligned}$$

Article publié dans la revue ATTI : XVIII^e séminaire octobre 2012. Grazie Tonino Tasselli.





Nef solaire de Tavel 1993-2013

Denis SAVOIE

L'année 2013 est celle du vingtième anniversaire de la réalisation de la nef solaire (fig. 1 et fig. 2). C'est l'occasion de revenir sur la construction de cet extraordinaire cadran solaire, installé sur l'aire nord de Tavel dans le Gard, sur l'autoroute A9, près d'Avignon (fig. 3), et réalisé par les Autoroutes du Sud de la France (ASF).

Dans un article¹ paru dans la revue *l'Astronomie* et joint en annexe, j'ai décrit l'histoire de ce cadran solaire que je résume ici très succinctement avant d'aborder certains points laissés de côté.



Fig. 1. La nef solaire en 1993.



Fig. 2. La nef solaire en juin 2012.

La sculpteur Odile Mir a imaginé dans les années 1980 une nef solaire dont elle a réalisé une maquette qu'elle m'a présentée en 1988. J'y ai apporté des changements afin que l'ensemble des quatre « voiles » puisse fonctionner avec deux styles polaires indépendants des surfaces. J'ai aussi fixé les paramètres des faces (ou voiles) et les dimensions de l'ensemble, de façon, d'une part que le futur cadran ait la même architecture globale qu'Odile Mir avait imaginée, et que, d'autre part, il fonctionne quasiment du lever au coucher du Soleil sans interruption.



Fig 3. L'aire de Tavel sur l'autoroute A9 – Vue par Google Earth depuis 446 m d'altitude.

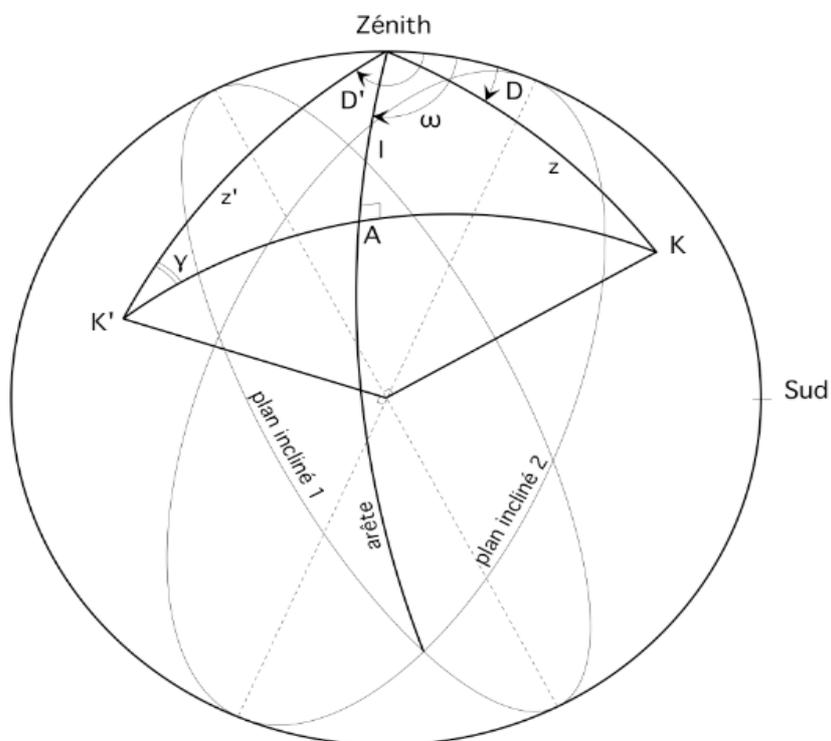
¹ D. Savoie, « Le cadran solaire de l'aire de Tavel », *l'Astronomie*, vol. 108, juillet-août-septembre 1994, p. 244-247. On prendra garde à une faute de frappe : la voile n° 1 est orientée sud-est (et pas sud-ouest). On consultera avec profit le bel article de A. Bouchard, « La nef de Tavel et l'idée de beauté chez Hegel », *Le Gnomoniste*, vol. XVII, n° 4, décembre 2010, p. 4-11.

L'heure solaire se lit sur trois faces, inclinées et déclinantes : la face n° 1 sud-est ($D = -43^\circ$, $z = 70^\circ$), la face n° 2 quasi occidentale ($D = 98^\circ$, $z = 71^\circ$) et la face n° 3 sud-ouest ($D = 50^\circ$, $z = 63^\circ$). Il s'agit donc de trois cadrans solaires – sans compter ceux au sol – qui fonctionnent avec des styles polaires dits à « centre inaccessible » puisque l'intersection des surfaces avec les styles est fictive. Le midi solaire se lit sur les faces n° 1 et n° 3 ; le style n° 2 projette une ombre sur les faces n° 2 et n° 3. On notera l'effet provoqué par la brisure des lignes horaires au niveau de l'intersection des faces n° 2 et n° 3 (fig. 4).



Fig. 4 . Arête de jonction entre les faces n° 2 et n° 3 : la brisure crée une rupture dans l'éventail horaire.

Parmi les nombreuses difficultés de gnomonique posées par ce cadran, celui de l'intersection des faces a donné lieu à un intéressant problème de trigonométrie sphérique. Deux plans d'inclinaison et d'orientation différentes déterminent une intersection (ou arête) dont la pente et l'orientation sont fonction des paramètres de chaque plan. Soient (fig. 5) D la déclinaison gnomonique de la normale K à un plan incliné de distance zénithale z , et D' la déclinaison gnomonique de la normale K' de l'autre plan incliné de distance zénithale z' . Appelons I l'inclinaison de l'arête avec le sol et ω la déclinaison gnomonique de la projection de l'arête au sol.



On calcule successivement :

$$\tan \gamma = \frac{\sin (D' - D)}{\sin z' \cotan z - \cos z' \cos (D' - D)} \quad (1)$$

$$\tan \eta = \frac{\sin (D' - D)}{\sin z \cotan z' - \cos z \cos (D' - D)} \quad (2)$$

$$\sin I = \sin z' \sin \gamma ; \quad (3)$$

$$\tan (\omega - D) = \cotan \eta \sec z . \quad (4)$$

On notera que γ et η sont les angles de l'arête, comptés dans le plan, avec le sol.

L'arête principale du cadran de Tavel est celle qui résulte de l'intersection des faces n° 1 et n° 2. Les formules précédentes donnent une inclinaison $I = 43^\circ 18' 18''$ et un azimut de la projection au sol de cette arête $\omega = + 26^\circ 56' 14''$.

Les formules utilisées pour calculer le cadran de Tavel sont celles du chapitre² VI de *La Gnomonique*, c'est-à-dire à la fois les coordonnées rectangulaires et polaires de l'ombre d'un style sur un plan incliné et déclinant. Après avoir testé le tracé des lignes horaires sur deux maquettes à l'échelle 1/31, l'ensemble des coordonnées fut transmis à l'ingénieur Robert Queudot (†) qui réalisa les calculs considérables de stabilité de l'ensemble de l'ouvrage (fig. 6). Les travaux commencèrent à l'automne 1992 et durèrent un an.



Fig. 6 . L'ingénieur Robert Queudot (†) à Tavel pendant l'été 1993. C'est lui qui fit tous les calculs de stabilité et d'architecture de la nef solaire.

Le poids des voiles, supportant pour trois d'entre elles les lignes horaires, variant de 70 à 240 tonnes, celles-ci furent coulées au sol dans des coffrages en bois et reliées à de puissantes charnières métalliques fixées profondément dans le sol (figures 7 à 9). Une fois le béton blanc sec, les voiles furent démoulées, puis inclinées au moyen de mâts haubanés et de vérins. Là résidait une difficulté importante (figures 10 et 11), car il fallait que les charnières autour desquelles s'effectuait la rotation soient positionnées, en amont du coulage du béton, en respectant très exactement la déclinaison gnomonique de chaque face ; d'autre part l'inclinaison des voiles, une fois ciclavées, devait elle aussi être très précise. Pour l'orientation, je fis de nombreuses vérifications, à l'aide du Soleil, des axes déterminés par les géomètres-topographes, qui ne sont pas habitués à travailler avec le sud géographique, mais avec des coordonnées Lambert

² L'ouvrage n'était pas publié à l'époque.

qui nécessitent une correction en fonction de la latitude et de la longitude du lieu. Quant à l'inclinaison des faces, je ne trouvai à l'époque qu'une solution mixte (car elle implique aussi l'orientation) : calculer l'instant précis où le Soleil cesse d'éclairer une face ou à quel instant il commence à l'éclairer (fig. 12). Je fis de nombreuses vérifications en lumière rasante et j'avoue à chaque fois avoir été surpris par la coïncidence entre calcul et observation ! Les formules utilisées pour calculer l'instant de passage du Soleil dans le plan incliné et déclinant sont celles du chapitre V de *La Gnomonique*.



Fig. 7 . Automne 1992 : début du chantier sur l'aire de Tavel ; on voit ici les blocs de béton qui constituent les fondations sur lesquelles vont être fixées les charnières.



Fig. 8 . Le moule en bois d'une des faces est placé au sol avec ses charnières avant le coulage du béton.



Fig. 9 . Vue depuis une grue des faces n° 1 et n° 2 couchées au sol. La face n° 1 attend son béton blanc.



Fig. 10 . Opération de levage de la face n° 1 avec le système de haubans.

La troisième grande difficulté était liée au caractère inaccessible du point d'intersection des styles polaires avec les faces ; ce qui signifiait qu'en cas de mauvais positionnement, l'ombre polaire, au lieu de s'aligner sur le méplat d'une ligne horaire, risquait de la cisailer. Il y avait deux causes pouvant entraîner ce risque : d'une part que les styles de 10 m de haut ne soient pas au bon endroit par rapport aux voiles ; et d'autre part qu'une erreur dans le coffrage des lignes horaires en béton ne les fasse pas converger correctement. D'où les nombreux tests effectués *in situ* à l'aide de styles temporaires en bois (fig. 13 et 14). Ce n'est qu'une fois ces phases de test vraiment terminées que l'ensemble des fondations fut immergé dans du béton, les styles prismatiques scellés, l'ensemble reposant sur une dalle de 26 m de diamètre, légèrement bombée.



Fig. 11 . La face n° 1 va être clavée à la face n° 2.



Fig. 12 . Vue de la nef depuis une grue pendant les périodes de test avec le Soleil : ici les trois faces sont éclairées. On attend que la face n° 1 cesse de l'être afin de vérifier que le Soleil quitte son plan au bon moment.



Fig. 13 : Phase de test avec des styles polaires temporaires en bois, orientés sur le méridien du lieu et inclinés de 44° avec le plan horizontal



Fig. 14 : On vérifie avec un style polaire temporaire que l'ombre s'aligne parfaitement sur une ligne horaire (ici 7 h solaire)

Ce cadran de l'aire de Tavel devait aussi avoir une fonction éducative auprès des visiteurs et des vacanciers ; la sculpteur Odile Mir (fig. 15) fut très favorable à cette idée et je fis donc installer autour de la nef huit stèles qui retraçaient l'histoire de la gnomonique. Pour l'anecdote, le cadran bifilaire horizontal en photo est celui que j'avais réalisé en 1984 au camp d'astronomie SNCF de Céreste ! J'installai aussi quelques panneaux rappelant des notions élémentaires de cosmographie, ainsi qu'une fresque au sol montrant les constellations zodiacales.



Fig. 15 . Odile Mir.



Fig. 16 Opération de scellement du style polaire prismatique du matin.



Fig. 17 . On voit ici le coffrage de la dalle de 26 m de diamètre ; toutes les fondations sont immergées dans le béton.

Vingt ans après sa construction, la nef solaire de Tavel a bien vieilli : pas de dégradations, pas de vols des pièces métalliques, bonne tenue du béton. De très nombreux vacanciers s'y arrêtent flâner et certains y font même un véritable pèlerinage.

De tous les cadrans solaires que j'ai réalisés, celui de Tavel est certainement mon préféré (fig. 19) : il reste un cadran simple, à l'architecture dépouillée, derrière laquelle se cachent des prouesses de calculs et de techniques.

Fig. 18 Opération de sablage des faces. ►





Fig. 19 . Denis Savoie devant la nef solaire.

⇒  **Dans la version numérique, vous trouverez en annexe :**
le fichier “Tavel L astronomie N108_1994” qui reproduit l'article
de D. Savoie présentant le cadran solaire dans la revue
L'Astronomie n° 108 juillet/août/septembre 1994, p 244 à 247.

⇒ **SUR LE SITE :** <http://www.palais-decouverte.fr/index.php?id=2310>

vous découvrirez la vidéo des *Autoroutes du Sud de la France* sur la réalisation
de la nef.





Dispersion des cadrans canoniaux

Denis SCHNEIDER

Approche de la dispersion inégale des cadrans canoniaux français.

Les cadrans canoniaux offrent la particularité de ne jamais entièrement se laisser découvrir ! J'ai eu l'occasion de traiter de liturgie, de symbolisme religieux, de comparaison entre les heures de prière dans les trois religions monothéistes ; je vais laisser de côté cette fois-ci la mystique pour retomber sur terre en comparant la répartition inégale des canoniaux français (à la fin 2010) avec d'autres cartes.

A propos de géographie ecclésiastique, le juriste et sociologue des religions, Gabriel LeBras, écrivait en 1945 un article fondateur : « Un programme : la géographie religieuse » et proposait un ensemble de recherches ; je cite : « à la carte des cathédrales, il serait bon que l'on ajoutât celle des collégiales afin de rendre sensible la densité de la « laus perennis » (l'auteur voulait parler de l'office divin).

Je ne vais pas faire l'histoire de l'évangélisation de la Gaule ; je rappellerai seulement qu'après l'effondrement des structures carolingiennes, l'Eglise, institution sans frontière, entreprit une œuvre de centralisation en s'appuyant sur les fondations monastiques dont la vocation première était l'évangélisation. A titre d'exemple, l'abbaye très ancienne de l'Ile-Barbe, près de Lyon, regroupait 70 prieurés dans le Sud-Est de la France et Marmoutier comptait 270 dépendances à la fin du XII^e siècle.

Il n'y a probablement pas de canonial en France remontant au I^{er} millénaire car la réforme grégorienne au XI^e siècle a abouti à la reconstruction des églises ou à l'implantation de nouvelles (diffusion de l'art roman). Si la fin du I^{er} millénaire fut monastique, l'obligation de prier sept fois le jour, inhérente à la vie des moines, séduisit plus tard le clergé séculier au-delà de ce qui lui était possible. La nécessité de graver des canoniaux dépend du respect de l'obligation de l'office divin, qui concerna bientôt tous les corps ecclésiastiques :



Ph. 1

moines et chanoines comme simples clercs. Les nombreux rappels de cette exigence au cours des conciles et synodes montrent bien qu'il existait un certain laxisme, parfois excusé par

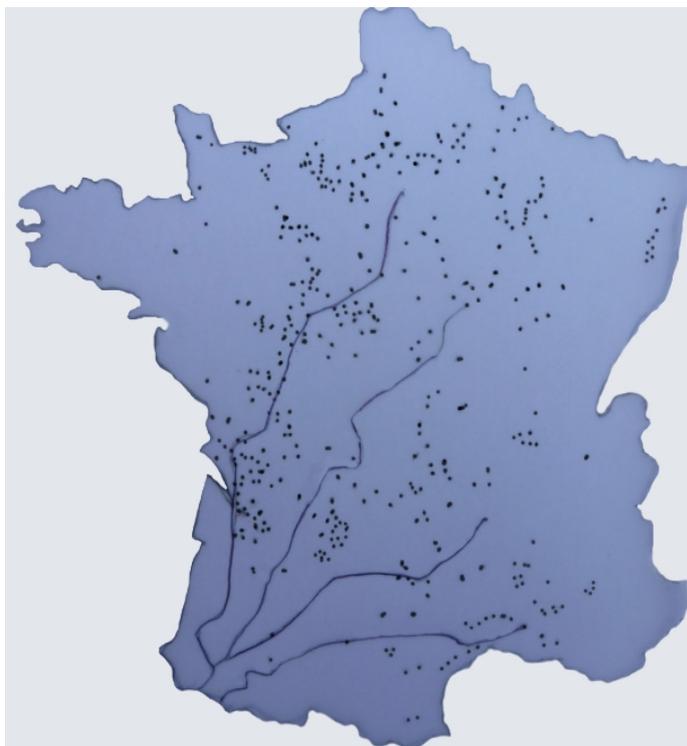
l'illettrisme de certains prêtres ou plus communément par l'absence de livres liturgiques dans les paroisses. Pour l'Angleterre, Chris Williams déduit de son étude statistique que chaque église possédait un « mass dial », déduction qui ne me paraît pas concerner la France.

Dans la revue *L'Astronomie* de février 1998, notre collègue espagnol M. Valdés Carracedo écrivait un article liant canoniaux et chemins de Saint Jacques-de-Compostelle en soulignant l'influence de Cluny (Ph.1). Il écrivait : « Les cadrans canoniaux en France sont répartis de manière uniforme... Font exception ceux situés sur le cours de la Marne (zone1). Il en est de même pour la séquence parallèle au Rhin à la hauteur de Sélestat (zone 2). Cette perception erronée de répartition uniforme s'explique sans doute par le peu de canoniaux français recensés alors (212) et par le contraste avec l'Espagne dont plus de la moitié sud était occupée par les musulmans ».

En 2003, j'avais dressé l'état de notre inventaire sur une carte où apparaissait une disparité dans leur répartition (Ph. 2) comme il m'avait alors été fait remarquer, elle pouvait dépendre de contingences aussi triviales que le lieu de résidence ou de vacances des chasseurs de cadrans de la SAF.

Qu'en était-il fin 2010 et comment comprendre la répartition toujours non homogène des 1 500 canoniaux français ; à quels facteurs celle-ci pourrait-elle plus sérieusement être corrélée (ph. 3) ?

Les cadrans sont nombreux en Touraine, en Saintonge-Aunis, en Dordogne, en Languedoc, en Haute-



Drans canoniaux Ph. 2.

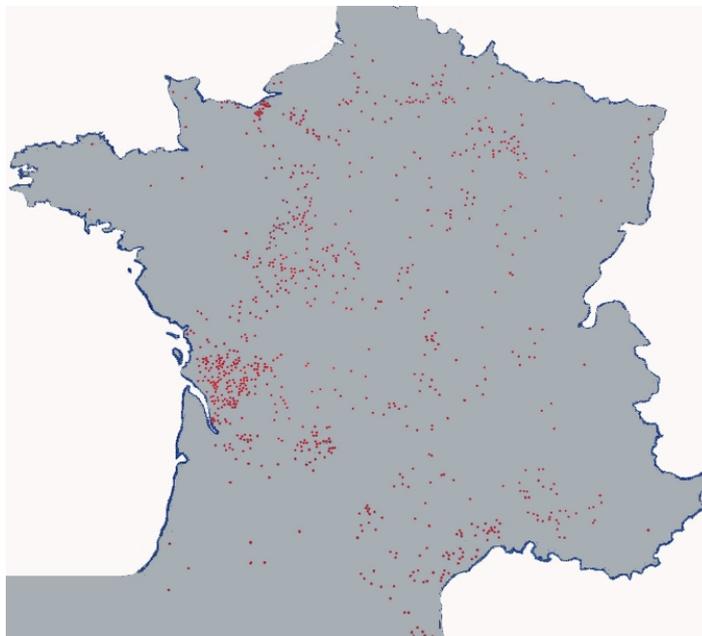
Provence, et rares en Bretagne, en Gascogne, en pays toulousain, en Provence méridionale, en Savoie, dans les Alpes, entre Poitiers et Montluçon, entre Le Puy-Mende-Valence, vers Belfort, entre Calais-Verdun et Metz (destructions dues aux guerres). Les départements qui en sont totalement dépourvus sont : les Hautes-Alpes, les Alpes-Maritimes, l'Ariège, la Haute-Corse et la Corse-du-Sud, le Doubs, la Haute-Garonne, le Jura, la Loire-Atlantique, la Mayenne, la Haute-Savoie, le Tarn-et-Garonne, les Hauts-de-Seine, la Seine-Saint-Denis et le Val-de-Marne.

En commençant mon étude, j'avais avisé un professeur d'art médiéval, qui m'avait répondu que l'évangélisation avait gagné tout notre territoire et qu'il devait y avoir, au moins à l'époque, une répartition homogène des églises romanes, paraphrasant la parole célèbre de Raoul Glaber : « La Gaule se couvrit autour de l'an mil d'un blanc manteau d'églises ». Il

m'ouvrit l' *Atlas de la France romane* Editions du Zodiaque, 1995. Au premier coup d'œil, leur répartition n'était pas homogène, mais, bien sûr, il s'agissait des églises romanes restantes ! On comptait peu d'églises romanes en Bretagne, et beaucoup autour de Tours, de Mâcon, de Montpellier, d'Arles, de Caunterets et dans les Charentes.

Concernant la répartition des abbayes en l'an mil, on peut déjà constater que le tiers ouest de l'espace gallique est très peu représenté (pas d'implantation dans les Charentes ni en Dordogne, qui compteront ensuite tant de canoniaux).

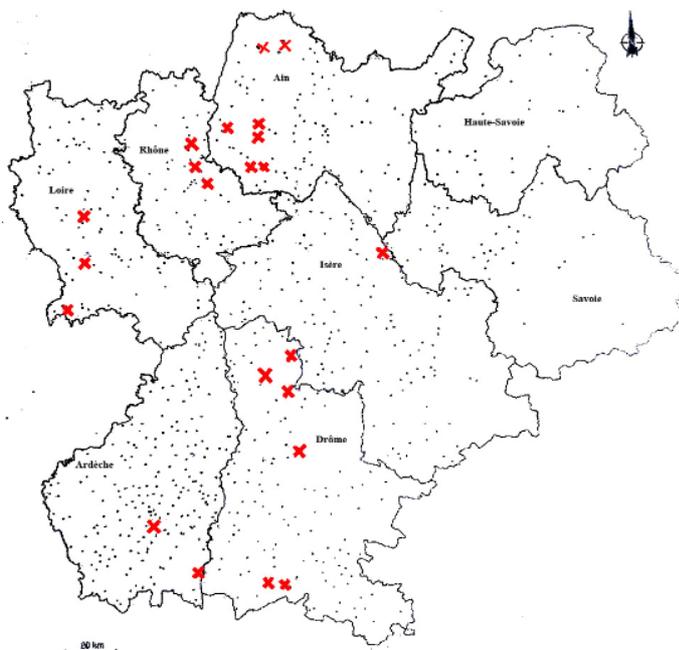
En comparant la carte des églises romanes du Lot de l' *Atlas de la France romane* à celle des églises médiévales du Lot du récent livre *Archives de pierres*, il apparaît que le nombre des édifices religieux médiévaux était considérablement plus important. Le passage du roman au gothique s'est fait à des époques dif-



Ph. 3.

férentes selon les régions, et je ne pouvais exclure des églises médiévales au motif qu'elles étaient gothiques !

En recherchant les édifices religieux porteurs de canoniaux parmi les édifices recensés dans les 13 volumes d' *Abbayes et prieurés de France* de Dom Becquet et Dom Besse, j'ai constaté que la plupart des édifices porteurs ne figurait pas dans ces volumes. Comme le dit Gabriel LeBras, ces 13 volumes, pourtant fruit du travail de bénédictins, sont encore bien incomplets. J'ai pu le vérifier encore en consultant le n° 23 de DARA « Documents d'Archéologie en Rhône-Alpes et en Auvergne » révélant un nombre considérable de prieurés non inventoriés jusque-là (Ph.4).



Ph. 4.

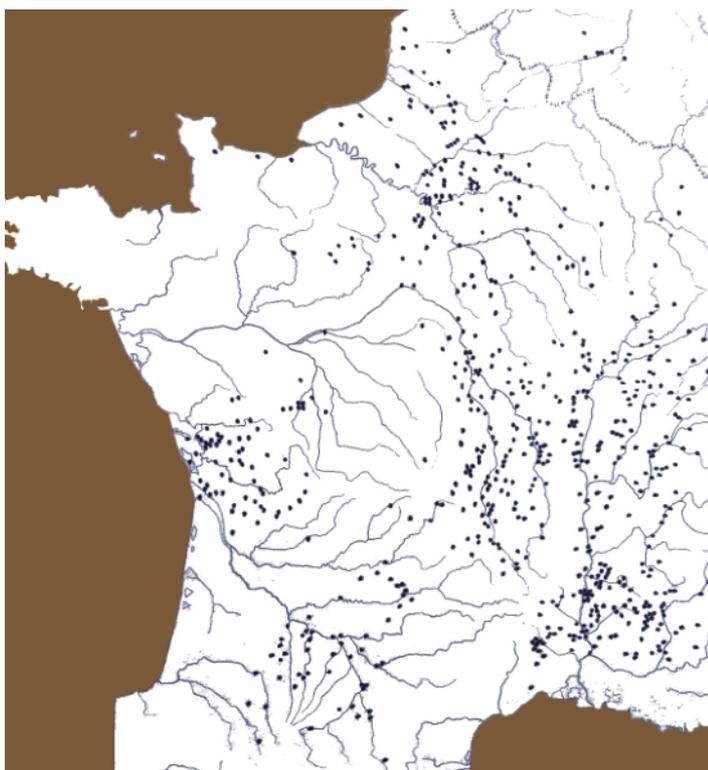
Il y est écrit : « Le pourcentage des prieurés par rapport aux paroisses varie d'un tiers en Savoie (20 prieurés pour 65 paroisses) pour passer d'un prieuré par paroisse dans le sud de la Drôme où certains villages comptent jusqu'à deux ou trois petites communautés. J'ai placé des croix rouges là où se trouvaient des canoniaux. Dans les départements si riches en prieurés-cures comme l'Isère et l'Ardèche, on ne constate qu'un ou deux canoniaux et donc pas de lien entre ces deux présences. Seules la Savoie et la Haute-Savoie, moins riche en prieurés-cures, n'ont pas de canonial ».

Le n° 5 de la revue Histoire et archéologie, publiée par le CAHMER (Centre d'Archéologie et d'Histoire Médiévale des Etablissements Religieux), intitulé « Prieurés et environnement » confirme pour la Thiérache, le Vercors, la ville de Laon, le Forez et Marmoutier le foisonnement des prieurés jusque-là non recensés. Il est vrai que ces numéros dans les deux revues citées sont issus de recherches poussées menées en archives par la faculté de Lyon-Lumière, la DRAC et le CNRS et ne reflètent pas l'état de ce qui reste en place aujourd'hui...

Il m'est apparu qu'il pouvait être intéressant de poursuivre la comparaison entre l'inventaire des canoniaux et l'implantation des deux principaux ordres monastiques clunisiens et cisterciens même si au XII^e siècle la spiritualité monastique ne se limite pas à ces deux ordres.

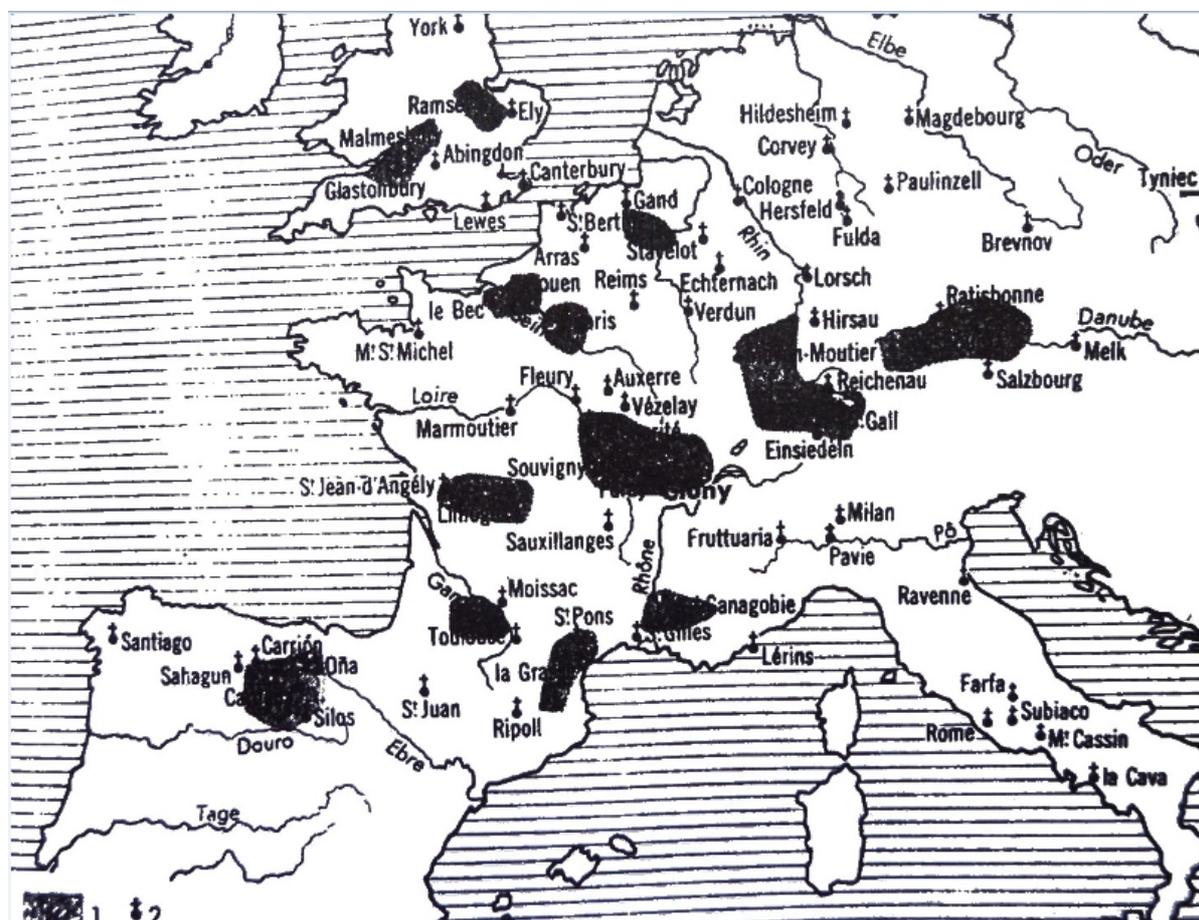
(Ph. 5) Il apparaît que les établissements clunisiens n'avaient pas une répartition homogène sur notre territoire : Cluny, fondé en 910, ne s'est pas facilement installé dans le nord du royaume de France où l'ordre possédait à la fin du XI^{ème} siècle plus de 800 maisons. La réforme grégorienne a stimulé les restitutions d'églises, que Cluny s'est empressé de convertir en prieurés ; parfois, c'est une abbaye importante, tombée en déshérence, qui entre dans l'ordre de Cluny, avec toutes ses dépendances, au rang de prieuré, comme l'est toute dépendance clunisienne.

Ph. 5 ►



(Ph. 6) : En noir, les zones riches en établissements clunisiens) La répartition des établissements clunisiens n'est pas du tout homogène. Elle est dense dans le « vieux pays clunisien », c'est-à-dire dans les provinces clunisiennes de Lyon et de Provence, sauf dans sa partie méridionale, car de vieilles familles aristocratiques, attachées à leur patrimoine foncier

religieux et à ses dîmes, se sont opposées à la restitution des églises privées et donc à l'implantation de Cluny. En sont pourvus également : les Charentes, l'Auvergne, le pays toulousain, la région au nord-est de Paris, la Savoie et les Alpes.

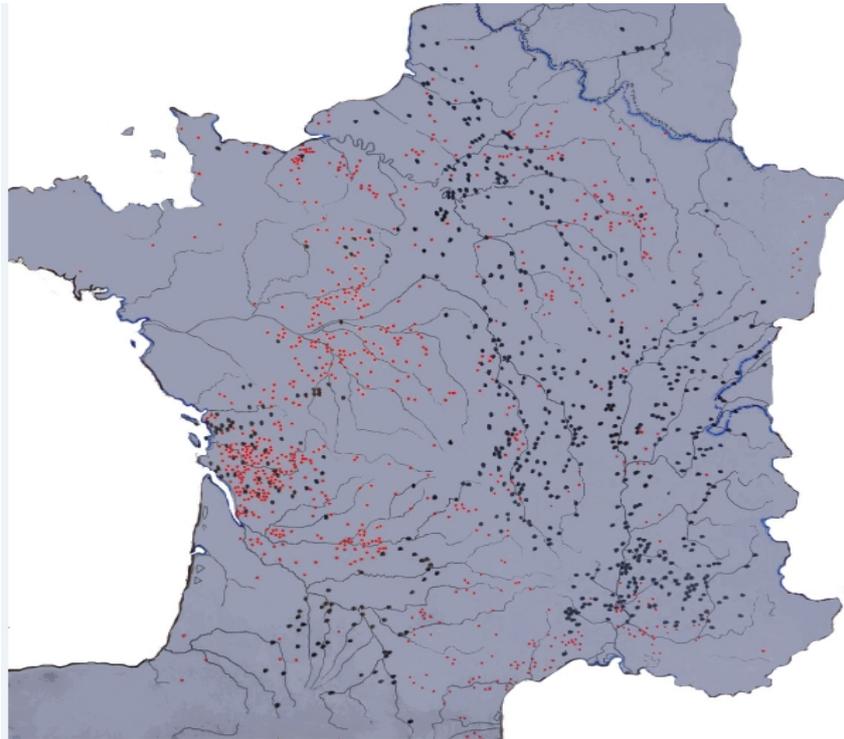


Ph. 6.

(Ph. 7) : En noir, les établissements clunisiens ; en rouge, les cadrans canoniaux. Seules les versions *Cadran-Info* « luxe » et DVD rom visualisent cette comparaison) Il n'y a pas de lien entre établissements clunisiens et cadrans canoniaux, à l'exception d'une bonne représentation des uns et des autres dans les Charentes.

(Ph. 8) : On voit par contre que la répartition des établissements cisterciens est homogène et qu'en conséquence on ne peut établir de lien avec les canoniaux.

Une concentration d'abbayes bénédictines et de canoniaux se rencontre vers Tours, dans les Charentes et en Languedoc, qu'on ne retrouve pas pour les canoniaux dans la région de Mâcon, de Causerets ou d'Arles. Une même rareté d'abbayes et de canoniaux, se retrouve en Bretagne .



Ph. 7.



Ph. 8.

Comme on vient de le voir, il n'est pas évident relier par comparaison la répartition des canoniaux recensés par notre coimmission et celle des différentes cartes ecclésiastique. L'inventaire est certes encore loin d'être terminé, mais j'avais envie de faire un point. Il faudra que les chasseurs portent leur attention sur les départements vierges ou peu pourvus,

mais je pense qu'il y a, à cette absence d'autres explications que le manque de recherches dans ces régions. La pierre calcaire des Charentes se prête mieux à la gravure des canoniaux que le granit breton, mais le matériau n'explique pas tout, même si le tuffeau qui se lèpre laisse peu de traces ; l'histoire y prend sa part : les églises médiévales bretonnes sont aussi beaucoup moins nombreuses à avoir été conservées, car les invasions anglo-saxonnes ont fait fuir vers la Bretagne les populations britanniques qui construisirent beaucoup d'églises en bois ; la fièvre de reconstruction tarda jusqu'aux XV-XVI^e siècles. L'absence de canoniaux aussi en Loire-Atlantique pourrait s'expliquer par le fait que cette région faisait partie de la Bretagne médiévale.

Les invasions normandes, les flambées de l'hérésie, la guerre de Cent Ans, les troubles de la Ligue, la Révolution et la vente d'abbayes comme biens nationaux, les reconstructions au XIX^e siècle et les guerres mondiales rendent l'étude complexe. C'est une chance que Jérôme Bonnin ait trouvé cette année dans le Pas-de-Calais, jusque-là vierge de tout canonial, deux canoniaux sur l'église Saint.Pierre d'Ames, une des rares églises romanes non détruites de ce département sinistré. Jean Scordia a découvert l'an passé le premier canonial dans les Landes et M. Faivre, architecte des Monuments historiques, nous en a fait connaître sur deux autres églises landaises. Cependant, parmi les 160 nouveaux canoniaux trouvés en 2011 et tout juste inventoriés par Serge Gregori, aucun n'est situé dans les départements en étant dépourvus.

L'étude des canoniaux reste ardue. Il n'est pas évident d'expliquer leur disparité alors même qu'on attendait de l'obligation de réciter les heures une homogénéité. Une étude à poursuivre.

Remerciements à Jérôme Bonnin qui a beaucoup amélioré la qualité des photos depuis leur présentation le 13 octobre 2012.



Vu à Vendre... + 3000€ annonce « leboncoin » février 2013



Dimensions :30X20X16 ; Poids
5 Kg : métaux, cuivre,
bronze, laiton ?

Cadran canon du XIX^e siècle, sur un socle massif de métal jaune sont fixés un cadran solaire rotatif, un canon du genre Marine sur l'affut fixe duquel est arrimé un bras oscillant sur un plan, prolongé d'une loupe orientable sur rotule (accessoire du XX^e siècle).



Cercles hindous verticaux

Michel UGON

Les cercles hindous horizontaux étaient utilisés pour tracer la méridienne du lieu. Ils peuvent également servir à tracer les bases d'un cadran solaire, quelle que soit son inclinaison, en particulier sur les murs verticaux.

1 - Introduction

On sait que les cercles hindous horizontaux étaient très utilisés pour tracer géométriquement la méridienne du lieu, sans avoir besoin de connaître la latitude ni la déclinaison solaire, c'est-à-dire sans recourir aux éphémérides. Il suffisait de tracer les médiatrices des cordes de ces cercles, obtenues par deux ombres d'un style droit ayant des longueurs égales : la position moyenne de ces médiatrices donne la méridienne.

Cette construction astucieuse et relativement précise peut également servir à tracer les bases d'un cadran solaire, quelle que soit son inclinaison, en particulier sur les murs verticaux. Dans ces cas, les cercles hindous donnent directement une méridienne du plan, qui devient alors la sous-styloire des cadrans à style polaire.

Les cercles hindous fournissent donc un moyen d'obtenir sans aucun calcul l'angle tabulaire S' de la sous-styloire.

Sur le plan pratique, cela suppose que cette méthode soit applicable, notamment, dans les cas où les cordes considérées sont très courtes, c'est-à-dire presque tangentes aux cercles hindous. On perçoit alors que cette méthode a des limites pratiques, mais lesquelles ? Nous allons voir que la théorie nous donne des réponses qui peuvent être surprenantes, ce qui nous a fait faire plusieurs fois les calculs pour s'assurer des résultats. La présente note a non seulement pour but d'analyser cette construction, mais aussi de proposer une méthode applicable dans la plupart des cas.

2 – Précision de la méthode

Lorsque le plan est vertical et que l'on possède l'angle tabulaire S', on sait que sa déclinaison gnomonique D est donnée par :

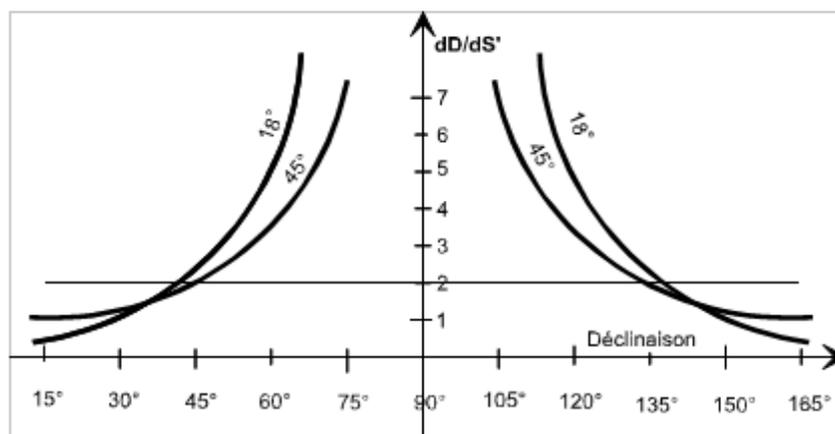
$$\sin D = \operatorname{tg} \varphi \cdot \operatorname{tg} S' \quad (1)$$

où φ est la latitude du lieu.

Cette relation vaut aussi pour les constructions géométriques. En différenciant les deux membres, et en tenant compte de (1), on obtient :

$$|dD/dS'| = (\operatorname{tg}^2 \varphi + \sin^2 D) / \operatorname{tg} \varphi \cdot \cos D$$

L'étude de cette fonction est illustrée par les courbes ci-dessous pour les deux latitudes 18° et 45°.



S' étant donné (par exemple par la méthode des cercles hindous), cette relation permet de chiffrer l'erreur engendrée sur la détermination de D : cette erreur croît très vite lorsque l'on dépasse certaines valeurs de φ et de D , et nous considérerons pour la suite que $|dD/dS'| < 2$ si l'on veut obtenir un tracé acceptable, en supposant S' obtenu au quart de degré près, ce qui est toujours réalisable en prenant un rayon de cercle suffisant. Cette limite arbitraire correspond à la droite en pointillé. Cela fournit deux résultats essentiels à notre étude :

1- la latitude ne doit pas dépasser $\pm 60^\circ$ (le calcul donne $63,43^\circ$).

2- la déclinaison gnomonique du plan vertical ne doit pas dépasser $\pm 40^\circ$ pour la latitude de 18° (qui correspond à Marigot dans les Antilles, entre les tropiques, le calcul donne $|dD/dS'| = 2,08$).

3 – Principes d'une méthode

3-1 La détermination de la déclinaison gnomonique à partir de l'angle tabulaire de la sous-styloire pour les latitudes dépassant $\pm 60^\circ$ peut conduire à des erreurs notoires, surtout pour les fortes déclinaisons. Pour s'en affranchir, il faut alors diminuer l'inclinaison du plan en fonction de la latitude. Le tableau ci-après peut servir de guide :

Latitude	Inclinaison limite
$\leq 60^\circ$	90° (vertical)
70°	80°
80°	70°

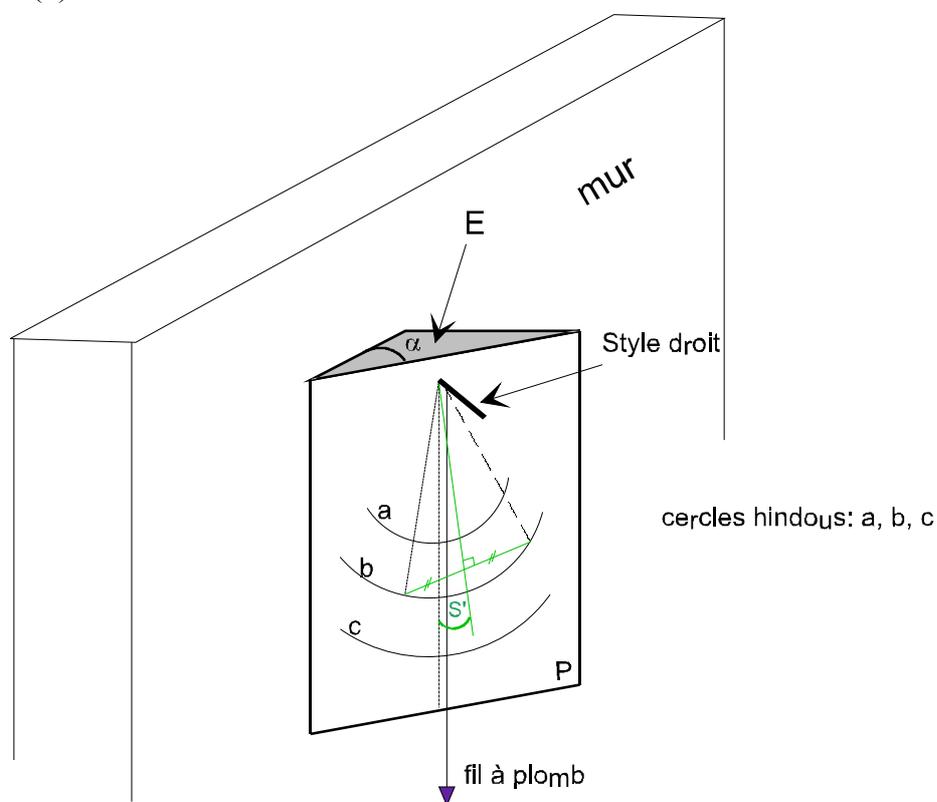
3-2 Pour la déclinaison gnomonique, les résultats sont les suivants :

Latitude	Déclinaison maximale
18°	45°
35°	44°
45°	43°
50°	40°
55°	35°
60°	17°

En conséquence, si l'on veut utiliser entre les tropiques, la méthode des cercles hindous pour les murs très déclinants (par exemple -75°), en prenant une marge de sécurité de 5° , il faut les tracer sur un plan dont la déclinaison gnomonique ne dépasse pas 40° à la latitude de 18° . Cela peut se réaliser en traçant les cercles sur un plan faisant un angle de 40° avec le mur, ce qui s'obtient à l'aide d'un montage approprié (dans ce cas, la déclinaison gnomonique du mur se situe aux environs de -35°).

4- Application

Le croquis ci-après donne un exemple de réalisation. Les cercles hindous sont tracés sur un plan P, bien vertical, qui fait un angle α avec le plan du mur. L'angle α est obtenu à l'aide d'une entretoise triangulaire E. Le plan P est muni d'un style droit qui porte ombre sur les cercles hindous. Lorsque l'on a obtenu l'angle S' , on en déduit un angle intermédiaire D' par la formule (1).



α est choisi en fonction du tableau et en prenant une valeur ronde, par exemple 40° pour une déclinaison de -75° .

La déclinaison gnomonique du mur est donnée par :

$$D = D' - \alpha.$$

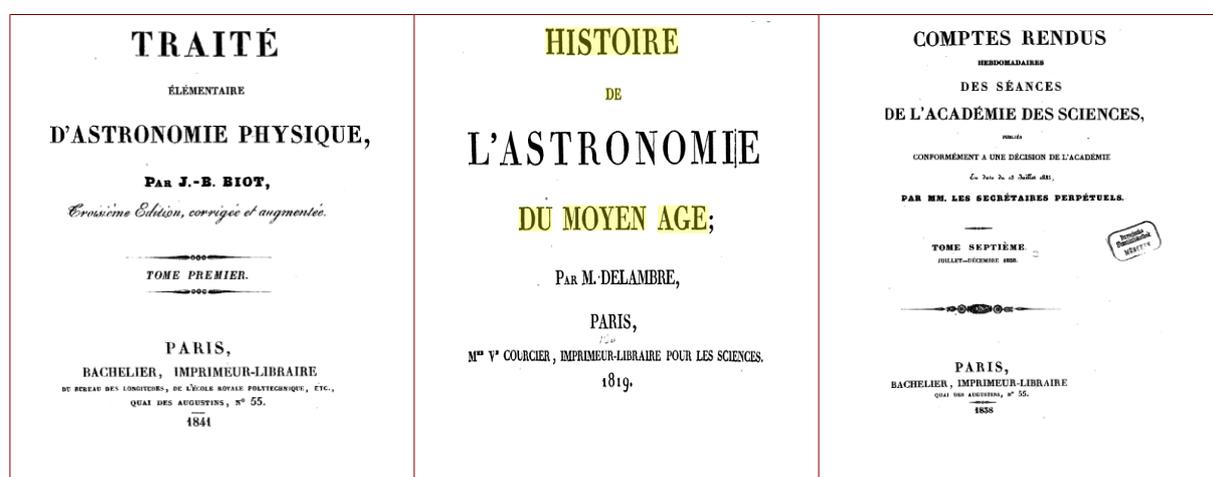
Remarque : cette méthode peut réduire la durée d'éclairage du plan P, ce qui n'est pas le cas de notre exemple de Marigot ; la mesure de S' doit être faite le matin sur le mur déclinant sud-est. Si $\alpha = 40^\circ$, le Soleil se lève en avant du plan P l'hiver et les tracés devront être faits entre 7 h et midi.

5 - Conclusion

Sous nos latitudes, l'utilisation des cercles hindous verticaux ne pose pas de problème particulier pour les faibles déclinaisons ($< 40^\circ$). Par contre, leur emploi est plus délicat pour les murs très déclinaisons, notamment aux fortes latitudes, et nous donnons ici une méthode pour continuer à les employer.



Les cercles indiens/hindous dans...



» La plupart des auteurs arabes et persans recommandent l'emploi du **cercle indien** pour tracer la ligne méridienne. M. Sédillot en donne une description très détaillée d'après un manuscrit persan, n° 173, du XI^e au XII^e siècle. Quelques auteurs parlent de ce **cercle** et de son usage sans le nommer ainsi. Pourquoi la dénomination de **cercle indien**, appliquée ordinairement à un instrument connu des Grecs du V^e siècle; car il est décrit dans les hypotyposes de Proclus. Est-il réellement un emprunt fait aux Indiens?

Egalement ...

dans un manuscrit du XII^e siècle signalé par John Davis in *bulletin de la British Sundial Society* volume 25 (i) de mars 2013 page 29

et pour en savoir plus :

° The method of equal altitude or Indaina circle par Hugh McCague in *bulletin de la British Sundial Society* volume 19 (iv) de décembre 2007 pages 164 à 172.



Le cadranier inconnu du Queyras

Michel UGON

En cherchant l'identité du mystérieux cadranier qui a réalisé une bonne vingtaine de cadrans solaires dans le Queyras entre 1821 et 1839 (voir Cadran Info n° 23 et n° 24), nous avons commencé notre périple au hameau des Meyries en établissant que préalablement, à Zarbula [3], cet inconnu utilisait les mêmes méthodes géométriques, notamment pour obtenir l'angle stylaire par rabattement autour de la sous-styloire à l'aide du fameux point « Z » sur l'horizontale (Cadran Info n° 14 et n° 15). Nous avons aussi établi que ce cadranier tenait compte de l'inclinaison des murs. Dans la deuxième partie, nous avons poursuivi notre périple à La Chalpe de Saint-Véran, en compagnie de Paul Gagnaire ; nous y avons notamment déchiffré les devises latines effacées qui témoignent d'une très bonne culture ecclésiastique.

3^e Partie : de Château-Queyras à Fontgillarde

Malgré des informations de plus en plus précises, nous cherchons toujours qui était cet inconnu, si habile artiste et gnomoniste.

Dans cette quête, nous allons poursuivre notre route en passant par Château-Queyras jusqu'à Fontgillarde, en cernant davantage ce personnage énigmatique.

1 – Les cadrans de Château-Queyras

Avant de prendre la route étroite qui monte en face du château vers Les Meyries et Le Rouet, levons la tête pour contempler le magnifique cadran de la place, face à la fontaine, qui a été restauré par Evelyne Peyrot, il y a déjà quelques années. Ce cadran, daté 1828 et montrant les quatre signes du zodiaque en positions inversées à la façon de l'inconnu, possède trois devises :

- Ante Solem permanet nomen Dni (Avant le Soleil demeure le nom du Seigneur).
- Pourquoi la chercher si c'est pour la perdre.
- Soli Soli Soli (Un jeu de mot: Au Seul Soleil de cette Terre).

La figure 1 ci-contre montre ce

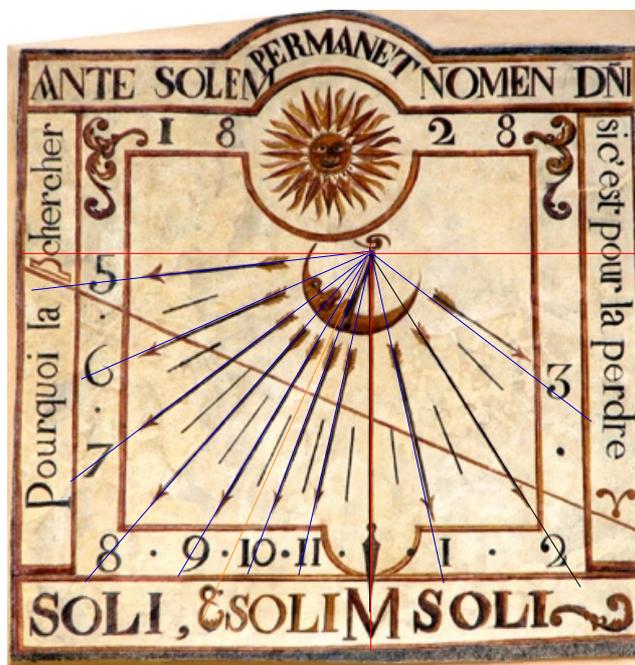


Fig. 1. le cadran de la place de Château-Queyras .

cadran sur lequel nous avons tracé en bleu l'éventail horaire calculé pour le lieu N 44° 45' 18" ; E 6° 45' 10" avec une déclinaison gnomonique de - 27°30'. A part un léger écart de la ligne de 15 heures, nous constatons son exactitude.

L'écart de la ligne de 15 heures peut s'expliquer, car le point d'intersection du rayon correspondant du cercle diviseur avec l'équatoriale est assez éloigné et donc imprécis. Le deuxième cadran qui attire l'attention à Château-Qeyras est celui du château (voir figure 2).

Ce cadran possède la devise : EGO TEMPORIS MENSURA SUM, c'est-à-dire "Je suis la mesure du temps", ainsi qu'une ligne équinoxiale très nette. Par contre, il ne possède plus de style et la jambe est complètement tordue. On peut faire les remarques suivantes :

1 - La devise n'est pas utilisée ailleurs par notre inconnu ;

2 - Le décor et le graphisme du cadran ne se retrouvent pas sur les cadrans de ce cadranier ;

3 - Les signes du zodiaque qui apparaissent sur l'équinoxiale sont dans le bon sens, ce qui n'est pas non plus dans les habitudes de notre inconnu ;

4 - L'éventail horaire recalculé pour une déclinaison de - 43° donne une sous-styloire à 8 h 30, et les lignes horaires du matin sont assez bonnes (en bleu sur la figure), mais celles de l'après-midi sont plutôt éloignées des bonnes habitudes du cadranier recherché.

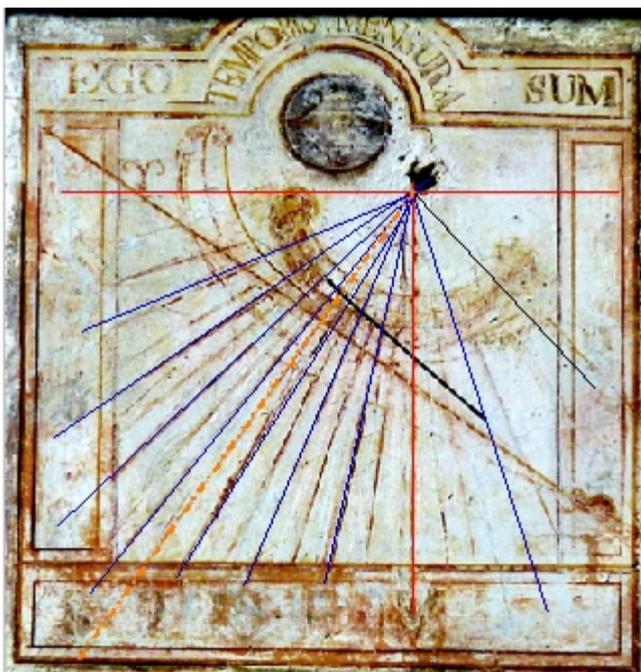


Fig. 2. Le cadran du château [2].

Nous en concluons donc que l'auteur du cadran du château n'est pas notre inconnu.

2 - Au Rouet

Ce petit hameau tout en longueur se situe juste au-dessus de Château-Queyras, au nord sur la commune de Château-Ville-Vieille. On y trouve deux cadrans réalisés par notre inconnu : celui de la dernière maison au bout de l'unique chemin a été restauré par Rémi Potey avec sa devise "DIEU SOIT BENI", tandis que l'autre, situé sur la 5 cinquième maison avant la fin de ce chemin se trouve presque dans son état d'origine comme le montre le cliché de la figure 3 ci-dessous. Ces deux cadrans, se trouvant sur des maisons bien alignées le long du chemin ont presque la même déclinaison, mais nous allons tenter de découvrir l'énigme qui se cache derrière ces deux cadrans. Penchons nous d'abord sur le dernier cadran qui, bien qu'ayant un style tordu, montre encore des tracés et sa devise, laquelle peu lisible au bas du cadran est "A DIEU SEUL HONNEUR ET GLOIRE", est classique pour ce cadranier (figure 3). Une ligne horizontale et un cercle "Z" sont facilement mis en évidence et les lignes

horaires sont chiffrées, mais ces chiffres apparaissent dédoublés, comme si une restauration intermédiaire avait été faite avec un éventail horaire différent.

Nous avons d'abord recalculé ce cadran pour en vérifier l'éventail horaire et en supposant la table verticale (voir figure 4).



Fig. 3. Cadran ancien du Rouet.

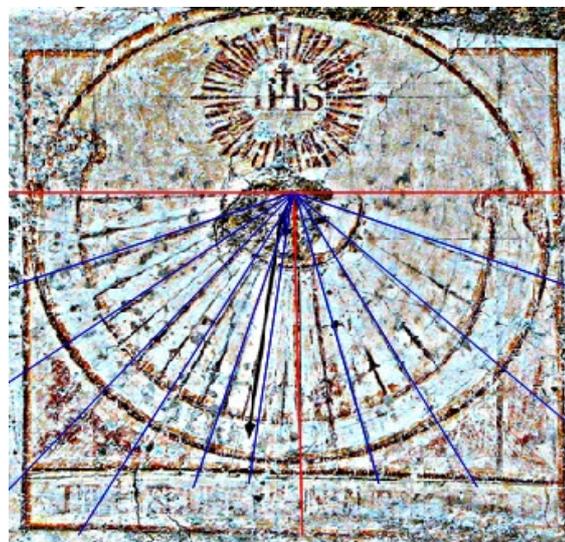


Fig. 4. Le cadran du Rouet et son éventail horaire recalculé.

Les coordonnées du Rouet étant respectivement $44,763^\circ$ et $6,753^\circ$, le cadran a une déclinaison voisine de -20° , ce qui place la sous-styloire à 10 heures 10. Le cercle diviseur est invisible, mais on voit encore assez bien le cercle des latitudes centré sur la ligne de midi, et le cercle "Z" centré en C et coupant l'horizon au point "Z" à 6 h en accord avec le calcul. Par contre, nous découvrons que l'éventail horaire est quelque peu différent du calcul. Quelle est la raison des différences observées ?

Comme nous savons que ce cadranier sait tenir compte d'une inclinaison du mur, un nouveau calcul va nous mettre sur la piste, en prenant une petite inclinaison de 4° par rapport à la verticale. Cette fois-ci, nous retrouvons l'éventail horaire du cadran ! et il n'est pas nécessaire ici de redonner un cliché au lecteur.

Mais rappelez-vous qu'aux Meyries (situés tout près) notre inconnu savait tracer ce type de cadran en se servant astucieusement d'un autre tracé sur un mur vertical voisin. Ou se trouverait cet autre cadran si utile ?

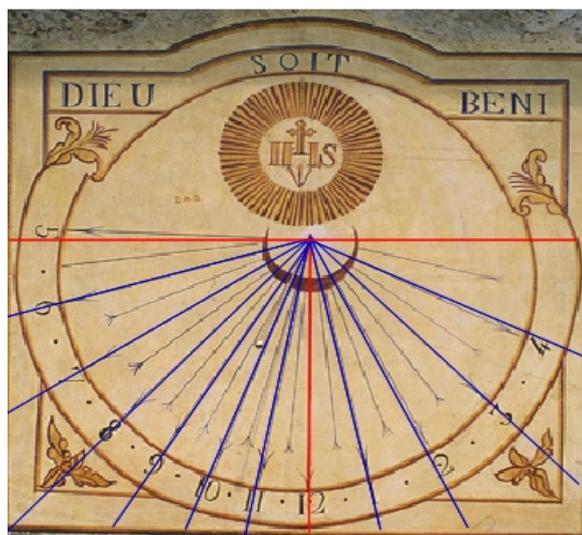


Fig. 5. L'horizon et l'éventail horaire du 2° cadran du Rouet [2] (en bleu: l'éventail calculé).

Nous éluciderons ce mystère en examinant de plus près le deuxième cadran du Rouet. Ce dernier est construit sur un mur vertical et l'éventail horaire est différent ; pour s'en rendre compte, il suffit de regarder la ligne de 5 heures qui se trouve, cette fois, au dessus de l'horizon. Recalculons ce cadran en prenant une déclinaison de -18° , ce qui place la ligne sous-styloire à 10 heures 20. Quelle n'est pas notre satisfaction de constater cette fois-ci que l'éventail horaire qui apparaît en bleu sur la figure est correct, alors nous pourrions dire comme l'inconnu : "Dieu soit béni".

Et voilà sans doute la raison pour laquelle nous trouvons deux cadrans au Rouet, mais le restaurateur du premier n'avait sans doute pas pris en compte l'inclinaison du mur pour chiffrer les lignes à nouveau !

3 - A Ville-Vieille

En redescendant du Rouet nous passons à Château-Ville-Vieille où il faut remarquer sur l'église le cadran restauré par Rémi Potey. (figure 6).

Ce cadran daté 1821, est orienté plein sud et possède trois devises latines :

1- Ante Solem permanet nomen DNI (Domini) - (Avant le Soleil demeure le nom du Seigneur).

2 - Vita fugit sicut umbra - (La vie s'enfuit comme l'ombre).

3- A Solis ortu usque ad occasum L.N.D (Laudabile Nomen Domini) (Du lever du Soleil jusqu'à son coucher, il faut louer le nom du Seigneur).

En 1821, la séparation de l'Eglise et de l'Etat n'était pas encore prononcée, mais l'inscription "Jean Falques Maire" montre l'ouverture qui s'ensuivra.

Ces devises et leurs graphismes ne sont pas sans évoquer celles du cadran de la place d'Armes de Briançon, que nous reproduisons à la fin (figure 11), ainsi que celles de l'église d'Abriès. Peut-on en déduire que le réalisateur de ces cadrans est le même ?

De plus, on distingue bien à droite le signe de la Balance, à l'horizontale au-dessus de « DNI ». L'éventail horaire de ce cadran est correct, le lecteur pourra s'en assurer.

4 - Les cadrans de Fontgillarde

La route qui passe à Molines vers le col Agnel (2 744 m) nous conduit à Fontgillarde, où se trouvent trois cadrans réalisés par notre cadranier, le plus connu se situant à l'entrée du village sur l'ancien bar-tabac ; les deux autres sont des cadrans complémentaires peints et restaurés à l'angle sud-est de l'église.

4 - 1 Le cadran de l'ancien bar-tabac "Au Soleil Couchant"

4-1-1 Description:



Fig. 6. le cadran de l'église de Château-Ville-Vieille.

Il s'agit d'un ancien cadran bien restauré si l'on en juge par de vieux clichés (voir figure 7 et [1]). Ce cadran est assez fortement déclinant ouest ($D = 38^\circ$) avec une sous-styloire à 15 h 12. C'est sans doute ce qui justifia le nom de cet ancien café. Hormis la date de réalisation de 1839, nous lisons très bien les devises: "QUI BENE VIVIT BENE MORITUR" (Qui vit bien, mourra bien) et "VITA FUGIT SICUT UMBRA" (La vie s'enfuit comme l'ombre). Comme à son habitude, ce cadranier a marqué l'équinoxiale des deux signes du zodiaque de la Balance et du Bélier, tandis que le signe du Capricorne apparaît nettement dans la partie basse de la sous-styloire.



Fig. 7. Le cadran du bar-tabac.

Le lecteur se rappellera, que dans la première partie, nous avons émis l'hypothèse que ce cadranier inconnu signait ses cadrans.

Nous avons remarqué en effet que ce cadran de Fontgillarde de 1839 comportait probablement une signature au centre de la décoration inférieure, comme le montre la figure 8.



Fig. 8 (rappel). La « signature » cachée du cadran de Fontgillarde (ancien bar-tabac).

Il ne semble pas que cette signature figure telle quelle sur d'autres réalisations, mais, si on la retrouvait ailleurs, on pourrait donner des initiales à cet inconnu : peut-être « C. A », que l'on devine aussi, bien cachées dans le décor d'autres cadrans. Ce point reste à éclaircir.

4-1-2 L'éventail horaire

L'étude de l'éventail horaire peut se faire à l'aide du test des tangentes, mais, comme nous avons rencontré des difficultés pour le réaliser, nous avons préféré reprendre le calcul complet de ce cadran qui donne des résultats plus précis. La figure 9 ci-après montre la superposition du cliché corrigé en perspective avec l'éventail recalculé (en rouge) pour une déclinaison gnomonique de 38° (soit 15 h 12). D'une façon générale, nous obtenons une certaine exactitude avec le tracé d'origine, mais nous trouvons quelques lignes légèrement fautives entre midi et 16 heures, ce qui explique probablement les difficultés rencontrées pour appliquer le test des tangentes.

Comme nous sommes en 1839, nous avons vu dans la première partie (cadran du Meyries, 1837) que ce cadranier sait parfaitement tenir compte d'une inclinaison de la table, même partielle. Nous avons donc recalculé ce cadran avec une légère inclinaison du support, mais, dans ce cas, le défaut constaté va en s'accroissant, ce qui infirme cette hypothèse. Peut-être la table était-elle légèrement bombée lors de la réalisation ? Ces erreurs minimales, non constatées sur les autres cadrans de notre inconnu, restent donc sans explication pour l'instant.

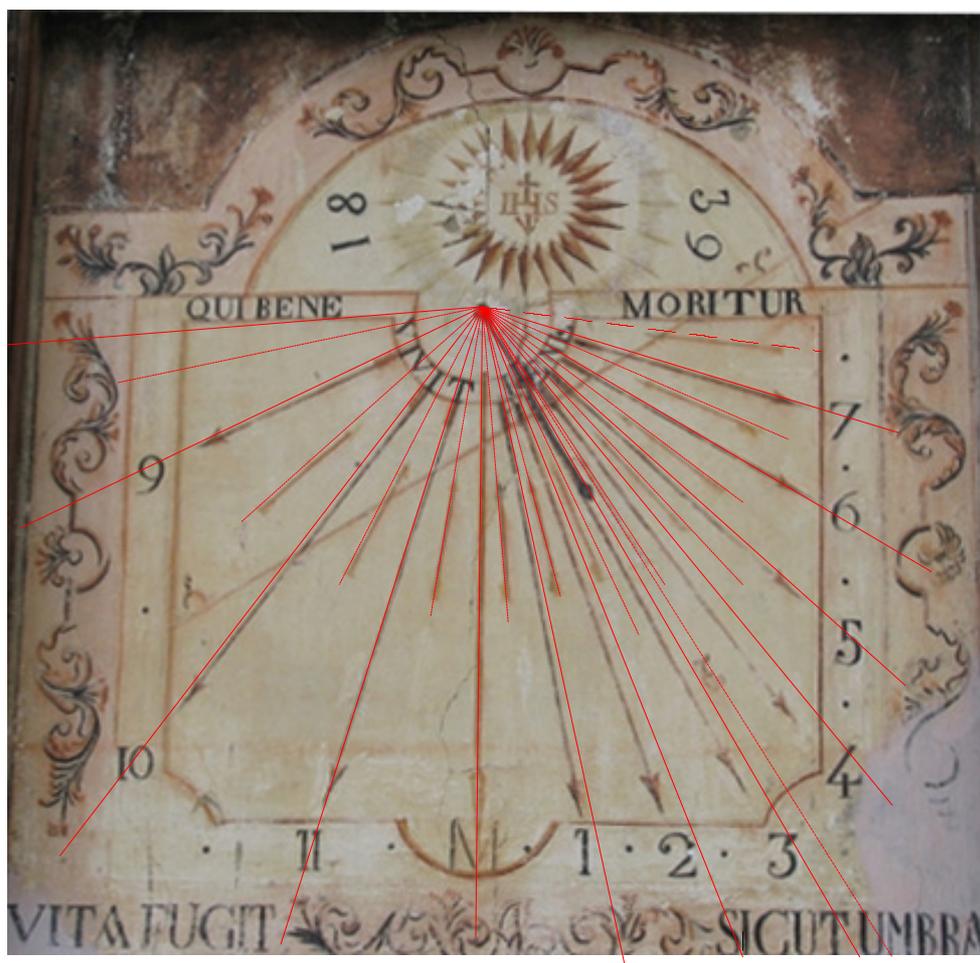
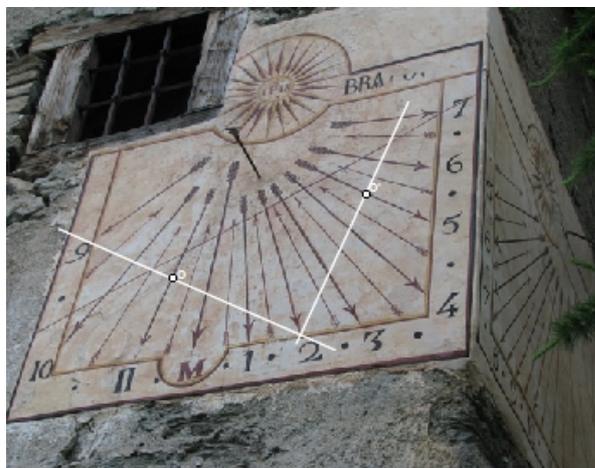


Fig. 9 . Le cadran du bar-tabac recalculé.

4-2 Les deux cadrans complémentaires de l'église

Les deux clichés ci-après montrent ces cadrans complémentaires qui ont été restaurés.



▲ Fig. 9a. Cadran sud-ouest



Fig. 9b. Cadran sud-est ►

Fig. 9. Les projections gnomoniques des deux cadrans complémentaires de l'église.

Sur ces deux clichés, nous avons appliqué le "test des tangentes" (lignes blanches) avec les deux centres de symétrie respectifs O et O'. Sur le cadran sud-ouest ayant une sous-styloire vers 15 heures avec un angle horaire de $+35^\circ$, les lignes se coupent à 14 heures tandis que sur le cadran sud-est avec une sous-styloire vers 7 h 45 (angle horaire -55°), elles se coupent à 10 heures. Pour ces deux cadrans, on peut voir que la symétrie des points d'intersection avec les lignes horaires par rapport à ces deux centres est respectée, donc il s'agit bien de deux projections gnomoniques et les deux styles parallèles sont bien orientés.

Par contre, la devise du cadran sud-ouest pose un problème, que nous allons tenter de résoudre en examinant celle-ci de plus près.

Tout d'abord constatons que la devise partielle restaurée semble indiquer: "BRA..TUT" ce qui peut orienter vers "UMBRA..TUT" ainsi que le suggère celui de l'église d'Abriès. Le lecteur se doute que cette explication n'étant pas satisfaisante, nous avons travaillé sur un cliché pris avant restauration et reproduit ci-dessous en augmentant à plusieurs reprises la netteté et le



Fig. 10. Une vue partielle du cadran sud-ouest avant restauration [2].

contraste. Nous reproduisons ci-contre une vue partielle de ce cliché.

Cette fois-ci, une lecture plus approfondie nous donne une terminaison fort différente : "...T,RATU(R)" le dernier (R) étant, pour l'instant, suggéré. Un effort supplémentaire nous livre: "...T,R(E)TU(R)", puis enfin: "ToR(I)TUR", en remarquant que les deux premières lettres T et o doivent être imbriquées, car le cadranier a sans doute voulu gagner de la place.

C'est alors que le début de cette devise s'éclaire : il ne s'agit pas de l'imbrication d'un T et d'un o, mais celle d'un **M** et d'un o, ce qui donne finalement le mot : "**M**oRITUR" que l'on retrouve aussi sur les autres cadrans de cet auteur, notamment sur le cadran voisin du bar-tabac et sur les cadrans proches de Château-Ville-Vieille et du Meyriès. Dans cette hypothèse, la devise supérieure complète, qui fut tronquée par le percement de la fenêtre, était probablement : " (Qui bene vivit bene) **M**ORITUR".

Conclusion de cette troisième partie : "**Mieux que Zerbola**" [3]

Encore que notre promenade ne fut pas exhaustive, elle n'a pas permis de trouver le nom qui se cache derrière tous ces cadrans réalisés par le même inconnu. Cependant nous avons appris qu'il maîtrisait bien la gnomonique et qu'il pouvait tenir compte de l'inclinaison des murs, ce qui est tout à fait remarquable à cette époque. Un cadran à Fontgillarde nous montre une "signature" était-ce la sienne ? En outre, les nombreuses références religieuses et le décryptage de certaines devises latines de La Chalpe de Saint-Véran nous permettent de penser qu'il s'agissait d'un ecclésiastique, probablement un ancien moine. Était-il le maître de Zerbola ?

Bibliographie

[1] Voir *Premières Images du Queyras* Editions du Queyras, 2003, p 179.

[2] Obtenu après traitement d'un ancien cliché de Pierre Putelat.

[3] Le nom de "Zerbola" (et non Zarbula) apparaît sur la facture du cadran du Villard-de-Valouise ainsi que sur celle des fresques de l'église de Saint-Véran trouvée en 2011 par Gaëlle Putelat. En outre ce nom correspond bien à celui de certaines familles piémontaises retrouvé dans les cimetières.



Fig. 11. le cadran de la place d'armes de Briançon.

ANNEXE (mise à jour)

Cadran réalisés par l'inconnu

Commune	date	Lieu	signes du zodiaque	déclinaison
Abriès	1821	Eglise		0°
Château-Ville-Vieille	18 ?	Le Rouet		- 20°
Château-Ville-Vieille	18 ?	Le Rouet		- 18°
Château-Queyras	1828	Place	♈ ♉ ♊ ♋ ♌	- 27°30
Château-Queyras	1841	Eglise [4]		
Château-Ville-Vieille	1837	Les Meyries	♋ ♌	- 105°
Château-Ville-Vieille	1837	Les Meyries	♌ ♍	- 10°
Château-Ville-Vieille	1839	Les Meyries	♌ ♍	17°
Château-Ville-Vieille	1821	église		0°
Fontgillarde	1839	Ancien tabac	♌ ♉ ♋	38°
Fontgillarde	18 ?	Eglise-Est		- 55°
Fontgillarde	18 ?	Eglise-Ouest		35°
Saint-Véran	1835	Gîte	♌ ♍	32°
Saint-Véran	1836	La Chalp-médian	♌ ♉ ♋	90°
Saint-Véran	1836	La Chalp-médian	♌	0°
Saint-Véran	≥1836	La Chalp-Haut	effacés	-5°
Saint-Véran	1836	La Chalp-D5	♌ ♉ ♋	86°
Saint-Véran	1836	La Chalp-D5	♌ ♉	- 4°

[4] Nous avons vu que ce cadran avait été restauré en 1939, mais qu'il comporte des éléments graphiques identiques. En outre, la devise se retrouve au sein de son inscription.

Autres cadrans attribuables à l'inconnu

Lieu	date	Lieu	signes	déclinaison
Aiguilles	1838	place		
Briançon [5]	1823	Place d'Armes	♌ ♍	20°

[5] Bien que restauré, ce cadran de la place d'Armes de Briançon est très voisin de celui de l'église de Château-Ville-Vieille (graphismes et devises).





Le curieux manuscrit de Fournes

Jacques VIALLE

Un curieux manuscrit traitant de gnomonique pose divers problèmes quant à son auteur et à la compétence de ce dernier en ce domaine. Le présent article propose quelques solutions plausibles à l'énigme.

Au début de 2011, la commission des cadrans solaires a reçu communication du fac-simile (voir exemple d'une page fig. 1) d'un manuscrit portant le titre de *Cadrans solaires à Fournes*¹, découvert par Pedro Novella chez un bouquiniste de Majorque. Or, il n'y a pas à l'heure actuelle de cadran solaire connu à Fournes en Weppes (Nord) et, pour autant qu'on le sache, il n'y en a jamais eu. Ce fascicule de 25, pages relié à l'italienne, soulève plusieurs questions, d'autant plus qu'il comporte de nombreuses erreurs en matière d'astronomie élémentaire et de gnomonique.

Qui donc alors a rédigé ce curieux manuscrit et dans quel but ?

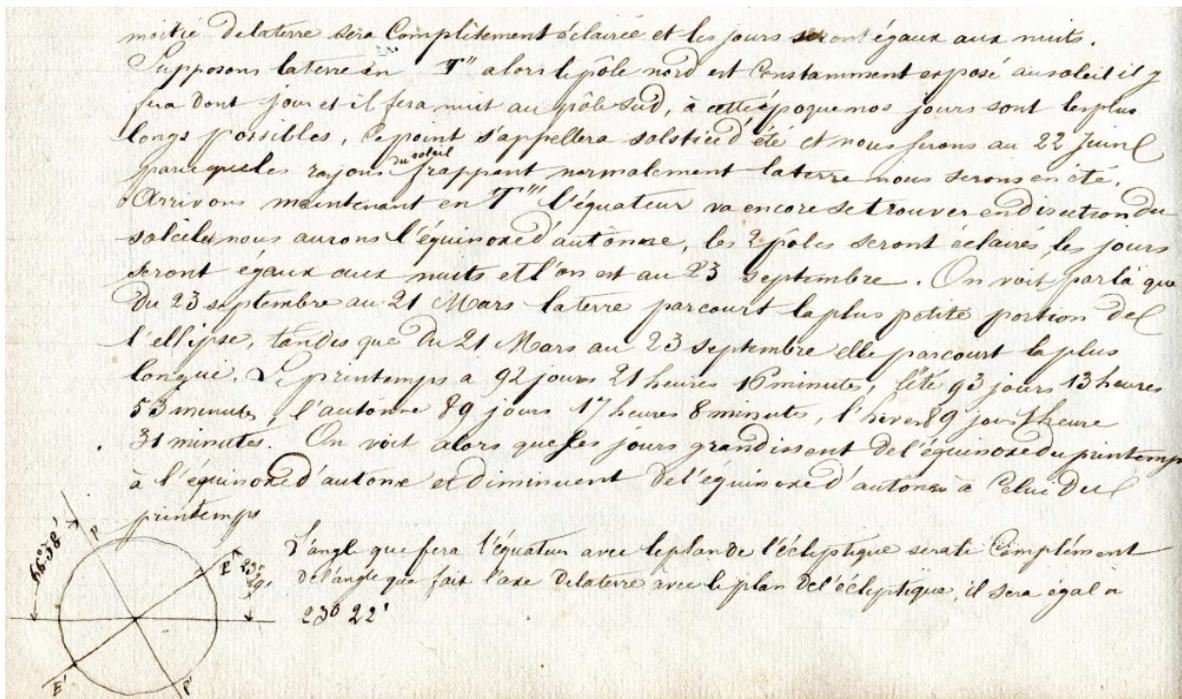


Fig. 1. Exemple d'une page du manuscrit (p. 7).

Remarquer la durée erronée attribuée aux saisons et en bas à gauche l'erreur de calcul qui donne à l'angle droit une valeur de 89° 67' !

Fort heureusement, on retrouve disséminées ça et là dans ce manuscrit quelques indications qui, sans donner une réponse définitive, conduisent à des conjectures tout à fait plausibles. Ainsi, une première indication nous est donnée par deux documents insérés dans le manuscrit : un calendrier de l'année 1922 et une carte postale² représentant une classe de

1 Les numéros de pages mentionnés ci-après dans le texte renvoient aux pages de la copie [.pdf] consultable auprès de la commission des cadrans solaires de la SAF.

2 Selon la base de données Mnémosyne de l'INRDP, cette carte date de 1910, mais il est probable qu'elle a connu plusieurs tirages par la suite.

dessin industriel de l'École supérieure professionnelle de Fournes (fig. 2). Ces documents annexes, qui ne font pas partie du manuscrit, permettent néanmoins de le dater de l'année 1922 (ou d'une année postérieure proche). D'autre part, une recherche sur Internet suggère que cette école supérieure professionnelle est très probablement le pensionnat Gombert devenu par la suite pensionnat Vercouttre-Gombert. Fondé en 1794, cet établissement privé dispensait un enseignement général et professionnel, accueillant entre autres des élèves boursiers de l'État ou des Compagnies de chemin de fer. L'établissement préparait ses élèves non seulement aux examens et concours classiques de l'époque (brevets élémentaire et supérieur, admission aux écoles normales primaires), mais aussi aux concours de grandes écoles techniques comme les Arts & Métiers ou les Ponts & Chaussées ainsi qu'à divers concours administratifs. Comme on le voit, les objectifs étaient ambitieux et la réputation de l'école, garantie par le succès des élèves aux examens et concours, ne pouvait reposer que sur la qualité du corps enseignant et, naturellement, sur les aptitudes intellectuelles des élèves.



Fig. 2. Un cours de dessin industriel au pensionnat Gombert vers 1910 (carte postale E. C., éditeur à Lille (59)).

Or, quel qu'en ait été le rédacteur (un élève du pensionnat ou un professeur ?), celui-ci fait montre d'étranges lacunes en matière d'astronomie élémentaire, citant des données carrément erronées. Par exemple, les distances de la Terre au Soleil à l'aphélie et au périhélie sont respectivement trop grande et trop faible (p. 3), la valeur p. 7 de l'obliquité de l'écliptique ($23^{\circ} 22'$, trop faible – on notera au passage l'erreur de calcul sur la figure de cette même page 7, qui fait de $23^{\circ} 29'$ le complément de $66^{\circ} 38'$!), enfin une durée des saisons (donnée à la seconde près, précision illusoire) qui aboutit à une année tropique de 363 j 53 min 48 s, évidemment trop courte. L'auteur du manuscrit était-il alors plus à l'aise en gnomonique ? On peut en douter quand il mentionne l'usage de la boussole comme moyen alternatif d'orienter un cadran solaire, d'autant plus qu'il donne une valeur inexacte de la déclinaison magnétique ($22^{\circ} 10'$, alors que, selon le logiciel Declimag®, elle était à Fournes (très) approximativement de l'ordre de -12° en 1922). De plus, il paraît ignorer que cette valeur change avec le lieu considéré et omet de préciser si le méridien magnétique est à l'est ou à l'ouest du méridien géographique. Enfin, pour déterminer l'intersection du plan d'un cadran vertical non déclinant avec le plan du méridien, il est inutile d'avoir une montre « réglée avec Paris » (p. 12) puisqu'un simple fil à plomb suffit.

Alors, qui a vraisemblablement rédigé le manuscrit : un élève du pensionnat Gombert ou un membre du personnel, par exemple un professeur de dessin technique ? Le texte comporte quelques fautes mineures de français (« ligne oraire » pour « ligne horaire », « hémisphère » parfois considéré à tort comme féminin ou quelques rares impropriétés : ce qu'il nomme « l'antipode du lieu » est en fait *stricto sensu* « l'antiméridien »). Ces fautes et ces impropriétés suggèrent que le rédacteur du manuscrit pourrait avoir été un élève du pensionnat rédigeant à partir de souvenirs de cours ou de notes prises en classe. Malgré la fluidité générale du style et le caractère soigné des nombreux croquis qui accompagnent le texte, cette hypothèse paraît renforcée par une écriture qui, à certains endroits, fait penser à une rédaction « au fil de la plume ».

Cependant, certains maniérismes caractéristiques (les « tics » de langage) de l'enseignement magistral suggèrent que l'auteur du manuscrit pourrait avoir été un professeur de dessin technique de l'établissement. Ainsi, le rédacteur utilise souvent l'impératif ou l'indicatif présent à la première ou à la troisième personne (« supposons que nous prenions un point m... » (p. 9), « nous aurons ainsi nos lignes oraires [sic] », « je marque l'ombre portée sur le plan horizontal par le fil à plomb à midi et j'ai ainsi la méridienne » (p. 13) ; ou encore des expressions propres au langage du dessin technique (« la ligne opposée, c'est-à-dire l'antipode du lieu sera cotée minuit » (p. 9). On peut toutefois objecter qu'il arrive souvent qu'en rédigeant, un élève adopte les maniérismes du maître. L'hypothèse qu'un professeur de dessin technique pourrait être l'auteur de ces notes semble cependant confortée par une référence ambiguë, p. 20, à « mon cours de dessin ». Malheureusement, une recherche dans le Catalogue collectif de la Bibliothèque nationale de France (CcFr), accessible sur le site de la BNF et dans la base de données SUDOC-ABES n'apporte pas de réponse définitive en raison de critères de recherche trop vagues : on ne connaît en effet ni le nom de l'auteur ni la date de cette éventuelle publication.

D'autre part, il n'est pas rare qu'un élève s'attribue la possession d'un manuel, « mon cours de dessin (technique) » pouvant signifier en fait « le cours de dessin technique qui me sert de manuel ». Quant à la signature qui se trouve sur le coin supérieur droit de la p. 27 (fig. 3) et que l'on peut raisonnablement supposer être celle du propriétaire du carnet, elle est malheureusement illisible.

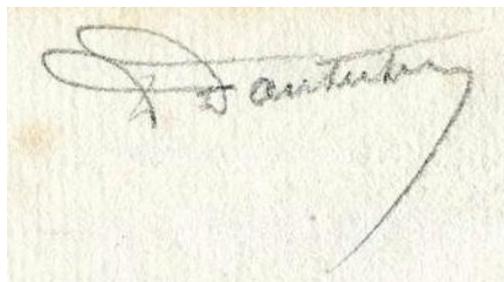


Fig. 3. La signature (p. 27 du ms).

Que peut encore nous apprendre le carnet ? Les deux exemples de tracés donnés dans le texte n'apportent guère d'information : l'exemple de tracé vertical proposé correspond à une latitude des Pays-Bas et le cadran horizontal est tracé pour la ville d'Aix-en-Provence. Tout au plus pourrait-on conjecturer que l'auteur aurait pu avoir des relations avec cette ville (qui, incidemment, possédait une école des Arts et Métiers). Quant aux 33 devises listées à la fin du carnet, elles n'apportent guère d'information, si ce n'est qu'aucune de ces devises, sauf une³, ne figure dans les recueils classiques consultés, c'est-à-dire Gatty, Boursier et O. Escuder (dir.), références bien connues des membres de la Commission. De plus, ces devises sont soit d'une grande banalité (par exemple *Nubilo serena succerunt* qui correspond à notre dicton « Après la pluie le beau temps »), soit des citations tirées des grands poètes latins comme Virgile, Plaute ou Horace. Dans ce cas, le choix de citations glanées au hasard des

3 « Ut cuspis, sic vita fluit, dum stare videtur » [*Comme l'ombre de mon aiguille, la vie passe ainsi, tout en semblant immobile*], voir Boursier, p. 28).

lectures nous ramène à la première hypothèse, c'est-à-dire que ces notes auraient été rédigées par un « potache », futur ingénieur, qui aurait fréquenté les classiques latins.

Ce choix de devises, probablement glanées au hasard de lectures et qui sortent pour la plupart de l'ordinaire, laisse à penser que le rédacteur de *Cadrans solaires à Fournes* a longuement réfléchi au problème. Le fait qu'il ait éprouvé le besoin de conserver ces notes pour les rassembler dans une reliure très soignée révèle aussi qu'il s'intéressait aux cadrans solaires et envisageait peut-être même d'en concevoir un.

Ce qui laisse perplexe dans ces notes, cependant, c'est l'ignorance flagrante de données astronomiques élémentaires et une connaissance très incertaine de la gnomonique : si une telle méconnaissance reste difficile à admettre, bien que tout à fait possible de la part d'un enseignant non spécialiste, elle reste très plausible pour un élève qui aurait mal assimilé un cours de cosmographie et appliquerait maladroitement les principes de la géométrie projective à la gnomonique. Ce manuscrit suscite aussi bien d'autres questions, par exemple celle du cheminement qui l'a conduit de Fournes à la boutique d'un bouquiniste aux Baléares.

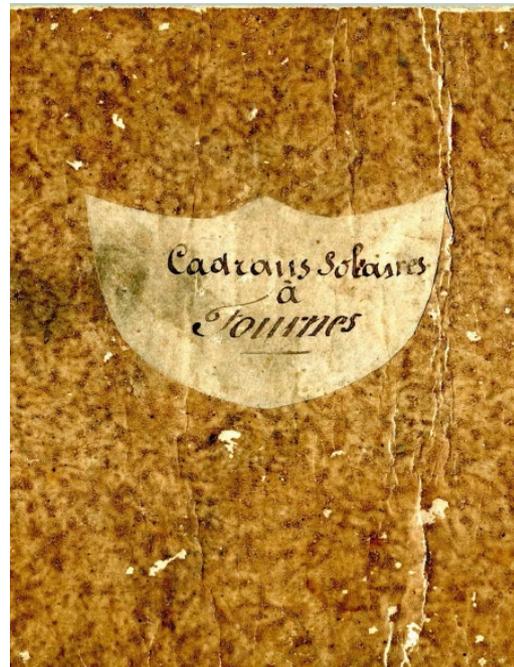
En définitive, la seule certitude est que l'origine de *Cadrans solaires à Fournes* se trouve au ci-devant pensionnat Gombert de cette même ville.



Info-mail n° 14 du 24 février 2011 : *Cadrans solaires à Fournes*

Pedro NOVELLA nous fait découvrir un curieux manuscrit qu'il a acheté dans une librairie de Mallorca et portant le titre de *Cadrans solaires à Fournes*.

A l'intérieur, il y avait un calendrier daté de 1922 et une photo de la salle de dessin de l'Ecole supérieure professionnelle de Fournes près de Lille (département du Nord).



⇒ Dans la version numérique, vous trouverez en annexe :

le fichier "Manuscrit Fournes.pdf" reproduisant le fascicule.



INFORMATIONS DIVERSES



° Dernières réalisations ou découvertes

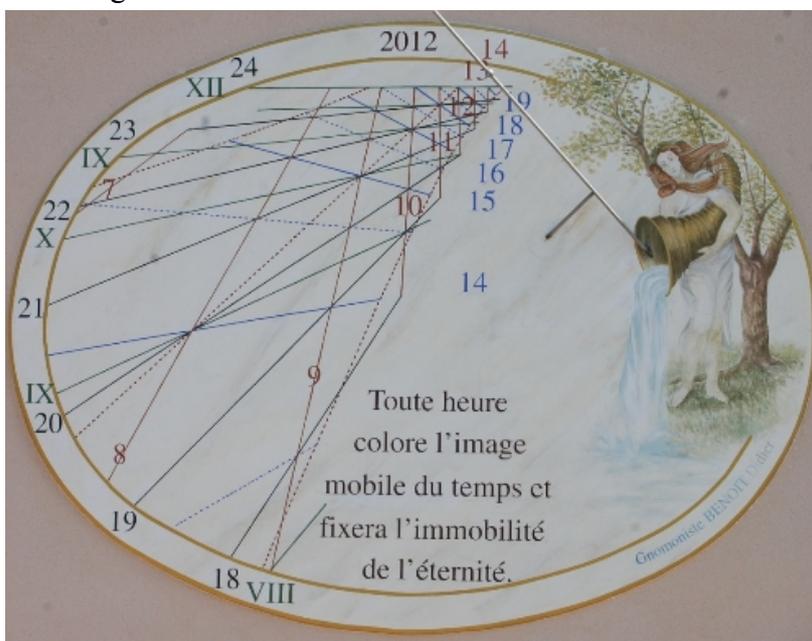
- de Didier Benoit

Un cadran solaire fortement déclinant nord / ouest au 1, rue Léon-Jouhaux à Carmaux (Tarn), œuvre du cadranier-gnomoniste Didier Benoit.

Le cadran (270 cm x 200 cm) est réalisé sur un support d'enduit de chaux et ciment. Peinture minérale de technique B du fabricant allemand KEIM.

Le style polaire est en inox massif, de même que le style droit représenté par la boule obtenue par usinage mécanique.

Quatre types d'heures sont tracées : les heures antiques, les heures babyloniennes et italiques, les heures égales dites « équinoxiales ».



⇒ Dans la version numérique, vous trouverez en annexe :

le fichier "Cadran solaire journées du patrimoine 2012.pdf," réalisé à l'occasion des Journées du patrimoine de 2012, présentant le cadran et commentant les différentes sortes d'heures indiquées.

- de Claude Gahon, le Solaflore

Solarflore, à ne pas confondre avec Florasol déjà présenté dans *Cadran Info* n° 26, est une sorte de bouquet de fleurs qui a demandé pas mal de travail et de patience à notre collègue, car « il n'est pas évident de travailler avec des outils plutôt rudimentaires ».

« Le Soleil n'est malheureusement pas de la partie en ce moment et je n'ai pas pu vérifier tous les calages et réglages, mais cela semble à peu près correct, au moins dans



son principe.



Chaque "fleur" est gravée d'un numéro correspondant à une heure, le numéro suivant est sur la fleur située juste sur la spire au-dessus (avec un décalage de 15° dans le plan équatorial).

L'heure "ronde" est atteinte dans une fleur quand l'ombre de sa pointe est juste sur sa bordure rectiligne.

Naturellement, 24 fleurs c'est trop, mais cela remplit un peu mieux la structure et complète l'effet décoratif (enfin, c'est mon avis !).

A l'origine du projet, la spirale devait aussi être le pied d'assise, mais la lame n'est pas assez épaisse et l'ensemble de la spirale ne se tenait pas rigide. Je l'ai remplacé par un renfort en tube, c'est un peu moins esthétique, mais ça tient !

Mon épouse se désole car, pour "faire briller", cela ne sera pas facile. Il reste à attendre le Soleil ».

- de Claude Gahon, le Sunlaser et VSS 13

En janvier de cette année, Cl. Gahon dit avoir « retrouvé un peu d'inspiration » et nous adresse les photos de **Sunlaser** et **VSS 13** (comme Vaisseau Spatial Solaire, 13 étant pour l'année).

« Ces noms m'ont été inspirés par mes petits-enfants qui, en voyant les objets, les ont pris en main et ont joué à la guerre spatiale ! Sans doute l'influence de Play Station ou Star Wars.!



Sunlaser

Ces 2 deux cadrans sont construits selon le même principe : des disques, tous dans un plan équatorial, empilés sur 3 niveaux, dans lesquels sont découpées des encoches. Les encoches sont perpendiculaires au plan des disques, donc leurs arêtes sont parallèles à l'axe terrestre. L'ouverture des encoches étant de 15° , leurs faces sont donc dans les plans horaires ; ainsi, à chacune d'elles correspond une heure ronde repérée par un nombre gravé.

Il faut chercher l'encoche qui reste totalement éclairée par le soleil, et ceci pendant une heure complète, les autres encoches étant alors ou totalement ou partiellement ombrées.



Vaisseau Spatial Solaire13.

J'espère que le Soleil reviendra bientôt pour vérifier mes calculs et découps !!! Le tout est réalisé en bois et "décoré" au pyrograveur ».

- de Claude Gahon, le Macao

Macao est le nom de l'ara rouge, ce magnifique perroquet multicolore, qui m'a donc inspiré pour mon dernier cadran dont je vous joins quelques photos.



Photo 1.

C'est un vertical à $48,88^\circ$ de latitude nord, déclinant $5,40^\circ$ est, avec correction de longitude $2,73^\circ$ est.

En y regardant de plus près, on y trouve les arcs zodiacaux. Jusque-là rien d'extraordinaire, mais que vient faire le perroquet là-dedans ?

Pas de style, mais un gnomon (ici de 3 cm de hauteur).

Le perroquet pivote autour d'un axe situé sur le pied du style fictif.

Il suffit de faire tangenter la queue du perroquet à la pointe de l'ombre du gnomon (photo 2). On lit l'heure à la pointe du bec du perroquet (photo 3) ! Vous voyez qu'il avait son mot à dire cet oiseau bavard.

Oui, mais voilà, l'oiseau rare ne peut faire un tour complet car il arrive que sa queue bute sur le gnomon ! Qu'à cela ne tienne, notre oiseau a plus d'un tour dans son sac, il suffit de le retourner (photo 4). Pour donner une idée des dimensions, le perroquet mesure 50 cm hors tout.



Photo 2.

Je n'ai malheureusement pas de talent de peintre, j'ai simplement voulu un ensemble un peu coloré.

On s'apercevra très vite qu'aux heures "extrêmes" lisibles sur le cadran, la pointe de l'ombre du gnomon sera difficile à distinguer car très éloignée, d'où une précision faible ; mais

c'est le principe qui m'intéressait. En effet, j'avais d'abord pensé à une représentation au sol : un piéton se déplaçant sur une bande graduée en heures et cherchant à former un alignement avec le pied d'un style fictif et la pointe de l'ombre d'un gnomon (poteau, mât, borne, etc.), histoire de concurrencer l'analemme ou la ficelle de Joël ! Peut-être une prochaine réalisation !

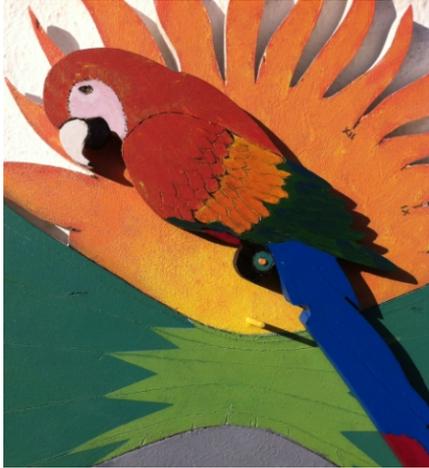


Photo 3.



Photo 4.

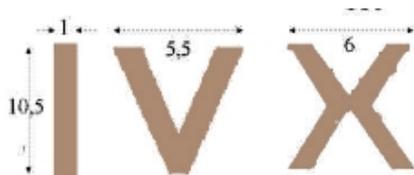
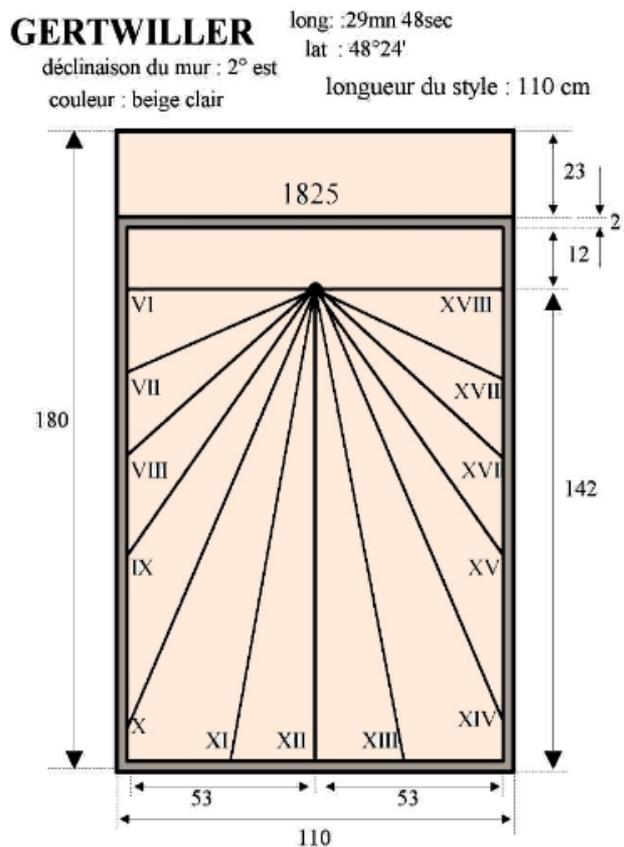
Vos appréciations et remarques seront les bienvenues.

- de Jean-Marie Poncelet

« Après plus de dix années, le conseil de fabrique de l'église protestante de Gertwiller (Bas-Rhin) a décidé de faire rénover le cadran solaire de 1825, situé sur la face arrière de l'édifice. La restauration s'est faite à l'identique.

C'est un membre du Conseil qui s'est chargé de la peinture de fond.

J'avais pu, en 1995, accéder au cadran pour en prendre toutes les mesures utiles.



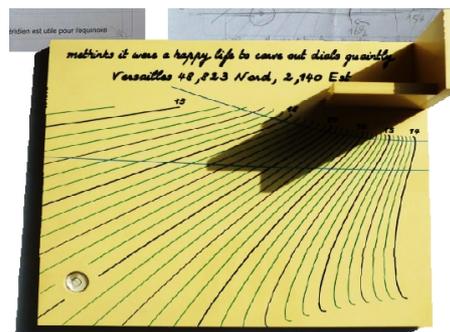


- de Jean-Michel Ansel et Frédéric Rousseau

En complément à la présentation de F. Rousseau lors de notre réunion d'octobre 2012 : " l'Égypte antique à l'Allemagne du début XX^e ", Jean-Michel Ansel propose en annexe ses découvertes gnomoniques. Celles-ci nous entraînent jusqu'aux cadrans bifilaires.

⇒ Dans la version numérique, vous trouverez en annexe :

le fichier JM ANSEL-F.ROUSSEAU



- de Hassan Tabili

Alain Ferreira avait des contacts avec Hassan Tabili du lycée Hassan II, à Benslimane, au Maroc. Benslimane (en arabe : بنسليمان) est le chef-lieu de la province du même nom, dans la région de Chaouia-Ouardigha (الشاوية ورديغة), située sur la plaine atlantique, à 55 km de Casablanca, à 60 km de Rabat.

Alain l'a rencontré en été 2012 au festival d'astronomie d'Ifrane, et c'est ainsi que Hassan Tabili, très lié aux clubs, associations et observatoires du Maroc, a accepté de devenir correspondant de notre commission.

Voici quelques-une de ses découvertes de cadrans solaires marocains.



- A la grande mosquée de Meknès : un premier cadran



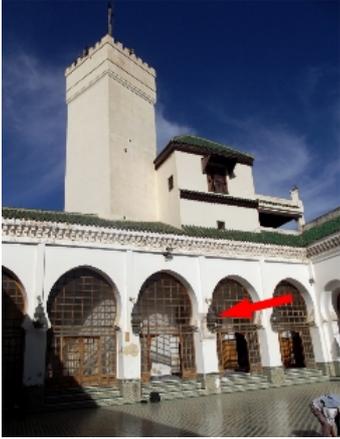
Un deuxième cadran sur la terrasse.



Sur la terrasse, deux cadrans horizontaux.



- A la mosquée des Andalous, à Fès :



- Photographies suivantes :

- n° 1 : cadran vertical à droite du portail de la grande mosquée de Zerhoun ;
- n° 2 : cadran vertical orienté sur à la grande mosquée de Salé ;
- n° 3 : grand cadran de la mosquée Qaraouiyine à Fès ;
- n° 4 : petit cadran de la mosquée Qaraouiyine à Fès.



◀ Photo n° 1

Photo n° 2 ▲



▲ Photo n° 3

Photo n° 4 ▶



- A Volubilis, deux cadrans romains
« Jérôme Bonnin rappelle que le terme de

SCAPHE ne devrait s'appliquer en toute logique, qu'aux cadrans hémisphériques ou de type sphérique. Les cadrans coniques ou cylindriques ne doivent pas en être qualifiés. En effet, le terme scaphé en grec, est bien spécifique et ne désigne pas tous les instruments de mesure du temps »



En terminant sa moisson de cadrans solaires, Hassan Tabili a découvert, dans une ruelle de Fès, un astrolabe sphérique et une sphère céleste.



Enfin, Hassan dit avoir souvent posé la question suivante: « pourquoi ce minaret de Fès est-il incomplet ? Pourquoi n'a-t-il pas de "tête" comme les autres ?

La réponse est qu'il n'est pas utilisé pour l'appel aux prières mais, spécialement conçu pour l'astronome qui doit déterminer le temps des prières et l'observation du croissant de Lune... On m'a dit qu'il y avait des cadrans solaires ».

Affaire à suivre...

NB : Les cadrans signalés par Hassan Tabili (tous ne sont pas présentés ici) sont enregistré dans l'inventaire de notre commission.



- Autres découvertes de Hassan Tabili

◦ Cadran solaire à El Jadida

« C'est avec une grande joie que j'écris ce message pour vous informer que j'ai fait un voyage à El Jadida (Mazagan) pour rechercher un cadran solaire dont j'ai pris connaissance par internet sur le site : www.eljadida.com/galerie/photo-membres-el-jadida-72-0-0.html .

Je voulais le voir de mes yeux. Je croyais qu'il était très difficile à trouver car implanté dans une maison de la ville. Mais, Allah merci, j'ai pu trouver la maison et grâce à son propriétaire j'ai pu le contempler et le photographier.

Ce cadran solaire a été installé par Haj Mohamed El Mohandis en 1890 dans sa maison de la cité portugaise.

Ce cadran existe toujours dans la même maison (photo ci-contre) »



° Un deuxième cadran à la mosquée Benyoussef



Un cadran solaire orne la mosquée Benyoussef à Marrakech : <http://www.flickr.com/photos/34522271@N06/page11/>

Il existe un deuxième cadran, situé en hauteur, près du minaret, sur le toit de la chambre du mowaqit (le scientifique chargé de préciser l'heure des prière et d'observer le



croissant de Lune) comme le montrent la photo ci-dessous à gauche et le détail à droite.



- de Guy Brelivet

« Je souhaitais aussi un cadran sur mon balcon. J'ai eu le privilège de rencontrer Paul Schott dans ma commune et de mesurer tout son talent pour la gnomonique. Mon choix s'est porté sur un cadran multiface cubique avec du matériau régional, pour rester simple et précis dans la réalisation et la fiabilité des indications horaires. Infos techniques :

Matériau : grès rose à grain fin des Vosges du Nord, carrière d'ADAMSWILLER (67320). Concepteur : Paul SCHOTT. Forme : cubique 20x20x20- 4 faces actives-1 face localisation styles en laiton-poids : 18 kg.

Coordonnées : 48° 33 N - 7° 41 E - LINGOLSHEIM - 67380 - inventaire : SAF : 6726701-1. L'hermine a été gravée pour rappeler mes origines finistériennes.



▲ Premiers tracés sur le bloc cubique
Cadran sur son socle ►



- de Didier Benoit

« Très simplement j'ai voulu dans ce nouveau cadran solaire rendre hommage à un cévenol de Génie, Antoine Deparcieux. Tous les deux, nous sommes natifs de ce coin des Cévennes. Si les siècles ne nous avaient pas séparé, nous aurions pu jouer ensemble ou user les bancs des salles de catéchisme et de classes ».

Cadran solaire vertical plan déclinant sud / ouest à style droit (axe de la rondelle ajourée) et style polaire. Il est visible au 1 rue Jules Guesde à Carmaux. Dimension 180 cm x 140 cm.

Devise française :

Il n'est de grand esprit sans sagesse et vertu.

Il n'est d'élus des temps sans talent et probité.

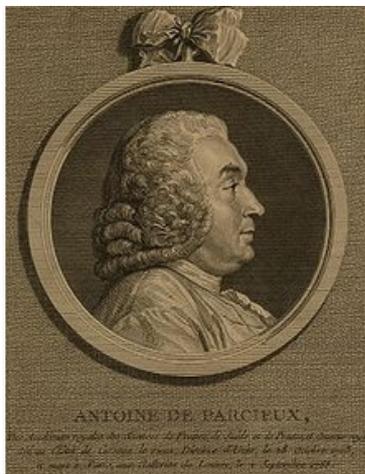
Techniques : Cadran réalisé sur support fait d'un enduit de chaux et ciment. Peinture minérale de technique B du fabricant allemand KEIM.



La facture du style polaire est en inox massif, de même que celle du style droit représentée par la rondelle ajourée obtenue par usinage mécanique.

Le tracé gnomonique : courbe en huit du temps moyen pour la ligne horaire de midi. Cette courbe est parfois appelée courbe de Fouchy du nom de son inventeur ou plus vraisemblablement de son vulgarisateur. Progression de 5 min en 5 min autour de la ligne de 12 heures. Ce principe de tracé était très en vogue au temps de Deparcieux. Il permettait aux habitants des lieux de régler avec précision leur montre. La représentation du zodiac marchait souvent de pair avec ce type de cadran solaire.

Le thème : dernier d'une fratrie de 7 enfants, Antoine Deparcieux vient au monde le 28 octobre 1703 au mas du Clotet du lieu dit Cessous situé dans la paroisse de Peyremale proche de mon village natal, à une époque où Cévennes et royaume de France vivent une période sombre de leur histoire. L'assassinat de l'abbé du Chayla au Pont de Monvert (Lozère), un an auparavant, a entraîné la révolte camisarde. Les Cévennes sont à feu et à sang. De plus, les années qui vont suivre sa naissance seront faites d'hivers froids et longs, de printemps calamiteux et de récoltes détruites. La famine et la misère sont le lot du royaume.



L'enfance d'Antoine Deparcieux sera marquée par ces années difficiles et surtout la mort, alors qu'il est encore très jeune, de ses parents. Laissé à la charge de son frère, son aîné de presque 30 ans, il fréquentera les écoles de Saint Florent et de Porte plus proche du mas que celle de Peyremale. Brillant élève, vers 19 ans il quittera sa famille pour des raisons encore mal définies (brouille avec son frère aîné ?) pour entrer, très certainement sur recommandation, à l'école des jésuites de Lyon. Il y suivra le cycle secondaire avec brillance et approfondira parallèlement les mathématiques, alors non dispensé dans les collèges de France, avec la complicité d'un religieux qui l'avait en estime. Très vite l'élève dépasse le maître et vers 1730 il décide de se rendre à Paris, ville où il ne

connait personne si ce n'est l'adresse d'un collège de Jésuites, pour acquérir les connaissances qui lui font défauts. On sait peu de chose des premières années de Deparcieux à Paris. Il fera rapidement connaissance avec un illustre professeur du collège Royal, Mr de Montcarville qui remarquant ses fabuleuses dispositions s'empressera de l'aider de ses conseils et lui ouvrira la carrière des sciences.

Pour subvenir à ses besoins, notre jeune cévenol va devenir réalisateur de cadrans solaires. Écoutons Monsieur Grandjean de Fouchy dans son éloge d'Antoine Deparcieux, prononcé devant l'Académie des Sciences: *Il possédait éminemment la gnomonique. Son adresse et son exactitude, jointes à la parfaite connaissance qu'il avait des principes sur lesquels cet Art est fondé, assuraient la perfection de ses ouvrages en ce genre. On lui procura les occasions d'en tracer plusieurs, et, entre autres, la belle Méridienne qu'il traça au Louvre pour Mr le Duc de Nevers. Les honoraires qu'il recevait de ses ouvrages, le prix de ses leçons, et, pour ainsi dire, la frugalité et la sage économie ; éloignèrent de lui le besoin, et le mirent en état de se livrer à son génie...*

En 1738, Antoine Deparcieux adresse à l'Académie Royale des Sciences son premier ouvrage important. C'est un traité de trigonométrie rectiligne et sphérique complété par des tables trigonométriques et des tables logarithmiques. Il comprend aussi un traité approfondi de gnomonique.

En 1746, Antoine Deparcieux va sortir son œuvre majeure. C'est un Essai sur les probabilités de la durée de la vie humaine, d'où l'on déduit la manière de déterminer les rentes viagères, tant simple qu'en Tontines. Dès sa parution l'ouvrage sera regardé dans toute

l'Europe comme le plus parfait jamais paru sur ce sujet. Les tables de mortalités de Deparcieux furent utilisées par les compagnies d'assurances et les banques pendant tout le XIX^e siècle et la moitié du XX^e. Par la suite, les progrès de la médecine les rendirent obsolètes. Elles sont regardées aujourd'hui comme l'ouvrage fondateur de la Science Actuarielle (Droit financier). La même année Antoine Deparcieux sera nommé à l'Académie Royale de Paris, Berlin, Stockholm, Metz, Lyon etc...

On lui doit en outre de nombreux mémoires et travaux scientifiques, notamment touchant au domaine hydraulique. Il signera pour Diderot en 1755, les huit pages de l'*Encyclopédie* concernant les moulins.

L'enfant de Cessous, le petit berger des Cévennes, était devenu l'égal des plus grands.

Dessin : Unique portrait connu de Deparcieux du à l'artiste Charles Nicholas

Sources : Propos tirés de la biographie de Deparcieux par Jacques Dardalhon et Gérard Delmas ».

Carmaux le 08.03.2013

- de Claude Gahon, la prise de becs

« Le printemps semble avoir un peu d'avance puisque les cigognes sont déjà présentes ici, ce qui est plutôt rare. Surtout lorsqu'il s'agit d'une famille au complet : un couple et 13 cigogneaux, du jamais vu !

Naturellement, avec une telle famille, la mère cigogne doit s'organiser pour nourrir tout son petit monde. Elle a donc décidé de leur donner à manger chacun leur tour, toutes les heures, et dans l'ordre.



C'est ainsi que seul le petit, qui est juste dans l'ombre du bec de sa mère, aura droit à sa pitance. On le reconnaît à la tache d'ombre qui est juste sur sa tête, c'est donc son heure.

Au travers de cette petite histoire, et au vu des photos, vous reconnaîtrez mon cadran horizontal tout frais fabriqué.

La "table" est gravée selon les lignes horaires du cadran horizontal du lieu, incluant les corrections de longitude et de l'heure du fuseau horaire (je sais, Joël n'aime pas !!)



Le bec de la cigogne "mère" sert de style dont l'inclinaison correspond évidemment à l'angle de la latitude. Les cigogneaux ont un numéro, gravé sur le cou, pour repérer l'heure, et

un trait sur le "crâne" qui sert de repère à la position de l'ombre du bec. L'heure ronde est atteinte quand cette ombre est centrée sur le trait.

Tout se passe comme si le cadran horizontal se situait au niveau des "crânes" des cigogneaux, les traits étant ainsi des portions des lignes horaires.

Quand à la plus grande cigogne, elle n'a aucun rôle dans l'affaire, sinon d'harmoniser "la famille" !

Et si cela s'appelle "Prise de Becs" c'est parcequ'une telle bande d'oiseaux n'arrête pas de se bagarrer pour le festin ».



° Informations diverses

- Le cadran solaire du domaine du marquis de Solage

Lors de recherches dans les archives de la ville de Carmaux, Didier Benoit a trouvé par hasard une vieille photo où l'on voit le cadran solaire du domaine du marquis de Solage. Marquis dont parle le baron Edmond de Rivières dans son livre de 1885 (ou 1881 ?) "Inscription et devises horaires"- *Au domaine du marquis de Carmaux un cadran solaire UMBRA REGIT.*

Le domaine du marquis est aujourd'hui le siège de la communauté de commune du Carmausin.

La restauration du cadran devrait être réalisé prochainement.



- Rénovation d'une méridienne

Voici l'histoire par Francis Tamarit de la rénovation de la méridienne du domaine de La Planta, à Dardagny (extrémité occidentale de la Suisse, Dardagny est délimitée par la frontière avec la France à l'ouest et par le Rhône au sud).

« La mairie de Dardagny m'a offert un très beau livre écrit par des architectes qui ont fait des relevés à la main de toutes les façades de toutes les maisons du village, rue par rue. Magnifique ! Ce livre a été publié en 1994 par l'Etat de Genève, département des Travaux Publics. En plus des dessins, on y trouve des informations tirées des archives sur chacune des maisons.

Au sujet de la maison sise au 11, chemin de la Côte, il est écrit qu'en 1973 l'architecte Bernard Plojoux fit des transformations dans cette vieille maison datant de la fin du XVIII^e siècle. Il signale l'existence sur la chaîne d'angle d'une méridienne sans gnomon.

Lorsque j'ai "découvert" cette méridienne vers 1997, un disque percé était en place sur la façade. On peut voir que le disque est légèrement déformé, probablement à la suite de sa chute dans le passé. On ne sait pas à ce jour quand le style fut remis en place. Il fut placé pratiquement perpendiculairement au mur.



A l'époque, débutant, j'ai fait plusieurs pointages assez intrigant... je ne comprenais pas. Le point lumineux passait sur le méridien une demi-heure après midi vrai. Jamais je ne me serais imaginé que le style n'était pas à sa place initiale...

En juillet 2000, j'ai eu la chance de pouvoir mesurer la déclinaison du mur et relever l'ensemble sur un calque.

Description de l'objet :

- La méridienne est sculptée dans la chaîne d'angle de la maison ;
- La largeur du plan de la méridienne est de 490 mm et sa hauteur 1700 mm ;
- La déclinaison du plan de la méridienne est de $14,1^\circ$ ouest ;
- La largeur des traits taillés en biseau à 45° est d'environ 5 mm ;
- Le tracé de la méridienne comprend une ligne verticale, la ligne équatoriale ainsi qu'une courbe de temps moyen local ;

- Le gnomon est constitué d'un disque de 220 mm de diamètre percé d'un trou de 10 mm, il est supporté par un bipied en fer forgé massif carré de 24x24 mm ;

- La distance orthogonale du trou du gnomon au plan de la méridienne est de 766 mm.

Les travaux se sont déroulés de fin octobre à début novembre 2011. Nous avons démonté le gnomon ; celui-ci a été nettoyé, puis traité contre la rouille. Le gnomon a été remis à sa place originale avec l'aide d'un papier calque collé sur le plan de la méridienne. Ce calque comprenait toutes les lignes horaires vraies espacées d'un intervalle de 5 minutes ainsi que le tracé du parcours du Soleil pour le jour du réglage.

Le gnomon a été scellé dans la pierre une fois que la précision de sa position a été contrôlée. Enfin, un restaurateur en œuvres d'art est venu avec une peinture minérale, marquer les lignes gravées dans la pierre.

Nous avons repris les couleurs utilisées sur la méridienne de la cathédrale Saint-Pierre de Genève, établie par Jacques-André Mallet en 1778.



- Chute du cadran solaire de l'église de Melgven (Bretagne)



Jean-Paul Cornec nous informe de la destruction du cadran solaire de l'église de Melgven, village proche de Concarneau, dans le Finistère. Ce cadran, haut placé sur un pignon, était tombé en 1989. Ses fixations avaient sans doute été affaiblies par la grande tempête d'octobre 1987, qui avait abattu le clocher de l'église. Sa chute, bien verticale, avait été amortie par des arbustes : il avait été retrouvé intact. Il figurait alors en bonne place dans une exposition locale consacrée aux conséquences de cette tempête.

L'auteur de ces lignes avait donc eu le loisir de l'étudier de près. C'était un beau cadran, d'un diamètre de 65 cm, daté de 1589 (photo Melgven-1-1989).

Très rapidement, la municipalité, une fois les travaux de réparation de l'église terminés, l'avait fait remettre en place, et l'avait doté d'un style terminé par un soleil doré (photo Melgven-1-1990).

Tout se passa bien jusqu'au 6 février dernier ; ce jour là il est retombé, mais très mal cette fois ci (photo Melgven-1-2013 *Ouest-France*)

Le cas est assez désespéré. Un cadran en schiste cassé ne peut guère se réparer. Il faut en faire une copie.



Melgven-1-1989.



Melgven-1-1990.



Melgven-1-2013 *Ouest-France*.

- Présentations gnomoniques

Jean-Claude Reita a tenu stand :

° « A Saint-Maximin aux Rencontres spatiales, organisées par les rédacteurs de la revue *Espace et Exploration*. Il a présenté les cadrans solaires avec des maquettes et un globe terrestre, en expliquant que les cadrans sont le résultat de la projection cylindrique de l'équatorial sur le sol ou sur le mur. Les maquettes comportent des fils de pêche qui matérialisent les génératrices horaires de ce cylindre.

Pour les enfants (et les grands), des petits cadrans horizontaux et équatoriaux permettent de visualiser la position des styles aux différentes latitudes. Des clous en cuivre placés avec de la patafix matérialisent les ombres aux différentes longitudes. Des Schtroumpfs définissent les levers et couchers du Soleil. L'éclairage est fourni par une lampe de 25w/12v branchée sur une batterie de démarrage de voiture.

Des maquettes de tous les cadrans classiques sont présentées : équatorial, vertical, horizontal, déclinant, polaire, septentrional ; les cadrans de hauteur avec le bâton de berger, l'hémisphérique, le nocturlabe etc.

° A Ollioules, aux portes ouest de Toulon pour l'association VEGA. Les explications sont présentées à des classes de CM1/CM2 et CE1 parfois à des préparatoires.

A bientôt ... pour un projet de réalisation d'un cadran déclinant de l'après-midi destiné à VEGA ».



En rouge, le président IRIS, en bleu foncé, l'astronaute Frank De Winne et JC Reita.



° Courriers gnomoniques

- Que déduire d'une photo de cadran solaire ?

Notre collègue André Marchal a proposé (réf. info-mail n° 102 du 26/11/2012) une "étude de style sur un cas particulier" pour retrouver les paramètres (latitude, longitude, orientation de la façade, date et heure de la prise de vue) d'un cadran à partir d'une photographie (ci-contre). Profitons de cette démarche pour faire le point sur le sujet.

Tout d'abord, Denis Savoie rappelle qu'on ne peut rien déduire d'une photo prise trop obliquement. L'utilisation de l'angle entre le style polaire et la ligne de midi est absolument impossible. On ne peut déduire la latitude d'un tel cadran que de son tracé. Or, ici, on ne le peut pas. C'est ainsi que les résultats trouvés par M. Marchal diverge de 6° pour la latitude, de 8° pour la déclinaison.

Alors que peut-on faire?

° Dans son livre *Gnomonique moderne*, édition SAF 1997, p 204, D. Savoie indique une méthode pour déterminer la déclinaison d'un cadran connaissant la latitude, à partir d'une photographie même prise obliquement.

° Joël Mahé propose le redressement des photos à l'aide d'un logiciel. « Le cliché en question présente une particularité exceptionnellement favorable pour le redressement de la perspective : l'ovale de la pendule ronde peut être redressé en un cercle par un logiciel de traitement d'images (Photoshop ou The Gimp). Le redressement de perspective s'applique également au cadran, qui peut alors être traité par une méthode gnomonique classique.

Par contre, quand il n'y a pas de cercle de référence, en l'absence d'éléments précisant le rapport largeur/hauteur, le redressement de l'image par traitement électronique s'avère très délicat et risque d'introduire de nouvelles distorsions ».

° Se reporter au *Guide du chasseur de cadrans solaires* (diffusé à tous les membres en novembre dernier et disponible sur demande), chapitre 3-4, présentant les méthodes et outils d'analyse d'un cadran solaire.

Pour revenir à la photo, D. Savoie précise que le cadran n'est pas en Ecosse mais à Londres, sur l'église St Mary, dans le quartier de Putney, à une latitude de 51° 28' et une longitude de 0° 12' 50 " ouest.

« Par contre quelque chose m'étonne dans la photo de M. Marchal, c'est l'heure donnée par l'horloge. Il est 13 h 14 m à l'horloge et midi solaire au cadran. Or le Royaume-Uni est soit en TU, soit en TU + 1 h. A priori, la très petite longueur d'ombre du style polaire me laissait penser qu'on était en décembre ; mais il n'est pas possible qu'en décembre il soit midi solaire et 13 h 14 m temps légal à Londres ! J'en déduis donc que cette photo a été prise soit fin mars, soit fin octobre, très près des dates où le Royaume-Unis change d'heure.

La photo ci-contre montre le cadran pris en février (jour inconnu) : on voit nettement que l'intersection de l'ombre du style polaire et de la jambe de soutien tombe un peu en dessous du haut du chiffre XII ; l'heure est cohérente ici avec celle l'horloge : nous sommes



bien en "heure d'hiver". Cette photo, comparée avec celle de M. Marchal, montre qu'il est très difficile d'estimer la date de prise de vue. Elle permet cependant d'être plus affirmatif sur l'époque de prise de vue : fin octobre (car fin mars, la déclinaison du Soleil n'est plus compatible avec la position de l'ombre du style) ».

Complétons ces éléments par la détermination d'une heure à partir d'une ombre :

° A l'adresse <http://adsabs.harvard.edu/full/1939C%26T...55..390A> sont données des méthodes pour « déterminer l'heure à partir de l'ombre portée par un objet terrestre » ;

° Sous le titre "l'Astronomie et la justice", la revue *l'Astronomie* de 1913 conte comment un accusé a été disculpé après détermination de l'heure à partir d'une ombre sur une photographie.

⇒ Dans la version numérique, vous trouverez en annexe :

le dossier CS à partir d'une photo, comprenant les fichiers : 1) Etude de A. Marchal : "localiser un CS.pdf" ; 2) Calculs de P. Tosi venant en réponse "Cadran à midi.pdf" ; 3) l'article de *l'Astronomie* : "Astro et justice 1913.pdf".

- Que dire de cet astrolabe ?

Joël Mahé écrit (réf info-mail n° 102 du 26/11/2012) : « J'ai acheté il y a quelques années cette belle pièce, ornée de petits cabochons de turquoise, chez un grand brocanteur de Bombay. Je pense qu'il s'agit en fait d'une copie récente.

Avec mes remerciements pour toute suggestion que vous pourriez m'apporter ».



Voici les réponses d'Alain Ferreira à partir des photographies, et de Brigitte Alix d'après les photos puis examen de l'objet lui-même.

A. Ferreira : « Je remarque beaucoup d'éléments sont non conformes. Il manque l'alidade et l'ostensor. L'écliptique de l'araignée est gravé à l'intérieur et non à l'extérieur. Les gravures du carré des ombres ne passent pas par les diagonales.

Les tympan n'ont pas d'index, sont-ils donc libres ? Ils doivent être fixes dans la mère. Les étoiles de l'araignée ne portent pas de noms.

En ce qui concerne les écritures, je suis incapable de vous répondre, mais il faudrait compter les espaces pour vérifier s'ils sont corrects. Les deux quarts de cercle du haut du dos ne servent pas à grand-chose. Il y a un tympan des horizons. Un examen *de visu* est nécessaire ».



B.Alix : « Les informations formulées par Alain Ferreira sont tout à fait exactes. Il serait intéressant malgré tout de pouvoir faire quelques relevés de mesures sur les tympanes et sur les étoiles de l'araignée. Cela permettrait d'avoir une idée de la précision de l'astrolabe.

Pour le dos, le carré des ombres est effectivement non conforme.

Les tracés du quart de cercle haut droit sont a priori les arcs d'entrée du Soleil dans les différentes constellations zodiacales, mais ce tracé est incomplet, en général, les courbes de hauteurs du Soleil pour ces moments doivent également figurer.

Le quart haut gauche est le quadrant des sinus, visiblement gradué tous les 2 degrés, mais la précision du tracé manque de rigueur ».

Voici la synthèse de J. Mahé : « J'ai rencontré Brigitte Alix sur son stand du Carrousel du Louvre et elle m'a fort obligeamment fait une expertise complète de cet appareil.

Le tracé en est assez grossier à défaut d'être fidèle à un modèle. L'instrument ne peut être fonctionnel puisqu'il manque, probablement dès l'origine, l'alidade et l'ostensor.

D'autre part, il n'y a pas de fixation des tympanes sur la mère. Les tympanes, au nombre de cinq, seraient relativement précis, avec cependant des écarts de gravure. Ils correspondent à diverses latitudes : l'un au delà du cercle polaire, deux vers

24°, soit environ la latitude des Emirats et de Bhopal-Calcutta en Inde où le cadran a été acheté et le dernier à l'équateur. Les deux de latitudes moyennes correspondant aux tropiques, présentent des cercles équatoriaux de diamètre différent, ce qui pourrait signifier qu'ils étaient destinés à deux mères différentes.

La position des étoiles sur l'araignée ne semble pas différente de leur position actuelle, ce qui exclut une grande ancienneté.

En conclusion, nous sommes face à un objet décoratif par ses cabochons de turquoise, non fonctionnel par ses manques, mais d'une certaine qualité scientifique par ses tracés, hélas imprécis. Peut-être y a-t-il lieu d'y voir un outil pédagogique pour expliquer les différents tracés en fonction de la latitude.

- Objet non identifié

La photographie de l'objet ci-contre nous a été adressée par madame Marianne Lombardi directrice du musée de l'Horlogerie 48, rue Edouard Cannevel 76510 Saint-Nicolas d'Aliermont (réf info-mail n° 102 du 26/11/2012).

Cette pièce métallique de 3,3 cm de diamètre a été trouvée dans un chantier de fouilles sur le site d'une ancienne verrerie forestière, au sud du département du Tarn (verrière de Peyremoutou) où œuvraient les gentilshommes verriers du Languedoc entre le XV^e et XVIII^e siècle.

De quoi s'agit-il ? Notre collègue Claude Guicheteau propose la solution suivante :



Au musée Bernard-d'Agesci, à Niort, il existe un objet non exposé, portant le numéro d'inventaire 9143-1-612 et provenant de la collection Piet-Lautaurie (composition du legs dans le Bulletin de la Société historique et scientifique des Deux-Sèvres de 1914-1915). Il s'agit d'un élément de cadran horizontal portable en laiton, elliptique, dont les dimensions sont les suivantes : 48 mm x 39 mm, hauteur 20 mm avec le style triangulaire déplié, épaisseur 1 mm. Petits traits horaires et demi-heures pour les heures IV, XII, VIII.

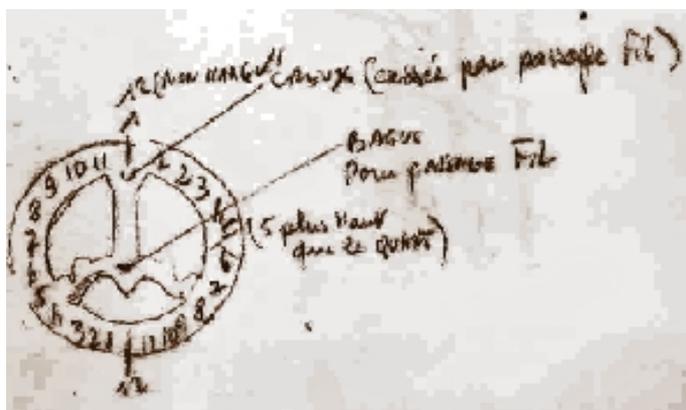
Le style est monté à l'envers. En effet, le pied du style pénètre dans la table du cadran du côté du XII, à l'opposé du lieu normal de rencontre, c'est-à-dire à l'intersection de la ligne des VI et de celle du XII.

- Première hypothèse, la plus vraisemblable : un simple "cadran boussole". Ce cadran devait être fixé sur une boîte de forme vraisemblablement elliptique (en métal, bois ou ivoire) contenant une boussole, avec un couvercle de protection. On peut voir ce type de cadran dans les catalogues du musée de Greenwich et celui de Cambridge.

- Seconde hypothèse : ce cadran est peut-être un élément d'un ensemble gnomonique complet, du genre "nécessaire astronomique". Dans cette hypothèse, la cassure du laiton, du côté du XII, serait l'emplacement d'une charnière, articulant notre objet, dans la boîte le contenant.

Daté de 1585, il se situe en pleine période de construction des nécessaires astronomiques : Christophe Schissier en 1555 et 1579 à Augsbourg ; Humphrey Cole en 1579 à Londres ; Ulrich Schnieper en 1585 à Munich ; Comelius Vinckx à la fin du XVI^e siècle à Anvers...

Une dernière énigme concernant ce cadran : l'angle du style indique une latitude de 51° or les lignes horaires semblent être tracées pour environ 45,9° de latitude !



▲ Dessin de la pièce trouvée sur le site de l'ancienne verrerie. Élément de cadran n° 9143-1-612, musée Bernard d'Agesci. ►

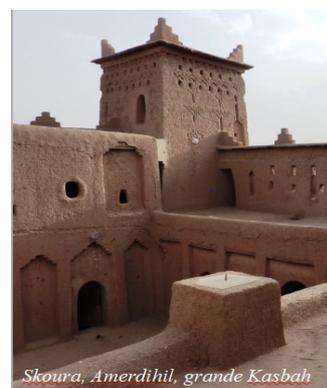


- Détermination de la prière de l'asr

Alain Ferreira écrit à Denis Savoie : « Je te raconterai plus tard les détails de ma découverte d'un cadran à Skoura au Maroc.

Ce cadran horizontal se trouve dans un coin un peu perdu, sur la terrasse d'une splendide casbah privée. Il a été tracé par l'arrière grand-père du propriétaire, d'après lui il servait pour indiquer les heures de prières.

Il comporte les solstices et équinoxes, les lignes horaires, bien tracées et fines, particulièrement autour de midi, et les cercles de hauteur. Voici sur cette présentation deux



exemples que j'ai imaginés pour déterminer la prière de l'asr*, un aux équinoxes, l'autre au solstice d'hiver. Qu'en penses-tu ?

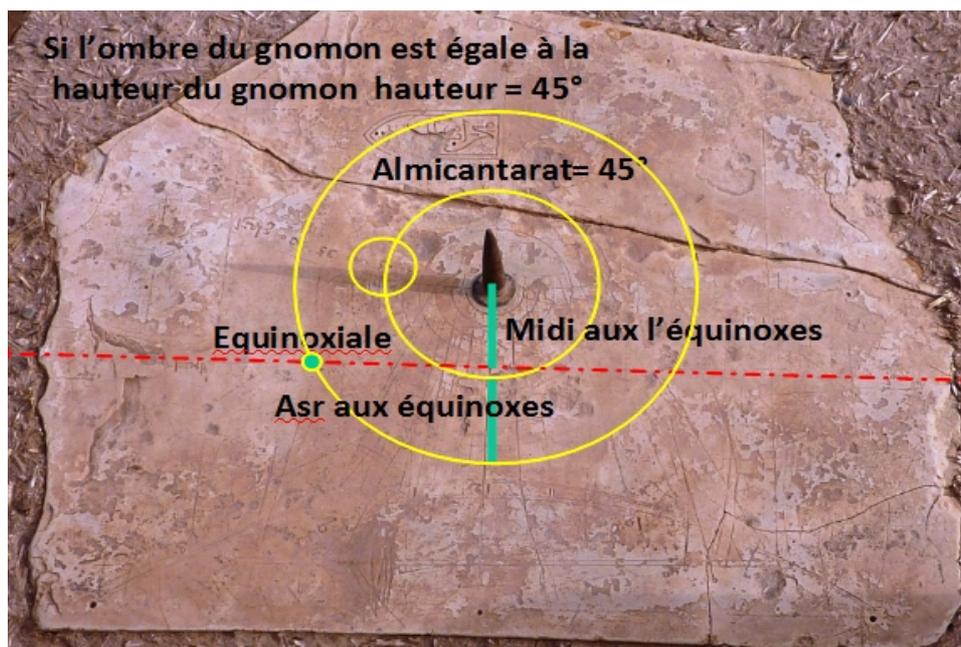
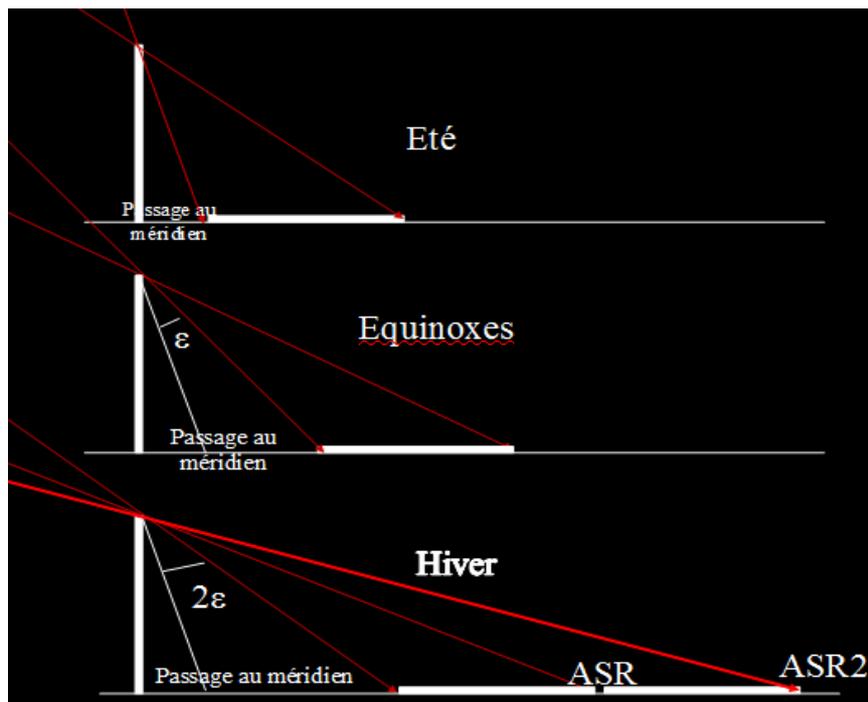
* Selon al-Bīrūnī :

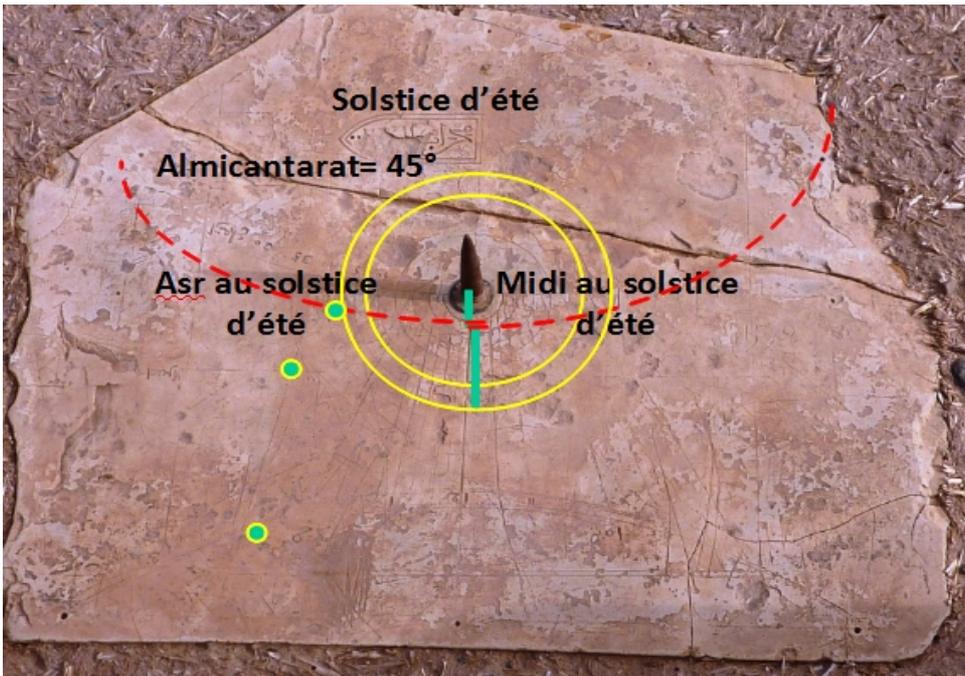
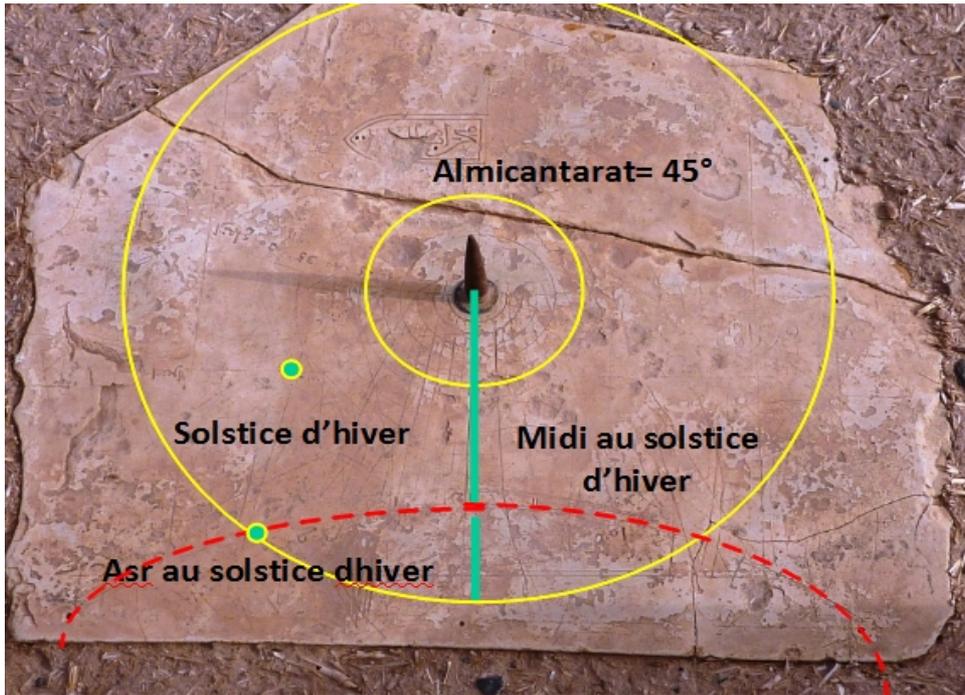
L'asr débute lorsque la longueur de l'ombre d'un bâton a pour longueur une fois celle du bâton augmenté de l'ombre du bâton à midi.

ou bien : lorsque la longueur de l'ombre d'un homme est égale à la longueur de son ombre à midi augmentée de la longueur de l'homme.

La formule donnant la hauteur du Soleil à cet instant est :

$$\tan h(\text{asr}) = 1 / (1 + \tan (\Phi - \delta)).$$





Skoura, Amerhidil, grande kasbah, (photo Alain Ferreira).

° Réponse de D. Savoie :

« J'ai regardé ton cadran islamique; il n'est pas mal du tout. On voit bien, en plus, l'indicateur de Qibla.

Tu as tout à fait raison sur le rôle des cercles de hauteur dans la construction de la courbe d'asr. Je t'envoie une note que j'avais faite sur le tracé de l'asr avec un compas et des cercles de hauteur. C'est très simple comme méthode (aucun calcul...) et c'est absolument exact.

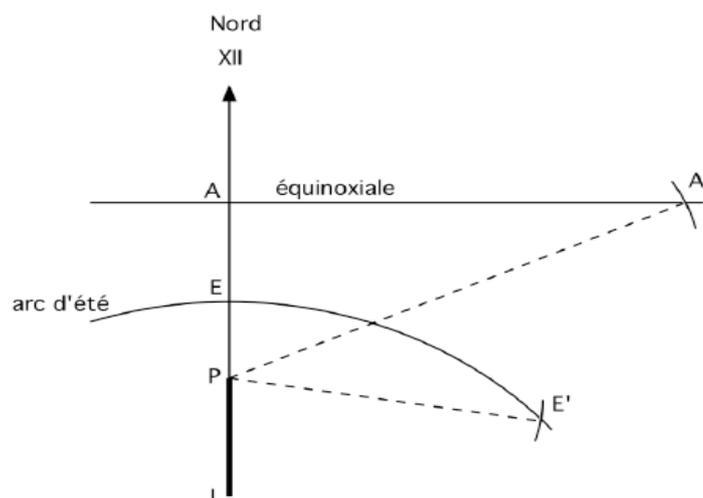
Construction géométrique de la courbe d'asr sur un cadran horizontal

Soit un cadran horizontal dont le style droit de longueur a est planté en P et dont les arcs des signes ont été tracés. On construit $PI = a$, en direction du sud. Soient E la position de l'ombre à midi solaire au solstice d'été, A la position de l'ombre à midi solaire aux équinoxes.

Avec une ouverture de compas égale à IE , on décrit un arc de cercle de centre P qui vient couper l'arc d'été en E' : c'est l'un des points de la courbe. De même, avec une ouverture de compas égale à IA , on décrit un arc de cercle de centre P qui vient couper la droite des équinoxes en A' . On construit ainsi les autres points des arcs signes, qui, reliés entre eux, déterminent la courbe de l'asr.

Cela revient à déterminer l'intersection d'un cercle de hauteur avec un arc diurne ».

D. Savoie 19/07/2011



⇒ Dans la version numérique, vous trouverez en annexe :

Photographies de la casbah et du cadran avec animation
des tracés dans le fichier « Amerhidil2.ppt »

- Tracé d'un méridien

« Je voudrais tracer sur ma petite terrasse le méridien correspondant à mon adresse. En fait, je souhaiterais obtenir deux points au sol assez distants (entre 3 m et 4 m) pour pouvoir obtenir une méridienne qui serait tracée entre ces deux points en me basant sur le même principe que l'alignement de deux fils à plomb sur l'étoile Polaire de nuit, ce qui n'est pas facile à faire. J'ignore s'il est possible de positionner les deux fils à plomb pour que les deux ombres correspondent au même méridien avant que le Soleil ne passe au zénith ? »

Il y a peut-être une autre méthode pour pallier le fait qu'avec un fil à plomb très long l'ombre de la partie haute du fil est très floue ?

° Réponse de D. Savoie :

« La solution la plus simple consiste à utiliser l'instant de passage du Soleil au méridien du lieu, ce qui suppose que vous connaissiez votre longitude exprimée en h,m,s. A l'aide des *Ephémérides* de la SAF, il est

facile ensuite de calculer l'instant de passage sur votre terrasse. L'IGN donne pour votre adresse une longitude de - 9 m 41 s. Donc par rapport aux éphémérides de la SAF, l'instant de passage précède de 20 secondes celui au méridien de Paris.

A cet instant (exprimé en temps légal), vous matérialisez au sol l'ombre d'un fil à plomb (plongé dans l'eau pour l'amortissement), ombre que vous prolongez ensuite à l'aide



d'un laser. Il faut ensuite vérifier que la prolongation n'a pas dévié, en effectuant un nouveau passage au méridien.

L'autre solution consiste à construire un œilleton temporaire (verticalement ou horizontalement), puis à repérer plusieurs passages au méridien suffisamment espacés dans le temps (3 fois par mois), de sorte que la tache de lumière parcoure une distance assez grande.

Cette méthode est très précise, mais demande un calage rigoureux de l'heure sur l'horloge parlante : l'azimut du Soleil varie en effet plus vite aux alentours du méridien ».

- Numérotation en chiffres romains

Les cadrans solaires sont souvent datés en chiffres romains. Pourquoi certains sont-ils notés, pour l'année 1990 par exemple : MCMXC et non MXM qui serait plus simple et plus facile à interpréter ? Exemple le cadran 0513307 à Serre-Chevalier

Notre collègue Jean-Claude Tauleigne, répond :

Il ne s'agit pas d'une question d'esthétique ou autre, mais du simple respect des règles, comme le mentionne le site Wikipedia*, qui précise notamment : "Toute lettre d'unité placée immédiatement à la gauche d'une lettre plus forte qu'elle, indique que le nombre qui lui correspond doit être retranché du nombre qui suit. ... I est une unité pour V et X, X est une unité pour L et C, C est une unité pour D et M."

1990
MXM
MCMXC

Ainsi X n'est pas une unité pour M, donc on ne peut pas écrire XM pour 990.

*cf : http://fr.wikipedia.org/wiki/Num%C3%A9rotation_romaine.

Règles données par le site : la numérotation a été normalisée selon l'usage actuel et repose sur quatre principes :

- Toute lettre placée à la droite d'une autre figurant une valeur supérieure ou égale à la sienne s'ajoute à celle-ci ;
- Toute lettre d'unité placée immédiatement à la gauche d'une lettre plus forte qu'elle, indique que le nombre qui lui correspond doit être retranché au nombre qui suit ;
- Les valeurs sont groupées en ordre décroissant, sauf pour les valeurs à retrancher selon la règle précédente ;
- La même lettre ne peut pas être employée quatre fois consécutivement, sauf M.

- Cadran à Regensburg (Allemagne)

« Je cherche en vain la traduction de la devise du cadran de Ravensbrück (photo ci-contre) » nous indique Patrick Robo.

° Réponse de P. Gagnaire :

En fonction des abréviations utilisées au XV^e siècle, il me semble que la devise complète est :

LONGITUDO DIERUM * HORAE
INEQUALES (ou INAEQUALES)

et sa traduction : Longueur des jours * Heures inégales.

On voit bien qu'il s'agit d'heures temporaires qui semblent converger au pied du style droit.



Les espaces entre les heures sont numérotés de 1 à 12, toutefois le 1 et le 12 n'ont pas de bornes en amont ou en aval, ce qui est normal puisque c'est l'horizon qui serait leur borne mais il n'est pas tracé.

Le long des marges gauche et droite, on lit la longueur des jours (jours clairs) : 8 heures en hiver, 12 heures aux équinoxes et 16 heures au solstice d'été, avec des arcs intermédiaires tracés pour les dates (déclinaison du Soleil) où les jours clairs comptent un nombre rond d'heures.

En revanche, cette quantification des jours ne peut qu'être exprimée en heures solaires égales. Si elle devait être exprimée en heures temporaires, tous les jours compteraient 12 heures, par définition.

Le cadran doit être un méridional à une latitude de 48 à 50° N. Vous noterez la forme du 4. La date est 1487. M. Opizzo connaît beaucoup de 4 ainsi tracés, en Allemagne.

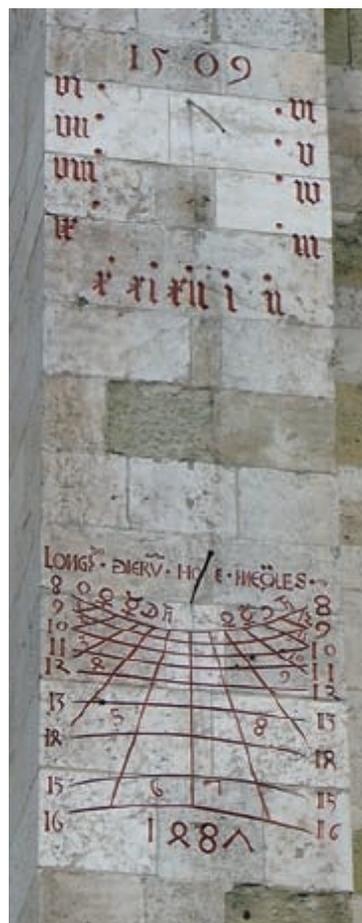
° Réponse de Y. Opizzo :

La date de 1487 ne soulève pas de difficulté. Il y a en effet de nombreuses églises en Allemagne (la cathédrale "Münster", mais aussi en Alsace (Strasbourg par exemple), où le 4, dit-on, est un demi-huit. J'ai soulevé le problème dans *Les Ombres des temps*¹ et continue à voir plutôt un double 4 dans le 8, mais c'est sans importance. Le 7, comme les 7 "anglais" ou celui des calculatrices est presque moderne, il suffit de le faire basculer un peu.

Les heures temporaires sont évidentes par leur numérotation. Le chiffre est bien gravé en pleine zone et c'est caractéristique d'une durée, pas d'un instant. Les heures temporaires sont des durées (la sixième heure du jour, celle de la sieste, sesta, sixième) alors que les heures égales sont des instants, comme de nos jours. A l'instant où j'écris, il est 15 h 32 m 45 s et, cet instant se situe dans la dixième (ou peut-être onzième) heure temporaire, début février.

Les droites des heures temporaires ne convergent pas vraiment, parce que ces droites n'en sont pas. Ce sont des courbes complexes, plus ou moins évidentes, puisque la déclinaison solaire joue là un rôle essentiel et que cette déclinaison ne varie pas linéairement (malheureusement pour mon bel apolytère² !). Voir encore *Les Ombres des temps* et aussi "*Le Rêve d'une ombre*"³.

Les courbes de déclinaison sont aussi des courbes de dates, pour lesquelles le Soleil reste un nombre entier



Réf. article de Reinhold. Kriegler.

d'heures au-dessus de l'horizon. Il est donc facile de déterminer à peu près la latitude théorique du cadran. C'est celle où le Soleil, aux alentours du solstice d'été, reste environ 16 heures au-dessus de l'horizon, c'est-à-dire vers la latitude de 48° ou 49°. Or, je trouve environ 53,2° pour la latitude de Ravensbrück. Je trouve cela surprenant et je vais calculer un peu plus sérieusement. Il n'est pas exclu que l'auteur du cadran ait voulu rester parfaitement juste et pour cette raison n'ait pas indiqué la courbe 17. A partir de quelle latitude le Soleil reste-t-il 17 heures et plus au-dessus de l'horizon ? Je ne sais pas sans calculer. Je vais le faire et

¹ *Les Ombres du Temps* par Yves Opizzo (1998) chez Burillier.

² In *Cadran Info*, différents articles de Yves Opizzo.

³ *Le rêve d'une ombre* par P. Gagnaire et Y. Opizzo (2007) chez Burillier.

reprend contact avec vous. Dans ce cas, la ligne du 21 juin aurait donné une indication intéressante.

Voici, un calcul de vérification du cadran pour la latitude de 53,2°. Le 21 juin, le Soleil se lève théoriquement à 3 h 38 m TVL. Il reste donc 16 h 44 m au-dessus de l'horizon ce jour-là, et le cadran de Ravensbrück est donc juste sur ce point. La ligne de déclinaison du 21 juin aurait indiqué 16,75° et non pas 17°. Honneur et gloire à ce créateur ! Notons cependant qu'il aurait pu de la même façon ne pas indiquer la ligne 8 heures, mais commencer seulement à 9 heures. Convenons que le cadran aurait beaucoup perdu, puisqu'il aurait été difficile d'inscrire le 1 et le 12 sur la table, trop étroite.

Attention, précisez P. Gagnaire, il ne s'agit pas de la ville de RAVENSBRÜCK mais de REGENSBURG.

La latitude est alors de 50° 47' et les remarques précédentes d'Yves Opizzo sont encore plus vraies.

° Complément par R. Kriegler :

Pour compléter ces informations, notre collègue a publié son étude « Über die Horologien des Regensburger St. Petri Doms », sur son site :

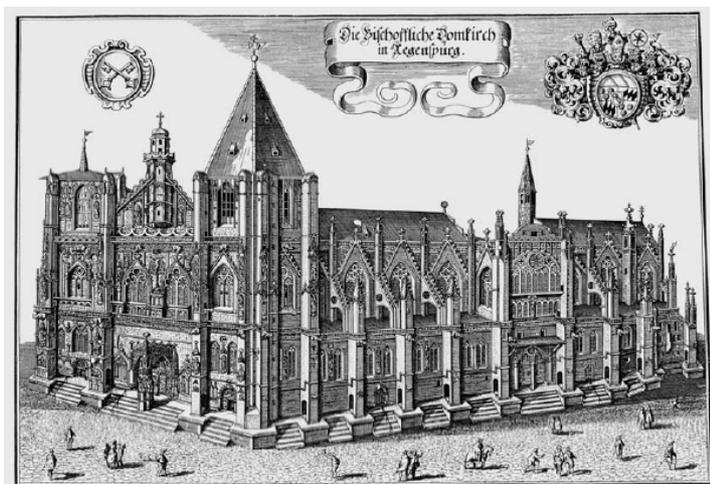


Abb. 1 Die Bischöfliche Domkirche in Regensburg von Matthaeus Merian

http://www.ta-dip.de/fileadmin/user_upload/bilder/208398cd04c9f728c4a312c1d94badcb_articulo%20para%20web2.pdf

Il nous précise également : « Quand j'ai étudié le cadran à Regensburg, celui-ci n'était pas encore restauré. Plusieurs photos de mon article le montrent dans son état primitif. Pour la restauration des deux cadrans solaires, deux personnes ont été contactées : Blasius Gerg et Heinz Schumacher. Peut-être que le choix de Heinz Schumacher, au lieu de Blasius Gerg qui a été retenu, aurait été meilleur pour recalculer le cadran solaire 1487.

Alessandro Gunella, qui a bien voulu faire un nouveau calcul suivant les règles graphiques du 15^e siècle, a dit que le calcul de Blasius Gerg était moyen.

En 2007, j'ai connu une situation très privilégiée, identique, au "Dombaumeister" (qui était absent ce jour-là m'offrant la liberté de rester aussi longtemps que je voulais dans son bureau. J'ai ainsi pu recopier les calculs de Heinz Schumacher que j'ai utilisés en partie pour mon article dans la revue annuelle de la Deutsche Gesellschaft für Chronometrie (DGC) et sur mon site.

Outre ces deux cadrans, un élément comique est à noter. En effet, Ernst Zinner avait écrit qu'un cadran (une ligne de midi) se trouvait à l'intérieur de la cathédrale. Personne n'avait essayé de contrôler l'existence de celui-ci. Lors de ma venue, j'ai eu la chance de pouvoir constater que ce n'était que pure imagination de la part du célèbre E. Zinner. (Vous pouvez voir que j'ai utilisé une source française célèbre pour l'illustration).

Un second fait qui m'a rendu heureux et "fier" est la découverte d'un cadran canonial entre les deux cadrans restaurés. Après cela, j'ai demandé à la DGC que ce petit cadran comporte également un numéro d'enregistrement ».

⇒ [Dans la version numérique, vous trouverez en annexe :](#)

L'article « Über die Horologien des Regensburger St. Petri Doms » de Reinhold Kriegler.

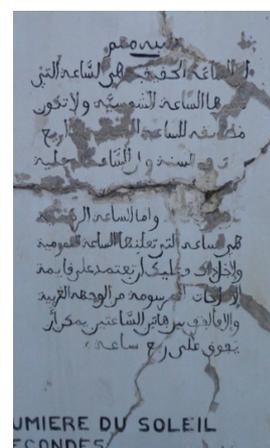
- Un cadran à restaurer à Saïda (Algérie)

« Bonjour, je me présente, je suis M. Djebbar Mohamed Abdelaziz habitant de la ville de Saïda dans l'ouest de l'Algérie. Dans notre ville il existe un cadran solaire construit dans les années 30 par la Légion étrangère, il est aujourd'hui dans un état catastrophique.

Avec des amis nous voulons créer un groupe pour constituer un dossier de rénovation



et le présenter au ministère de la Culture, afin qu'il soit classé patrimoine national. Je vous prie Monsieur de jeter un coup d'œil sur les photos et de nous donner votre avis sur la possibilité de le rénover, et comment constituer ce dossier dans son aspect technique. Cordialement, Aziz ».



L'ensemble des photographies a été examiné par le nouveau groupe « Restauration du patrimoine gnomonique ». A partir de celles-ci un diagnostic a

été établi, des conseils ont été prodigués, ainsi qu'une approche financière par rapport aux conditions françaises. En voici une synthèse :

Il s'agit, non pas d'un seul cadran, mais de deux. Celui des pages 1 à 5, est méridional, et tracé sur la façade sud ; celui de la page 6, septentrional et tracé sur la façade Nord. La déclinaison des murs doit être nulle (à vérifier). Les murs sont certainement en béton armé, avec un revêtement supportant les cadrans. Il faudra répondre à quelques questions simples, en premier lieu : quel est l'état réel du support, quelle est sa nature, est-il bien plan, bien vertical ? Le sommet du style a la largeur de la nervure ; ainsi les deux arêtes par lesquelles l'ombre est projetée sont déportées d'une demi-largeur. Pour un "cadran solaire de précision", on engendre déjà une petite erreur. Il faudrait pouvoir biseauter le sommet de la nervure afin d'obtenir, en son milieu, une seule arête ; et vérifier qu'elle est bien polaire. Vérifier aussi la perpendicularité de cette nervure avec le mur.

Ce genre de monument ne pose aucun problème technique. M. Djebbar trouvera dans son pays les gens compétents pour réaliser cette restauration. Sa tâche avec ses amis sera plus complexe. Il leur faudra fédérer autour de ce projet la population civile et politique de Saïd et la sensibiliser à l'intérêt de préserver ce petit patrimoine, envisager de présenter un dossier de classement national (ça se passe comme ça en France). Pour la procédure administrative algérienne, peut-être qu'Alain Ferreira pourrait connaître un conseiller. Pour la restauration, les démarches peuvent se dérouler de la sorte.

1) Réalisation d'un dossier photos extrêmement complet, avec détails de toutes les surfaces du cadran. Pour cela pratiquer par quadrillage. Eviter les ombres ou l'excès de lumière. Ne pas hésiter à faire de la micro, très importante pour la pigmentation et les petits détails. Sur un dossier photos bien fait, de nombreux professionnels peuvent déjà travailler, du moins apporter des conseils. Pour l'équipe de bénévoles, c'est aussi se préserver pour l'avenir de toute accusation de destruction (par exemple, lorsqu'on intervient dans le périmètre d'un autel d'église, on prend bien soin de relever tout ce qui est abîmé afin qu'on ne nous le reproche pas en fin de chantier).

2) Faire un dossier historique le plus complet possible : recherche en archives d'écrits, plans, photos, etc, ont participé à sa réalisation, le conseil municipal de Saïda, les autorités civiles et militaires. Il faut essayer de retrouver les dossiers. On peut être aider à faire la recherche auprès des archives militaires.

3) La consolidation des corps d'enduit, des pierres et des peintures doit être mise en œuvre par des compagnons restaurateurs comme il s'en trouve chez nous. Il faut que M. Djebbar se rapproche des professionnels des Monuments historiques ou du Service archéologique, voire des Beaux-Arts de son pays pour, lancer une étude de restauration.

4) La partie gnomonique doit être confiée à des confrères, sinon il doit bien s'en trouver en Algérie. Au pire nous pouvons nous en charger.

En France le coût d'une telle restauration, menée par des professionnels qui travaillent selon le cahier des charges de notre époque des Monuments Historiques, avoisinerait 45 000 euros HT. C'est une estimation faite par expérience, le peu de détails des vues ne permet pas de définir et de délimiter donner les causes exactes de la dégradation. Cette information n'est là que pour ordre de grandeur d'une enveloppe financière que bien des particuliers découvrent lors de démarches similaires.

Des détails importants, visibles sur les photos expliquent la propagation des dégâts : l'étanchéité du dessus du bloc, sa cohésion et la facture du corps d'enduit. Ce cadran a été repeint il y a quelques années. Le fort écaillage fait penser à l'utilisation de peinture synthétique, car il n'y a aucune coulure pigmentaire. Cela est frappant mais pourrait être dû aux particularités du climat.

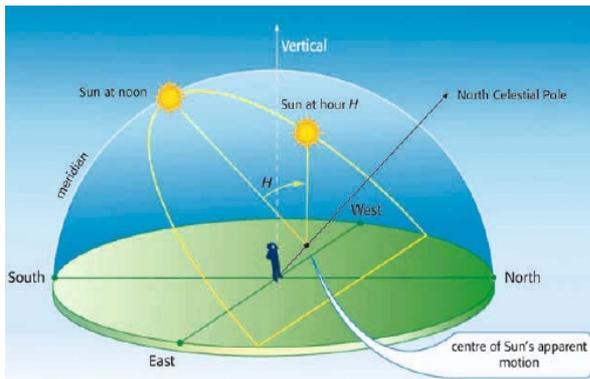
Pour l'ensemble du groupe de conseils à la restauration des cadrans solaires de la C.C.S.

- Quelle différence entre l'angle horaire et l'azimut du Soleil

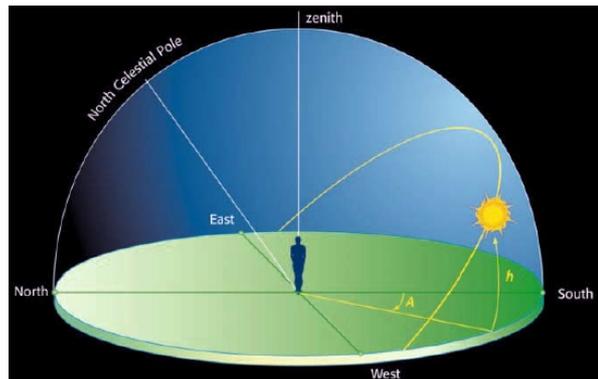
La différence entre l'angle horaire H et l'azimut A du soleil est dû au fait que ces deux angles ne sont pas mesurés dans le même plan.

L'angle horaire (heure solaire vraie) est mesuré sur l'équateur céleste. Il est mesuré depuis la culmination au sud. Ainsi $H = 0^\circ$ correspond à 12 h; pour 11 h $H = -15^\circ$ et 13 h $H = 15^\circ$; 10 h $H = -30^\circ$ et 14 h $H = 30^\circ$ etc.

L'azimut est mesuré dans le plan horizontal de 0° à 180° vers l'ouest et de 0° à -180° vers l'est. Ainsi l'azimut du point cardinal Est vaut -90° et l'azimut du point cardinal Ouest vaut 90° .



Angle horaire.



Azimut.

Schémas tirés du livre de D. Savoie *Les cadrans solaires* chez Belin. Explications détaillées chapitre 1.

Lorsque l'on connaît H , on peut calculer l'azimut par la formule :

$$\tan(A) = \sin(H) / (\sin(\phi) \cdot \cos(H) - \cos(\phi) \cdot \tan(\delta))$$

avec

- A : azimut du Soleil ;
- Phi : latitude du lieu (en degré) ;
- Delta : déclinaison du Soleil ;
- H : angle horaire du Soleil.

- On recherche David Beringer

Madame Eva Dayot, chargée de la régie des collections au château des ducs de Bretagne, musée d'Histoire de Nantes, service Conservation pose la question : « Je renseigne la fiche d'inventaire d'un cadran solaire portatif polyédrique signé D. BERINGER (instrument de marine).

Mes recherches dans les livres que j'ai à ma disposition sont infructueuses. Quant aux recherches sur Internet, elles donnent des résultats confus.

Il est question de Paul et David Beringer, père et fils, fabricants de cadrans solaires originaires de Dieppe. Puis installés à Strasbourg ? Augsburg ? Nuremberg ? Associés à un certain G. P. Seyfried à Nuremberg. Deux dates de naissance : 1756 et 1777 (probablement le père et le fils), mais une seule date de décès : 1821.

Je trouve également mentionné, un David Beringer (1756-1821), né et mort à Nuremberg et un D. Beringer vivant à Dieppe vers 1725.

Auriez-vous des informations concernant ce fabricant de cadrans solaires ? Dans ce cas, je vous serais reconnaissante de m'en faire part, afin que je complète correctement cette fiche biographique ».

En réponse, Denis Savoie adresse deux fichiers relatifs au constructeur de cadran David Beringer :



° un fichier numérisé de l'ouvrage de référence de E. Zinner, *Deutsche und niederländische astronomische Instrumente des 11.-18. Jahrhunderts* paru en 1956, qui a fait l'inventaire de ses réalisations,

° un article PDF du *Metropolitan Museum Journal* ayant pour titre « Three Nürnberg Compassmaker, Hans Troschel the Elder, Hans Troschel the Younger and David Beringer » par Bruce Chandler et Clare Vincent.

Ces documents sont mis à la disposition des personnes intéressées.

⇒ Dans la version numérique, vous trouverez en annexe :

Le dossier Beringer comportant les deux fichiers ci-dessus

- Un cadran égyptien de 3300 ans

« Des chercheurs de l'Université de Bâle (Suisse) ont mis au jour un cadran solaire vieux de 3300 ans, soit un des plus anciens au monde, dans la Vallée des rois en Haute-Egypte. L'équipe du Pr Susanne Bickel a fait cette découverte lors de fouilles à l'entrée d'une tombe.

L'objet, de la taille d'une sous-tasse, se présente comme un morceau de calcaire aplani - un ostracon - sur lequel figure un demi-cercle de couleur noire divisé en douze segments de 15 degrés. C'est précisément cette forme "moderne" en demi-cercle qui fait sa particularité, a expliqué à l'agence de presse suisse ats Mme Bickel ».

...

« Placé plein sud à Louxor, aux équinoxes de mars et de septembre, le mesureur de temps du Nouvel Empire affichait un degré d'exactitude proche de la perfection, durant toute la matinée du moins »

...

L'avis de Denis Savoie :

« Cet "article" fait dans le sensationnel (et le consternant !), avec une affirmation qui m'amuse beaucoup : un cadran vertical méridional qui fonctionne à la "perfection" à Louxor ! J'en déduis donc que les égyptiens de 1300 av JC connaissaient le style polaire et les heures égales puisque l'on voit sur la photo que les lignes convergent vers le pied du style (ce qui n'est pas possible avec un cadran d'heures temporaires)....>>



Pour figurer dans les rubriques **Informations diverses**, adressez vos photos et informations à Ph. Sauvageot sauvageotph@wanadoo.fr



° Gnomonique du monde

- **Sommaires des dernières revues ou bulletins :**



Seminario Nazionale di Gnomonica XVIII (sur papier-155 pages et CDs) de **L'UNIONE ASTROFILI ITALIANI (UAI) SEZIONE QUADRANTI SOLARI**

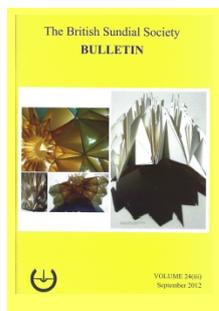
L. Agnes L'ultimo restauro della meridiana dell'Università di Pavia 01 ; P. Albèri Auber Il "triangolo della luce diurna" negli orologi solari conici e sferici 05 ; P. Albèri Auber Il "triangolo della luce diurna" negli orologi solari orizzontali 12 ; E. Berard Tre nuovi strumenti gnomonici autocostruiti 17 ; G. Casalegno Gnomonica "tascabile" 27 ; F. Caviglia Orologi con gnomone di notevole spessore 32 ; G. De Dona' Determinazione della declinazione della parete con l'uso del teodolite 38 ; G. De Dona' Quadrante a ora locale o a ora del fuso orario 43 ; E. Del Favero Tentativi di realizzazione di un quadrante

solare su conchiglie marine 48 ; G. Ferrari Alcune formule dimenticate 58 ; G. Ferrari Il quadrante orario a linee orarie rettilinee - alcune considerazioni 62 ; F. Garnerò Svelato il nome di uno gnomonista del passato fino ad ora sconosciuto 70 ; L. M. Ghia Il programma "Stellarium" e la gnomonica su Marte 79 ; P. G. Lovotti Pisa e il suo tempo 93 ; S. Magnani "Meridiana riflessa" 99 ; U. Mascolo "Cronometro solare" da spiaggia 104 ; U. Mascolo Il salvataggio di un quadrante ad ora italiana destinato alla scomparsa 108 ; A. Nicelli Quadranti solari omologici 111 ; A. Pantanali Una meridiana con pannelli fotovoltaici 115 ; B. Rouxel Orologi analematici generalizzati 118 ; F. Savian Sundial Atlas, una piattaforma cloud per l'evoluzione dei programmi di gnomonica e astronomia 123 ; T. Tasselli Orologi "di precisione" 127 ; M. L. Tuscano Annotazioni di P. Angelo Secchi sul tempo all'italiana 143 ; G. Zuccalà Generalizzazione della teoria e del calcolo per gli orologi solari a cornice 147 ; G. Zuccalà Programmi e regoli analogici per il calcolo delle ore delle preghiere Islamiche e della direzione della Qibla 151.



Arbeitsgruppe sonnenuhren im Osterreichischen Astronomischen Verein N°44 **Décembre 2012** (sur papier) de la **GNOMONICAE SOCIETAS AUSTRIACA GSA**

Die Aalener Sonnenuhr 4 ; Die genaueste Sonnenuhr der Welt 6 ; Sonnenuhren auf Briefmarken 8 ; Weltraumtechnik in der Gnomonik 9 ; Zu Gast im Hause Löschner ; Zum Nachdenken - die Lösung 13 ; Besuch aus Japan 16 ; Jahrestagung der GSA 17.

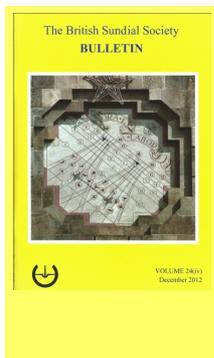


VOLUME 24 (iii) - Septembre 2012 (sur papier) de la **BRITISH SUNDIAL SOCIETY**

1. Editorial; 2 A Standing Stone and its Possible Astronomical Alignment—Using seasonal shadow and light displays in the Neolithic - *Daniel Brown*; 6 Reader's Letter – *Drinkwater*; 7 Check-in at Noon—A noon dial with analemma at an airport check-in desk - *Douglas Bateman* 8 . The Stereographic Projection and Quadrant by Henry Sutton - *Michael Lowne and John Davis* 15. Postcard Potpourri 23—Churchill, Somerset - *Peter Ransom*; 15. Gnomon Supporter - *Mike Cowham*; 16 . In the Footsteps of Thomas Ross.

Part 2: The sundials at Craigiehall - *Dennis Cowan*; 18 BSS Group photograph—Cheltenham, 2012; 19 Cathedral Mass Dials - *Tony Wood*; 20 The Planispheric Nocturnal - *Mike Cowham*; 21 The Clock and the Sundial – *JD*; 22 Lost Bonar Dial Resurfaces (Briefly!) - *John Davis*; 23 A Dutch Manuscript Showing Polyhedral Dials - *Heilke van der Wijk and John Davis* 26. New Dials - *Brown, James*; 28 Upton Manor Farm,

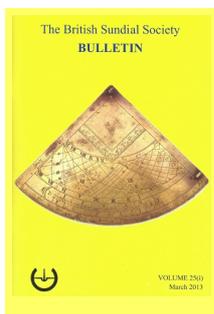
Cambs – *JD*; 29 The Tyttenhanger Sundial - *Geoffrey Lane*; 32 The Old Meeting House, Norwich – *JD*; 33 The Sundials of Gerald Laing - *Dennis Cowan*; 34 Obituary—Peter Hingley (1951-2012); 35 Decorative Dials - *Tony Wood*; 36 A Medieval Equinoctial Dial Excavated at St James’s Priory, Bristol - *John Davis and Cai Mason*; 40 Holbein’s Cylinder Dial – *JD*; 41 Mosque of the Sun II: Crown of Doha - *Sara Shajfiei and Ben Cowl*; 43 Early 19th-century English Drawings of Greek Dials - *John Davis and Jérôme Bonnin*; 45 Exhibition of Sundials, North Oxford - *Douglas Bateman*; 46 An Equatorial Sundial with EOT Adjustment: Update - *Roger Bunce*



VOLUME 24 (iv) – Décembre 2012 (sur papier) de la **BRITISH SUNDIAL SOCIETY**

2. Editorial; 3 Lost and Found. The long journey of an unusual sundial - *Peter Kunath* \ 5. Haddon Hall Horizontal Dial - *Tony Wood*; 6 In the Footsteps of Thomas Ross. Part 3: The sundials of James Gifford - *Dennis Cowan* 9. Blemish or Blessing? - *John Lester*; 11 Readers’ Letters - *Lowne, Woodbury*; 12 The Equatorial Dials of Kloppenburgh & Cremer - *Mike Cowham*; 15 New Dials; 16 Summertime Noon Dial - *Tony Wood*; 17 Postcard Potpourri 24. St Peter’s, Bexhill, East Sussex - *Peter Ransom*; 18 An Excavated Lead Sundial - *John Davis*; 20 Window Reflections - *Michael Lowne*; 21 The Strangest Place

for a Sundial? - *Dennis Cowan*; 22 North-facing Mass Dials - *Jackie Jones*; 23 Mapping Greco-Roman Sundials using GIS - *Shaul Adam and Jerome Bonnin* 26. Nine Newly Reported Dials - *John Foad* 28. BSS Newbury Meeting, 22 September 2012 - *Sue Mansion* 30. Building a Sundial at Chestnut Cottage - *Richard and Judy Cecil* 34. The Restoration of a 19th Century Noon Cannon Sundial - *Malcolm Bamfield*; 36 BSS Sundial Safari to Catalonia, 13-18 September 2012 - *V Cowham, Butson, M & J Jenkins, Honey, Bateman & Payne*; 40 The Celtic Quartet Re-visited and Augmented - *Tony Wood and Johan Wikander*; 41 Helical Sundials - *John Davis*; 41 Mosque of Uqba – *JD*; 42 Secure Fixings and Fastenings for Sundials - *Tony Moss*; 46 Utile et Dulce - *Aleksandr Bolyrev*; 47 The Meridies Media Greenwich Noon Dial - *Christopher Daniel*



VOLUME 25 (i) – Mars 2013 (sur papier) de la **BRITISH SUNDIAL SOCIETY**

1 Editorial ; 2 Astronomy and Solar Symbolism in the Basilica of San Miniato al Monte in Florence - *Simone Bartolini & Marco Pierozzi* 8. A West Indies Dial by Thomas Wright - *Maciej Lose* ; 14 Phil Rogers—Obituary - *Christopher Daniel*; 15 he Lesser-known Dials at Barrington Court - *Peter Ransom* ; 16 In the Footsteps of Thomas Ross. Part 4: The hidden sundials of South Queensferry - *Dennis Cowan* ; 18 Postcard Potpourri 25—Floral Dials - *Peter Ransom* ; 19 The Science Fair at Preston—June 2012 - *Graham Aldred* ; 20 Report on the Greek Dial From Delos Stored in The Louvre (Ma 4823)-*Jérôme Bonnin and Denis Savoie* ; 23 The Singleton Dial - *Tony Wood* ; 24 he First International Conference

on Sun-dials -*Anthony Turner* ; 25 *Horologia et Solaria*. Instrumentation of Time in the Roman Empire: Lille 3 University, 29 March 2013 - *Jérôme Bonnin* ; 26 Dickensian Dials - *John Wall* ; 28 A Palimpsest Gnomon - *John Davis* ; 29 A 12th-century Manuscript Indian Circle Diagram - *John Davis* ; 30 The Duncraggan Stone-*Alastair Hunter* ; 33 Frank King wins the Sawyer Dialing Prize ; 34 The Dials of Middle Verdon - *Mike Cowham* 37. An Unusual Geographical Sundial - *Ian Butson* ; 39 An Interesting Scottish Slate Dial ; 40 Book Review—*De Cursu Solis* by Mario Araldi - *Andrew James* ; 41 Dial Dealings 2012 - *Mike Cowham* ; 44 Readers’ Letters - *Orders et al, Drinkwater*; 45 Thomas Boleyn’s Slate Sundial - *John Davis* ; 46 A Short Trip to Canada for Sundials - *Valery Dmitriev* 48. A Holographic Sundial - *John Davis*



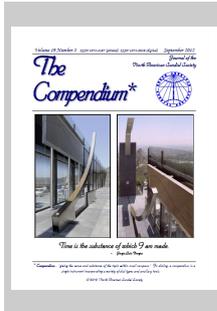
LE GNOMONISTE VOLUME XIX-4 DÉCEMBRE 2012 de la **COMMISSION DES CADRANS SOLAIRES DU QUEBEC** à télécharger sur le site : ([HTTP://CADRANS SOLAIRES.SCG.ULAVAL.CA/](http://CADRANS_SOLAIRES.SCG.ULAVAL.CA/))

1 La première page avec photos 2 Liminaire (L: XIX-4) par André E. Bouchard 4 Les nouveaux cadrans du répertoire par la CCSQ (répertoire) .6 Un beau cadran de Charles Bloud (1653) par André E. Bouchard 13 Deux rencontres annuelles (Trois-Rivières et Paris) par Géraldine Grenen 17 Un cadran de Lac-Mégantic par Geneviève Massé 19 Les écrits en gnomonique (les revues) 20 Les cadrans en Belgique (un livre) 22 Guigues et sa mine de plomb par Jasmin Gauthier 24 Correspondance



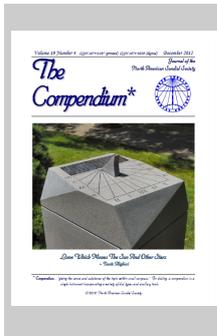
LE GNOMONISTE VOLUME XX-1 MARS 2013 de la COMMISSION DES CADRANS SOLAIRES DU QUEBEC à télécharger sur le site : ([HTTP://CADRANS_SOLAIRES.SCG.ULVAL.CA/](http://CADRANS_SOLAIRES.SCG.ULVAL.CA/))

2 Liminaire (L:XX-1, mars 2013) par André E. Bouchard 4 Au pays de l'argan par Jasmin Gauthier 6 Un beau cadran musulman du Moyen Âge par André E. Bouchard 13 Écrits en gnomonique internationale par G. Grenen 15 Un nouveau cadran à Québec par Michel Marchand 16 Correspondance 21 Un nouveau cadran horizontal spécial par Claude Naud, ing. Retr 23 La célébration du 20e anniversaire de la CCSQ par la rédaction.



The COMPENDIUM vol 19-3 Septembre 2012 (sur CD) de la NORTH AMERICAN SUNDIAL SOCIETY

Sundials for Starters – A Simple Equatorial Dial Robert L. Kellogg 1 Quiz: The Houseman's Trick Kosmala & Wieland 4 The Meridian Instrument At Griffith Observatory Bohannan & Norris 5 A Compact Indoor Reflection Sundial Egan & Kellogg 12 An Eclipse Sundial Bill Gottesman 23 Digital Bonus 26 Projected Refraction Sundials With Ambigram Fred Sawyer 27 The Sphere Of Matelica Alessandro Gunella 32 Horizontal Layout 6 Fred Sawyer 36 Henry Moore Sundial In Germany Rolf Wieland 38 The Tove's Nest 39



The COMPENDIUM vol 19-4 Décembre 2012 (sur CD) de la NORTH AMERICAN SUNDIAL SOCIETY

Sundials for Starters – A Moving Earth Robert L. Kellogg 1 Quiz Answer: The Houseman's Trick Kosmala & Wieland 3 Quiz: Nicole's Meridian Fred Sawyer 5 Two Sundials In Nichephoros K. Kordosis et al. 6 The Meridian Instrument At Griffith Observatory II Bohannan & Norris 11 The Shimel-Hyams Sundial Robert Adzema 18 The Phenomenon Of Sunlight In Rose Windows Rafael Soler Gayà 20 A Ramp Walking Sundial Mac Oglesby 25 The Culmination Sundial Ortwin Feustel 26 Digital Bonus 36 Sharpen Your Knives Using The Science Of Sundials Bill Gottesman 37 Horizontal Layout 7 Fred Sawyer 39 The Tove's Nest 40



The COMPENDIUM vol 20-1 Mars 2013 (sur CD) de la NORTH AMERICAN SUNDIAL SOCIETY

Sundials for Starters – Art In Placing The Gnomon Robert L. Kellogg 1; Non Numero Nisi Serenas Gertrude Hoey 2 ; Parallel Time Peggy Gunella 3; A Reflective Reflected Sundial Silvio Magnani 11; Tracking Elihu Yale's Sundial Fred Sawyer 16; Using The Sun To Survey Long Straight Lines Arthur L. Kaufman 19 ; Quiz Answer: Nicole's Meridian Fred Sawyer 24; Digital Bonus 27; Sundial Plaza/Cranmer Park Endangered Colorado Preservation 27; An Hours To Sunset Vertical Analemmatic Sundial Mac Oglesby 28; Horizontal Layout 8 Alessandro Gunella 31; An EOT App For Android Platforms Don Snyder 32; The Tove's Nest 34.



La BUSCA de PAPER N° 73 Hiver 2012 (sur papier et CD) de la Societat Catalana de Gnomonica SCG

Editorial 3; Correus de socis i amies 4; Aspetes gnomonics de la Catedral de València, per F. Fons Laguna 5; Miquel Palau i Claveras (Barcelona, 1901-1987), per Eduard Farré. 10 Incorporacions al fons documentai 12 ; Per a navegants 12 ; Poema "El Relotge de Sol" de J. Brossa 13 ; Nadala, per G. Mira 13 ; Una cronologia de la Cronometria (XI), per Eduard Farré 14 ; Visita de la BSS a Catalunya, setembre 2012, per C. Bou 15 Benvingudes les col laboracions. Una guia ; 19 Relotges de capell filtrant portàtils.

Mètode analitic de calcul, per R. Soler 20 ; Un rellotge de sol huma a la ciutadella de Roses, per R. Raluy 22 ; El rellotge de sol de la casa Pallarès-Pradells, per V. Aragonès 24 ; Textos en castellano 25 ; Els tresors del Matarranya, imatges de P. Novella 31

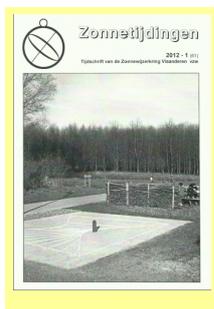


SCAPHE N° 8 Hiver 2012 (sur papier) du **Centre Mediterrani del Rellotge de Sol CMRS**

Editorial 3; Rellogte de sol horitzontal a Granollers4; Historia d'un rellogte de sol de vitrall a Uoret de Mar 8; Tempus Fugit 11; Escapthes, ais museus 12; Rellogtes de sol de rajóla vidrada 13 ; Relojos de sol de baldosas vidriadas 16; La filatelia y la gnomónica VII 18; De molins, moliners i rellogtes de sol 20; Ruta peí Girones i La Selva 24 ; Agenda - Resum d'activitats 28; Incorporacions al catàleg del CMRS 31.



Notre ami Yukio Ono, membre de la **Japan Sundial Society** et correspondant de notre commission à Tokyo nous a adressé : trois livrets du **Tokyo Zokei University** et une revue de la **Japan Sundial Society**.



Zonnetijdingen 2012 (sur papier) **de la Zonnewijzerkring Vlaanderen VZW**

N° 61 : Voorwoord 3 ; Zonnewijzers van Max Elskamp en René De Bock 4 ; De bibliotheek van Mercator 6 ; De educatieve bolvormige zonnewijzer 7 ; Een “sonne oft maen wijserken” 9; Minimale persoonsgrootte 13 ; Zonnewijzers in Vlaanderen (aanvulling nr. 17) 14 ; Kringleven 17.

N° 62 : Voorwoord 3 ; Zonnewijzers in mozaiek 4 ; Een willekeurige helling en richting voor de stijj van een zonnewijzer, het kan! 6 ; Maak zelf uw nocturlabium 9 ; Datumlijnen voor een declinerende verticale zonnewijzer 12 ; Kringleven 16.

N° 63 : Voorwoord 3 ; Verticale zonnewijzer in smalti-mozaiek 4 ; Het

nocturlabium (deel 2) 6 ; De schaduw van een gebouw doorheen het jaar 11 ; Een onverwachte kijk op zonnewijzers 13 ; Positieve lezersenquête 15 ; Kringleven 16.

N° 64 : Voorwoord 3 ; De zonnewijzer in het Rubenshuis 4 ; De lange reis van een ongewone zonnewijzer 5 ; De Fugio Cent 9 ; De herderszonnewijzers (deel 1) 10 ; De snelheid van de voorbischrijdende schaduw 14 ; Kringleven 17.

 Toutes les sociétés gnomoniques étrangères peuvent faire paraître des informations dans cette rubrique.

This heading is open at every gnomonic society.

Pour utilisation personnelle, des articles peuvent être numérisés et envoyés à nos membres, par mails, téléchargement ou par courrier (Prix de la page au tarif de la SAF + frais d'envoi suivant poids.)

Informations arrêtées le 2 avril 2013



Photo de D. Collin

L'astrolabe horizontal d'Oughtred
"Marean-Kielhorn director"