

Au Sommaire :

- **Le Torquetum**
- **Le double cadran solaire horizontal de Benjamin Scott**

- **Histoire**
Le *Pantocosme* et la gnomonique de N.-L. Morgard
Pierre Charles Le Monnier et la méridienne de Saint-Sulpice
- **Réalisations**
Cadrans solaires « fun »
- **Découvertes**
Un cadran solaire islamique marocain
Une table gnomonique de 1737
Cadran du petit palais de Napoléon à l'île d'Elbe
- **Études**
Problème inverse dans un cadran solaire à réflexion
Cadran solaire mal orienté
Cadrans canoniaux en Bretagne
La méthode du C.H.A.R.
- **Informations**
Nouveaux cadrans et dernières réalisations
Documents et logiciels
Questions/réponses gnomoniques
Sociétés étrangères



Software : typography

T_EX and $\mathcal{A}\mathcal{M}\mathcal{S}$ -T_EX are trademarks of the American Mathematical Society.

L^AT_EX is a program whose copyright belongs to Leslie Lamport.

Copyright © 2018 by C.C.S.

(Société Astronomique de France)

Première édition, octobre 2018

All inquiries should be addressed to :

Philippe SAUVAGEOT

Président de la Commission des Cadrons Solaires.

sauvageotph@wanadoo.fr

&

Dominique COLLIN

dominique.collin457@orange.fr

21 octobre 2018



Commission des Cadres Solaires

<http://www.commission-cadran-solaires.fr/>

La **Commission des Cadres Solaires** de la **Société Astronomique de France** effectue des recherches, des travaux théoriques et pratiques concernant les gnomons, cadrans solaires, méridiennes, astrolabes, nocturlabes et autres dispositifs permettant de mesurer le temps à partir de la position du soleil, de la lune ou des étoiles. Elle publie, donne et reçoit des informations au niveau international, sur l'histoire des cadrans, leurs devises, leur construction et la littérature qui leur est consacrée. Elle participe à la sauvegarde du patrimoine gnomonique français. Elle comprend environ 300 membres du néophyte à l'expert.

La Commission des Cadres Solaires c'est :

- deux réunions annuelles en province et à Paris (ou banlieue).
- la publication de la revue *Cadran Info*, en mai et en octobre.
- la publication en octobre de chaque année des inventaires (France et étrangers) des cadrans solaires, astrolabes, nocturlabes.
- un accès aux études, livres numérisés, logiciels (liste des offres, liste des articles parus dans *Cadran Info*, sur demande).
- de l'information tout au long de l'année par de nombreux envois de courriels.

Pour nous rejoindre :

- Si vous êtes membre de la Société Astronomique de France, il suffit de demander l'inscription à la Commission des Cadres Solaires.
- Si vous n'êtes pas membre, inscrivez-vous à la SAF : 35 €/an pour la province et l'étranger, 50 €/an pour l'île de France.

Contact : secretariat@saf-astronomie.fr

En couverture : le double cadran solaire horizontal de Benjamin Scott exposé au musée des Arts et Métiers à Paris (Crédit photo : © Musée des arts et métiers-Cnam / photos : Michèle Favareille).

Couleurs en page de couverture : rouge de Cassius (code RVB {107,28,35}), et couleur du package xcolor, option x11names : AntiqueWhite, en dos de couverture : IndianRed3.

Summaries in French, English, German, Spanish, Italian

Traduction de M. Lambalieu (anglais), Y. Opizzo (allemand), D. Collin (espagnol),
R. Anselmi (italien)

Sommaire de Cadran Info n° 38

Le Torquetum : origine et description de l'appareil mentionné en 1284.	Brigitte Alix	11
Problème inverse dans un cadran solaire à réflexion : calcul de l'inclinaison et de la déclinaison gnomonique d'un miroir plan à partir de l'image du soleil formée dans le plan du cadran.	Dominique Collin	19
Le balatā d'une kasbah saharienne : présentation d'un des rares cadrans islamiques marocains. Il date du début du XXe siècle..	Esteban Martínez Almirón	33
Le "Pantocosme" et la gnomonique de Noël-Léon MORGARD (1612) : étude d'un ouvrage de 1612 présentant un « instrument universel » au service des sciences de l'astronomie.	Paul Gagnaire & Éric Mercier	47
Peut-on dater les astrolabes anciens par une méthode astronomique ? : détermination de la marge d'erreur entre trois méthodes astronomiques de datation d'astrolabes anciens.	Éric Mercier	67
Appréciation de l'erreur de lecture sur un cadran solaire mal positionné : étude sur l'erreur de lecture d'un cadran mal orienté sur la base d'une réalisation destinée au monastère d'Azille.	Jean Pakhomoff	86
Pierre Charles Le Monnier et la méridienne de St-Sulpice : le tracé en 1743 de la plus grande méridienne de France, dans l'église Saint Sulpice à Paris, s'est déroulé dans un contexte scientifique particulier, raconté ici.	Denis Savoie	92
Le double cadran solaire horizontal de Benjamin Scott du musée des Arts et Métiers : description d'un cadran conservé dans les réserves du musée du Conservatoire des Arts et Métiers.	Denis Savoie	111
Rareté des cadrans canoniaux en Bretagne : causes probables de la rareté des cadrans canoniaux bretons.	Denis Schneider	128
Cadran du petit palais de Napoléon : description du cadran de l'île d'Elbe et de son environnement.	Jean Scordia	134
La langue de quelques cadrans : déchiffrement de texte sur des cadrans bretons.	Jean Scordia	139
Essais de traduction : traduction d'inscriptions grecques et égyptiennes sur des « horloges à ombre » en forme de « L » et à plan incliné.	Jean Scordia	142
Le C.H.A.R. : nouvelle méthode universelle pour tracer un cadran incliné déclinant.	Michel Steiner	151
Une table de 1737 : étude d'un cadran solaire marqué Laval et daté de 1737.	Michel Ugon, Paul Gagnaire & Pierre Labat	175

Suite page suivante ...

... Suite de la page précédente

Informations diverses :

- Dernières réalisations ou découvertes de cadrans.
- Cadrans originaux de Claude Gahon.
- Courriers/courriels gnomoniques (sous-styliste et équinoxiale, croissant lunaire, heures musulmanes, correction de perspective d'une image sous PhotoShop, rétrogradation dans un cadran solaire)
- Livres
- Gnomonique du monde.

Contributeurs : G. Baillet, J.-C. Berçu, Cl. Gahon, H. Guillemet, M. Keiffer, J. Pakhomoff, Ph. Sauvageot, D. Savoie, J. Theubet. **192**

En version numérique :

- dans le « sommaire.pdf », hyperliens à partir des titres vers les fichiers en .pdf ;
- le symbole \supseteq indique que l'article est complété par une étude détaillée ou un logiciel ou d'autres documents dans le dossier « annexes ».



Contents of Cadran Info n° 38



Torquetum : origin and description of this called device in 1284.	Brigitte Alix	11
Inverse problem for a reflection sundial : calculation of inclination and gnomonic declination for a plan mirror from the sundial picture displayed on the sundial plan.	Dominique Collin	19
Saharan Kasbah Balata : presenting one of the rare Moroccan Islamic sundial dated early XX th .	Esteban Martínez Almirón	33
“Pantocosme” and Noël-Léon MORGAN (1612) : study of a 1612 document describing an “universal instrument” for astronomical sciences.	\supseteq Paul Gagnaire & Éric Mercier	47
Is-it possible to determine age for ancient astrolabes by means of astronomical method? : determination of errors margin between three astronomical methods for dating ancient astrolabes.	Éric Mercier	67
Reading errors assessment on a badly placed sundial : Study of reading error on a awkward sundial from a sundial for Azille Monastery.	Jean Pakhomoff	86
Pierre Charles Le Monnier and St Sulpice meridian : history of the design of the greatest French meridian occurred in a special scientific environment during the year 1743.	Denis Savoie	92
B. Scott’s double horizontal sundial of the museum of “Arts et Métiers” : description of a sundial aside in “Conservatoire des Arts et Métiers” reserves.	Denis Savoie	111
Rare scratched sundials of Britany : likely reasons for these rare found scratched sundials in Britany.	Denis Schneider	128

Continued on next page ...

... Continued from previous page

Napoleon's small palace sundial : description of the sundial in Elbe Island and its environment.	Jean Scordia	134
Some sundials language : deciphering Bretons sundials.	Jean Scordia	139
Translation trials : Greek and Egyptian engravings on inclined plane "L" shaped "shadows clocks".	Jean Scordia	142
The C.H.A. R. : a new universal method to draw a declining and inclined sundial.	Michel Steiner	151
A 1737 Table : study an engraved Laval sundial 1737 dated.	Michel Ugon, Paul Gagnaire & Pierre Labat	175
Miscellaneous information : <ul style="list-style-type: none"> • Last designed or discovered sundials. • Original Cl. Gahon's sundials. • Letters and mails. • Books. • Gnomonic in the world. 	Contributeurs : G. Baillet, J.-C. Berçu, Cl. Gahon, H. Guillemet, M. Keiffer, J. Pakhomoff, Ph. Sauvageot, D. Savoie, J. Theubet.	192

In numerical version :

- In the « sommaire.pdf », hyperlinks starting from the titles towards the files in .pdf;
- \supseteq symbol means a complementary study to be found in annexes.



Verzeichnis von Cadran Info n° 38



Das Torquetum : Herkunft und Beschreibung des im Jahre 1284 erwähntes Geräts.	Brigitte Alix	11
Umgekehrtes Problem in einer Reflektion-Sonnenuhr : Berechnung der Neigung und der gnomonischen Deklination eines flachen Spiegels ab dem in der Ebene der Sonnenuhr gebildetes Bild der Sonne.	Dominique Collin	19
Der balatā eines Kasbah im Sahara : Präsentation von einem der seltenen marokkanischen islamischen Sonnenuhren. Sie stammt aus dem Anfang des 20. Jahrhunderts.	Esteban Martínez Almirón	33
Der « Pantocosme » und die Gnomonik von Noël-Léon MORGARD (1612) : Studie eines Buches von 1612 mit einem "universellen Instrument" im Dienst der Wissenschaft der Astronomie.	\supseteq Paul Gagnaire & Éric Mercier	47
Kann man die alten Astrolabien mit einer astronomischen Methode datieren ? : Bestimmung der Fehlerquote zwischen drei astronomische Datierung-Methoden von alten Astrolabien.	Éric Mercier	67

Fortsetzung auf der nächsten Seite ...

... Fortsetzung von vorheriger Seite

Schätzung des Ablesensfehler einer schlecht positionierten Sonnenuhr : Studie des Lesefehlers einer schlecht positionierten Sonnenuhr ab einer Arbeit für das Kloster von Azille.	Jean Pakhomoff	86
Pierre Charles Le Monnier und die Meridiane von St Sulpice : Die Arbeit im Jahr 1743 der größten Meridiane Frankreichs, in der Kirche Saint Sulpice in Paris, fand in einem hier erzählt besonderen wissenschaftlichen Kontext statt.	Denis Savoie	92
Außergewöhnliche Sonnenuhr von B. Scott : Beschreibung einer in der Reserve des Museums des "Conservatoire des Arts et Métiers" gehaltene Sonnenuhr.	Denis Savoie	111
Seltenheit von Kanonischen Sonnenuhren in der Bretagne : Wahrscheinliche Ursachen der Seltenheit von bretonischen Kanonischen Sonnenuhren.	Denis Schneider	128
Sonnenuhr des "Petit Palais" von Napoléon : Beschreibung der Sonnenuhr auf der Insel Elba und der Umgebung.	Jean Scordia	134
Die Sprache einiger Sonnenuhr : Entzifferung von Texten auf bretonischen Sonnenuhren.	Jean Scordia	139
Übersetzungsversuch : Übersetzung von griechischen und ägyptischen Inschriften auf "Schatten Uhren" in "L" Form und schiefe Ebenen.	Jean Scordia	142
Der C.H.A.R. : Neue universelle Methode, um eine inklinierte deklinierende Sonnenuhr zu zeichnen.	Michel Steiner	151
Eine Tafel von 1737 : Studie einer Sonnenuhr mit dem Wort "Laval" und von 1737 datiert.	Michel Ugon, Paul Gagnaire & Pierre Labat	175
Verschiedene Informationen : <ul style="list-style-type: none"> • Letzte Realisationen oder Entdeckungen von Sonnenuhren. • Originale Sonnenuhren von Cl. Gahon. • Gnomonische Briefe/Elbriefe (Substilare und Äquinoxiale, Mondsichel, moslemische Stunden, Perspektive Korrektur eines Bildes mit PhotoShop, Retrogradation in einer Sonnenuhr). • Bücher. • Welt Gnomonik. 	Beiträger : G. Baillet, J.-C. Berçu, Cl. Gahon, H. Guillemet, M. Keiffer, J. Pakhomoff, Ph. Sauvageot, D. Savoie, J. Theubet.	192

In digitaler Version :

- Im « sommaire.pdf », Hyperlinke ab den Titeln zur pdf Dateien ;
- das Symbol \triangleright zeigt, dass der Artikel eine detaillierte Folge im Ordner « Annexes » hat.



Sumario de Cadran Info n° 38



Torquetum : origen y descripción del dispositivo mencionado en 1284.	Brigitte Alix	11
Inverso problema en un reloj de sol de reflexión : Cálculo de la inclinación y declinación gnomónica de un espejo plano a partir de la imagen del sol formada en el plano del reloj.	Dominique Collin	19
Balatā de una kasbah sahariana : presentación de uno de los raros relojes islámicos marroquíes. Data de principios del siglo XX.	Esteban Martínez Almirón	33
El "Pantocosme" y la gnomónica de Noël-Léon MORGARD (1612) : Estudio de un libro de 1612 que presenta un "instrumento universal" al servicio de las ciencias de la astronomía.	Paul Gagnaire & Éric Mercier	47
¿Podemos fechar los antiguos astrolabios por un método astronómico? Determinación del margen de error entre tres métodos de datación astronómica de antiguos astrolabios	Éric Mercier	67
Apreciación de la error de lectura en un reloj de sol mal posicionado : estudio sobre la error de lectura de un reloj mal orientado basada en un realización para el monasterio de Azille	Jean Pakhomoff	86
Pierre Charles Le Monnier y el meridiano de San Sulpicio : el trazado en 1743 del meridiano más grande de Francia, en la iglesia de San Sulpicio en París, se efectuó en un contexto científico particular, relatada aquí.	Denis Savoie	92
Doble reloj de sol horizontal de B. Scott : descripción de un reloj de sol conservado en las reservas del museo del "Conservatoire des Arts et Métiers".	Denis Savoie	111
Rareza de los relojes de sol canónicos en Bretaña : causas probables de la rareza de los relojes canónicos bretones.	Denis Schneider	128
Reloj de sol del pequeño palacio de Napoleón : descripción del reloj de la isla de Elba y su entorno.	Jean Scordia	134
El lenguaje de algunos relojes de sol : descifrado de texto en relojes de sol bretones.	Jean Scordia	139
Ensayos de traducción : Traducción de inscripciones griegas y egipcias en "relojes de sombra" en forma de "L" y plano inclinado.	Jean Scordia	142
EL C.H.A.R. : nuevo método universal para dibujar un reloj inclinado declinante.	Michel Steiner	151
Una mesa gnomónica de 1737 : estudio de un reloj de sol con la marca Laval y fechado en 1737.	Michel Ugon, Paul Gagnaire & Pierre Labat	175

Continúa en la página siguiente ...

... Continuación de la página anterior

información miscelánea :

- Últimos realización o descubrimientos de relojes.
- Reloj de sol originales de Cl. Gahon.
- Correos / correos electrónicos gnomónicos (subestilar y equinoccial, medialuna lunar, horas musulmanas, corrección de la perspectiva de una imagen en PhotoShop, retrogradación de un reloj de sol))
- Libros.
- Gnomónica del mundo.

⊇

Los
colaboradores : G.
Baillet, J.-C.
Berçu, Cl. Gahon,
H. Guillemet, M. **192**
Keiffer, J.
Pakhomoff, Ph.
Sauvageot, D.
Savoie, J.
Theubet.

En versión numérica :

- en el « sommaire.pdf », hipervínculos a partir de los títulos hacia los archivos en .pdf;
- el símbolo \supseteq indica que el artículo es completado por un estudio detallado o un programa informático o de otros documentos en el archivo « anexa ».

**Sommario di Cadran Info n° 38**

Il Torquetum : origine e descrizione del dispositivo menzionato nel 1284	Brigitte Alix	11
Problema inverso in una meridiana a riflessione : Calcolo dell'inclinazione e della declinazione gnomonica di uno specchio piano partendo dall'immagine del sole formata sul piano del quadrante.	Dominique Collin	19
Il balatā di una kasba sahariana : presentazione di uno dei rari quadranti islamici marocchini. Risale all'inizio del XX secolo.	Esteban Martínez Almirón	33
Il "Pantocosmo" e la gnomonica di Noël-Léon MORGARD (1612) : Studio di un'opera del 1612 che presenta uno "strumento universale" al servizio delle scienze dell'astronomia.	Paul Gagnaire & Éric Mercier	47
Possiamo datare gli antichi astrolabi con un metodo astronomico : Determinazione del margine di errore tra tre metodi di datazione astronomici di antichi astrolabi.	Éric Mercier	67
Apprezzamento dell'errore di lettura su una meridiana mal posizionata : studio sull'errore di lettura di un quadrante mal orientato in base ad una realizzazione destinata al monastero di Azille.	Jean Pakhomoff	86
Pierre Charles Le Monnier e la meridiana di St Sulpice : Il tracciato del 1743 della più grande meridiana di Francia, nella chiesa di Saint Sulpice a Parigi, fu realizzato in un particolare contesto scientifico, qui raccontato	Denis Savoie	92
Quadrante eccezionale di B. Scott : descrizione di un quadrante conservato nei depositi del museo del Conservatorio delle Arti e dei Mestieri.	Denis Savoie	111

Continua alla pagina successiva ...

... Continua dalla pagina precedente

Rarità dei quadranti canonici in Bretagna : probabili cause della loro scarsità in quella regione.	Denis Schneider	128
Quadrante del piccolo palazzo di Napoleone : descrizione del quadrante dell'Isola d'Elba e del suo ambiente.	Jean Scordia	134
La lingua di alcuni quadranti : decrittografia del testo di quadranti bretoni.	Jean Scordia	139
Saggi di traduzione : traduzione di iscrizioni greche ed egiziane su "orologi d'ombra" sotto forma di "L" e su piano inclinato.	Jean Scordia	142
Il C.H.A.R. : nuovo metodo universale per disegnare un quadrante inclinato declinante.	Michel Steiner	151
Una tavola del 1737 : studio di una meridiana firmata Laval e datata 1737.	Michel Ugon, Paul Gagnaire & Pierre Labat	175
Informazioni varie :		
<ul style="list-style-type: none"> • Ultime realizzazioni o scoperte di quadranti. • Quadranti originali di Cl. Gahon. • Posta / posta elettronica gnomonica (sustilare ed equinoziale, mezzaluna lunare, ore musulmane, correzione prospettica di un'immagine sotto PhotoShop, retrogradazione in una meridiana). • Libri. • La Gnomonica del mondo. 	\supseteq	Contributeurs : G. Baillet, J.-C. Berçu, Cl. Gahon, H. Guillemet, M. Keiffer, J. Pakhomoff, Ph. Sauvageot, D. Savoie, J. Theubet.
		192

In versione numerica :

- nel "Sommaro.pdf", i collegamenti ipertestuali dai titoli ai file in .pdf;
- il simbolo \supseteq indica che l'articolo è completato da uno studio dettagliato o da un software o da altri documenti nel dossier "allegati".

Le Torquetum

par Brigitte Alix

Apparu à la fin du 13^e siècle, le torquetum, instrument dont les origines conceptuelle et géographique sont incertaines, est constitué des plans principaux des sphères terrestre et céleste (horizon, équateur, écliptique). Il permet au même titre que l'astrolabe la résolution de la plupart des problèmes liés à la mesure du temps. Cependant, ce qui le différencie de l'astrolabe, c'est, du fait de sa conception, la facilité de réalisation de relevés astrométriques tout comme le passage des coordonnées équatoriales aux coordonnées écliptiques et inversement.

Nous sont parvenus 2 instruments de la fin du Moyen-âge, et une dizaine d'instruments datés du 16^e et début du 17^e siècle.

1 Qu'est-ce-qu'un turquet ?

Mentionné pour la première fois dans un traité d'astronomie daté précisément de 1284, le turquet (torquetum) est un instrument constitué des plans principaux des sphères terrestre et céleste (horizon, équateur, écliptique). Il permet au même titre que l'astrolabe la résolution de la plupart des problèmes astronomiques, (triangle de position, mesure du temps, calcul des mouvements célestes) mais apporte également une aisance certaine dans la pratique de l'astrométrie. L'auteur du traité de 1284, Francon de Pologne, dont seul le nom nous est parvenu grâce à cet ouvrage, décrit avec une terminologie très précise les différents éléments constituant le « turquet ».

Un autre traité d'astronomie *Tractatus super totam astrologiam* daté au plus tôt du dernier quart du 13^e siècle et au plus tard pendant les premières années du 14^e siècle, écrit par un franciscain, Bernard de Verdun, comprend la description et les usages d'un instrument qu'il appelle « truquetum » ou encore « turketum ».

Qui de Bernard de Verdun ou de Francon de Pologne, apparemment contemporain l'un de l'autre est « l'inventeur » de l'instrument ? Difficile d'apporter une réponse précise. D'après Emmanuel Poulle, les deux hypothèses sont plausibles. Postérieurement à Bernard de Verdun et à Francon de Pologne d'autres traités vont décrire l'instrument et ses usages. Contemporain de Francon de Pologne et Bernard de Verdun, Richard de Wallingford (1292/1336), abbé,



Figure 1 – Torquetum ayant appartenu à Nicolas de Cues (1401/1464) constructeur inconnu.

mathématicien, astronome, astrologue et horloger, officiant à la cathédrale de Saint-Albans (Angleterre) mentionne et décrit le *torquetum* dans un traité consacré au *Rectangulus*, un autre instrument peu connu du moyen-âge¹.

Regiomontanus (1436/1476), traité *Scripta Clarissimi Mathematici*, édité en 1544 par Schönner (*cf. fig. 2*). En préambule, description de l'instrument avec pour « seule » illustration

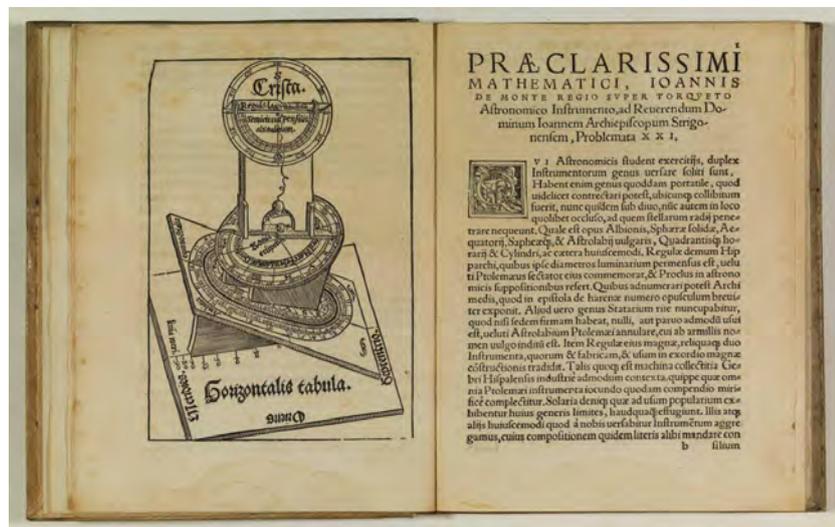


Figure 2 – Regiomontanus, *Scripta Clarissimi Mathematici*.

une gravure d'un instrument complet, et la résolution de 21 problèmes (comment « régler » et orienter l'instrument, lecture des heures de lever et coucher du soleil, lecture de l'heure de jour comme de nuit, lecture des arcs diurnes...)

Petrus Apian (1495/1552) mentionne le *Torquetum* dans *Astronomicum Caesareum* (1540), description de l'instrument avec tracés des différents éléments le constituant et résolution de 12 problèmes (longitude et signe du soleil, calcul de l'arc diurne, lecture des coordonnées de la lune...).

1. Henri Michel, *Le Rectangulus de Wallingford*. Extrait du bulletin : *Ciel et terre* n° 11-12, 1944.

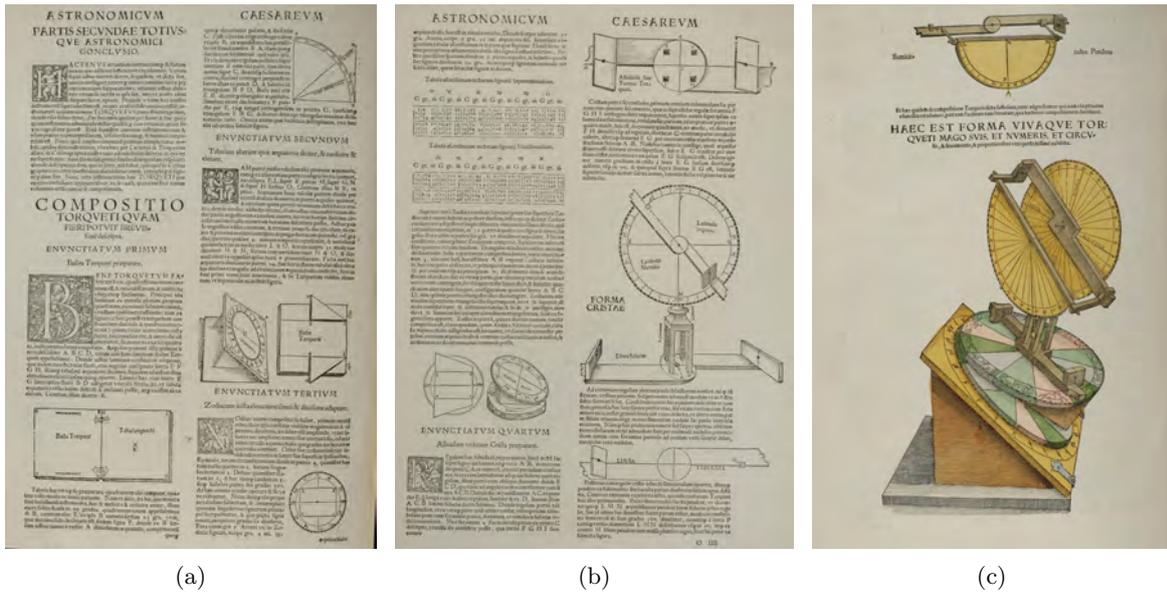


Figure 3 – Petrus Apian, *Astronomicum Caesareum*, extraits.

Egnazio Danti (1536/1586). Les 2 premiers chapitres décrivent l'instrument et sa mise en place pour utilisation. Les 21 chapitres qui suivent traitent de la résolution des problèmes astronomiques, le dernier chapitre traite de la construction du *torquetum*.



Figure 4 – Egnazio Danti, *Astronomicum Caesareum*, extraits.

2 Sur l'origine du nom

Parmi les différentes hypothèses émises quant à l'origine du mot *torquetum*, voici celle d'Emmanuel Poule. Dans son traité Bernard de Verdun désigne l'instrument par : *turketus* ou *truquetus* ; *truquetus* serait un diminutif d'un mot du vieux français : *troche*.

Définition dans le dictionnaire de Godefroy² : *troche*, s.f., assemblage, faisceau, masse, troupe, quantité.

Cette définition correspond assez bien à la description que l'on peut faire de l'instrument constitué effectivement de différents éléments constituant un assemblage.

3 Description du torquetum

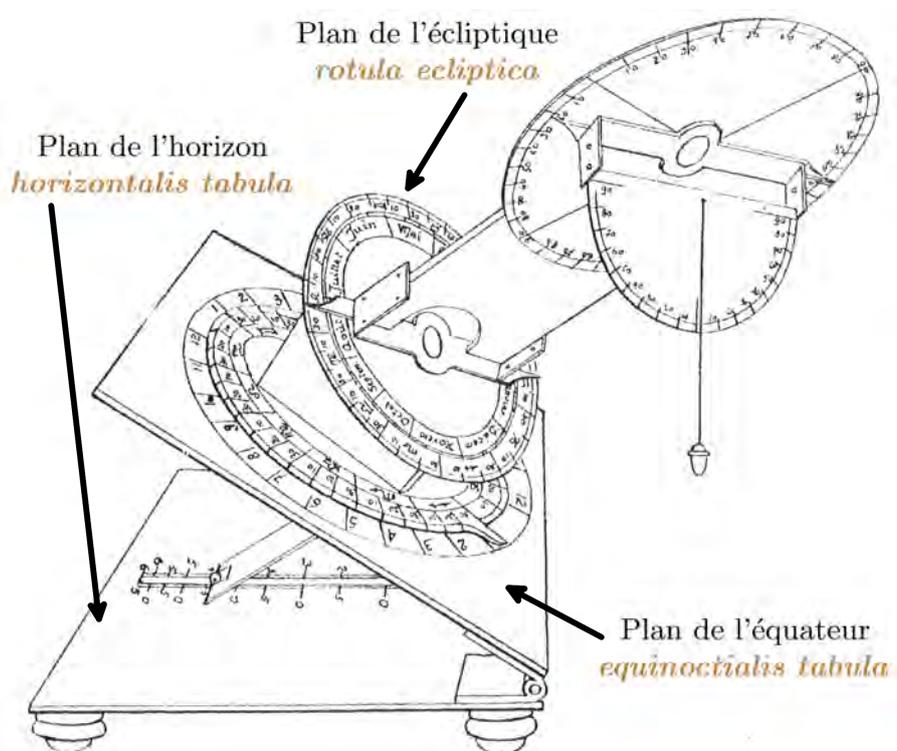


Figure 5 – Dessin H. Michel, extrait du bulletin *Ciel et Terre* (cf. note 1).

L'instrument se caractérise par la représentation des 3 plans principaux : horizon, équateur, écliptique. La table horizontale sert de socle. Elle porte une ligne de foi, et sera orientée sur le méridien.

Un système à charnière la relie à la table équatoriale (fig. 6 page suivante), de façon à régler cette dernière en fonction de la latitude, (réglage en co-latitude) et d'être ainsi parallèle au plan de l'équateur. Cette table est pourvue d'un disque gradué en heures et en degrés.

L'assemblage comprenant le plan de l'écliptique est constitué de 3 disques, 1/2 disque et 2 alidades (fig. 7).

Le premier disque (fig. 8(a) page ci-contre), la *basilica*, comprend une graduation zodiacale, un index (*almuri*) situé sur le zéro du Capricorne, et repose sur la table équatoriale. La *basilica*

2. Frédéric Godefroy (1826/1897), Philologue – Lexicographe.

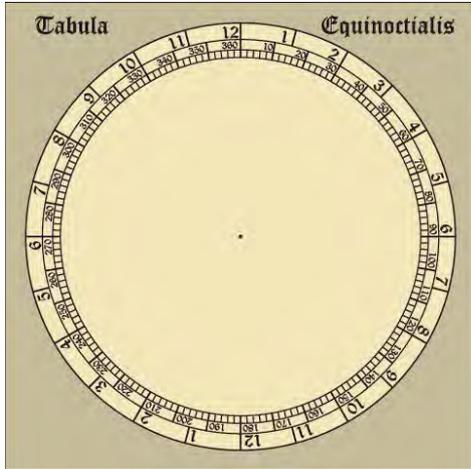


Figure 6 – Table équatoriale.

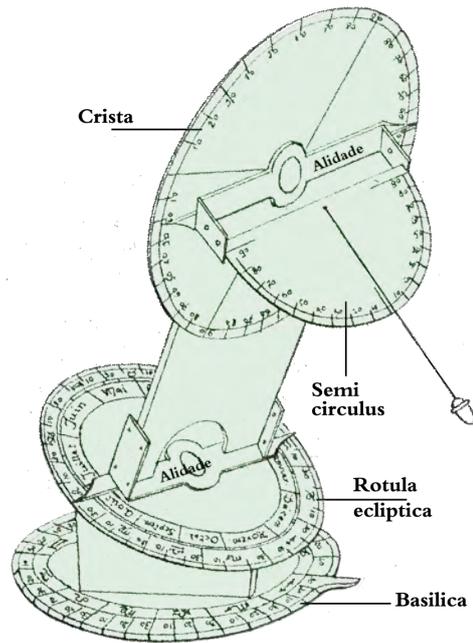
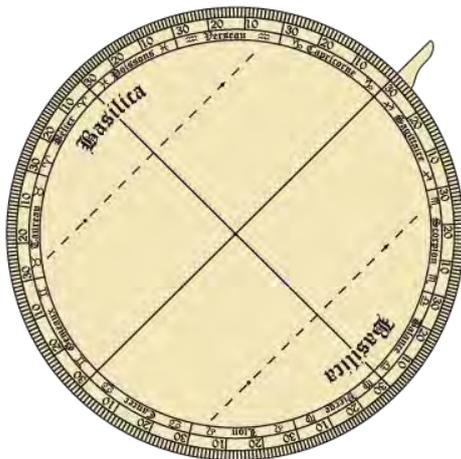


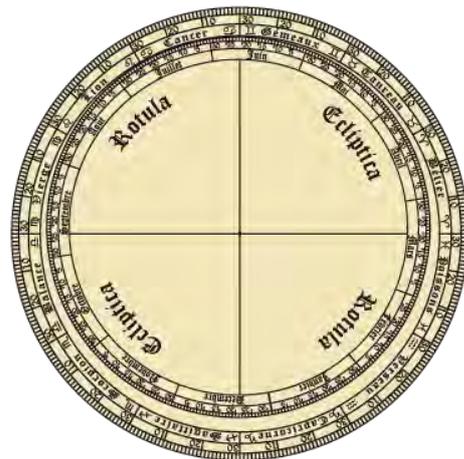
Figure 7 – Assemblage du *turquetum*.

est mobile grâce à un axe la traversant et passant par le centre de la table équatoriale. La graduation zodiacale est irrégulièrement espacée, conséquence de la projection de l'écliptique sur l'équateur.

Le second disque (fig. 8(b)), la *rotula ecliptica* repose sur la *basilica*, et est pourvue de calendrier zodiacal. (Pour cet instrument reconstitué, le calendrier est grégorien et non julien, contrairement aux instruments d'époque). Ce disque fait avec la tablette équatoriale un angle constant égal à l'obliquité de l'écliptique, matérialisé par un tronc de cône.



(a) La *basilica*



(b) La *rotula ecliptica*

Figure 8 – L'ensemble *basilica* et *rotula*.

Dans un plan perpendiculaire au plateau éclipstique, est fixé un disque, la *crista* (la crête), gradué en $4 \times 90^\circ$, avec à sa base et solidaire de l'ensemble une alidade à pinnules. la *crista* est également pourvue d'une alidade à pinnules, mobile, qui permettra la lecture de hauteurs, mais également de latitudes ou déclinaisons. A l'alidade de la *crista* est suspendu un *semi circulus*, gradué en $2 \times 90^\circ$, qui fera office de niveau, au centre duquel on fixe un fil à plomb.

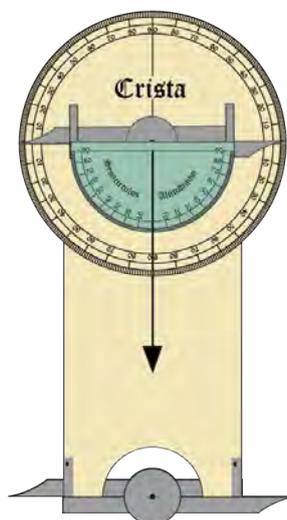


Figure 9 – La *crista* et l'alidade à pinnules.

Exemple d'utilisation du *torquetum* : lire l'heure solaire à une latitude de 49° N.

Afin d'être opérationnel, l'instrument doit être orienté sur la méridienne et réglé en co-latitude, ici 41° . Les 2 premiers plateaux seront alors parallèles aux plans horizon, équateur.

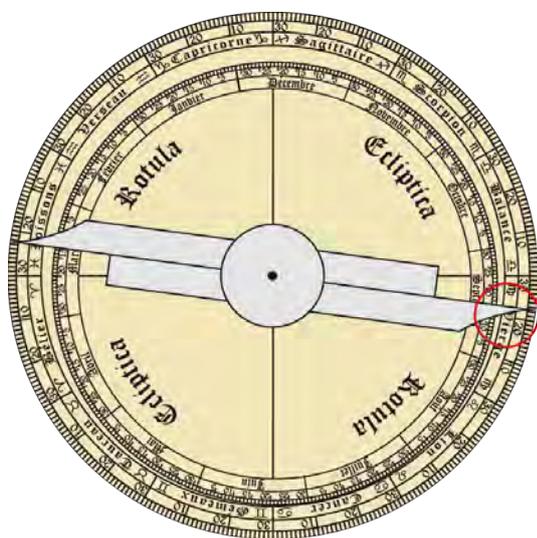


Figure 10 – Exemple d'utilisation : l'alidade.

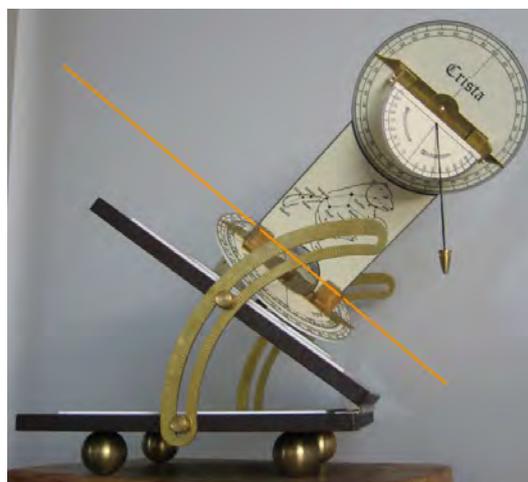


Figure 11 – Réglages : *rotula ecliptica* et *crista*.

L'alidade reposant sur la *rotula ecliptica* doit être positionnée sur la date du jour. Exemple ici le 15 septembre. On lit également à la pointe de l'alidade la longitude éclipstique du soleil, $172^\circ 30'$ ou $22^\circ 30'$ dans la Vierge (fig. 10).

Sans dérégler l'alidade, il faut faire pivoter l'ensemble de la partie supérieure (*rotula ecliptica* et *crista*) jusqu'à ce que la lumière du soleil passe par les pinnules de l'alidade de la *rotula ecliptica*. La *rotula ecliptica* est alors parallèle au plan de l'écliptique (fig. 11 page précédente). Le fil à plomb nous renseigne sur la hauteur du soleil : 40°.

L'heure solaire se lit sur la couronne équinoxiale, elle correspond à la graduation faisant face à 22° 30' de la Vierge sur la *basilica*, soit 10 h 30. (la couronne équinoxiale est graduée tous les 2 degrés).

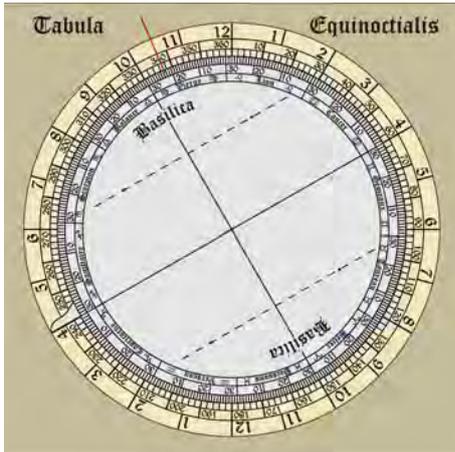


Figure 12 – Couronne équinoxiale.

Au cours de la journée, l'heure pourra être lue en mesurant régulièrement la hauteur du soleil. Durant une journée le fil à plomb indiquera 2 fois une hauteur égale à 0°, correspondant au lever et au coucher du soleil.

4 Instruments existants

Nous sont parvenus 2 instruments de la fin du moyen-âge.



(a) Nicolas de Cues (1401/1464), constructeur inconnu



(b) Martin Bylica (astronome) constructeur Hans Dorn à Buda, 1480. Musée Universitaire Jagellon, Cracovie

Figure 13 – Instruments du moyen-âge.

Sont recensés une dizaine d'instruments du 16^e et du 17^e siècle.



(a) Constructeur Habermel (1585/90) H 36,7 cm ; base : L 20,2 cm ; l 20,2 cm. Musée des Arts et Métiers, Hambourg



(b) Attribué à Habermel. H 33 cm, L 24,5 cm, l 24,2 cm. Deutsches Museum, Munich



(c) Johann Richter, alias Johannes Praetorius (1537/1616) mathématicien, fabricant d'instruments et astronome allemand. Muséum National Nuremberg

Figure 14 – Instruments des 16^e et 17^e siècle.

Problème inverse dans un cadran solaire à réflexion

par Dominique Collin

Un problème original est celui du calcul de l'inclinaison et déclinaison d'un miroir à partir de l'image du soleil formée sur le plan du cadran. On présente les différentes formules nécessaires à la résolution de ce problème. Le cas de la mesure consécutive de deux taches lumineuses est également proposé.

1 Principe du calcul

Le plan du cadran est incliné et déclinant ; I et D représentent respectivement son inclinaison et sa déclinaison gnomonique. On utilise un miroir plan lui aussi incliné et déclinant. On désigne par I_m la distance zénithale de la normale au miroir, par D_m sa déclinaison gnomonique, puis par $(H_n; \delta_n)$ les coordonnées horaires de la normale au miroir. Le problème que l'on se pose ici consiste à déterminer les paramètres géométriques du miroir plan à partir de la mesure des coordonnées d'une ou deux taches lumineuses produite sur le cadran. C'est un *problème inverse* à celui qui consistait à déterminer la position de la tache de lumière à partir des caractéristiques géométriques du miroir et du cadran.

Le calcul peut se dérouler de la façon suivante. Des coordonnées $T(X; Y)$ de la tache lumineuse dans le repère du cadran, on extrait les coordonnées horizontales locales du Soleil réfléchi : $(h_r; Az_r)$. Partant de là on calcule l'angle de réflexion i du rayon lumineux réfléchi¹ à partir de la connaissance de h_r , h et de la différence des azimuts $Az - Az_r$. Puis à partir de seulement h_r , h , et i , on calcule simplement la distance zénithale du miroir. Le calcul de D_m est quand à lui un peu moins direct. Il existe plusieurs formules possibles, on ne présentera que la plus efficace. C'est une solution « élégante » que propose la trigonométrie sphérique.

Le cas du plan incliné et déclinant (PID) conduit aussi aux formules dans le cas du plan vertical déclinant (PVD) pour l'obtention du couple $(I_m; D_m)$. C'est pourquoi on ne traitera

1. L'angle de réflexion est le même que l'angle d'incidence : $i = r$ selon la loi de la réflexion. On a retenu la notation i pour exprimer l'un ou l'autre réciproquement.

ici que le plan incliné déclinant ; pour le plan vertical déclinant il suffira de prendre $I = 90^\circ$, pour le plan horizontal on prendra $I = 0^\circ$ et $I = 180^\circ$ pour un plafond (non mansardé).

Et enfin on abordera une autre solution, plus « moderne » et très expéditive basée sur la mesure de la position de deux taches lumineuses dans le plan du cadran. C'est une solution qu'offre l'emploi du calcul vectoriel.

2 Inversion à partir d'une tache lumineuse

Traitons directement du cas général qui est celui d'un cadran incliné et déclinant, plan d'orientation tout à fait quelconque et *supposé* bien déterminée. Une étude précédente² justifiait l'emploi d'un formulaire que l'on reprendra tel quel en faisant donc usage du même repère positionnant la tache lumineuse dans le plan du cadran :

$$T \begin{cases} X = R \frac{\sin I \tan h_r - \cos I \cos (Az_r - D)}{\cos I \tan h_r + \sin I \cos (Az_r - D)} \\ Y = R \frac{\sin (Az_r - D)}{\cos I \tan h_r + \sin I \cos (Az_r - D)} \end{cases} \quad (1)$$

Comment déterminer l'inclinaison et la déclinaison gnomonique du miroir utilisé ?

2.1 Coordonnées horizontales locales du soleil réfléchi

2.1.1 À partir du formulaire initial

En observant les équations (1) on se rend compte que la hauteur du soleil réfléchi, h_r intervient uniquement par sa tangente, alors que l'azimut Az_r intervient par un sinus et un cosinus. Il va donc être possible d'éliminer $Az_r - D$ afin de ne faire apparaître que la hauteur h_r , et ce par une série de combinaisons trigonométriques de ces angles.

Posons, pour simplifier un peu l'écriture et surtout sa lecture, $K = Az_r - D$. Les équations (1) s'écrivent alors :

$$T \begin{cases} X = R \frac{\sin I \tan h_r - \cos I \cos K}{\cos I \tan h_r + \sin I \cos K} \\ Y = R \frac{\sin K}{\cos I \tan h_r + \sin I \cos K} \end{cases}$$

De la première coordonnée il vient assez rapidement que :

$$\cos K = \frac{R \sin I - X \cos I}{R \cos I + Y \sin I} \tan h_r \quad (2)$$

De la même façon à partir de la deuxième coordonnée :

$$\sin K = \frac{Y}{R \cos I + X \sin I} \tan h_r \quad (3)$$

Et enfin, de par la combinaison trigonométrique $\cos^2 K + \sin^2 K = 1$ on obtient :

$$\tan h_r = \pm \frac{R \cos I + X \sin I}{\sqrt{(R \sin I - X \cos I)^2 + Y^2}} \quad (4)$$

2. D. Collin, *Éléments de gnomonique catoptrique*, Cadran Info n° 26, octobre 2012. Le repère GXY dans le plan du cadran est tel que GX est vertical, orienté vers le bas, GY est horizontal, orienté vers la droite lorsqu'un observateur regarde le cadran. O est le centre du miroir et $OG = R$ est sa distance au plan du cadran.

d'écrire que les coordonnées de la tache lumineuse dans le repère $Oxyz$ se calculent à partir des coordonnées relevées dans le plan du cadran de la façon suivante :

$$T \begin{cases} x = X \cos \lambda \cos \ell - Y \sin \ell - R \sin \lambda \cos \ell \\ y = X \cos \lambda \sin \ell + Y \cos \ell - R \sin \lambda \sin \ell \\ z = -X \sin \lambda - R \cos \lambda \end{cases} \quad (6)$$

On vérifiera que la longueur OT est égale à $\sqrt{X^2 + Y^2 + R^2}$. Les coordonnées sphériques du soleil réfléchi R s'écrivent ⁵ :

$$R \begin{cases} x_r = R \cos Az_r \cos h_r = \frac{R}{\sqrt{X^2+Y^2+R^2}} x \\ y_r = -R \sin Az_r \cos h_r = \frac{R}{\sqrt{X^2+Y^2+R^2}} y \\ z_r = R \sin h_r = \frac{R}{\sqrt{X^2+Y^2+R^2}} z \end{cases} \quad (7)$$

Le système (7) est suffisant pour déterminer sans aucune ambiguïté les angles Az_r et h_r . En effet, sachant que $\lambda = I$ et $\ell = -D$, on obtient sur-le-champ :

$$\tan Az_r = \frac{X \sin D \cos I - Y \cos D - R \sin D \sin I}{X \cos D \cos I + Y \sin D - R \cos D \sin I} \quad (8)$$

Lorsque le dénominateur de $\tan Az_r$ est positif, Az_r est du signe du numérateur. Lorsque le dénominateur est négatif, prendre $Az_r + 180^\circ$ si le numérateur est positif, sinon prendre $Az_r - 180^\circ$. Comme on peut le voir il est nettement plus simple ici d'extraire l'angle Az_r et contrairement à la relation (5) on a littéralement désolidarisé Az_r de D .

La troisième ligne de (7) donne tout aussi directement la hauteur sur l'horizon du soleil réfléchi :

$$\sin h_r = -\frac{X \sin I + R \cos I}{\sqrt{X^2 + Y^2 + R^2}} \quad (9)$$

Toute ambiguïté de signe est ainsi levée (ce qui n'était pas le cas dans la relation (4)). On peut voir que h_r est de même signe que le numérateur de (9).

C'est cette méthode d'extraction que l'on adoptera et dès qu'une image du soleil par le miroir est repérée dans le plan du cadran solaire, on obtient immédiatement à partir de (8) et de (9) les coordonnées horizontales locales du soleil réfléchi.

2.2 Paramètres primaires du miroir

Maintenant déterminons les formules de calcul de la distance zénithale du miroir et de sa déclinaison gnomonique, objectif de ce travail. Nous allons puiser dans l'ensemble des formules établies dans la même étude ⁶ pour résoudre ce problème inverse.

2.2.1 Distance zénithale du miroir

On se sert des très importantes formules de calcul de l'angle d'incidence et de la hauteur du soleil réfléchi. L'étonnante similitude de ces deux formules (cela avait été déjà remarqué)

5. Le repère $Oxyz$ est direct, or l'azimut est compté depuis l'axe Ox dans le sens indirect si bien qu'il faut changer le signe de l'angle Az . Ce changement a été intégré dans les coordonnées de S_r .

6. D. Collin, *op. cit.*

va conduire directement au calcul de l'angle I_m . Mettons-les en regard ici :

$$\begin{cases} \cos i = \cos I_m \sin h + \sin I_m \cos h \cos(Az - D_m) \\ \sin h_r = \cos 2I_m \sin h + \sin 2I_m \cos h \cos(Az - D_m) \end{cases}$$

Multiplier la première égalité par $\cos I_m$, dans le but de faire apparaître $\sin 2I_m$ (et obtenir un terme identique), conduit après quelques manipulations trigonométriques à l'élégante formule ⁷ :

$$\cos I_m = \frac{\sin h + \sin h_r}{2 \cos i} \quad (10)$$

Le dénominateur étant toujours positif puisque $i \in [0^\circ; 90^\circ]$, et comme $I_m \in [0^\circ; 180^\circ]$, l'extraction de I_m s'effectue sans difficulté. Lorsque I_m est négatif, prendre $180^\circ + I_m$. Mais à ce stade, l'angle d'incidence i n'est pas connu. Il faut donc le déterminer indépendamment bien entendu de I_m et D_m ...

Autre démonstration : en se plaçant dans le triangle sphérique SZR (cf. fig. 2 page suivante) dans lequel les trois côtés sont connus ($SR = 2i$, $ZR = h_r = 90 - h_r$ et $ZS = \bar{h} = 90 - h$), la propriété de la médiane sphérique, justement le côté $ZN = I_m$, permet d'établir ⁸ :

$$\cos I_m = \frac{\sin \frac{h+h_r}{2} \cos \frac{h-h_r}{2}}{\cos i} \quad (10 \text{ bis})$$

Expression donnant un résultat parfaitement identique à la précédente ; on en tirera peut-être avantage lors de l'étude des incertitudes de mesure qui s'exercent sur la détermination de la distance zénithale du miroir...

2.2.2 Angle d'incidence

Le calcul de l'azimut du soleil réfléchi passait par l'utilisation d'une des formules de Borda avec les angles h , h_r , i et Az . L'élégante symétrie dans cette formule nous laisse envisager une extraction possible de i et ce, de la plus belle manière. En effet, partant de la formule de calcul de l'azimut du soleil réfléchi (établie dans le triangle sphérique SZR , fig. 1 page 21) :

$$\tan Z/2 = \sqrt{\frac{\cos(h - h_r) - \cos 2i}{\cos 2i + \cos(h + h_r)}}$$

avec l'angle naturel $Z = |Az - Az_r|$, on est conduit à une relation donnant l'angle d'incidence. Et si l'on veut s'affranchir de toute indétermination à cause de la présence de la tangente ⁹, on optera pour l'expression :

$$\cos 2i = \cos(h - h_r) \cos^2 Z/2 - \cos(h + h_r) \sin^2 Z/2 \quad (11)$$

7. Elle pouvait s'obtenir plutôt directement en considérant que le côté ZN est une médiane sphérique dans le triangle sphérique SZR ...

8. On pouvait très bien partir de la relation (10) et appliquer les transformations trigonométriques de la somme de deux sinus en un produit de deux lignes trigonométriques. Le calcul est classique.

9. C'est plus par habitude d'éviter toute indétermination dans les calculs. Cependant l'angle Z ne peut pas être nul car dans ce cas le triangle sphérique dans lequel il intervient n'existe plus. Mais cela voudrait dire aussi que l'azimut du soleil réfléchi est le même que l'azimut du soleil incident ; cette condition d'ailleurs existe-t-elle vraiment ?

Az étant obligatoirement connu lors de la mesure des coordonnées de la tache lumineuse, et Az_r ayant été extrait plus haut par la relation (8). L'extraction de i ne pose pas non plus de difficulté. Lorsque i est négatif, prendre $180 + i$ et l'angle i devra appartenir à l'intervalle $[0^\circ; 90^\circ]$ pour être pris en compte¹⁰.

Il est remarquable que le calcul de i , et celui de I_m par conséquent, ne sollicite que les paires de coordonnées $(Az; h)$ et $(Az_r; h_r)$! Pour la première paire on peut obtenir autant de précision que l'on souhaite à partir d'éphémérides, pour la deuxième, la précision dépendra en particulier de la qualité des mesures des coordonnées $(X; Y)$ de la tache lumineuse et du relevé de la distance R .

2.2.3 Déclinaison gnomonique du miroir

Le calcul de l'angle D_m n'est pas difficile à conduire. Après quelques recherches, il s'avère que son calcul ne peut s'envisager indépendamment de celui de I_m , ce qui ne laisse plus d'amplitude de manoeuvre quand aux formules employées. L'angle D_m est l'angle dièdre orienté entre le plan méridien représenté par ZK et le plan normal au miroir représenté par ZN (cf. fig. 2). L'idée est de travailler dans le triangle sphérique complet SZR et de ne raisonner que sur les grandeurs angulaires orientés Az et Az_r . Leur comparaison permettra de

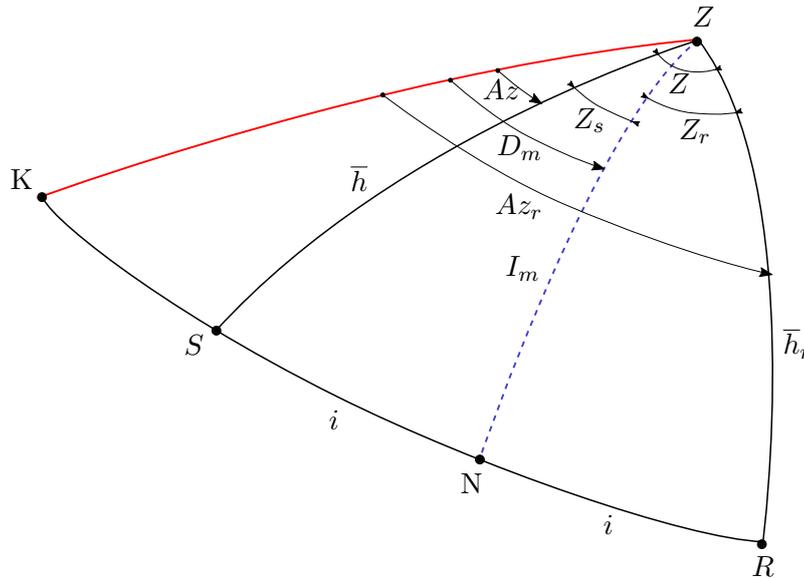


Figure 2 – Exemple d'une configuration des triangles Sphériques SZR , ZNS et ZNR . Le méridien est l'arc de grand cercle ZK , le plan incident est représenté par l'arc de grand cercle $KSNR$. L'arc de grand cercle ZN représente le plan normal au miroir ; le côté ZN est une médiane dans le triangle sphérique SZR dans lequel $NS = NR = i$ et $\widehat{Z} = \widehat{Z}_s + \widehat{Z}_r$ mais $\widehat{Z}_s \neq \widehat{Z}_r$.

savoir si le plan azimuthal ZS du soleil incident S est placé avant ou après le plan azimuthal ZN du miroir et par conséquent de remonter à la valeur correcte de l'angle orienté D_m lequel intervient deux fois implicitement¹¹ dans les triangles sphériques NZS et NZR .

10. Rappelons que l'on est toujours assuré que le soleil est au-dessus du miroir puisque l'on travaille avec les coordonnées de son image dans le plan du cadran...

11. Dans le triangle sphérique ZNS on a $Z_s = |Az - D_m|$ et $Z_r = |D_m - Az_r|$ dans le triangle sphérique ZNR . Si Az est supérieur à Az_r par exemple, alors c'est que le soleil incident a déjà franchi le plan normal au miroir, et par conséquent le soleil réfléchi est de l'autre côté du plan normal (c'est-à-dire avant celui-ci). Réciproquement, dès que $Az < Az_r$, on en déduit que le soleil incident ne peut se trouver qu'avant le plan

Commençons par déterminer les *angles naturels* Z_s et Z_r respectivement angles au sommet Z dans les triangles sphériques NZS et NZR (fig. 2). Dans ces triangles les trois côtés sont connus, on utilise par conséquent la formule de Borda. Le demi-périmètre du triangle sphérique NZS est $u = \frac{1}{2} (\bar{h} + I_m + i)$ et est $v = \frac{1}{2} (\bar{h}_r + I_m + i)$ pour le triangle sphérique NZR . Par suite :

$$\begin{cases} \tan \frac{Z_s}{2} = \sqrt{\frac{\sin(u - I_m) \sin(u - \bar{h})}{\sin u \sin(u - i)}} \\ \tan \frac{Z_r}{2} = \sqrt{\frac{\sin(v - I_m) \sin(v - \bar{h}_r)}{\sin v \sin(v - i)}} \end{cases} \quad (12)$$

La programmation puis l'extraction de ces angles naturels ne pose aucune difficulté¹² ; $Z_s \in [0^\circ; 90^\circ[$ et $Z_r \in [0^\circ; 90^\circ[$. On calculera D_m de la façon suivante :

$$D_m = \frac{1}{2} (Z_r - Z_s + Az + Az_r) \quad \text{lorsque } Az > Az_r. \quad (13)$$

$$D_m = \frac{1}{2} (Z_s - Z_r + Az + Az_r) \quad \text{lorsque } Az < Az_r. \quad (14)$$

2.3 Formules utiles pour le calcul des paramètres primaires du miroir

On regroupe toutes les formules utiles dans le tableau suivant, sans tenir compte des autres formules à appliquer pour trouver par exemple δ_r via les formules de transformations des coordonnées, ou encore h et δ du Soleil incident qui sont supposées connues à l'instant de la mesure des coordonnées de la tache lumineuse.

Au commencement des calculs on admet que sont connus respectivement :

- φ , la latitude du lieu,
- (I, D) pour le plan du cadran ;
- (h, Az) et (H, δ) pour le soleil incident ;
- et enfin les mesures de la tache lumineuse $T(X, Y)$ dans le plan du cadran.

Table 1
Récapitulatif des formules et des angles recherchés.

Angle recherché	Besoin	Formule	N°
h_r	R, I et X, Y	$\sin h_r = -\frac{X \sin I + R \cos I}{\sqrt{X^2 + Y^2 + R^2}}$	9
Az_r	R, I, D et X, Y	$\tan Az_r = \frac{X \sin D \cos I - Y \cos D - R \sin D \sin I}{X \cos D \cos I + Y \sin D - R \cos D \sin I}$	8
i	h, h_r et Az, Az_r	$\cos 2i = \cos(h - h_r) \cos^2 (Az - Az_r)/2 \dots$ $\dots - \cos(h + h_r) \sin^2 (Az - Az_r)/2$	11
I_m	h, h_r et i	$\cos I_m = \frac{\sin \frac{h+h_r}{2} \cos \frac{h-h_r}{2}}{\cos i}$	10 bis

Suite page suivante

normal au miroir. De là, il vient que si $Az > Az_r$ alors $D_m = Az - Z_s$ ou encore $D_m = Az_r + Z_r$, et dans le cas contraire, on a bien évidemment $D_m = Az + Z_s$ ou encore $D_m = Az_r - Z_r$.

12. L'angle incident $i = NS = NR$ est compris entre 0° et 90° , si bien que l'angle au sommet (opposé au côté i) dans chacun des triangles sphériques NZS et NZR ne devrait pas être plus grand que 90° .

Suite de la table 1

Angle recherché	Besoin	Formule	N°
Z_s	$u = \frac{1}{2} (\bar{h} + I_m + i)$	$\tan \frac{Z_s}{2} = \sqrt{\frac{\sin(u - I_m) \sin(u - \bar{h})}{\sin u \sin(u - i)}}$	12
Z_r	$v = \frac{1}{2} (\bar{h}_r + I_m + i)$	$\tan \frac{Z_r}{2} = \sqrt{\frac{\sin(v - I_m) \sin(v - \bar{h}_r)}{\sin v \sin(v - i)}}$	12
D_m	Az, Az_r, h, h_r, I_m et i	$\begin{cases} D_m = \frac{1}{2} (Z_r - Z_s + Az + Az_r) & \text{lorsque } Az > Az_r \\ D_m = \frac{1}{2} (Z_s - Z_r + Az + Az_r) & \text{lorsque } Az < Az_r \end{cases}$	13-14

La position de la tache lumineuse dans le plan du cadran est associée à un soleil apparent à l’instant de la mesure. On fera abstraction de toute réduction de coordonnées et de ses conséquences lorsque l’on ira prendre dans des éphémérides respectivement la hauteur et l’azimut du soleil, sa déclinaison et son angle horaire. Il ne fait pas de doute que l’erreur commise élargi le domaine d’incertitude que l’on peut espérer atteindre avec cette méthode.

2.4 Exemples numériques

Exemple 1. Prenons l’exemple 5 en page 159 du chapitre VI de *Recherches sur les cadrans solaires* de Denis Savoie (édition Brepols, 2014). Il s’agit d’un plafond incliné de telle sorte que l’on ait $D = -170^\circ$ et $I = 155^\circ$, situé à une latitude de 44° . Quelles sont les caractéristiques du miroir, placé à 3,1 m du plafond, donnant à 11 h de temps vrai lors du solstice d’été une tache lumineuse de coordonnées $X = -2.13$ m, $Y = 0.957$ m ?

Après avoir utilisé les formules (9), (8), (10 bis) et (13), on regroupe les résultats dans la table 2 page ci-contre.

Les très légères différences que l’on peut observer dans les coordonnées du soleil réfléchi viennent du fait que l’on pris $\delta = 23^\circ 26'$ et non 23.4333 . On remarquera aussi que l’on a arrondi au centimètre la mesure de X et au millimètre celle de Y . Le miroir envisagé ici a pour caractéristiques : $D_m = -10^\circ$ et $I_m = 4^\circ$.

Exemple 2. Proposons le cas d’un cadran solaire installé sur un mur plein nord¹³ et pour lequel un miroir renvoi les rayons du soleil 6 mois dans l’année. Installé sous une latitude de $\varphi = 46^\circ$ et placé à 2,5 m du mur, on relève, en hiver, à 10 h (temps vrai) une tache lumineuse de coordonnées : $X = 1,792$ m, $Y = 1,029$ m. Quelles doivent être l’inclinaison et la déclinaison du miroir pour que la tache lumineuse soit dans cette position ?

Les différentes étapes des calculs sont disposées dans le tableau 3 page 28.

Le miroir est légèrement déclinant vers l’est : $D_m = -5^\circ$ et fortement incliné avec $I_m = 100^\circ$.

3 Inversion à partir de deux taches lumineuses

Il existe une autre méthode pour déterminer respectivement I_m et D_m : le calcul vectoriel. Le plan d’incidence contenant le soleil incident, la normale au miroir et le soleil réfléchi, est un plan constamment perpendiculaire au miroir. Ainsi, si on note comme d’habitude, S et R les positions des soleils incident et réfléchi sur la sphère céleste, alors un vecteur perpendiculaire au plan d’incidence sera contenu dans le plan du miroir. Notons M la position sur la sphère céleste de l’extrémité d’un représentant de ce vecteur. La normale au miroir sera donc perpendiculaire à son tour à ce vecteur perpendiculaire au plan d’incidence. Partant de là, une seule tache

13. L’exemple est suggéré en page 157, dans l’ouvrage de D. Savoie, *op. cit.*

Table 2
Inversion à partir d'une tache lumineuse.
Exemple 1.

(a) Position de la tache lumineuse

Caractéristiques du cadran		
$\varphi = 44^\circ$	$D = -170^\circ$	$I = 155^\circ$
Jour	Angle horaire	Coordonnées (en mètres)
Solstice d'été	$-15^\circ 0'$	$T \begin{cases} X = -2.13 \\ Y = 0.957 \end{cases}$

(b) Coordonnées du soleil réfléchi

Soleil incident	Soleil réfléchi	Angle d'incidence
$S \begin{cases} Az = -35^\circ 46' 26'' \\ h = 66^\circ 1' 56'' \end{cases}$	$R \begin{cases} Az_r = -133^\circ 08' 19'' \\ h_r = 72^\circ 9' 02'' \end{cases}$	$i = 20^\circ 43' 96''$

(c) Résultats

$D_m \approx -10^\circ 03' 98''$
$I_m \approx 4^\circ 00' 42''$

lumineuse ne suffit pas à trouver un représentant de la normale au miroir. Prenons alors la position dans le plan du cadran d'une deuxième tache lumineuse. Une certaine durée s'étant écoulé depuis la première mesure, le plan d'incidence a tourné autour de la normale au miroir correspondant au mouvement du soleil incident amenant à la formation d'une deuxième tache lumineuse, associant ainsi un soleil réfléchi numéro 2. Le vecteur perpendiculaire au premier plan incident a par conséquent balayé la surface du miroir pour se retrouver dans une position correspondant au vecteur perpendiculaire au deuxième plan d'incidence. Et c'est pourquoi à partir des deux vecteurs contenus dans le plan du miroir on est en mesure de déterminer un représentant de la normale par le calcul du produit vectoriel entre ces deux vecteurs. Chacun des vecteurs ici nommés sont tous centrés à l'origine O , centre du miroir. Cela donne accès aux coordonnées sphériques de l'extrémité N' du vecteur colinéaire au vecteur normal au miroir dont le point N était un représentant sur la sphère céleste. Et par là même on obtient directement les angles D_m et I_m sans ambiguïté.

Exprimons au moyen de vecteurs ce qui vient d'être expliqué (*cf.* fig. 3 page 29). Soient $\overrightarrow{OS_1}$ et $\overrightarrow{OR_1}$ les vecteurs associés à la position sur la sphère céleste du soleil incident et du soleil réfléchi responsables d'une première tache lumineuse dans le plan du cadran. Ainsi, si on note $\overrightarrow{OM_1}$ un vecteur normal à ce premier plan d'incidence, on a : $\overrightarrow{OM_1} = \overrightarrow{OS_1} \wedge \overrightarrow{OR_1}$. De la même façon en ce qui concerne le deuxième plan incident, on aura : $\overrightarrow{OM_2} = \overrightarrow{OS_2} \wedge \overrightarrow{OR_2}$. Relation dans laquelle $\overrightarrow{OS_2}$ et $\overrightarrow{OR_2}$ sont les vecteurs associés à la position sur la sphère céleste des soleils incident et réfléchi donnant une deuxième tache lumineuse.

Table 3
Inversion à partir d'une tache lumineuse.
Exemple 2.

(a) Position de la tache lumineuse		
Caractéristiques du cadran		
$\varphi = 46^\circ$	$D = 180^\circ$	$I = 90^\circ$
Jour	Angle horaire	Coordonnées (en mètres)
Solstice d'hiver	$-30^\circ 0'$	$T \begin{cases} X = 1,792 \\ Y = 1,029 \end{cases}$

(b) Coordonnées du soleil réfléchi		
Soleil incident	Soleil réfléchi	Angle d'incidence
$S \begin{cases} Az = -28^\circ 25' 3''.4 \\ h = 15^\circ 25' 15'' \end{cases}$	$R \begin{cases} Az_r = 22:372\ 07 \\ h_r = -33:538\ 32 \end{cases}$	$i = 34:417\ 91$

(c) Résultats
$D_m \approx -4:996\ 42$
$I_m \approx 100:003\ 20$

Un représentant de la normale au miroir sera donné par

$$\overrightarrow{ON'} = \overrightarrow{OM_1} \wedge \overrightarrow{OM_2} = (\overrightarrow{OS_1} \wedge \overrightarrow{OR_1}) \wedge (\overrightarrow{OS_2} \wedge \overrightarrow{OR_2})$$

et aura pour composantes :

$$\overrightarrow{ON'} \begin{cases} x_{N'} = ON' \cos D_m \sin I_m \\ y_{N'} = ON' \sin D_m \sin I_m \\ z_{N'} = ON' \cos I_m \end{cases} \quad (15)$$

On obtient alors sur-le-champ :

$$\tan D_m = \frac{y_{N'}}{x_{N'}} \quad (16)$$

Lorsque le dénominateur de $\tan D_m$ est positif, D_m est du signe du numérateur. Lorsque le dénominateur est négatif, prendre $D_m + 180^\circ$ si le numérateur est positif, sinon prendre $D_m - 180^\circ$. On n'oublie pas que D_m est un angle indirect dans le repère $Oxyz$, il faudra lui changer le signe.

Pour obtenir la distance zénithale du miroir, faire :

$$\cos I_m = \frac{z_{N'}}{\sqrt{x_{N'}^2 + y_{N'}^2 + z_{N'}^2}} \quad (17)$$

Lorsque $z_{N'} < 0$, prendre $180^\circ - I_m$.

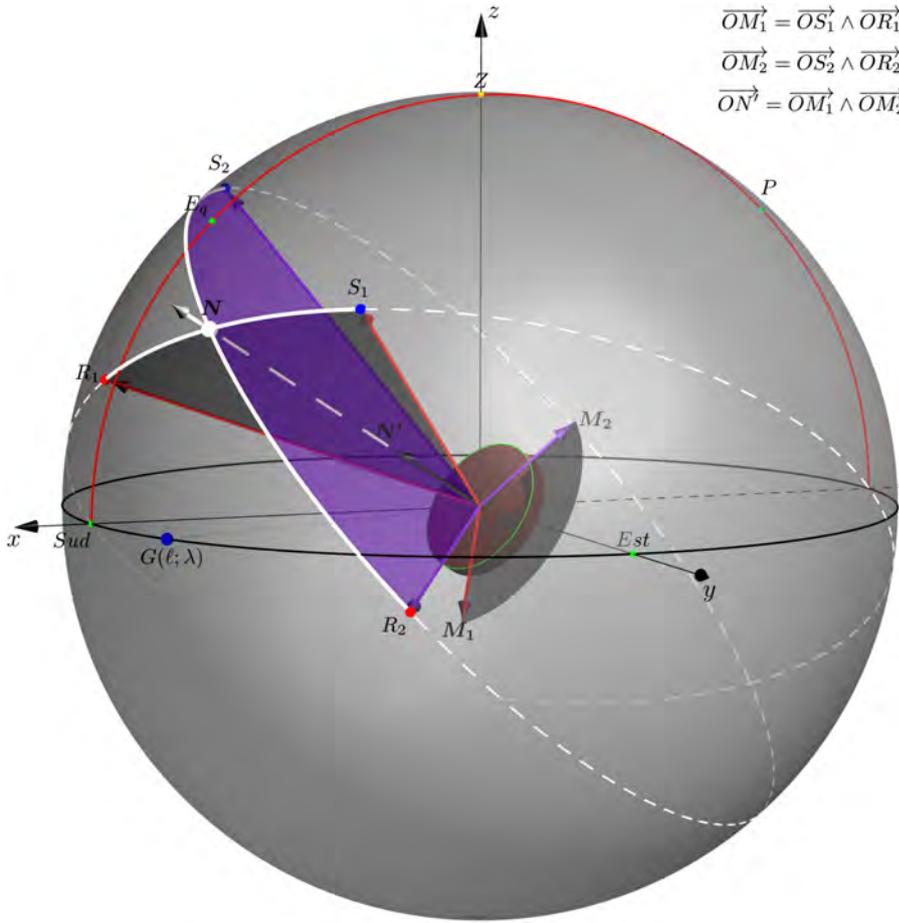


Figure 3 – Vue tridimensionnelle des vecteurs incidents et réfléchi puis des différents produits vectoriels conduisant à la solution du problème inverse. Les produits vectoriels ont été normalisés afin de restreindre la figure à la sphère céleste.

On aura à appliquer *ad hoc* les formules de calcul de l’azimut et de la hauteur pour chaque soleil réfléchi afin de déterminer les composantes des vecteurs $\overrightarrow{OR_1}$ et $\overrightarrow{OR_2}$ (cf. § 2.3). D’une façon systématique on a bien évidemment pour la première tache lumineuse :

$$\overrightarrow{OS_1} \begin{cases} x_{s1} = \cos Az_1 \cos h_1 \\ y_{s1} = -\sin Az_1 \cos h_1 \\ z_{s1} = \sin h_1 \end{cases} \quad \overrightarrow{OR_1} \begin{cases} x_{r1} = \cos Az_{r1} \cos h_{r1} \\ y_{r1} = -\sin Az_{r1} \cos h_{r1} \\ z_{r1} = \sin h_{r1} \end{cases}$$

et pour la deuxième tache lumineuse :

$$\overrightarrow{OS_2} \begin{cases} x_{s2} = \cos Az_2 \cos h_2 \\ y_{s2} = -\sin Az_2 \cos h_2 \\ z_{s2} = \sin h_2 \end{cases} \quad \overrightarrow{OR_2} \begin{cases} x_{r2} = \cos Az_{r2} \cos h_{r2} \\ y_{r2} = -\sin Az_{r2} \cos h_{r2} \\ z_{r2} = \sin h_{r2} \end{cases}$$

On ne développera pas davantage les composantes des autres vecteurs¹⁴ : la règle de Sarrus pour le calcul des composantes du produit vectoriel étant parfaitement claire, il n’est pas utile ici d’aller plus en avant dans le détail de ce calcul élémentaire mais long.

14. Pour simplifier un peu le calcul des coordonnées du vecteur \overrightarrow{ON} on peut considérer :

$$\overrightarrow{ON} = \left(\overrightarrow{OS_1} \cdot \left(\overrightarrow{OS_2} \wedge \overrightarrow{OR_2} \right) \right) \overrightarrow{OR_1} - \left(\overrightarrow{OR_1} \cdot \left(\overrightarrow{OS_2} \wedge \overrightarrow{OR_2} \right) \right) \overrightarrow{OS_1}$$

Exemples numériques

Cadran solaire à réflexion — Brignola (It.)

Le mur au niveau du balcon du 1^{er} étage d'une propriété centenaire à Brignola ($\varphi = 44^\circ 17' 45''36$), a pour déclinaison moyenne $-43^\circ 30'$ et une inclinaison moyenne approchée de 88° . Et enfin, un miroir incliné déclinant a été calé sur la rambarde du balcon située à environ 1.185 m du mur de telle sorte qu'il donne une image du soleil toute l'année sur une plage horaire de 9 h à 13 h de temps vrai.

On a relevé le même jour et à deux instants différents, la position de la tache solaire sur le mur depuis l'origine G préalablement installée sur le mur (*cf.* table 3(a) page 28. Les valeurs calculées (*cf.* table 3(b) page 28) sont délivrées arrondies à 5 décimales (totalement superflues mais ne servent que pour vérification des calculs — les coordonnées des taches lumineuses T_1 et T_2 dans le plan du cadran sont fournies au millimètre près, parfois au centimètre près¹⁵). Par contre les coordonnées des vecteurs ne seront pas arrondies mais délivrées telles quelles pour éviter quelques instabilités numériques. Les résultats¹⁶ sont données en table 4.

Table 4

Inversion à partir de 2 taches lumineuses.

Exemple 3 (Brignola) — Mesures et calculs préliminaires.

(a) Position de deux taches lumineuses relevées le même jour

Jour	Angle horaire	Coordonnées (en mètres)
Solstice d'été	-30°	$T_1 \begin{cases} X_1 = 0,278 \\ Y_1 = -1,047 \end{cases}$
Solstice d'été	0°	$T_2 \begin{cases} X_2 = -0,528 \\ Y_2 = -1,253 \end{cases}$

(b) Coordonnées des soleils réfléchis

Jour/Heure	Soleil incident	Soleil réfléchi	Angle d'incidence
$\begin{cases} H_1 = -30^\circ \\ \delta = 23^\circ 26' \end{cases}$	$S_1 \begin{cases} Az_1 = -59^\circ 30' \\ h_1 = 57^\circ 49'8 \end{cases}$	$R_1 \begin{cases} Az_{r1} = 94^\circ 786\ 65 \\ h_{r1} = -11^\circ 467\ 08 \end{cases}$	$i_1 = 64^\circ 836\ 93$
$\begin{cases} H_2 = 0^\circ \\ \delta = 23^\circ 26' \end{cases}$	$S_2 \begin{cases} Az_2 = 0^\circ 0' \\ h_2 = 69^\circ 8'4 \end{cases}$	$R_2 \begin{cases} Az_2 = 90^\circ 326\ 70 \\ h_{r2} = 15^\circ 642\ 73 \end{cases}$	$i_2 = 37^\circ 760\ 98$

15. Les chiffres significatifs à prendre en compte dans les mesures jouent ici un rôle très important. On réfléchira notamment au fait de *mesurer* une abscisse ou une ordonnée d'une tache lumineuse, généralement élargie, située à plus d'un mètre, voire 2 mètres de l'origine O et assurer une précision au millimètre. C'est bien souvent illusoire...

16. On observera que lorsque l'angle d'incidence est élevée (soleil très haut au-dessus du plan du miroir) le calcul de D_m et I_m devient très sensible aux valeurs des abscisses et ordonnées des taches lumineuses; en d'autres termes une précision beaucoup plus accrue est exigée ce qui n'est pas souvent réalisable *in situ*. C'est la limite de la méthode vectorielle. Les situations de mesures/calculs devront être multipliées pour avoir une meilleure idée des paramètres gnomoniques du miroir.

Table 5
Inversion à partir de 2 taches lumineuses.
Exemple 3 — Calcul vectoriel détaillé.

(a) Coordonnées des vecteurs		(b) Résultats	
$\overrightarrow{OS_1}$	$\begin{pmatrix} 0,270230242911445 \\ -0,458759917117291 \\ 0,846472063486183 \end{pmatrix}$	$\begin{cases} D_m \approx 70^\circ 3'7 \\ I_m \approx 40^\circ 28' \end{cases}$	
$\overrightarrow{OS_2}$	$\begin{pmatrix} 0,35608571467917 \\ 0 \\ 0,934453296747047 \end{pmatrix}$		
$\overrightarrow{OR_1}$	$\begin{pmatrix} -0,0817800699607022 \\ 0,976621046328246 \\ -0,198804808860213 \end{pmatrix}$	$\overrightarrow{OR_2}$	$\begin{pmatrix} -0,00549072832715805 \\ 0,962946106479293 \\ 0,269637994204836 \end{pmatrix}$
$\overrightarrow{OM_1}$	$\begin{pmatrix} -0,735478754694275 \\ -0,0155014727814212 \\ 0,226395124464694 \end{pmatrix}$	$\overrightarrow{OM_2}$	$\begin{pmatrix} -0,899828163789308 \\ -0,101145067057942 \\ 0,342891352523203 \end{pmatrix}$
$\overrightarrow{ON'}$	$\begin{cases} x_{N'} = 0,0175834290774495 \\ y_{N'} = 0,0484725958112839 \\ z_{N'} = 0,060441386174308 \end{cases}$	$\ \overrightarrow{ON'}\ = 0,0794476600377734$	

Les valeurs théoriques¹⁷ étant : $D_m = 70^\circ$ et $I_m = 40^\circ 24'$. Ne prendre par exemple que 5 décimales dans les coordonnées vectorielles entraînerait bien vite une dérive non acceptable sur D_m et I_m .

Autre exemple

Considérons en un lieu de latitude $43^\circ 43'$ un mur orienté au Nord-Ouest tel que $D = 150^\circ$. On a installé un miroir à une distance de 2,5 m du mur vertical. On a relevé aux deux solstices, à midi précisément, les coordonnées des images du soleil sur le mur, cf. table 6(a) page suivante. Quelles sont les inclinaison et déclinaison du miroir ainsi installé ?

Les premiers calculs nécessaires à la détermination de D_m et I_m sont présentés en table 6(b). Et enfin les coordonnées d'un vecteur normal au miroir suivit de l'extraction des angles recherchés se trouvent dans les tables 6(c) & 6(d). Les mesures des coordonnées des taches lumineuses aux solstices ont été proposées au millimètre près (et au centimètre près pour X_1).

17. Pour la petite histoire, la distance zénithale de ce miroir a été choisie de telle sorte que la ligne de midi soit horizontale. Parvenir à obtenir une telle inclinaison pour le miroir est un véritable défi ! Cette technique d'inversion apporte une aide non négligeable dans cette réalisation.

Table 6
Inversion à partir de 2 taches lumineuses.
Exemple 4.

(a) Position des taches lumineuses relevées en des jours différents

Jour	Angle horaire	Coordonnées (en mètres)
Solstice d'été	$0^\circ 0'$	$T_1 \begin{cases} X_1 = 1,27 \\ Y_1 = -0,076 \end{cases}$
Solstice d'hiver	$0^\circ 0'$	$T_2 \begin{cases} X_2 = -0,845 \\ Y_2 = -0,682 \end{cases}$

(b) Coordonnées des soleils réfléchis

Jour/Heure	Soleil incident	Soleil réfléchi	Angle d'incidence
$\begin{cases} H_1 = 0^\circ 0' \\ \delta = 23^\circ 26' \end{cases}$	$S_1 \begin{cases} Az_1 = 0^\circ 0' \\ h_1 = 69^\circ 43'2 \end{cases}$	$R_1 \begin{cases} Az_{r1} = -31^\circ 741\ 26 \\ h_{r1} = -26^\circ 919\ 89 \end{cases}$	$i_1 = 49^\circ 657\ 22$
$\begin{cases} H_2 = 0^\circ 0' \\ \delta = -23^\circ 26' \end{cases}$	$S_2 \begin{cases} Az_2 = 0^\circ 0' \\ h_2 = 22^\circ 51' \end{cases}$	$R_2 \begin{cases} Az_2 = -45^\circ 259\ 00 \\ h_{r2} = 18^\circ 060\ 33 \end{cases}$	$i_2 = 21^\circ 257\ 90$

(c) Coordonnées d'un représentant du vecteur normal

$$\overrightarrow{ON'} \begin{cases} x_{N'} = -0,544482719846385 \\ y_{N'} = 0,231178934529052 \\ z_{N'} = -0,239029491156302 \end{cases}$$

(d) Résultats

$$\begin{cases} D_m \approx -23^\circ \\ I_m \approx 68^\circ \end{cases}$$

$$\|\overrightarrow{ON'}\| = 0,637997045152833$$



Le balatā d'une kasbah saharienne

par Esteban Martínez Almirón¹

Nous étudions ici un des rares cadrans islamiques marocains. Il date du début du XX^e siècle et est conservé dans une Kasbah de la région de Ouarzazate. Il s'agit d'un cadran horizontal gravé sur pierre, qui indique les heures (égales), le début et la fin de asr, et la Qibla. Sur le plan gnomonique, sa réalisation apparaît comme étant de qualité médiocre sur de nombreux points.

1 Introduction

La kasbah Amridil² se trouve au centre du Maroc, à environ 240 km au sud-est de Marrakech, sur la N 10, à l'Est de Ouarzazate, au milieu de la palmeraie, un peu avant d'atteindre Skoura (fig. 1 page suivante). C'est à l'origine une *zaouia*³, ou *madrassa*, construite à la fin du 18^e siècle pour l'enseignement du Coran et des principes de l'Islam. Cet établissement est situé au bord de l'Oued Elhejjaj que suivaient les caravanes transsahariennes.

La kasbah d'Amridil est connue pour sa merveilleuse architecture en adobes (briques de terre crue séchées au Soleil), avec diverses structures formant un mur d'enceinte flanqué d'une douzaine de tours de guet magnifiquement décorées (fig. 2 page suivante); elle est aussi connue au Maroc car sa façade orientale apparaît au dos des anciens billets de 50 dirhams; enfin elle est connue pour avoir été le lieu de tournage de nombreux films⁴ qui ont exploité l'atmosphère très particulière de cet endroit.

1. Traduction du texte original en espagnol : Éric Mercier. Cette étude a déjà fait l'objet d'une publication en langue italienne dans la revue *Orologi Solari*, n° 16, avril 2018.

2. Kasbah (ou Casba, Casbah..), de l'arabe القصبَة, qasabah, qui signifie citadelle ou forteresse; Amridil vient du terme amrdoul, qui en berbère signifie désert. On pourrait donc dire que la kasbah d'Amridil pourrait se traduire par la citadelle du désert.

3. École religieuse ou monastère islamique. Le terme est utilisé dans les régions du Maghreb et de l'Afrique de l'Ouest et correspond approximativement au nom oriental madrasa.

4. Entre autres « Hannah, jeune, douce, innocente, fatale » (2011), du réalisateur londonien Joe Wright.



Figure 1 – Emplacement de la Casbah d’Amridil.



Figure 2 – Façade principale de la casbah Amridil — photo : José Antonio Mateo.

Mais ce qui nous intéresse ici, c’est l’existence d’un cadran solaire horizontal (ou balatā⁵ en arabe, fig. 3 page suivante). Ce cadran est situé sur l’une des terrasses de l’étage supérieur donnant sur la cour de la mosquée. Par l’intermédiaire de l’ami d’un ami⁶, des photographies de ce cadran, me sont parvenues.

Ce cadran est inventorié, avec beaucoup d’autres situés au Maroc, par le Dr. Fathi Jarray, de l’Université de Tunis⁷. Il a également été commenté dans un court article reproduisant

5. L’utilisation du terme balatā, en arabe *اطلابية*, qui signifie cadran solaire plat, apparaît parmi d’autres textes anciens dans le Traité sur la science des ombres « *Risala fi’ilm al-zilal* », de Muhammad ibn al-Raqqam al-Andalusí. Voir Carandel, J., *Estudios sobre el tratado de Gnomónica de Ibn al-Raqqam. Risala fi’ilm al-zilal*. Instituto « Millás Vallicrosa » de Historia de la Ciencia Arabe. Université de Barcelone. 1988. (222 p.).

6. Mettons des noms : José Antonio Mateo est celui qui a visité la kasbah fin 2016 et a transmis les photos au professeur Carlos E. Esteve, de l’Université de Grenade, et c’est lui qui a voulu les partager avec nous. Nous vous en sommes donc très reconnaissants à tous les deux.

7. Jarray, F., « Gnomonique musulmane au Maroc : Un premier bilan sur le corpus des mizwala-s ». Études en patrimoine écrit. Centre National de la Calligraphie. Institut National du Patrimoine. Ministère des Affaires Culturelles. République Tunisienne. Tunisie, 2017, p. 20.



Figure 3 – Le balatā d’Amridil — Photo : José Antonio Mateo.

une série de lettres entre les gnomonistes et chercheurs Alain Ferreira et le Dr. Denis Savoie sur la détermination de la prière *asr* publiée dans Cadran Info en 2013⁸.

Dans les lignes qui suivent nous décrirons ses caractéristiques, matériaux et dimensions et nous essaierons de déchiffrer les indications (lignes et inscriptions) qu’il présente. Nous nous baserons sur les photos disponibles qui, bien qu’elles ne soient pas orthogonales, permettent une analyse. Nous espérons qu’un jour nous pourrions obtenir d’autres photos avec plus de détails et sur lesquelles des caractéristiques nouvelles du cadran apparaîtront.

2 Description du site du balatā d’Amridil

2.1 Situation géographique

Comme nous l’avons déjà signalé, le cadran solaire est situé sur la balustrade nord de la cour de la mosquée. Cette balustrade, à laquelle a été ajouté un petit socle pour soutenir l’instrument (fig. 4 page suivante), est en adobe tout comme tout l’édifice.

Les données de localisation géographique du cadran sont :

- 31° 2' 47''41 Nord
- 6° 34' 53''05 Ouest.

2.2 Matériau et dimensions approximatives

Le cadran semble être fait d’une pierre calcaire dont la surface s’est considérablement détériorée au fil du temps. Comme nous n’avons pas été en mesure d’obtenir ses dimensions exactes, aux fins des calculs que nous expliquerons plus loin, nous adopterons les dimensions conventionnelles suivantes : 50 cm. de largeur par 41 cm. de haut.

Le balatā, qui à l’origine devait être de forme rectangulaire, est maintenant de forme hexagonale irrégulière, probablement en raison de la détérioration au fil du temps. La surface de lecture présente également quelques défauts, avec deux fissures importantes, l’une dans la moitié Sud et l’autre d’importance mineure dans la moitié Est. Le cadran dispose d’un gnomon métallique situé perpendiculairement à la surface de lecture plane qui, d’après l’ombre projetée, présente la forme présentée à la figure 5 page suivante.

8. Savoie, D. & Ferreira, A., *Détermination de la prière de l’asr*. Cadran Info n° 27, Paris, Mai 2013, p. 184.



Figure 4 – Emplacement du balatā sur la balustrade de la terrasse supérieure de la cour de la mosquée.

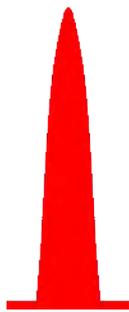


Figure 5 – Le Gnomon métallique.



Figure 6 – Le carré, les équinoxes et le cadre extérieur.

Nous verrons qu'il existe un petit cercle dessiné au Sud de l'orthognomon, une première hypothèse serait de supposer qu'il s'agit du point de départ du gnomon polaire inexistant (*cf.* bas de la fig. 8 page ci-contre), nous verrons plus loin ce que vaut cette hypothèse.

2.3 Organisation du cadran

Sur la table, on observe différentes lignes droites ou courbes, ainsi que des légendes et quelques trous que nous détaillons ci-dessous.

Tout d'abord, on peut voir des lignes de solstices et d'équinoxes. Elles sont encadrées par un carré ouvert au Sud. À l'extérieur au Nord de ce carré, on note aussi une ligne droite perpendiculaire à la méridienne qui joint deux points en position très externe et creusés dans le calcaire (fig. 6 page précédente).

D'autres points alignés des deux côtés du cadran semblent également indiquer les « limites » de la surface utile du cadran. On reconnaît également des lignes horaires pour les heures entières allant de 8 h à 14 h, plus des intermédiaires à partir de 9 h 30 (fig. 7). Ainsi, vers dix heures du matin, il y a une ligne toutes les quinze minutes, jusqu'à 1 h $\frac{1}{4}$ de l'après-midi.

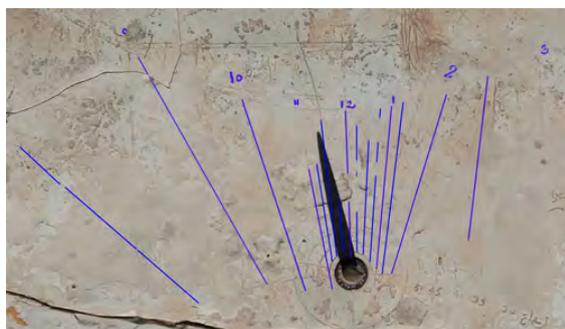


Figure 7 – Lignes horaires et chiffres.



Figure 8 – Cercles de la hauteur du Soleil observés sur la table. Sur cette image, l'ombre du gnomon indique que le Soleil est situé à 33° au-dessus de l'horizon.

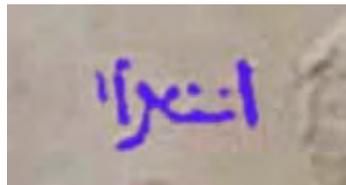
Les chiffres horaires ont été dessinés en caractères arabes, de 10 heures à 15 heures, ce dernier ne correspond à aucune ligne horaire, est symétrique du chiffre 9. Autour du gnomon, des cercles indiquent différentes hauteurs du Soleil (fig. 8), avec les indications chiffrées suivantes 30, 35, 40, 45 et 50 degrés.

Vu l'origine de la kasbah, qui était une zouia ou madrasa, on doit s'attendre à ce que le cadran serve à fixer l'appel à certaines prières, et notamment le début et la fin de la période favorable à la prière « asr », prière de l'après-midi qui fait partie des obligations de l'Islam, et on doit aussi s'attendre à ce que le cadran indique la direction de la Mecque : la *qibla*.

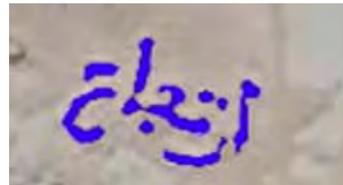
Les courbes correspondant au début et à la fin de « asr » sont (mal) visibles sur la fig. 3 page 35, nous y reviendrons plus loin.

Sur la partie centrale méridionale, un dessin a été gravé représentant la qibla, il s'agit d'une boîte en forme d'arc pointu à l'intérieur de laquelle on peut voir le mot *mihrab* قَرهَب — suivi d'une graphie plutôt détériorée, dont on ne voit clairement que deux points terminaux⁹, et qui peuvent être ceux correspondant à la fin du mot « qibla » (le féminin final n'est pas prononcé par l'orateur pour des raisons euphoniques), à moins que ce soit le mot *Mekka* (La Mecque) qui se termine de la même façon.

En dépit du fait que la surface est très endommagée par les intempéries, avec des écailles et des éraflures, on peut remarquer la présence de lignes épigraphiques situées à côté des lignes équinoxiales et au début des cercles de hauteur (partie orientale) (fig. 9).



(a) À l'extrémité Est de l'équateur



(b) Début des cercles d'altitude

Figure 9 – Épigraphie observée sur la cadran (voir texte).

Le premier *i'tidal*, اعتدال, se traduit par « l'équinoxe », qui correspond bien avec la ligne qu'il indique. Le mot à côté des cercles de hauteur correspond à *irtifa*, ارتفاع, avec, comme d'habitude dans les pays du Maghreb, le point diacritique sous la lettre fa. Il se traduit par « hauteur » ou « altitude ». Le Dr. Ali Guerbabi nous a également signalé la présence dans la partie centrale du quadrant du graphème au ba[...] — [...] اب — qui pourrait peut-être signifier le baqi, dans le sens de « le temps restant » jusqu'à la prière *dhohr/zhur*.

Voyons maintenant ce qui manque... ou du moins ce que nous n'avons pas été en mesure de localiser sur les photos : il s'agit particulièrement de la date de construction et de l'auteur qui constituent deux données très importantes qui nous aideraient à localiser ce balatā d'Amridil dans son contexte historique et scientifique. Dans un premier temps, et avant de connaître les informations contenues dans l'article de Cadran-Info de Mai 2013¹⁰ nous avons pensé qu'il s'agissait d'un cadran datant du XVIII^e siècle sur la base des éléments suivants :

- la datation de la kasbah qui existait déjà à la fin du XVIII^e.
- l'utilisation des heures en heures égales — modernes — et non inégales, propres aux cadrans de la première période islamique.

9. Ces informations et celles relatives à la traduction des graphiques de l'équinoxe, des hauteurs du soleil, du temps restant jusqu'à la prière et des graffitis ajoutés que nous verrons plus loin, ont été fournies par le Dr. Ali Guerbabi, de Batna (Algérie), par l'ingénieur Gianni Ferrari, de Modène (Italie) à qui nous adressons ici, nos plus sincères remerciements.

10. Savoie, D. & Ferreira, A., *Détermination de la prière de l'asr*, Cadran Info n° 27, Paris, Mai 2013, p. 184.

- le type d'écriture utilisé : l'arabe occidental avec la graphie européenne des chiffres arabes.

Mais récemment, suite à l'article mentionné, nous avons appris que le cadran a été tracé par le grand-père de l'actuel propriétaire de la kasbah, probablement au début du XX^e siècle, c'est-à-dire sans doute entre 1900 et 1920.

Terminons cette section consacrée à la description des éléments observés sur le balatā, en faisant référence à des lignes qui peuvent être vues dans son dessin et qui, selon nous, sont dues à de simples erreurs dans la manipulation du burin et/ou à du vandalisme. Ainsi le mot « Merzak », nom propre qui apparaît en gros caractères qui, hélas et comme l'a bien précisé, et à notre grand regret, le Dr. Ali Guerbabi, ne correspond pas au *muwaqqit*¹¹ mais à un « artiste » qui tenait à informer les générations futures de son passage en ce lieu.

3 Vérification du cadran

Comme nous ne disposons pas pour analyser la disposition correcte du cadran, d'un tracé à l'échelle du cadran, mais d'images non totalement orthogonales, notre première étape sera de reconstituer une représentation avec une vue orthogonale. Les principaux éléments utilisés sont les points marqués en creux sur le bord extérieur et la position de l'orthognomon. Ces points sont alignés et/ou constituent les sommets d'un carré dont le centre est précisément l'orthognomon, ils constituent une aide fondamentale à la reconstitution de la représentation plane (fig. 10).

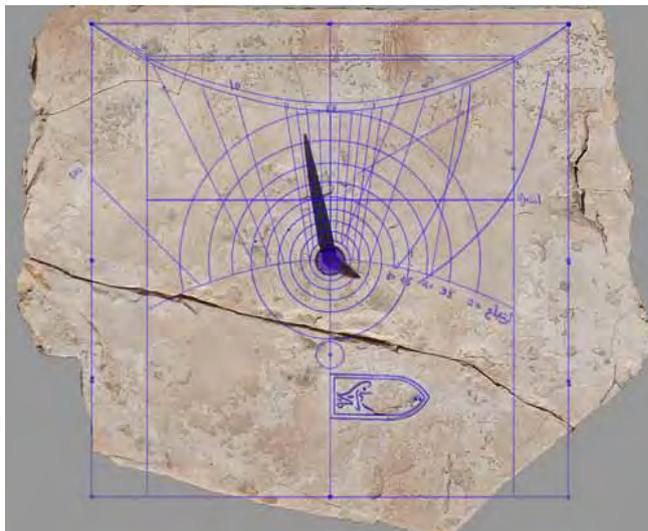


Figure 10 – Reproduction idéalisée du balatā d'Amridil en tenant compte des traits situés dans les images disponibles.

À partir de cette représentation graphique, nous vérifierons les éléments suivants :

- la hauteur de l'orthognomon ;
- la position des solstices et des équinoxes ;
- la position des lignes horaires ;
- la position des cercles de hauteurs ;
- la position des lignes de prière ;

11. *Muwaqqits*, également astronomes, étaient connus sous le nom de calculateurs horaires dans les mosquées. Par exemple, en al-Andalus, deux muwaqqits renommés étaient Hasan ibn Muhammad ibn Baso (d. 1316/1317), qui était l'astronome en chef de la mosquée Alhama à Grenade, et son fils Ahmad ibn Hasan (d. 1309).

- l'orientation de la qibla ;
- la signification du petit cercle.

3.1 Hauteur de l'orthognomon

Dans ce cas, il n'y a aucun doute sur la hauteur de l'orthognomon, puisque même en l'absence d'image de profil à l'échelle, on sait que le rayon de l'almincantarat 45° est égal à cette hauteur. Par conséquent, si l'on pose comme postulat que les dimensions extérieures du balatā sont de 50 cm de largeur par 41 cm de hauteur, alors, le rayon du cercle de 45° mesure 6,1 cm, qui est donc aussi la hauteur l'orthognomon. On déduit aussi son diamètre de 1,2 cm à la base, et celui de la plaque de soutien : 2,4 cm ¹²...

3.2 Les arcs de déclinaison

Une fois la hauteur de l'orthognomon obtenue et connaissant la latitude d'Amridil, nous pouvons obtenir la position (P) de l'ombre aux solstices et aux équinoxes sur la ligne du midi et, de là, la trace complète des arcs de déclinaison. Plus précisément, en appliquant le rapport trigonométrique de la tangente de la hauteur du soleil (a) dans chacun des moments envisagés, pour la hauteur du gnomon (h_g), on obtient la distance de l'orthognomon au point P correspondant sur le méridien (fig. 11 page suivante),

$$P = \tan a \times h_g$$

Table 1
Position de l'ombre sur la ligne du midi aux solstices et aux équinoxes

	Solstice d'été	Équinoxes	Solstice d'hiver
Hauteur du Soleil	7°56	31°	54°44
Position du point P	81	367	853

En tenant compte des données précédentes, nous dessinerons les arcs de déclinaison correspondants sur le cadran d'Amridil on obtient le résultat illustré à la figure 12 page ci-contre.

Notons les différences importantes entre le dessin réel et le dessin théorique, surtout aux alentours de midi. Si on généralise cette démarche, on obtient la figure 13 page suivante.

3.3 Les lignes horaires

Sur un cadran solaire, les lignes horaires doivent converger vers un point unique central, ce n'est pas le cas ici (fig. 14 page ci-contre) ; il y a deux points et aucun ne correspond avec le centre du petit cercle qui nous avait semblé pouvoir correspondre au point d'implantation d'un éventuel gnomon polaire.

De plus, le tracé lui-même pose problème et diverge de la position calculée (fig. 15 page 42).

12. Toutes ces mesures et dimensions, nous insistons, sont calculés sur une base estimée du fait de l'absence d'échelle sur les images disponibles.

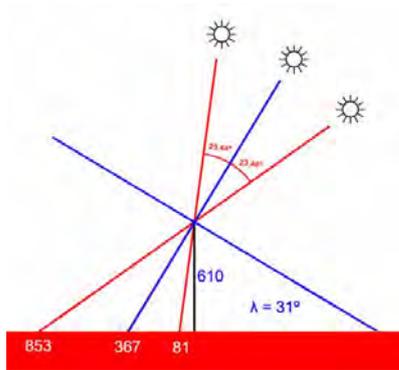


Figure 11 – Distance entre l’orthogonon et les points de solstices et d’équinoxes sur le méridien d’Amridil.

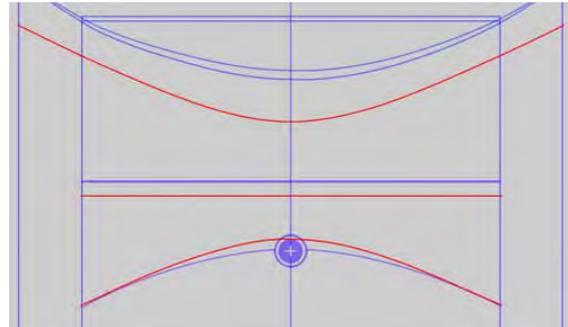


Figure 12 – Comparaison entre les arcs de déclinaison, en bleu, du cadran et ceux calculés, en rouge, pour la latitude d’Amridil.

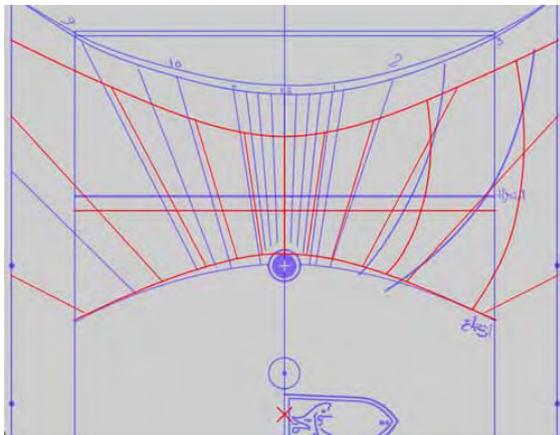


Figure 13 – Superposition sur la disposition des lignes horaires, saisonnières et de prière, en bleu, de celles correspondant à un quadrant situé à la latitude 31° 2’ Nord, en rouge.

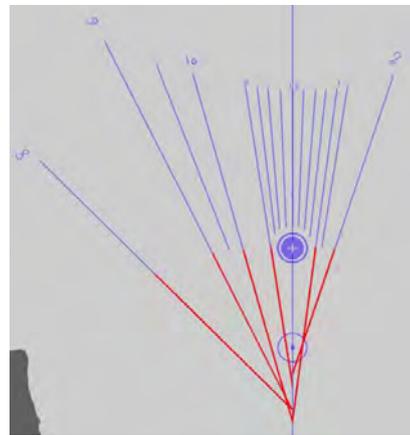


Figure 14 – La convergence des lignes horaires.

Par ailleurs, il est clair que le cercle évoqué plus haut ne constitue pas le point de convergence des lignes horaires calculées (fig. 16 page suivante).

3.4 Cercle de hauteur du soleil

Si l’on prend comme référence le cercle de 45° dont le rayon est égal à la hauteur du gnomon, soit 6,1 cm dans notre système conventionnel ; on peut calculer le rayon théorique (R) de tous les autres cercles (tableau suivant) en utilisant la formule suivante (avec a = hauteur angulaire et G_o , longueur du gnomon) :

$$R = \tan a \times G_o$$

Et ainsi comparer le tracé théorique et le tracé réel (fig. 17 page suivante).

On peut constater une dérive systématique dans un sens comme dans l’autre, au départ du cercle à 45° que nous avons considéré conventionnellement comme correct.

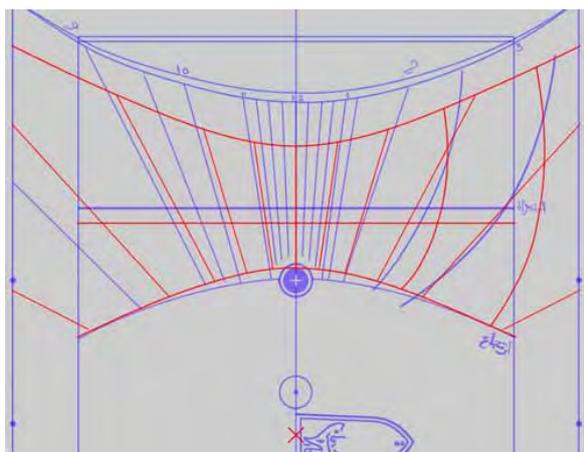


Figure 15 – Comparaison des lignes horaires du cadran, en bleu, et calculées pour la latitude d'Amridil, en rouge.

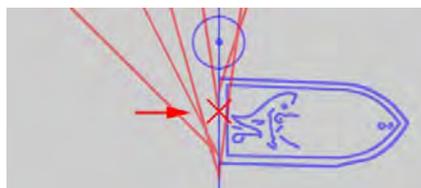


Figure 16 – Le point de convergence réel des lignes calculées diffère des points réels et du cercle énigmatique.

Table 2
Rayon théorique R des cercles de hauteur

Angle du Soleil	70°	65°	60°	55°	50°	45°	40°	35°	30°
Rayon du cercle de hauteur	2,22	2,84	3,52	4,27	5,12	6,10	7,27	8,71	10,57

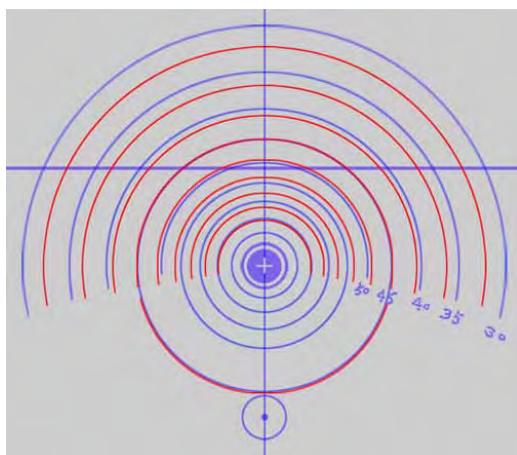


Figure 17 – Comparaison des cercles de hauteur du cadran Amridil (en bleu) avec les cercles calculés (en rouge).

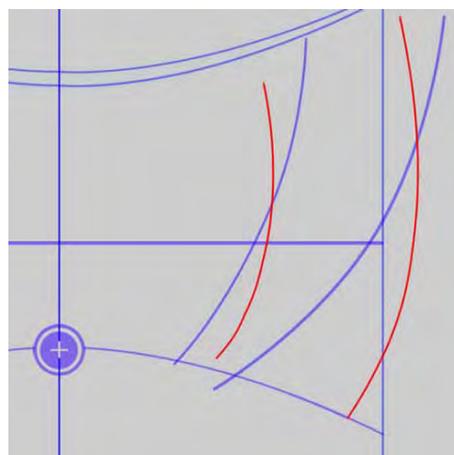


Figure 18 – Comparaison des arcs de prière « asr » (début et fin) du cadran avec ceux calculés pour la latitude 31° nord.

3.5 Lignes de prière

Dans la description du cadran, nous avons rapidement mentionné des lignes qui semblaient indiquer les moments de début et de fin de la prière « asr ». Ces moments correspondent respectivement, au moment où l'ombre de l'orthognomon est équivalente à celle de midi plus la longueur du gnomon, et au moment où l'ombre de l'orthognomon atteint celle de midi

plus deux fois la hauteur du gnomon. Les tracés correspondants montrent des différences importantes avec le tracé du cadran (fig. 18 page ci-contre).

3.6 Orientation de la qibla

Le dessin de qibla pointe dans la direction 91,67° qui est celle qui correspond à l'Amridil, le calcul et le dessin sont donc correct (fig. 19).

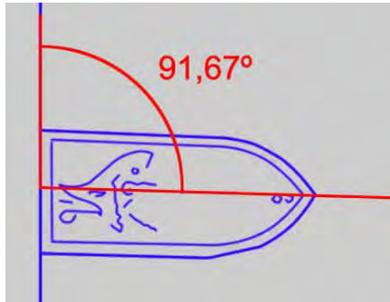


Figure 19 – Vérification de la qibla.

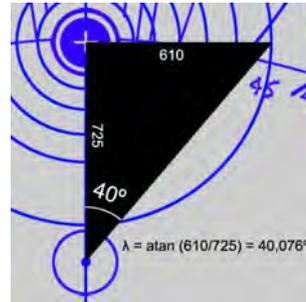


Figure 20 – Calcul pour obtenir la latitude.

3.7 Signification du petit cercle

Envisageons maintenant le cas du petit cercle centré, situé sur la ligne méridienne à proximité de l'indication de Qibla. Dans un premier temps, nous avons supposé qu'il pût s'agir de la base du style polaire, ce qui s'est révélé faux dans la mesure où les lignes horaires ne convergent pas vers ce point. Nous allons explorer ici l'hypothèse selon laquelle il s'agirait effectivement de ce point, mais que les lignes horaires auraient été mal tracées. En appliquant la formule suivante, on calcule la latitude théorique (fig. 20) :

$$A = \arctan \frac{G_o}{S_e}$$

où :

- G_o : distance du centre de l'orthognomon au cercle de hauteur à 45°. C'est la hauteur de l'orthognomon.
- S_e : distance entre le centre de l'orthognomon et la base du style polaire. C'est la longueur de la sous-style.
- A : latitude et inclinaison du style.

On obtient un résultat de 40°076, par approximation 40° ; ce qui est très loin de celle d'Amridil. Sur la base de ce calcul, on peut calculer le tracé du cadran correspondant et le comparer, par superposition, à celui étudié ici (fig. 21 page suivante).

On remarque que ce calage (avec 40° de latitude) est plus satisfaisant de celui de la figure 13 (31° de latitude) qui correspondait pourtant à la latitude d'Amridil. Cependant, ce calage est loin d'être parfait, notamment en ce qui concerne les lignes saisonnières, horaires et de prière. À ce stade de l'analyse, il semble donc plus raisonnable de laisser cette question ouverte sans conclure.

Nonobstant ce qui précède, nous renvoyons le lecteur au texte publié dans Cadran Info n° 27 dans lequel le Dr. Denis Savoie décrit une méthode simple et exacte par laquelle, sans calcul et seulement à l'aide d'un compas et des cercles de hauteur, il est possible d'obtenir la trace de la ligne de prière « asr » à partir d'un point situé sur le méridien.

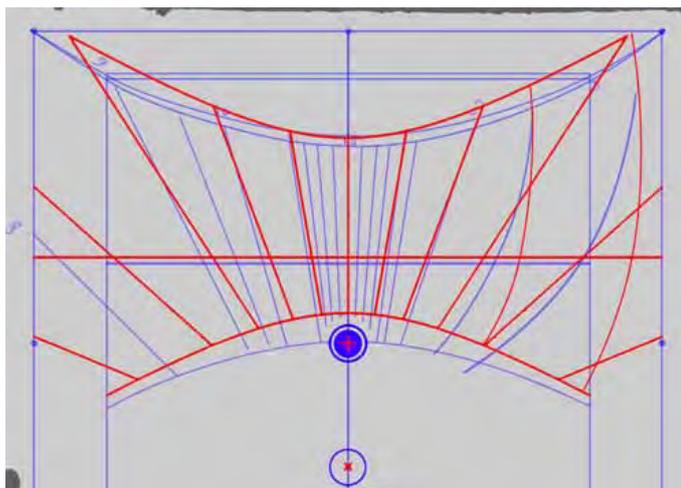


Figure 21 – Superposition d'un quadrant rouge à 40° de latitude nord sur la route bleue idéalisée.

4 Conclusions

À la lumière de l'étude réalisée sur la base des images presque orthogonale¹³ disponibles, les conclusions suivantes peuvent être tirées :

- Les lignes horaires présentent des défauts de tracé, car elles ne convergent pas vers le même point du méridien ;
- Les arcs de déclinaison ne sont pas en accord avec ceux calculés pour Amridil ;
- Les courbes de début et de fin de la prière *asr* sont incorrectes ;
- Les cercles de hauteur du Soleil présentent des erreurs appréciables ;
- Le petit cercle dessiné sur le méridien, à côté de la qibla (qui est bien tracée) n'a pas de signification claire ;
- L'orthognomon est en parfait état.



Figure 22 – Vue de la cour de la mosquée de la kasbah d'Amridil. Au premier plan, le cadran. Photo : Éric Mercier (2014).

13. Il serait souhaitable d'obtenir un tracé grandeur nature, ou muni d'une échelle, sur lequel toutes les lignes et les traits seraient visibles pour envisager une étude plus complète.

Le balatā d’Amridil, situé dans un lieu initialement prévu comme *zaouia*, a pu être fait sur place par un *muwaqqit* ayant une connaissance imparfaite du *miqat*¹⁴.

Malgré les erreurs constatées dans la réalisation du balatā d’Amridil, il mérite toute notre attention en tant que relique des connaissances scientifiques existantes à une époque — les premières années du XX^e siècle — et dans un lieu particulier dédié à l’enseignement de l’Islam. Ce balatā, qui permet de déterminer les moments des prières et la direction de la Mecque, constituait un outil utile au respect des préceptes islamiques, il a donc toute sa place en un tel lieu. Pour que cet instrument survive, il est souhaitable que les propriétaires actuels de la kasbah et les autorités marocaines recherchent une protection et une mise en valeur appropriée¹⁵. Dans tous les cas, nous vous invitons à découvrir la kasbah d’Amridil, pour sa beauté, sa simplicité et . . . son balatā, qui, en dépit de ses erreurs, mérite que l’on s’y arrête.

5 Remerciements

Ce travail a été rendu possible grâce aux personnes suivantes auxquelles nous sommes très reconnaissants :

- Le prof. José Antonio Mateos, de l’Université de Grenade, qui a visité la kasbah d’Amridil fin 2016 et a envoyé des images de balatā au Dr Carlos E. Esteve, architecte.
- L’architecte Dr. Carlos E. Esteve, de l’Université de Grenade, avec qui nous avons une longue amitié, qui à son tour nous a envoyé les images.
- L’ingénieur Gianni Ferrari, de Modène, avec qui nous avons une correspondance de longue date, qui m’a envoyé des informations reçues du Dr. Ali Guerbabi.
- Le Dr. Ali Guerbabi, conservateur des monuments archéologiques de la Wilaya (district administratif) de Batna (Algérie), qui a réalisé la traduction des mentions arabes et qui nous a fournis des informations pertinentes.
- Le prof. Éric Mercier, de l’Université de Nantes, qui nous a fourni de nouvelles images et clarifié certaines données concernant le cadran d’Amridil.

Références

- [1] Carandell, J., *Estudios sobre el tratado de Gnomónica de Ibn al-Raqqam. Risala fi’ilm al-zilal*, Instituto « Millás Vallicrosa » de Historia de la Ciencia Arabe, Universidad de Barcelona, 1988.
- [2] Ferrari, G., *Le meridiane dell’antico islam*, Édition à compte d’auteur, Modena, 2011.
- [3] Ferrari, G., « The Universal sundial of ancient islam », *The Compendium*, vol. 8, n° 2, North America Sundial Society, 2001.
- [4] Ferrari, G. & Severino, N, *Appunti per uno studio delle meridiane islamiche*, Édition à compte d’auteur, 1997.

14. Le *miqat* est une discipline astronomique qui traite de sujets directement liés au culte islamique, tels que le calcul de la *qibla*, les moments de prière, le début du nouveau mois musulman, etc.

15. En fait, nous ignorons si l’ensemble de la kasbah d’Amridil ou certaines des pièces qui y sont conservées bénéficient d’un quelconque statut officiel de protection, si ce n’est pas le cas, cela nous semble souhaitable.

- [5] Jarray, F., *Gnomonique musulmane au Maroc : Un premier bilan sur le corpus des mizwala-s*, Études en patrimoine écrit. Centre National de la Calligraphie. Institut National du Patrimoine. Ministère des Affaires Culturelles. République Tunisienne. Tunis, 2017. pp. 5-36.
- [6] Martinez, E., *Legado gnomónico de al-Andalus. Personajes, documentos y materiales*. Coll. Papeles Digitales « Sombra Solar ». Éd. Reloj Andalusi, Córdoba, 2014.
- [7] Savoie, D., « L'heure des crépuscules sur les cadrans solaires arabo-islamiques », *L'Astronomie*, vol. 118, 2004.
- [8] Savoie, D. & Ferreira, A., « Détermination de la prière de l'asr », *Cadran Info* n° 27, Paris, Mai 2013, p. 184.
- [9] Site web :
La casbah d'Amridil : <http://www.almaouja.com/casbah-ksar/casbah-amridil>,
visité le 09/01/2017.



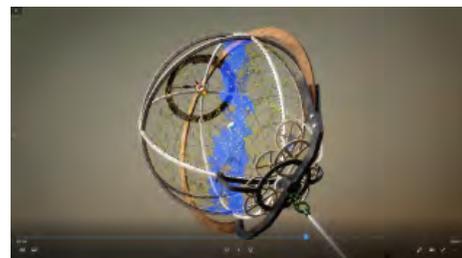
Horloge astronomique de Strasbourg

Lors de notre réunion du mois de mai dernier, il a été présenté une vidéo sur l'horloge astronomique de Strasbourg.

La clé USB contenant ce reportage scientifique et technique a été offerte par notre collègue Guy Brélivet.

Renseignement pris auprès de monsieur l'intendant ^a, les ventes par correspondance ne se font que par lot de 20 exemplaires.

^a. Gérard Valette 16 rue Brûlée, 67081 Strasbourg cedex.



Le « Pantocosme » et la gnomonique de Noël-Léon Morgard (1612)

par Paul Gagnaire & Éric Mercier

Nous étudions ici un ouvrage publié en 1612 qui correspond au mode d'emploi d'un instrument présenté comme « universel » : le « Pantocosme ». Les différents usages revendiqués par son inventeur (N.-L. Morgard) concernent l'astronomie, l'astrologie, la gnomonique, la géographie, la navigation, les sciences du comput et du calendrier etc. Nous avons analysé ces différentes fonctions (compte-rendu dans les annexes), mais cet article insiste particulièrement sur la conception de l'instrument, et ses usages en gnomonique et en astronomie appliquée. Globalement, nous mettons en évidence de nombreuses approximations, erreurs et revendications abusives : cet instrument est loin d'être un instrument universel, il est très approximatif (sauf peut-être dans le domaine du calendrier et du comput) et repose sur des principes scientifiques en partie erronés (systèmes de projection, coordonnées célestes, orbite lunaire...).

Au cours de la Renaissance, et au début des Temps modernes, alors que les limites du monde connu ne cessaient de reculer et que les voyages au long cours semblaient de plus en plus réalisables à tout un chacun, la nécessité de créer des instruments astronomiques / gnomoniques universels est apparue. Certains ont acquis une place dans l'histoire des sciences, comme l'astrolabe de Frisius (publication en 1556), celui de Rojas (publié avant le précédent, 1550, bien qu'il en constitue un développement), l'astrolabe de La Hire (1701). D'autres ont sombré dans l'oubli comme le Cosmolabe de J. Besson de 1567 ou le Pantocosme de N.-L. Morgard de 1612. Pourquoi cet oubli, pourquoi ce désintérêt des historiens des sciences ? Sommes-nous en face d'inventions géniales méconnues, ou au contraire d'objets sans intérêt ?

C'est entre autres pour répondre à ces questions que nous nous sommes intéressés à l'invention de Morgard qui nous est parvenue sous la forme d'un livre qui est à la fois un manuel de construction (grâce notamment à la présence de 6 magnifiques planches) et un mode d'emploi. L'ambition de Morgard est énorme ; il prétend apporter une solution pratique à de nombreux problèmes qui relèvent de l'astronomie, de la gnomonique, de l'astrologie, de la géographie, de la navigation, des sciences du calendrier et du comput... Nous avons

étudié l'œuvre de Morgard selon ces différents aspects. Notre analyse et nos conclusions sont disponibles en annexes sous la forme (1) d'une analyse critique de l'ouvrage proposition par proposition (*Annexe 5*) et (2) sous la forme de synthèses thématiques qui concernent l'astrologie, (*Annexe 8*) et la navigation (*Annexe 7*)¹. Dans cet article, nous aborderons principalement les aspects liés à la gnomonique; ce n'est qu'à la fin de l'article que nous esquisserons très rapidement les autres domaines.

1 Noël-Léon Morgard : sa vie, son œuvre



Figure 1 – Portrait de Noël-Léon Morgard dans l'Introduction de son ouvrage : *Déclaration, instruction et usage du Pantocosme ou instrument universel concernant les observations astronomiques, astrologiques, cosmographiques, géographiques, maritimes, géométriques, chorographiques & autres*.

Le livre était impressionnant. Ses quatre-vingt-dix pages renfermaient cent-vingt-deux *Propositions*, avec exemples, définitions, postulats et axiomes, traitant d'astronomie, d'astrologie, de cosmographie, de géographie, de chorographie, de géométrie, de navigation et de bien d'autres sciences encore. Des pages doubles, repliées sur elles-mêmes, présentaient, à grande échelle, cinq organes astrolabiques et trois alidades dont deux à pinnules. Ces planches d'une richesse et d'une précision admirables, portaient la signature de « François Galandius, faiseur des instruments des Mathématiques, près S. Hilaire ». On ne sait rien de lui. La page inaugurale, sous le portrait de Morgard, s'ornait d'un éloge de l'auteur, en beaux alexandrins

Un nom... Un livre... Trois dates... Rien, vraiment, et pourtant, quelle aventure!

Déjà, deux ans que le bon roi Henri IV était mort. Un habitué du Quartier latin, en cet automne 1612, essayait de vendre aux passants qui croisaient dans les parages de l'église Saint-Hilaire, son petit livre « Déclaration, instruction et usage du Pantocosme ... » et le titre complet s'étendait encore sur sept lignes. Cet auteur, docte professeur de mathématiques, sans éditeur, ni libraire, se nommait Noël-Léon Morgard (fig. 1 & 2). Récemment, encore, sa famille devait s'appeler Mauregard; lui, avait modifié cette orthographe déplaisante, mais signait toujours de ce prénom composé, palindromique, formé de deux pré-noms anacycliques; clin d'œil malicieux d'un personnage qui ne prêtait pas souvent à sourire.

Comme il faut bien gagner sa vie, Morgard faisait paraître, ainsi que bien d'autres émules de Nostradamus (1503-1566), des prophéties annuelles, vite oubliées, mais il avait mis tout son cœur et toute sa science dans ce Pantocosme qu'il appelait « instrument universel », traduction minimale du mot grec qui signifierait même « tout sur tout l'Univers ».

1. Les annexes électroniques contiennent également une reproduction du livre de Morgard (*Annexe 1*), un jeu de planches à la même échelle (*Annexe 2*), la description détaillée de chacune des parties de l'instrument (*Annexes 3 & 4*), et une série de sources bibliographiques (*Annexe 9*) et un tableau résumant Proposition, par Proposition, le type d'utilisation du Pantocosme qui est indiqué (*Annexe 6*).



Figure 2 – Plan détaillé du quartier Sainte-Geneviève, par l’abbé de La Grive, 1757.

sortis de la plume de Jean-Philippe Varin ; celui-ci avait même composé en latin, avec une pincée de mots grecs, une introduction à l’éloge dont voici la traduction :

Au très expérimenté astrophile, le Seigneur Morgard, pour son Pantocosme. Ici, vous les amoureux du cosmos, contemplez la Sphère du monde. Ici, toute sa splendeur est dévoilée par le Pantocosme. Désormais, chez nous, existe un nouvel Atlas, Morgard, qui nous enseigne les Ourses du Pôle, par son Art tout nouveau et nous entraîne chez les Antipodes. Grande est ta Gloire, ô Lutèce, et tous les siècles la proclament, mais plus grande gloire s’attache au nom de Morgard.

AD PERITISSIMVM ΑΣΤΡΟΦΙΛΟΝ, D. DOMINVM
 MORGARD PRO SVO PANTOCOSMO.
Hic, huc κοσμήτης Sphæram iam cernite mundi:
 Hic πανκόσμου cernitur omne decus.
 Iam nouus Atlas adest, MORGARDVS, qui mouet ἀγκυρ
 Arte nouâ: ἀντίποδες cernere prope facit.
 Gloria magna tua est, LVTECIA: factaque dicent,
 Nomine MORGARDI, gloria maior erit.

Figure 3 – Éloge de Morgard par Jean-Philippe Varin.

Quel fut le destin du livre ? Nous ne savons pas, mais nous ne l’avons trouvé cité nulle part, avant le XX^e siècle. En revanche, nous connaissons le destin de Morgard. Pour l’an 1614, il avait composé quelques prédictions, comme chaque année et certaines d’entre elles avaient fortement déplu dans les sphères gouvernementales. La reine-régente, Marie de Médicis, et son ministre Concini avaient fort à faire pour gérer une France en proie aux désobéissances, voire aux rébellions des Grands et aux révoltes des miséreux de plusieurs provinces. Les États Généraux avaient été convoqués pour 1614. Morgard parlait de troubles, de guerres et de meurtres, en des allusions à peine voilées. Déjà, en 1611, son almanach avait été saisi par les autorités. On l’envoya aux galères d’une manière expéditive et dont voici la chronologie-éclair :

- 8 janvier 1614 : arrêté par les archers du Grand Prévot et enfermé à la Bastille ;
- 17 janvier 1614 : transféré à la Conciergerie ;
- 31 janvier : condamné à 9 ans de galères par arrêt de la cour ; ni appel, ni grâce.

- 9 février 1614 : mis à la chaîne et envoyé à Marseille.
- En 1619, gracié après cinq ans de galères. Rentre à Paris et reprend son activité.

Le passage d'Hervé Drévilion (1998) donné ici en *annexe 9g*, ouvre une réflexion intéressante sur la liberté de penser et la raison d'État. Mettre un galérien à la chaîne signifiait lui river autour du cou un large collier de fer, relié au collier d'un autre condamné par une chaîne de fer. Ainsi, les forçats allaient, l'épaule marquée GAL au fer rouge, deux par deux, à pied, liés aussi par les chevilles, de Paris à Marseille, chargés, chacun d'une quinzaine de kilos de ferraille. Plusieurs mourraient en chemin ; le voyage durait cinq ou six semaines, à raison de quinze à vingt kilomètres par jour. La chaîne de Bretagne pouvait marcher pendant sept, voire huit, semaines. Des images terribles et des récits d'épouvante (notamment Victor Hugo) nous insèrent dans ces processions infernales.

Une fois à Marseille², les prisonniers ne passaient pas leur vie à bord des galères. Certes, l'accoutumance et les entraînements étaient rudes, plus souvent accomplis sous le fouet que lors de conférences en chambre ; les rameurs, enchaînés à leurs bancs par les pieds, nus, sales, brûlés par le Soleil et le sel des embruns, couverts de leurs excréments et dormant sur place, nourris d'une pitance infecte, perdaient toute humanité à tirer la rame pour le roi. La mortalité demeurait à peine un peu élevée, car il fallait économiser « la force motrice » des galères. Cependant, plus d'un forçat regrettait de n'avoir pas succombé en chemin. Les batailles navales étaient rares et Morgard n'a certainement participé à aucune. La guerre de course et la chasse aux Barbaresques ont dû, seules, lui donner quelques émotions³. Alors, les galériens vivaient souvent à terre, travaillant au bagne maritime ou dans l'arsenal. Les plus habiles pouvaient exercer une activité artisanale, gagner trois sols, acheter quelques vivres, fréquenter les maisons de débauche ou s'attacher des passe-gavettes. Morgard a dû se sentir bien dépaysé dans cet épouvantable milieu ! Lorsqu'il fut gracié, en 1619⁴, après cinq ans d'enfer, il revint à Paris et recommença à faire des prédictions, mais, cette fois, en « disant des vérités qui feraient plaisir ». Dès l'année 1619, il publia deux ouvrages, (l'un recueilli ici, dans les annexes PDF (*Annexe 9a*), où il faisait amende honorable, expliquait ses errements passés, mais, tout de même, maintenait qu'il était bon astrologue.

Puis, il disparut de la société des hommes (mort signalée en 1633), aussi nous ne pouvons en dire davantage, mais son Pantocosme nous a fait passer d'agréables heures d'étude, même si sa fabrication semble difficile à envisager ; la finesse des gravures est telle que le diamètre de ses disques devrait passer les soixante centimètres pour une lecture facile⁵. Mais, ne peut-on pas rêver ?

2 Le livre : Déclaration, instruction et usage du Pantocosme

Le livre qui nous intéresse ici : « Déclaration, instruction et usage du Pantocosme ou instrument universel concernant les observations astronomiques, astrologiques, cosmographiques, géographiques, maritimes, géométriques, chorographiques & autres » a été publié à compte d'auteur et est daté de 1612. Il est épais de 95 pages, et est accompagné de 6 planches (fig. 4 [page ci-contre](#)). Ces planches sont reproduites à une échelle homogène dans l'*Annexe 2*.

2. En 1630, Marseille abritait au moins vingt galères, soit un effectif de 6 000 hommes (galériens, soldats, matelots et officiers). La Grande Réale (130 mètres de long) embarquait un équipage total de 600 hommes. Plus tardivement, entre 1680 et 1748, Marseille a vu passer plus de 60 000 galériens, si bien qu'on estime que, vers 1700, 1 Marseillais sur 6 est un galérien.

3. Entre 1613 et 1621, les corsaires algériens ont capturé 936 navires chrétiens dont 253 français.

4. Saint Vincent de Paul fut nommé aumônier général des galères le 8 février 1619. Morgard l'a-t-il croisé ?

5. Comme nous le verrons plus loin, c'est en fait un instrument de 24 cm de diamètre dont il s'agit.

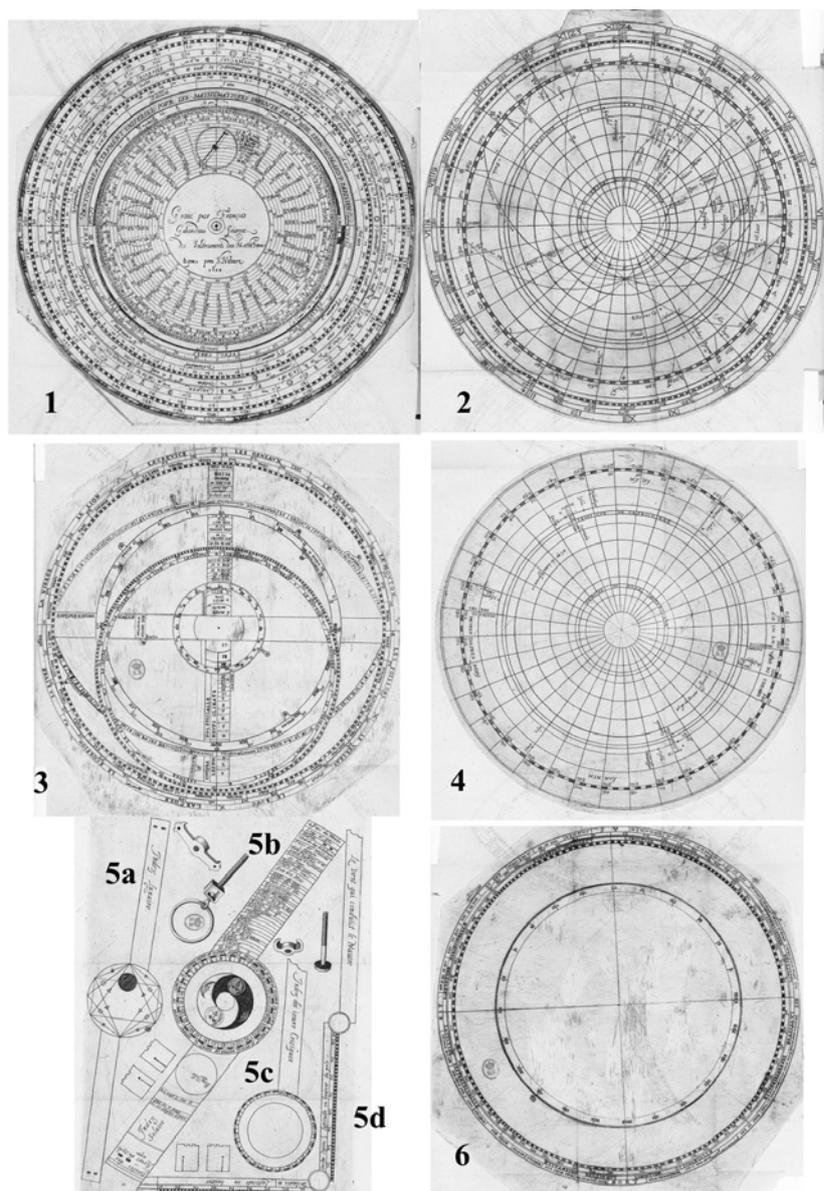


Figure 4 – Les six planches accompagnant le livre de Morgard. Ces planches, publiées à l'échelle, permettaient après collage et découpage de constituer l'instrument personnel de l'acheteur du livre, le diamètre était d'environ 24 cm.

1. le dos.
2. la mère (selon la terminologie de Morgard) et tympan de l'hémisphère N.
3. la *rete* ou *arene* (selon la terminologie de Morgard).
4. le tympan de l'hémisphère S.
5. la planche des petites pièces avec les pinnules pour les index 5a et 5b, l'anneau de fixation, et les index eux-mêmes (5a = Index lunaire; 5b = Index solaire; 5c = Index des *Jours critiques*; 5d = Index du *Vent qui conduit le Navire*).
6. le tympan de navigation.

Ces six planches sont conçues pour être découpées par l'acheteur, collées sur du carton ou du bois (ou gravées sur du cuivre), ajustées et évidées (notamment en ce qui concerne l'araignée) et montées sur un axe pour constituer un instrument opérationnel. Ces planches permettent de constituer un instrument d'environ 24 cm de diamètre au lettrage très fin et difficilement lisible. Il est probable que les acheteurs du livre de Morgard ont, dans leur majorité, réalisé, ou tenté de réaliser, ce montage. En effet, nous avons retrouvé la trace de 9 exemplaires de l'ouvrage dans diverses bibliothèques d'Europe, mais seuls 3 de ces 9 exemplaires possèdent encore les planches (*cf.* table 1 page 53).

Nous ne connaissons pas d'instrument complet conservé, néanmoins l'ancienne collection du Time Museum (Rockford, USA) avait dans ses collections un Pantocosme non achevé (l'araignée n'était pas découpée) et qui a été étudié de façon préliminaire par Turner (1985, p. 232-237) (fig. 5).



Figure 5 – Le Pantocosme, partiellement réalisé, de l'ancienne collection du Time Museum. Les index, simplifiés, sont en laiton mais l'araignée n'est pas évidée. On note la présence de pinnules sur l'index lunaire.

Table 1

Exemplaires de l'ouvrage de Morgard disponibles dans des collections publiques ; la présence des planches est indiquée.

Bibliothèque	Note	nb. de planches
Münchener Digitalisierungszentrum (D) / Google	4 Math a 303 m	0
BNF	VZ-825	6
BNF	V6 369	0
Biblioth. Municipale Orleans	C2653 Fonds ancien 1	0
Biblioth. CNAM	4 Ru 4	6
Biblioth. Municipale Reims	M 384 Fonds régional	0
Biblioth. Municipale Bordeaux	A 2666 (2)	6
Biblioth. St. Geneviève (Paris)	4 V 25 INV 465	0
Médiathèque du Valais (CH)	BCV RZ 1538	0

Voyons maintenant le livre lui-même : après le portrait de l'auteur (fig. 1 page 48) et son éloge (fig. 3 page 49), on trouve une « déclaration des parties du Pantocosme » qui présente les différentes pièces qui le composent. Sont ainsi successivement décrit :

- le dos de l'instrument.
- ce qu'il appelle la « mère » qui est en fait la face avant de l'instrument. Dans sa description on a le sentiment qu'il existe une bordure extérieure en relief ; le « Limbe », et que dans la cavité, vient se loger un tympan à deux faces qui est qualifié de « globe terrestre » et dont les faces représentent les « septentrionaux » et les « méridionaux » (= hémisphères N et S). En fait, les planches montrent que la « mère » inclut la représentation de l'hémisphère N. Il est donc probable que le texte ait été écrit avant la finalisation des planches ; nous avons identifié d'autres exemples de décalages entre le texte et les planches.
- l'araignée ou « arene » ou encore « rete », c'est pour reprendre l'expression de Morgard, une représentation du globe céleste.

Les planches montrent que l'instrument comprend un tympan supplémentaire (tympan de navigation) et divers index qui ne sont pas décrits dans cette présentation mais que nous présentons en *Annexe 4*.

Vient ensuite une dédicace de deux pages au Roi de France Louis XIII, puis le corps de l'ouvrage avec la liste des *122 propositions, 38 définitions & plusieurs communes sentences...* qui constitue une sorte de mode d'emploi de l'instrument. Ce plan semble à la mode à l'époque ; c'est notamment celui que nous rencontrons dans des ouvrages comme « La paraphrase de l'Astrolabe » de 1546 par J. Focard, ou « Le Cosmolabe » déjà signalé.

Dans un louable souci de pédagogie, l'auteur a pris la précaution de multiplier les exemples numériques qui, d'ailleurs, sont souvent plus explicites que les explications elles-mêmes.

L'ouvrage apparaît donc assez facile d'emploi ; hélas, il présente un certain nombre d'imperfections de forme qui se sont révélées assez gênantes :

- tout d'abord, un manque cruel d'homogénéité dans la terminologie utilisée ; par exemple : l'araignée change assez régulièrement de nom (« rete », « arene », et même « regne » dans la proposition XVII). Dans le même esprit, alors que chaque index possède un

nom (fig. 4), ceux-ci ne sont quasiment jamais utilisés dans les explications : le choix de l'index est souvent implicite (pour l'auteur, pas pour le lecteur). C'est, hélas, également le cas pour les tympans.

- les différentes « Propositions » se suivent généralement dans un ordre logique, mais de temps en temps, comme si cela résultait d'un oubli, on voit apparaître une « Proposition » qui n'est manifestement pas à sa place (*Propositions* XII, XIV, XLIIII). Dans le même ordre d'idée, on note des inversions ou des répétitions : la définition de l'ascension droite, utilisée dans la *Proposition* XXVIII n'est donnée qu'à la *Proposition* XXX, les parallèles géographiques sont définis deux fois (aux *Propositions* LXXI et XCIIII) etc.
- le texte est parsemé de coquilles typographiques et notamment, ce qui est parfois très gênant, dans les chiffres des exemples numériques. En fait l'erratum de l'ouvrage est ridiculement réduit (4 lignes à la dernière page), manifestement la relecture des épreuves n'a pas été réalisée avec la rigueur requise.

L'ouvrage de Morgard n'est pas non plus exempt de problèmes de fond, mais nous y reviendrons plus bas.

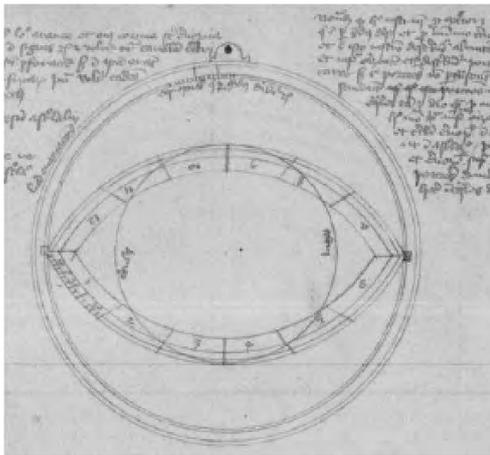
3 Les bases scientifiques du Pantocosme

Avec sa mère, ses tympans et son araignée, le Pantocosme possède des affinités avec l'astrolabe planisphérique. Mais des différences ont été introduites par Morgard, notamment en ce qui concerne les systèmes de projection. Cela concerne l'araignée, les tympans et le limbe ; le dos n'est pas concerné.

La différence la plus visible entre l'araignée de l'instrument et celle d'un astrolabe planisphérique est l'existence de deux arcs de cercles que Morgard qualifie d'« écliptique » (comme dans la *Proposition* XXXVI) même si généralement ce mot est attribué par lui au cercle excentrique similaire à celui des astrolabes planisphériques. Ces arcs évoquent le dessin de l'astrolabe de Malcotius qui a été publié à Rome en 1610, soit deux avant l'ouvrage de Morgard. Comme le souligne Morrison (2007, p. 281-286), même si l'Histoire a retenu le nom de Malcotius, ce type d'araignée était connu bien avant lui, on le retrouve dans un manuscrit de H. Arnault, un élève de Jean Fusoris (fig. 6 page ci-contre), ou chez des auteurs arabophones à partir du X^e siècle. Le principe de cette araignée est le suivant : alors que l'araignée des astrolabes planisphériques couvre tout l'hémisphère Nord et déborde jusqu'au tropique du Capricorne, ici on se limite à l'équateur. De ce fait l'écliptique est amputé de 6 signes et se limite à un arc de cercle. Si l'on souhaite superposer à cette représentation septentrionale, l'hémisphère Sud (jusqu'à l'équateur), on obtient un second arc de cercle, symétrique du premier, et qui couvre les 6 signes manquant (Michel 1947, p. 171-172). Les avantages de ce système sont discutés par Morrison (2007). Il est important de noter, pour la suite, que dans le dessin de ce genre d'araignée, le système de projection de l'astrolabe planisphérique (projection stéréographique) n'est pas remis en cause, il s'agit uniquement d'une modification des limites de cette projection.

Il faut noter que Morgard a choisi de graduer ces arcs, non pas en signes et degrés de longitude écliptique, mais en degrés de déclinaison.

Par ailleurs, un cercle excentrique gradué en signes et degrés de longitude écliptique apparaît sur l'araignée du Pantocosme ; ce cercle évoque l'écliptique des astrolabes planisphériques. De fait, dans ces *Propositions*, Morgard utilise le terme d'écliptique pour désigner ce cercle. Notons que ce cercle est complet et qu'il atteint donc le tropique du Capricorne. Il coexiste donc sur l'araignée, deux systèmes de projection qui diffèrent par la signification de la limite



(a) Henri Arnault (v. 1400) (*BNF ms latin 7295*)



(b) Malcotius (1610) (*Astrolabiorum, seu utriusque Planisphaerii universalis...*)

Figure 6 – Deux sources ayant pu inspirer le dessin de l'araignée du Pantocosme.

extérieure (bordure extérieure de l'araignée) : dans un cas il s'agit de l'équateur, dans l'autre du tropique du Capricorne. Notons enfin, pour la suite, que le second système de projection est obligatoirement stéréographique puisque le cercle cosmique de l'écliptique est représenté par un cercle sur la projection⁶. Par ailleurs, et nous en reparlerons, la position de l'écliptique sur l'araignée de Morgard est décalée par rapport à celle de l'astrolabe planisphérique (fig. 7 page suivante).

Voyons maintenant les tympanes et leur système de projection. Morgard a choisi de ne pas représenter sur ces tympanes le système classique à azimut et almicantrat à connotation astronomique, mais d'utiliser ces tympanes comme des cartes géographiques (planisphères), chaque tympan représentant un hémisphère terrestre. De ce choix, découlent des implications en termes de projection. Tout d'abord, la projection est évidemment polaire, et elle est limitée par l'équateur. Nous nous retrouvons donc dans la configuration de l'araignée de Malcotius, mais, et la différence est notable, il ne s'agit pas d'une projection stéréographique. En effet les parallèles géographiques (cercles concentriques autour du pôle) sont équidistants. Dans ce cas, la projection est équidistante Nord-Sud mais elle n'est ni conforme, ni équivalente. Pourtant, cela ne n'empêche pas notre auteur de représenter sur ces tympanes, des grands cercles célestes (comme les limites des maisons astrologiques (« mantions ») ou l'horizon parisien) comme des cercles, cette représentation est donc fautive.

Au final, utiliser le Pantocosme, revient à superposer des projections stéréographiques célestes (limitées soit par l'équateur, soit par le tropique du Capricorne) à une projection conique équidistante terrestre (limitée par l'équateur), et tirer des conclusions des superpositions observées ! On comprendra que ces conclusions ne peuvent qu'être fausses, ou au moins très approximatives.

Il est probable que Morgard était au moins en partie conscient de ces problèmes de fond, le décalage qu'il a introduit dans le dessin de l'écliptique excentrique de son araignée (fig. 7 page suivante) correspond probablement à une tentative de correction, ou plutôt de compensation. Un autre indice peut être trouvé dans son texte, aux *Propositions* LXIV et LXV, il y indique comment trouver la longitude écliptique de l'ascendant et des limites des autres maisons

6. Sur une projection stéréographique, et c'est spécifique, la projection d'un cercle est un cercle.

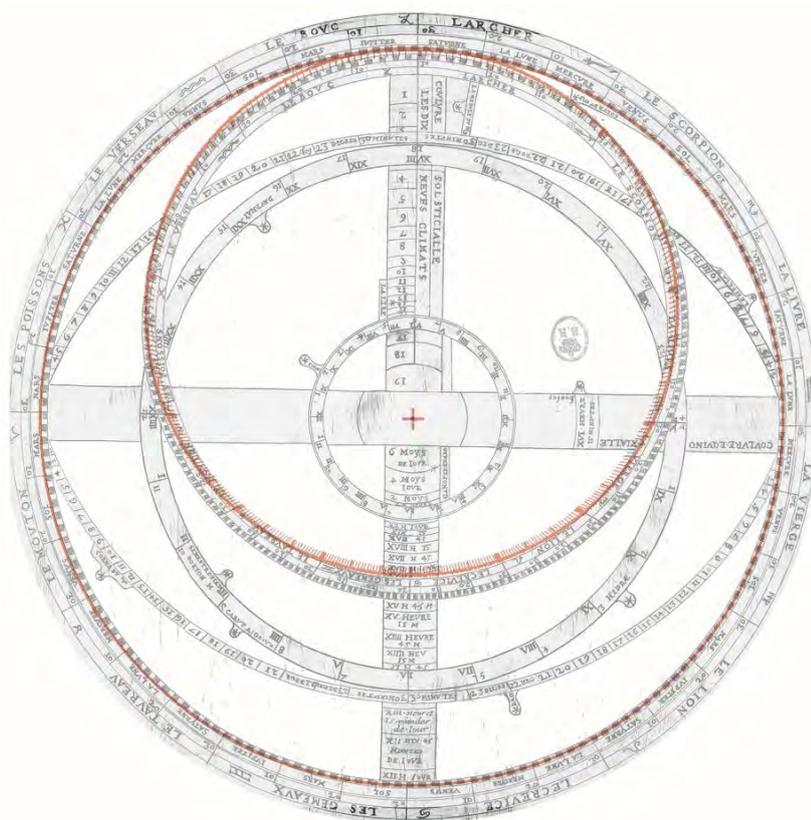


Figure 7 – Superposition de l’araignée du Pantocosme avec le dessin d’une araignée d’astrolabe planisphérique (en rouge) ; la position du tropique du Capricorne et du pôle Nord sont les mêmes, mais l’écliptique est légèrement plus grand, et décalé, sur le Pantocosme.

astrologiques grâce à son instrument. Du fait de l’incohérence des systèmes de projection, le résultat que l’on trouve avec sa méthode s’écarte (jusqu’à 7°) des valeurs correctes. Pourtant dans son exemple numérique les chiffres donnés sont à la fois corrects et affichés à la minute d’angle près (!). Une telle précision est hors d’atteinte de l’instrument, il est clair que Morgard s’est servi, non pas de son instrument qu’il sait très imparfait et dans lequel il n’a pas confiance, mais d’éphémérides !

Voyons maintenant plus précisément ce qui concerne la gnomonique.

4 La gnomonique de Morgard

4.1 Les systèmes horaires du pantacosme

L’astrologie a une grande place, à la fois dans la vie de Morgard, et dans les *Propositions* de son livre. Un des objectifs de celui-ci est de mettre à la disposition de chacun les outils utiles à la pratique de l’astrologie. Dans le cadre de cette pratique, on peut souhaiter déterminer la « planète-Régent » à un instant donné. Comme l’identité de cette *planète-Régent* varie en fonction de l’heure temporelle (ou inégale / planétaire) du moment, la détermination de cette heure doit donc logiquement être facilitée par l’usage de l’instrument. C’est l’objet des *Propositions* XVIII à XX.

La *Proposition* XVIII commence par la *Définition* VII, où l’auteur nous donne une définition de l’heure planétaire : le temps que mettent 15 degrés d’écliptique à se lever, un jour J et en un lieu L. Il s’agit donc de la définition de l’« heure planétaire authentique », telle qu’elle a été exhumée des vieux ouvrages par Drecker dans le célèbre *Die Theorie der Sonnenuhren* (1925).

Dans la suite du texte, il ressort que :

- quand la sphère est droite (c'est-à-dire quand on est à l'équateur) les heures inégales ont une durée constante et Morgard ajoute : « les heures planétaires et temporelles sont égales »
- quand la sphère est oblique (c'est-à-dire en s'éloignant de l'équateur), les jours sont inégaux (sauf aux équinoxes) ; les heures égales et inégales sont différentes (l'auteur utilise le terme d'« inégales », ce qui rend cette explication assez confuse) et, *dixit* Morgard, « celles de jours sont dites inégales, celles de nuit sont dites planétaires ».

Manifestement la définition d'« heure planétaire » n'est plus celle de la *Définition VII* (!) ; à ce stade les heures planétaires ne concernent plus les heures planétaires authentiques, mais plutôt les heures inégales de nuit. La suite du texte décrit la manière de déterminer cette heure inégale. Il faut utiliser le *lymbe* de la mère comme échelle des heures égales et *le cercle du polle artique*⁷ comme échelle des heures inégales. L'utilisation d'un index permet de faire la correspondance. En d'autres termes, si l'on suit ces explications, et comme les deux échelles sont fixes l'une par rapport à l'autre, il y a une relation constante entre l'heure égale et l'heure inégale. . .

$$HI = -3 + \frac{3}{4}HE$$

(*HE* = heure égale ; *HI* = heure inégale), ce qui est clairement faux, quelle que soit la définition que l'on retient pour les « heures inégales ». Dans l'exemple numérique que donne Morgard, à 8 h égales, il est 3 heures inégales. . . tous les jours de l'année !

Après ce passage aberrant, on revient à des choses plus raisonnables, mais en opposition totale avec ce qui vient d'être dit : il s'agit de calculer la durée d'une heure inégale et, selon Morgard, cela dépend du jour considéré ! Oublié donc, ce qui est dit trois lignes plus haut d'où il ressortait une relation constante. L'exemple choisi par l'auteur correspond au 1^{er} Mai. Selon lui, le jour dure 14 h 20 minutes (14,33 h) à Paris⁸. C'est ce qu'il appelle le jour artificiel. Avec un jour clair de 14,33 h égale qui correspondent à 12 h inégale, Morgard trouve bien une heure inégale de 71,66 minutes égales. Mais très curieusement la suite nous replonge dans les errements précédents : dans l'exemple numérique qui suit (celui de la *Proposition XIX*), on retrouve l'affirmation de l'équivalence 8 heures égales / 3 heures inégales. Nous devons avouer notre grande perplexité devant de telles incohérences⁹ qui concernent pourtant le domaine de prédilection de Morgard : l'astrologie.

On remarquera que les calculs de transformation des heures inégales en heures égales (et réciproquement) sont dépendants de la longueur du jour et donc de la latitude. Ce qui précède concerne implicitement ou explicitement Paris. Un instrument universel, comme prétends l'être le Pantocosme, doit pouvoir être utilisé sous d'autres latitudes. C'est l'objet de la *Proposition XIX*, il évoque Naples et Saint Jacques de Compostelle, et il se propose de déterminer, au même instant qu'à Paris, la planète dominante. Il faut donc déterminer l'heure inégale locale. Or pour la détermination de cette heure, il ne tient compte que du décalage horaire et pas de la latitude. Encore une erreur assez incompréhensible.

7. Présent près du centre, sur le tympan septentrional.

8. Le calcul de la durée du jour clair à Paris, quel que soit le jour de l'année, sera l'objet de la *Proposition XXIII*.

9. On trouvera dans l'*Annexe 5*, notamment dans l'analyse de la *Proposition XIX* au sujet de Naples et Saint Jacques de Compostelle, d'autres indices tendant à prouver que Morgard n'a pas vraiment compris la nature des heures inégales.

4.2 Les procédures transposées de l’astrolabe planisphérique

Comme nous l’avons vu précédemment, le Pantocosme contient des parties inspirées de l’astrolabe planisphérique (lymbe gradué en heures égales, écliptique gradué en longitude écliptique, quelques étoiles localisées sur l’araignée, lignes d’horizon et de crépuscule¹⁰ (pour Paris) sur le tympan septentrional...). Aux approximations près, dues aux systèmes de projection aberrants, il est possible de transposer plusieurs procédures (= usages) de l’astrolabe au Pantocosme.

- calcul des heures de lever et coucher du Soleil à n’importe quelles dates et à Paris (*Proposition XII*);
- idem pour les crépuscules (*Proposition XXIII*);
- calcul des heures du lever et coucher d’une étoile à Paris (*Proposition LXIII*).

On remarquera que, du fait de l’absence de tympan à almicantarats, la procédure classique de la détermination de l’heure par la mesure de la hauteur du Soleil, ou d’une étoile, n’est pas proposée.

4.3 Le cadran solaire

Le Pantocosme ne disposant pas des outils pour mesurer la course du temps comme le fait un astrolabe planisphérique, Morgard propose une procédure pour utiliser son instrument comme un cadran solaire. C’est l’objet de la *Proposition XVII* qui est précédée d’un « chapeau » qui nous annonce qu’il est question de

Faire çavoir l’heure il eft en tous les lieux du monde.

En pratique, ce programme nécessite de connaître (1) le décalage horaire entre le lieu de référence et le lieu distant dont on veut connaître l’heure, et (2) l’heure au lieu de référence. Ce dernier, comme nous allons le voir, ne peut être que Paris (ce qui pose problème pour un instrument « universel »).

L’instrument est en effet muni d’un cercle de 2 fois 12 heures avec 0/XII sur le méridien de Paris, il est donc facile de calculer le décalage horaire entre Paris et tous les lieux localisés sur la mère. En fait, Morgard propose une lecture directe grâce à l’échelle horaire de l’araignée (« regne » ici dans son texte) qui est dans le sens inverse de l’échelle de la mère. Il suffit de mettre l’heure du moment, repérée sur l’araignée, au-dessus du méridien de Paris de la mère, pour que l’échelle de l’araignée indique directement l’heure en face de tous les points de la Terre indiquées sur la mère. À partir de là, il est également possible, comme le dit Morgard, de corriger « l’éphéméride dressée pour un (autre) lieu... ». En fait cette affirmation est un peu abusive car pour certains paramètres qui dépendent de la latitude (lever du Soleil, coucher du Soleil...), le calcul nécessite un peu plus que la connaissance du décalage horaire.

En ce qui concerne la détermination de l’heure à Paris, Morgard nous dit qu’il est possible de mettre au-dessus du point représentant Paris sur la mère, « quelque chose qui face ombre » et de lire directement l’heure qu’il fait en tout lieu du méridien. Ce cadran est tracé sur la mère (fig. 8 page suivante). Les lignes horaires sont clairement équi-angulaires, il s’agit donc d’une face d’un cadran équatorial qui doit être incliné de façon précise et qui ne donne l’heure qu’entre deux équinoxes (ici seulement la face été d’après le sens des chiffres). Morgard ne dit rien de tout cela!

Plus surprenant encore, il s’agit clairement pour lui de tracer un cadran spécifique à Paris, le caractère universel de ce cadran semble lui échapper. Si ce n’était pas le cas, il est probable :

10. Même si le tracé du crépuscule parisien est fautif (voir l’*Annexe 5, Propositions XXII et XIII*)

- qu'il aurait positionné le gnomon au centre de la mère... et utilisé l'échelle horaire située à la bordure de la mère.
- il se serait abstenu de nous expliquer comment tracer d'autres cadrans du même type pour d'autres villes, en traçant nous-mêmes des réseaux horaires centrés sur la localisation géographique de ces localités et des nouvelles échelles horaires (*Proposition XXI*).

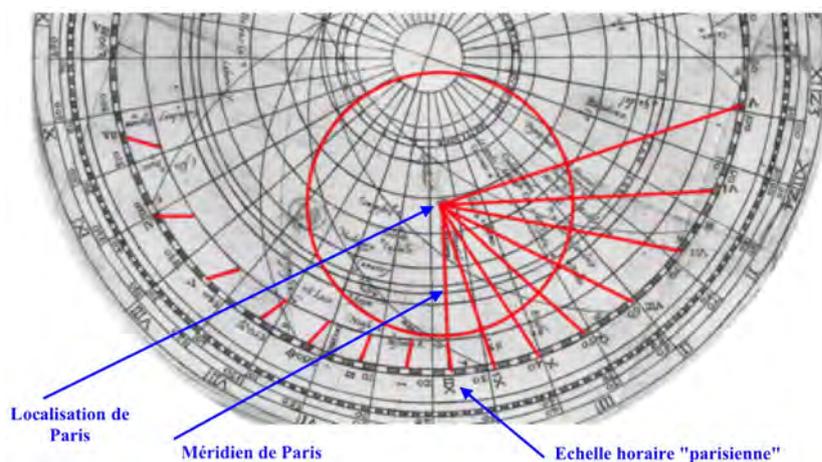


Figure 8 – Cadran équatorial (face été) de la mère. Le gnomon droit est implanté sur le point localisant Paris.

5 Astronomie appliquée

Une des principales fonctions du Pantocosme est de permettre la réalisation un horoscope pour un événement considéré... naissance par exemple (fig. 9 page suivante). Pour cela il faut :

- diviser l'écliptique en 12 secteurs, les maisons (« mantions »), dont les limites varient en permanence et auxquelles il a déjà été fait allusion dans le paragraphe 3.
- positionner les 7 planètes de l'astronomie ancienne, et des points fictifs (ex : part de Fortune, Substance...), dans ces domaines.

La compréhension astronomique de la position des planètes est donc une étape nécessaire et Morgard y consacre de nombreuses parties (*Propositions*) de son texte. Nous renvoyons le lecteur intéressé à notre analyse en *Annexe 5* ; nous nous limiterons ici à trois remarques principales :

- Dans l'ensemble des *Propositions* concernées il existe une confusion importante dans le choix des coordonnées célestes utilisées (ascension droite / déclinaison, longitude & latitude écliptique), tout est très approximatif, voire parfois complètement erroné.
- Comme l'année civile est différente de l'année tropique, à un jour et à une heure donnée, la position du Soleil varie légèrement par rapport à l'année précédente. Morgard est indiscutablement conscient du problème (voir *Proposition I* et *II*), mais il ne propose une procédure de correction que pour les 3 années qui suivent la publication de son livre (1613, 1614 & 1615)... il ne fait aucune allusion aux années suivantes, et notamment à la correction à faire en 1616, première année bissextile post-1612.
- En ce qui concerne la Lune, Morgard n'envisage que la Lune « moyenne ». Sa position est calculée, systématiquement, en fonction de celle du Soleil en se référant aux éléments du comput. Par ailleurs, il la situe systématiquement sur l'écliptique (*cf. infra*).

- Morgard essaye tout au long de son texte de maintenir l'illusion qu'il est possible, avec son instrument, d'établir la position des « planètes » autres que le Soleil et la Lune. Mais comme il n'y a rien dans son instrument qui pourrait s'approcher d'un « équateur », les éphémérides sont indispensables pour « habiller » l'horoscope.

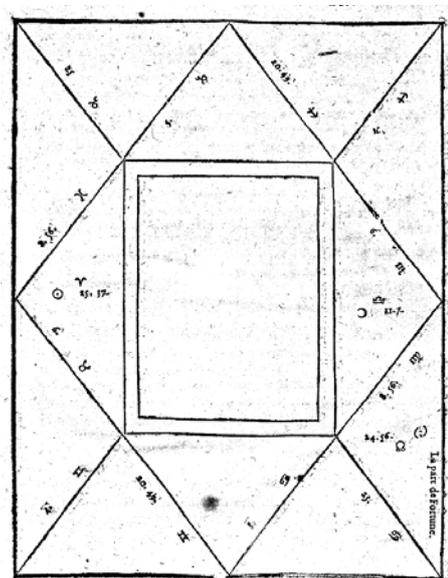


Figure 9 – L'exemple d'horoscope de Morgard (*Proposition LXV*). Chacun des triangles de la bordure correspond à une maison dont les limites sont indiquées en longitude écliptique, et qui accueillent les différentes « planètes » considérées.

On notera également une série de Propositions visant à prévoir les éclipses du Soleil et de la Lune et de savoir en quels lieux elles seront visibles (*Propositions XCVIII à CI*). C'est évidemment irréaliste dans la mesure où Morgard n'envisage que le mouvement de la Lune moyenne en longitude écliptique et, il considère que notre satellite est toujours précisément sur l'écliptique (latitude écliptique = 0).

6 Géographie et Navigation

Après avoir ainsi parlé du Ciel, Morgard va s'intéresser à la Terre et à la Mer. C'est une partie importante de son ouvrage puisqu'elle contient 28 pages sur 95 et 45 *Propositions* sur 122 :

- pour la Géographie, les *Propositions* LXXI à CI, aux pages 41 à 56 ;
- pour la navigation et la mer, les *Propositions* CII à CXV, aux pages 57 à 68.

À partir de définitions exactes de la longitude et de la latitude, on connaît les distances entre les villes, exprimées en lieues françaises et on saura les convertir en lieues allemandes ou en milles anglais ou italiens. Un tableau montre aussi la longueur au sol, des degrés en fonction de la latitude.

Suivent les définitions des Méridionaux, des Antéciens, des Amphisiciens, des Antipodes et de tous les groupes d'hommes, selon les zones de la Terre qu'ils habitent. Pour chacun, sont expliquées les durées des jours et des nuits, les levers et couchers d'astres, les frontières entre hivers et étés, les ombres, les passages du Soleil au zénith, les étoiles visibles, celles qui sont circumpolaires, Nord ou Sud, et comment elles passent au-dessus des têtes. Ensuite, Morgard développe la théorie des climats selon Maurolycus, qui ceinture le globe terrestre par des zones, non pas météorologiques, mais étagées de l'équateur aux pôles, avec une frontière à chaque latitude où la durée du jour clair solsticial d'été augmente de 1/2 heure, passant

ainsi de 12 heures (équateur) à 24 heures d'ensoleillement (cercle polaire) (voir *Annexe 5*). En manœuvrant l'index « colure des climats » de l'araignée, sur les tympan, on connaît tous les lieux qui se situent dans le même climat et on sait la longueur de leurs jours et de leurs nuits extrêmes.

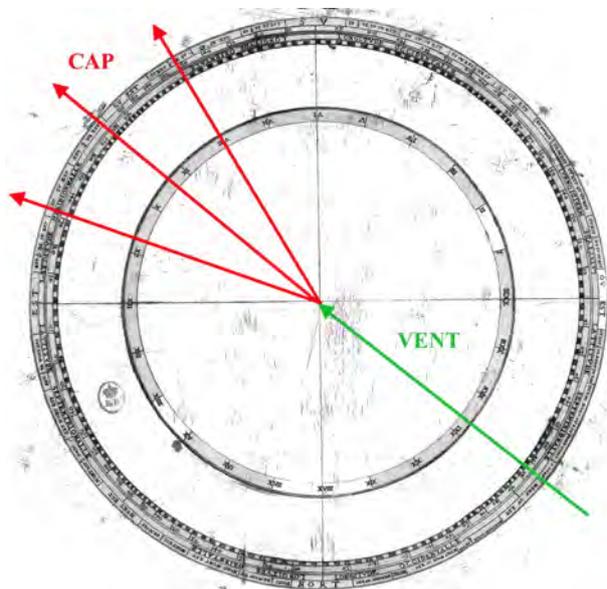


Figure 10 – Utilisation du Tympan géographique pour une navigation du cap de Sainte-Hélène jusqu'aux îles du cap Vert. Le Cap est la bissectrice de l'angle formé par 1) la moyenne des longitudes occidentales (50°) et 2) la moyenne des latitudes septentrionales (32°).

L'art de naviguer semble avoir été une préoccupation importante chez l'auteur. Il l'expose tout au long de quatre familles de problèmes, illustrés par quinze exemples qu'on dirait vécus par un capitaine au long cours. Il s'agit des *Propositions* suivantes : CII à CVIII, puis CIX, puis CX à CXIII, enfin CIIII à CXV, consacrées aux marées.

- connaître quel vent doit conduire le navire et, à l'opposé, le ramener, lorsqu'on connaît les longitudes et les latitudes des ports de départ et d'arrivée, donc les quatre coordonnées utiles. L'utilisation du tympan de navigation est ingénieuse, mais, ensuite, le raisonnement faiblit. Comment, en effet, admettre qu'un voilier de 1612 pourrait naviguer des milles et des milles, à cap constant, toujours vent arrière ? Morgard va jusqu'à présenter l'exemple d'une navigation, depuis le cap de Sainte-Hélène jusqu'aux îles du cap Vert (8 300 kilomètres) par vent constant de Sud-Est, malgré alizés et calmes plats équatoriaux (fig. 10)
- connaître la latitude du port de départ (qu'on ignore) alors qu'on connaît les trois autres coordonnées et le vent qui doit conduire le navire. Ici, le résultat est correct.
- connaître la hauteur (= latitude) où sont les navires, sans carte, ni Soleil, ni autre astre, mais en connaissant la hauteur du département (= port de départ), sa longitude, le vent qui conduira le navire et le nombre de lieues qu'il a déjà parcourues. À l'évidence, cette problématique a beaucoup tourmenté Morgard et il ne s'en est pas bien délivré. Ses quatre exemples s'appuient tous sur le dessin de sa page 65, repris ici, modernisé et, surtout, légendé et gradué (cf. fig. 11 page suivante). Si, géométriquement, la démonstration est correcte, sur la figure, on doit lui opposer deux objections invincibles :
 1. pourrait-elle être mise en application sur un navire perdu au milieu des *nuages, brouillards et autres empeschements*, sans qu'on y puisse prendre une hauteur d'astre ?

2. dans ses quatre exemples, Morgard choisit les caps 135 SE ou 315 NW qui sont les plus convenables pour son propos (avec ceux qui se situent encore plus près du Sud), mais si l'on généralise sa méthode (voir *Annexe 7*) on s'aperçoit qu'il faut choisir entre deux options : privilégier cap et latitude d'arrivée ou bien privilégier distance et latitude d'arrivée. Il n'est jamais possible de concilier les trois paramètres. Quelle que soit l'option retenue, la méthode de Morgard se révèle défailante. Et puis, on regrettera que le « merveilleux » pantocosme soit, ici, laissé au fond d'un tiroir, car il faut tracer le dessin *sur une tablette ou papier de telle grandeur qu'il en sera besoing!*

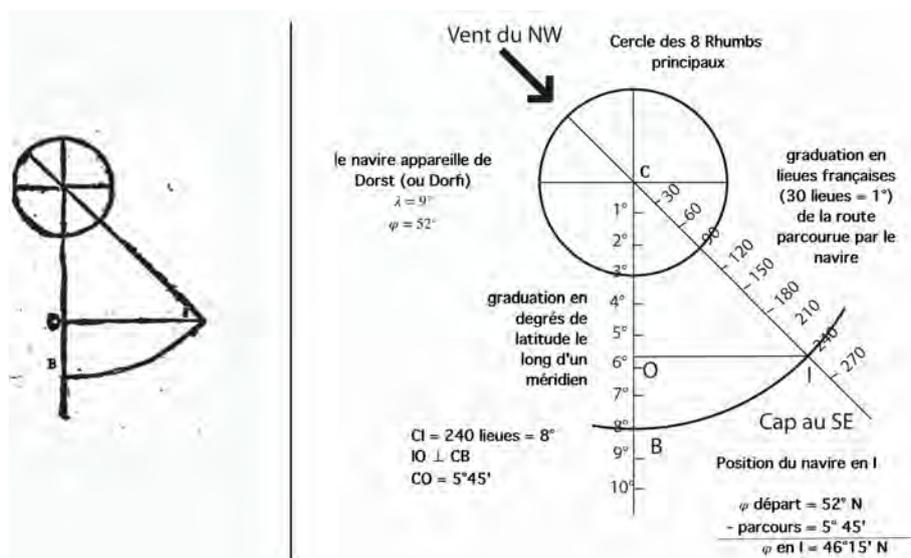


Figure 11 – Schéma de principe de la page 65 de l'ouvrage, et interprétation légendée.

On notera également que Morgard ne parle jamais de loxodromie et d'orthodromie. Souvent, il emploie l'expression *aller tout droit*, le vent qui conduira le navire *tout droit*. Même si, sur de courtes distances, on peut assimiler les deux routes, il y a une véritable faille dans le raisonnement de Morgard ; pourtant la carte de Mercator *ad usum navigantium* a été publiée en 1569 et le Pantocosme en 1612, quarante ans plus tard. Sur ce dessin de la page 65, la droite *CI* est une loxodromie puisqu'elle représente une route à cap constant ; mais il faut bien qu'elle soit aussi une orthodromie puisque Morgard la mesure en la rabattant sur le méridien ! D'où les incompatibilités tabulées en *Annexe*.

- les marées, Morgard ne peut pas s'empêcher d'exprimer son admiration devant le merveilleux du phénomène en terme très « moderne » : *car comme ainfi foit que la Lune soit éloignée par vn fi grand intervalle & distance de la terre & de l'eau, toutefois par vertu & efficace de foy & de fon mouuement & propriété, elle attire & rauift la grande mer oceane hors de ces termes...* Le problème est effectivement d'expliquer le lien qui existe entre le mouvement de la Lune et les marées sans avoir recours à la gravitation universelle (non encore découverte)... Morgard indique qu'il faut savoir quand les rayons de la Lune viennent toucher l'horizon du lieu, sans insister sur des relations de cause à effet, on le sent dubitatif. Cette explication d'ordre « lumineuse » qui est celle d'Aristote s'oppose à celle des astrologues qui parle d'« attirance » et qui a manifestement la préférence de Morgard. Au XVI^e siècle, il existait une théorie « aimantique » qui ne semble pas avoir atteint Morgard. Par ailleurs, à cette époque, on savait déjà distinguer

les influences de la Lune et du Soleil qui peuvent s'additionner (vives-eaux) ou non (mortes-eaux). La distinction entre ces cas de figure aurait facilement pu être intégrée dans l'usage du Pantocosme ; si Morgard ne l'a pas fait c'est probablement qu'il ignorait le phénomène, nouvel indice de sa grande ignorance des choses de la mer.

7 Astrologie

La façon dont Morgard parle de l'astrologie peut provoquer un certain étonnement car, à la fois, il veut montrer qu'il connaît le sujet, mais aussi qu'il évite de le traiter. À son époque, tous les astronomes sont aussi, plus ou moins, astrologues. Au minimum, ils savent conduire les calculs et les observations qui aboutiront à l'érection d'un thème astral, de nativité, par exemple, qui est un document scientifique. De nos jours encore, il en va de même et astronomes et astrologues travaillent sur d'identiques éphémérides. La science s'évanouit et fait place à la superstition lorsqu'on utilise l'horoscope pour composer des prédictions, des prophéties ou des analyses psychologiques, souvent à des fins mercantiles.

Voici quelques passages où Morgard relie ou oppose astronomie et astrologie.

- Dès sa page de titre, il s'intitule « P. Mathématicien ».
- Dans son *Épître au très-chrestien et florissant monarque de France et de Navarre, Louis treizième*, il signale que son instrument, s'il surpasse tous les autres instruments de mathématiques, fait aussi voir toutes les choses que peut remarquer un expérimenté astrologue en ses observations.
- Dans ses *Propositions* XI et XII, il annonce que la position de la Lune dans telle ou telle de ses 28 « mantions » journalières du zodiaque, revêt telle ou telle force pour la qualité de l'air et les affaires mondaines, mais qu'il se bornera à parler de l'air. L'air encore, mais aussi les maladies et autres accidents, sont influencés par la distance angulaire entre le Soleil et la Lune.
- Dans sa *Proposition* LII, il annonce qu'il lui a semblé très convenable de traiter des cieux, des étoiles et des planètes car, *par la connaissance d'iceux, il se fait non seulement de grandes spéculations par l'astronomie, mais aussi de grands effets* dont on juge par l'astrologie.
- Sa présentation, dans la *Proposition* LXIII, du système de domification de Regiomontanus (Mon-Royal), est purement astrologique et il s'en explique ainsi : *toutes les choses qui s'en peuvent dire appartiennent plus à l'Astrologie qu'à l'Astronomie ; c'est pourquoi, n'étant en ces propos, considérons seulement les mouvements*. On ne saurait être plus net : dresser un horoscope est travail scientifique ; en tirer des prédictions est autre chose.
- La même réserve est reprise dans la *Proposition* LXVII et, dans la LXVIII, il signale une interprétation usuelle, mais sans l'homologuer.
- En contrepoint de tout cela, qui reste assez mitigé et n'incline ni pour ni contre l'astrologie, nous trouvons, pour clore la partie du livre consacré à l'astronomie, l'ahurissante *Proposition* LXX que nous aurons plus loin à commenter et à illustrer. Elle affirme le déterminisme le plus complet sur le rôle invincible des astres dans le cours et l'évolution des maladies. L'astrologie s'impose au médecin ; d'avance, il sait si la maladie sera longue ou brève et si le patient guérira ou succombera. Morgard va même jusqu'à écrire qu'en certains cas (des cas certains !), la médecine fait plus de tort que de bien. Ah, si Molière avait lu Morgard. . .

On trouvera dans l'*Annexe 8* la liste des *Propositions* consacrées à des questions astrologiques, qu'elles soient purement astrologiques ou corrélées à des questions astronomiques. Mais, comme annoncé quelques lignes plus haut, nous voudrions nous arrêter quelques instants sur la *Proposition LXX* et en fournir une transcription en langage moderne... sans autres commentaires :

Proposition LXX : Astrologie médicale. Pas d'usage du Pantocosme (!) ; le médecin doit savoir dresser un thème.

1. il s'informerait des mois, jour et heure où le patient est tombé malade et il établirait son thème sur cette heure. Alors :
 - l'Ascendant et son seigneur signifierait le malade ;
 - la X^e maison et son seigneur signifierait la maladie ;
 - la IV^e maison et son seigneur signifierait la médecine ;
2. il considérerait la Lune en mettant l'index des jours critiques sur le jour de la conjonction passée et l'index lunaire sur le degré que possède la Lune.
3. il pronostiquerait ainsi :
 - (a) si la Lune actuelle est en quadrature (gauche ou droite) avec la Lune de conjonction
Ou
si elle est en opposition avec elle, mais en dehors de ses dignités essentielles (donc en Maison 6, 8 ou 12) le malade guérira, mais avec grandes difficultés. Toutefois, cas particulier : il mourra si le seigneur de l'Ascendant est débile, la médecine faisant, alors, plus de tort que de bien au malade.
 - (b) si la Lune se trouve dans la situation du (3a) ci-dessus, mais en ses dignités, le malade guérira, mais la maladie sera longue. Cela pourtant ne sera possible que si la X^e maison et son seigneur sont bien disposés.
 - (c) si le seigneur de l'Ascendant est en conjonction avec la Lune, en bon ou mauvais lieu, pourvu qu'ils soient forts, non rétrogradés ni brûlés, en signe muable ou non, le mal sera de courte durée.

8 Comput et science du calendrier

On connaît l'importance qu'avait, jusqu'au XIX^e siècle, la science du calendrier. À une époque où les calendriers imprimés et les almanachs ne devaient pas être très disponibles, il y avait une vraie nécessité à être capable de calculer soi-même les jours calendaires des débuts de mois, les dates des dimanches ou des fêtes religieuses mobiles dont, notamment, la fête de Pâques. Une partie importante du dos de son instrument, et les *Propositions* III à X, et XIII à XV, sont en relation avec ce type de problème. En utilisant le dos de l'instrument et l'index solaire comme une série de *volvelles*, Morgard définit et explique comment établir le « Nombre d'or », l'« Épacte », le « quatrième de Concurrence », et la « lettre dominicale ». À partir de ces valeurs, il explique comment répondre à l'ensemble des problèmes classiques de calendrier. Nous n'avons pas repéré d'erreur ou d'approximation grave dans cette partie. Signalons néanmoins que Morgard signale que le calcul du nombre d'or qu'il indique n'est valable que jusqu'en 1700 (*Proposition III*), ce qui limite *de facto* l'utilisation de sa méthode et de son instrument à cette date.

9 Topographie et Cartographie

Dans les *Propositions* CXVI à CXXII, Morgard propose des utilisations du Pantocosme dans ce que nous appellerions maintenant la topographie et la cartographie. Il s'agit d'usages très classiques des astrolabes planisphériques qui exploitent la partie « mesure » de l'instrument (mesure de la hauteur d'un bâtiment par exemple par visée à l'aide d'un index/alilade) et

le carré des ombres (calcul de la tangente ou de la cotangente). Le Pantocosme disposant de dispositifs équivalents peut donc être utilisé pour les mêmes usages (le carré des ombres correspond au cercle n° 11b). Cette partie du livre de Morgard n'apporte rien d'original.

10 Conclusions

Il apparaît clairement à l'issue de cette étude que N.-L. Morgard nous a proposé un instrument dérivé de l'astrolabe planisphérique. Les modifications sont conçues pour fournir des fonctions nouvelles que l'auteur considère comme indispensables à l'instrument universel de ses rêves. Clairement, le mot « universel » n'a pas, dans son esprit, le sens classique qu'il a en gnomonique : l'utilisation de beaucoup de fonctions est limitée à la latitude, voire la localité, de Paris.

Quel bilan peut-on tirer des modifications proposées ?

- l'abandon des tympans à almicantarats et azimuts prive l'astrolabe de ses fonctions gnomoniques (indications de l'heure). Il en résulte que Morgard est obligé de transformer son instrument en cadran équatorial. Mais, d'une part, le Pantocosme n'est pas muni d'un dispositif facilitant sa mise en station en position inclinée, et d'autre part il apparaît dans le texte que l'auteur n'a pas vraiment compris les propriétés du cadran équatorial.
- les transformations de l'astrolabe proposées par l'auteur s'accompagnent d'une série d'approximations dans le choix des systèmes de projection des sphères terrestre et céleste. Ces approximations, plus celles qui concernent la gestion chaotique des coordonnées célestes, impactent très fortement les résultats de nombreuses manipulations qui sont, au mieux, très approximatifs.
- l'adjonction, sur le dos, d'une série de volvelles relevant de la science du calendrier, permet le calcul de la longitude écliptique de la Lune moyenne. Contrairement à ce que laisse sous-entendre Morgard, il n'y a aucun moyen d'obtenir le même résultat pour les autres « planètes ». Le Pantocosme ne se suffit pas à lui-même pour dresser des horoscopes.
- les fonctions liées à la navigation, témoignent surtout des faibles compétences, voire de la naïveté, de l'auteur dans les choses de la mer. En pratique peu de choses peuvent être utiles dans ces chapitres.

Au final, le bilan est franchement négatif, rien de novateur, ou de pertinent, ne peut être extrait de l'ouvrage ou de la reconstitution de l'instrument. Pour autant, nous ne regrettons pas d'avoir réalisé cette étude ; elle témoigne tout d'abord, du (faible) niveau de compétence d'un des praticiens (sans doute parmi les meilleurs) de l'astrologie au début du XVII^e siècle. Elle témoigne aussi qu'en cette période charnière de l'histoire des Sciences, la notion de progrès, c'est-à-dire d'amélioration des procédures et des instruments, baignait déjà des larges fractions de la Société. Contrairement à ce qui se passait quelques décennies et siècles plus tôt, un modeste praticien de l'astrologie a pu se persuader que les principes et les instruments qu'il avait hérités des « Anciens » pouvaient être améliorés ! Sur le plan historique et sociologique, cela nous paraît fondamental. De ce point de vue, le Pantocosme constitue un témoin important qui mérite sans nul doute le temps que nous lui avons consacré.

Références

- [1] Drecker J. (1925) : *Die Theorie der Sonnenuhren*, vol. E of Bassermann J., *Die Geschichte der Zeitmessung und der Uhren*, Berlin,

- [2] Drévilion H. (1998) : *Lire et écrire l'avenir : L'astrologie dans la France du Grand Siècle, 1610-1715*, Champ Vallon Editions, 283 p.
- [3] Michel H. (1947) : *Traité de l'astrolabe*, (réédition de 1976, Alain Brieux éditeur, 202 p.).
- [4] Morrison J.E. (2007) : *The Astrolabe*, Janus ed. 438 p.
- [5] Turner A. J. (1985) : *Catalogue of the collection (of) the Time Museum*, Vol. 1, Part 1, Astrolabes (and) astrolabe related instruments. Time Museum ed. 268 p.

Liste des annexes

Annexe 1 : *Déclaration, instruction et usage du Pantocosme ou instrument universel concernant les observations aftronomiques, aftrologiques, cofmographiques, géographiques, maritimes, géométriques, chorographiques & autres.*

Annexe 2 : Les 6 planches de l'ouvrage reproduites à la même échelle.

Annexe 3 : Dossier de photos illustrant le montage du Pantocosme réalisé à l'occasion de cette étude.

Annexe 4 : Description / décryptage des différentes pièces de l'instrument.

Annexe 5 : Analyse de l'ouvrage, Proposition par Proposition.

Annexe 6 : Tableau des Propositions et des utilisations de l'instrument.

Annexe 7 : L'étrange navigation de N.-L. Morgard.

Annexe 8 : L'astrologie de N.-L. Morgard.

Annexes 9a à 9g : Quelques sources bibliographiques utilisées.

(Les annexes se trouvent dans la version numérique de Cadran Info)



Peut-on dater les astrolabes anciens par une méthode astronomique ?

par Éric Mercier

Trois méthodes astronomiques ont été proposées pour dater les astrolabes anciens. Dans cet article, je me propose d'établir les marges d'erreur qui sont inhérentes à ces méthodes :

- *la longitude du Périhélie, cité pour mémoire, est inutilisable ;*
- *la date de l'Équinoxe de Printemps, inscrite sur le calendrier au dos de l'instrument fourni une précision de l'ordre de ± 200 ans ;*
- *la position des étoiles sur l'araignée qui matérialise la Précession des Équinoxes, et qui donne un âge avec une précision de ± 50 ans, si l'on prend la peine de « filtrer » les étoiles selon un critère de « cohérence » et si l'on se limite à des groupes d'astrolabes particuliers (européens XVI^e siècle, maghrébo-andalous). Pour les autres groupes, la précision serait aussi de l'ordre de ± 200 ans.*

En pratique, plusieurs questions restent en suspend, et il est probable que, même dans les cas les plus favorables, l'âge calculé ne soit qu'une indication à confronter aux résultats d'autres méthodes (style, études métallurgiques...).

En utilisant les données astronomiques qui sont inscrites sur un astrolabe planisphérique, il est théoriquement possible de déterminer son âge. Il semble que ce soit Johann Schöner (1477 – Nuremberg 1547) qui est le premier, en 1525, à avoir essayé d'appliquer de telles méthodes sur un astrolabe islamique pour le dater (in Dekker 1992). Plus récemment des contributions importantes, comme celles de Gunther (1923), Michel (1947), Poulle (1956), Torode (1989 & 1992), Dekker (1992), et G. E. Turner (2003) ont repris cette question avec des conclusions souvent très réservées, voire franchement négatives.

Par ailleurs, il faut être conscient que sur le plan strictement scientifique, la question de la datation d'un astrolabe, ou de n'importe quel objet, n'a réellement de sens que si l'on prend la peine de fixer le degré de précision souhaité (ou la marge d'erreur admissible). Or ce problème de précision n'est jamais explicitement abordé par les auteurs qui se sont intéressés à la question ! On peut néanmoins se faire une idée en analysant le traité de Michel (1947) qui

est le plus complet sur cette question. Ainsi, cet auteur discute du *style pascal* (p. 133), qui était une manière de compter l'année datant du moyen-âge qui consiste à faire débuter l'année à la date de Pâques, et il conclut que *ce que nous appelons... 1^{er} Mars 1525 était encore millésimé 1524*. Le choix d'évoquer cette ancienne convention dans son ouvrage, et surtout l'endroit où il le fait : dans les premières lignes de son chapitre XIX sur la *Détermination de la date de construction d'un astrolabe*, suggère fortement que pour lui, et probablement pour les autres auteurs, l'objectif de précision est de l'ordre de l'année... Comme lui-même et la plupart des auteurs les plus récents le montrent de façon plus ou moins convaincante, cette ambition est totalement illusoire.

Mais, ce qui est présenté comme un échec ou une impossibilité dans la bibliographie, ne doit pas automatiquement condamner la méthode ; elle pourrait rester parfaitement pertinente à partir du moment où l'objectif de précision était revu à la baisse. Dans les lignes qui suivent, je vais présenter les trois approches astronomiques de datation envisageables et, contrairement aux auteurs précédents qui les ont testés, jugés et rejetés en ayant en tête des objectifs de précision irréalistes, je vais, sans *a priori*, essayer d'établir la précision qu'elles peuvent nous offrir. Puis, en fonction du résultat de cette évaluation, je tenterai de proposer une méthode astronomique opérationnelle de datation des astrolabes, en précisant, évidemment, l'ordre de grandeur de la précision que l'on peut attendre et les limites d'utilisation.

1 La longitude du Périhélie

Dans le système héliocentrique, le périhélie de la Terre est le point de son orbite qui est le plus proche du Soleil ; c'est aussi le moment de cet événement. De même, dans le système géocentrique (celui des astrolabes), le périhélie est le point de l'orbite du Soleil qui est le plus proche de la Terre ; et c'est le moment de cet événement. En pratique, le périhélie a lieu au même moment dans les deux systèmes (hélio & géocentrique) : en 2018 c'est le 3 Janvier vers 6 h. Comme la longitude du périhélie augmente d'environ $61,7$ d'angle chaque année, la lecture de cette valeur sur un astrolabe devrait permettre de le dater.

La longitude du périhélie peut, théoriquement être lue, sur l'arrière des astrolabes qui sont munis d'un calendrier civil excentrique. La figure 1 [page ci-contre](#) illustre le lien entre cette excentricité et la longitude du périhélie.

Selon Poulle (1956, p. 302-304), les évaluations de la longitude du périhélie et de sa dérive, étaient très mauvaises au moyen âge¹. À l'époque, même un astrolabiste précis et scrupuleux aurait été incapable de choisir une valeur de la longitude réellement représentative de la date de son travail. Par ailleurs, et en pratique, sur un astrolabe réel, il se révèle toujours impossible de localiser précisément le centre du calendrier civil (qui est rarement un cercle parfait) et donc de tracer la ligne des apsides et de mesurer correctement la longitude du périhélie. En conséquence de ces différents obstacles, aucun auteur n'a réellement essayé d'utiliser cette méthode pour dater un astrolabe : elle n'est présentée ici que par souci d'exhaustivité.

2 La date de l'équinoxe de printemps

La date des équinoxes est fixe si l'on se réfère à l'année tropique, mais si l'année du calendrier civil utilisée ne dure pas exactement une année tropique, la date des équinoxes va

1. La première valeur correcte de la longitude du périhélie fut établie par Kepler en 1609 (Simon, 2007) et la valeur de la variation séculaire fut déduite des travaux de Newton au XVIII^e. Lors de ces découvertes, les astrolabes étaient déjà passés de mode.

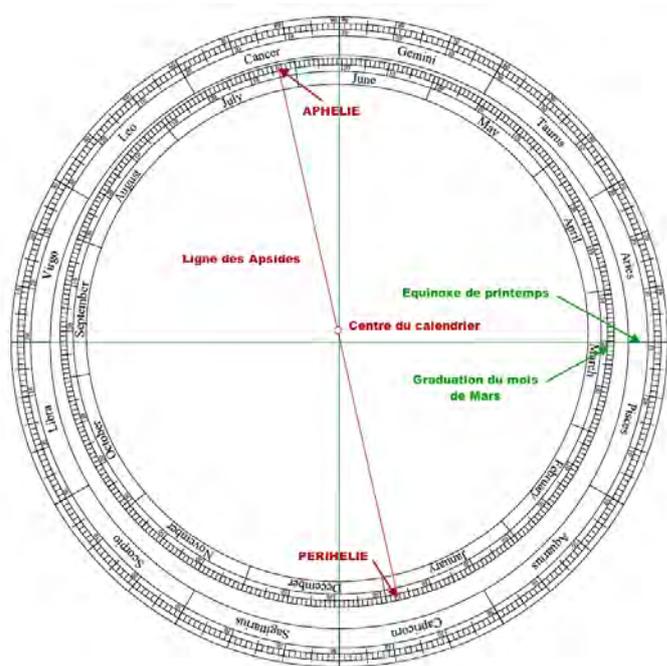


Figure 1 – Les calendriers à l’arrière d’un astrolabe contemporain avec (1) illustration des relations théoriques entre les centres des calendriers civil et zodiacal, le tracé de la ligne des apsides et la longitude de périhélie (inspiré de Morrison 2007); (2) la position de l’équinoxe de printemps et la graduation correspondante sur le calendrier civil.

dérivée au fur et à mesure des années. C’est notamment le cas avec le calendrier Julien qui fut de tout temps utilisé par les gnomonistes musulmans et qui avait cours en Europe au moins jusqu’à la renaissance². Comme on le constate sur la figure 1, si un astrolabe est muni d’un double calendrier (Zodiacal et Julien), on peut y lire la date de l’équinoxe de printemps et, théoriquement, en déduire la date de sa fabrication

C’est notamment l’opinion de Gunther (1923, p. 187) qui affirme : *L’époque de la construction est précisément indiquée par le jour du mois de l’équinoxe de printemps (vernal) quand le Soleil rentre dans le premier degré du Bélier (Aries)*. Michel (1947) a une vue beaucoup plus nuancée ; en pratique, plusieurs difficultés apparaissent :

1. Tout d’abord un problème de lecture. La figure 2 page suivante va me permettre d’illustrer ce problème. La flèche, permettant de dater l’équinoxe sur cet extrait de calendrier, indique 12,5. On pourrait penser que cela veut dire que l’événement date du 13 du mois³ en milieu de journée. Après l’avoir présenté, Michel (1947) affirme que cette conclusion est erronée et que le trait 12, dans notre exemple, indique le début du 12 du mois.
2. Une fois cela admis, reste à savoir si 12,5, par exemple, correspond à des jours civils qui commencent à minuit, ou des jours astronomiques, qui commencent à midi. Selon les cas, la graduation 12,5 indiquerait, en jours civils, le 12 à midi, ou le 12 à 0 h. La encore Michel (1947) est formel et ce sont les jours astronomiques qu’il faut considérer.

Ces incertitudes d’une journée ou d’une demi-journée dans la lecture de l’heure de l’équinoxe ne sont pas négligeables car elles engendrent une erreur de, respectivement, 128 ou 64 ans dans la datation de l’instrument. Ces erreurs peuvent même se cumuler. On doit donc s’interroger sur les arguments de Michel (1947). En fait, ils apparaissent assez faibles. Son principal argument (seul ?) est que le traité de Stoeffler de 1512 (*Elucidatio fabricae ususque astrolabii*)

2. Le passage au calendrier Grégorien eu lieu en 1582 dans les pays catholiques et au cours du XVIII^e ou du XIX^e siècle dans les autres.

3. En effet, il n’y a pas de jour « 0 » dans un mois, et que dès que l’on a dépassé la première graduation qui représente la fin du premier jour, on est dans le second etc...

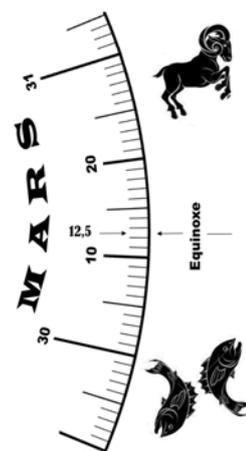


Figure 2 – Exemple de la correspondance sur le dos d’un astrolabe d’un calendrier zodiacal et d’un calendrier civil. Ici l’équinoxe de Printemps correspond à la graduation 12,5 du mois de Mars, ce qui peut correspondre dans le calendrier civil et selon les auteurs, au 12 Mars à 0 h (Michel 1947), le 12 Mars à midi (Gunther 1923, 1932), ou le 12 Mars à minuit (Poulle 1956) (voir texte).

affirme expressément les deux premiers postulats. Mais ce traité était-il aussi suivi que cet auteur le prétend ?

3. L’année Julienne dure en moyenne 365,2500, et l’année tropique : 365,2422 jours. C’est ce décalage qui engendre la dérive de la date de l’équinoxe. Mais dans la réalité, on assiste, dans le calendrier Julien, à une succession de 3 années de 365 jours, pendant lesquels la dérive est très importante, puis d’une année de 366 jours (année bissextile), qui compense en grande partie, mais pas complètement, les trois dérives annuelles précédentes. La figure 3 extraite de Michel (1947) illustre le phénomène.

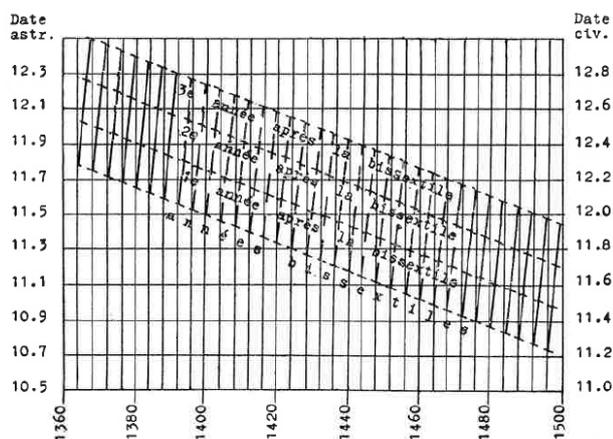


Figure 3 – Illustration de la variation de la date de l’équinoxe de printemps dans le calendrier Julien pour la période 1360-1500. On note deux phénomènes : une variation rapide sur des cycles de 4 ans (3 années normales + une année bissextile) et une dérive lente et séculaire due à la différence de durée entre l’année tropique et l’année Julienne.

Michel (1947) postule que les astrolabistes anciens tenaient compte scrupuleusement de ces importantes fluctuations annuelles pour fixer la date de l’équinoxe sur leur instrument. Si cela est vrai, on constate que la connaissance de la date inscrite sur l’instrument ne permet de fixer son âge qu’à l’intérieur d’un intervalle de 95 ans⁴. Ce qui dépasse largement les objectifs de précision de l’auteur. Par contre, si sa supposition est fautive, et Michel ne l’envisage pas, on peut penser que les astrolabistes utilisaient une « date moyenne » de l’équinoxe de printemps ; dans ce cas on pourrait espérer que la marge d’erreur n’est pas trop importante et qu’une datation est possible.

4. Par exemple, Michel (1948) indique que la date de l’équinoxe de printemps relevée sur un astrolabe de la collection Max Elskamp convient à bon nombre d’années, depuis 1080 jusqu’à 1175. Il précise néanmoins que cet intervalle de 95 ans est une *indication*.

4. Par ailleurs, l’auteur souligne que l’équinoxe est un événement astronomique qui est donc perçu à des heures différentes selon la longitude du lieu. Cela engendre une nouvelle incertitude qui correspond à plusieurs heures dans la date de l’équinoxe (et donc plusieurs années dans l’âge) selon que l’astrolabe a été conçu à Bagdad, Prague ou Paris. . .

Poulle (1956) nous dit que *certaines points de la démonstration . . . (de Michel (1947)) . . . ayant paru peu satisfaisants, il n’est pas inutile de la reprendre . . .* Par ailleurs, il considère que l’on ne peut pas réaliser un astrolabe précis sans manuscrits corrects. Il choisit donc de ne s’intéresser qu’aux manuscrits, ce qui a l’avantage de s’affranchir des erreurs de report et des problèmes de précision lors de la réalisation matérielle de l’instrument. Dans un premier temps, il valide l’opinion de Michel (1947) selon laquelle les jours indiqués sur le calendrier sont des jours astronomiques. Puis, en s’appuyant sur le manuscrit de Andalo di Negro (mort en 1334), il affirme dans un paragraphe particulièrement obscur que *les traits de la graduation des mois marquent la fin des jours astronomiques qu’ils représentent*. La graduation 12,5 de notre exemple (*cf.* fig. 2 page ci-contre) qui est la même que celle de son exemple, correspond donc à 0,5 jour avant la fin du 13 Mars astronomique, soit le 13 Mars à 12 h astronomique, ou encore le 13 Mars à 0 h civil⁵. Cette manière de compter introduit un décalage de 24 h (soit 128 ans en termes d’âge de l’instrument) avec celle de Michel (1947). Mais cette confusion dans la lecture du calendrier paraît presque anecdotique quand on lit la suite de la démonstration de Poulle (1956). En effet celui-ci nous montre, à l’aide de nombreux manuscrits, que la détermination de la date de l’équinoxe était très problématique pendant le Moyen-Âge européen et donc que les astrolabistes n’avait aucune chance de disposer de dates précises⁶. La vision un peu idyllique de Michel (1947) selon laquelle les astrolabistes anciens tenaient compte scrupuleusement des variations de la date de l’équinoxe pour dessiner leur instrument apparaît comme complètement irréaliste.

Comme nous le voyons, Poulle (1956) s’oppose à Michel (1947) sur de nombreux points mais ils s’accordent pour considérer que la date de l’équinoxe ne peut pas être une méthode fiable pour déterminer l’âge d’un astrolabe.

G. E. Turner (2003) a repris ces éléments⁷ dans un article qui cite beaucoup, et qui doit beaucoup, à Poulle (1956) et surtout à Michel (1947). Il s’agit en fait de la mise à la disposition des lecteurs anglophones de ces travaux publiés en langue française. L’intérêt principal de cet article est que, pour la première fois, on assiste à une vraie tentative d’évaluer la marge d’erreur de la méthode. En effet, l’auteur compare l’âge calculé en utilisant la proposition de Gunther (1923)⁸ avec l’âge effectivement inscrit sur l’instrument : des erreurs dépassant deux siècles et demi apparaissent et la moyenne de l’erreur s’établissant vers 95 ans. À mon avis, cette tentative ne clos pas le débat pour plusieurs raisons :

- l’âge calculé est très dépendant de la lecture des graduations et sur ce point, la méthode de Gunther (1923, 1932) diffère sensiblement de celle de Michel (1947) qui diffère elle-même de celle de Poulle (1956).

5. C’est-à-dire, comme il le dit dans la suite de sa démonstration, le 13,5 Mars (astronomique) soit 12,5 après le début du mois de Mars (astronomique).

6. À ma connaissance, ce travail d’évaluation de la connaissance de la date de l’équinoxe précise, année après année, dans le monde musulman reste à faire.

7. En fait, l’auteur mentionne uniquement comme source d’incertitude l’ambiguïté jour civil / jour astronomique (en signalant que Gunther (1923, 1932) retient le jour civil), le cycle de 4 ans et l’imprécision historique de la date de l’équinoxe. Les autres sources d’incertitude (problème d’interprétation des graduations et question de la longitude) ne sont pas mentionnées.

8. C’est-à-dire en considérant que les graduations correspondent à des jours civils et que la date choisie par l’astrolabiste est celle de l’équinoxe moyen.

- l'œuvre de Gunther (1932) est une compilation de sources très différentes, l'homogénéité des données n'est absolument pas garantie.
- l'impasse est faite sur les astrolabes musulmans.

Dans les lignes qui suivent je me propose de compléter cette analyse en m'abstenant de choisir une méthode de traduction graduation/date de l'équinoxe, en sélectionnant des sources plus homogènes et qui concerne des astrolabes plus variés. J'ai donc choisi, comme échantillon⁹ pour cette analyse, la collection d'astrolabes du Adler Planetarium & Astronomy Museum de Chicago (APAM), remarquablement illustrée dans les catalogues (Pingree (2009) et Webster & Webster (1998)). Les astrolabes maghrébo-andalous de l'ancien Time Museum (TM) (Turner 1985) ont été ajoutés dans l'échantillon.

La figure 4 illustre cette analyse¹⁰ ; on constate :

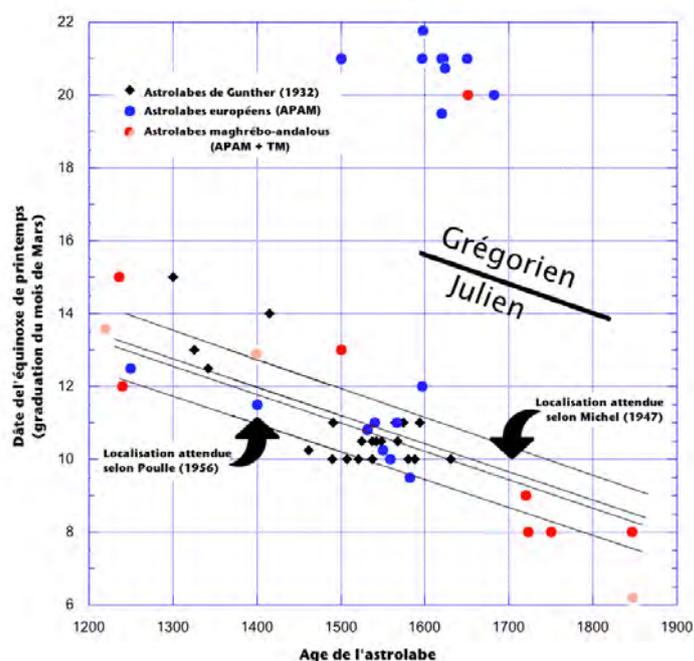


Figure 4 – Relation entre la date de fabrication inscrite sur des astrolabes et la graduation du mois de Mars correspondant à l'équinoxe de printemps. Les positions attendues, qui dépendent des conventions de lecture des graduations sont indiquées par les bandes obliques pour Michel (1947) et Poulle (1956) (la bande représentant la convention utilisée par Gunther 1923, 1932 serait située au milieu des deux autres). Les astrolabes illustrés correspondent à la liste de Turner (2003) d'après Gunther (1932), et à ceux des catalogues de Webster & Webster (1998) et Pingree (2009 ; complétés par A. J. Turner (1985) pour les astrolabes maghrébo-andalous). On note le passage du calendrier Julien au calendrier Grégorien des astrolabes européens à la fin du XVI^e siècle (l'astrolabe de 1500 est probablement mal daté) et la pérennité du calendrier Julien sur la plupart des astrolabes maghrébins.

9. Le catalogue international de Gibbs et al (1973) aurait pu fournir un plus vaste échantillon (la colonne 7 de la check-list donne la graduation de l'équinoxe), mais j'ai considéré que l'homogénéité des données n'était pas non plus garantie.

10. Les auteurs des catalogues de l'APAM, donnent la date de l'équinoxe. Mais l'analyse des photos correspondantes montre qu'ils se sont contentés de transcrire directement les graduations en date sans pratiquer de corrections comme celle de Michel (1947) et Poulle (1956). Les dates indiquées dans les catalogues correspondent donc bien aux graduations sur l'instrument.

- les données issues de l'APAM ne sont pas significativement différentes de celles extraites de Gunther (1932) par Turner (2003).
- les derniers astrolabes européens utilisent le calendrier grégorien (à partir de la fin du XV^e siècle).
- par contre l'usage du calendrier Julien perdure sur les astrolabes musulmans¹¹ jusqu'au XIX^e siècle.
- la position réelle des points sur le graphique est très éloignée des positions attendues qui sont représentées par les deux bandes obliques (voir fig. 3 page 70). Le décalage de la valeur d'une graduation de ces bandes correspond à la différence de conception de Michel (1947) et Poulle (1956), sur la manière de lire la date de l'équinoxe sur l'astrolabe¹².

On ne peut donc que constater que l'incertitude dans l'âge d'un instrument tiré de la lecture de la date de l'équinoxe de printemps dépasse très largement l'incertitude prévue par Michel (1947), c'est-à-dire 95 ans. Elle est de l'ordre d'au moins trois siècles, voire quatre ! (voir fig. 4 page précédente).

3 La position des étoiles de l'araignée

Convaincu que la date de l'équinoxe de printemps ne résoudra pas le problème de la datation des astrolabes anciens, Michel (1947) fonde beaucoup d'espoir dans l'analyse de la position des étoiles de l'araignée. Cette position, qui est fixe, quelle que soit la latitude pour laquelle l'instrument est prévu, varie par contre en fonction de la date de fabrication de l'instrument, du fait de la précession des équinoxes.

La *précession des équinoxes* est relative à la fluctuation séculaire (cycle de 27 788 ans) de l'axe de rotation de la Terre par rapport au plan de l'écliptique. Comme on le constate sur la figure 5 page suivante, cette fluctuation affecte l'équateur céleste et son intersection avec le plan de l'écliptique. Cette intersection constitue un repère astronomique fondamental : le point γ . Ce repère est donc amené à parcourir tout l'écliptique (360°) en 27 788 ans. Comme, quel que soit le système de coordonnées utilisé (longitude et latitude écliptique, ou ascension droite et déclinaison) la position des étoiles est donnée par rapport à ce point γ , le déplacement de ce repère sur l'écliptique induit un mouvement apparent des étoiles parallèlement à l'écliptique.

En théorie l'état du ciel représenté sur une araignée, et notamment la position des étoiles par rapport au point γ , devrait donc permettre, par comparaison avec l'état actuel, de fixer l'ancienneté (âge) de l'instrument. Mais ici, et contrairement aux deux méthodes précédentes, il ne s'agit pas de lire un chiffre sur l'astrolabe, mais au contraire des dizaines... chaque étoile de l'araignée pouvant potentiellement fournir un âge (correct ou erroné). Face à cette masse de données, et surtout aux calculs complexes nécessaires pour exploiter celles-ci alors que l'informatique n'est même pas encore un rêve, Michel (1947) va proposer 3 stratégies dont deux visent à minimiser les calculs :

1. utiliser la *longitude écliptique* dont les variations sont en relation linéaire avec la précession et donc avec l'âge. En pratique, une lecture facile est précise de ce paramètre n'est possible que pour des étoiles très proches de l'écliptique. C'est le cas de *Régulus*, et dans une moindre mesure de *Spica* de la Vierge (fig. 6 page suivante). Leurs longitudes écliptiques peuvent être mesurées directement sur les graduations de l'écliptique et

11. Il ne s'agit en fait que d'astrolabes de l'occident musulman. Comme le signalait déjà Michel (1948), ces astrolabes se distinguent de leurs homologues orientaux par la présence d'un calendrier solaire (Julien) au verso.

12. La conception de Gunther (1923) serait représentée par une ligne située entre les deux bandes.

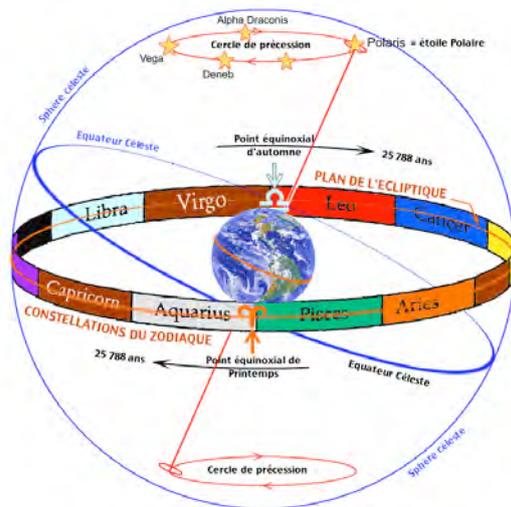


Figure 5 – Schéma géo-centré expliquant les causes et les effets de la précession des équinoxes (voir texte). Les positions et les relations entre les armilles sont celles de la période actuelle.

comparées aux données actuelles. Mais comme le souligne l’auteur, il est dangereux de se contenter d’une ou deux étoiles car rien ne garanti qu’elles aient été bien placées.

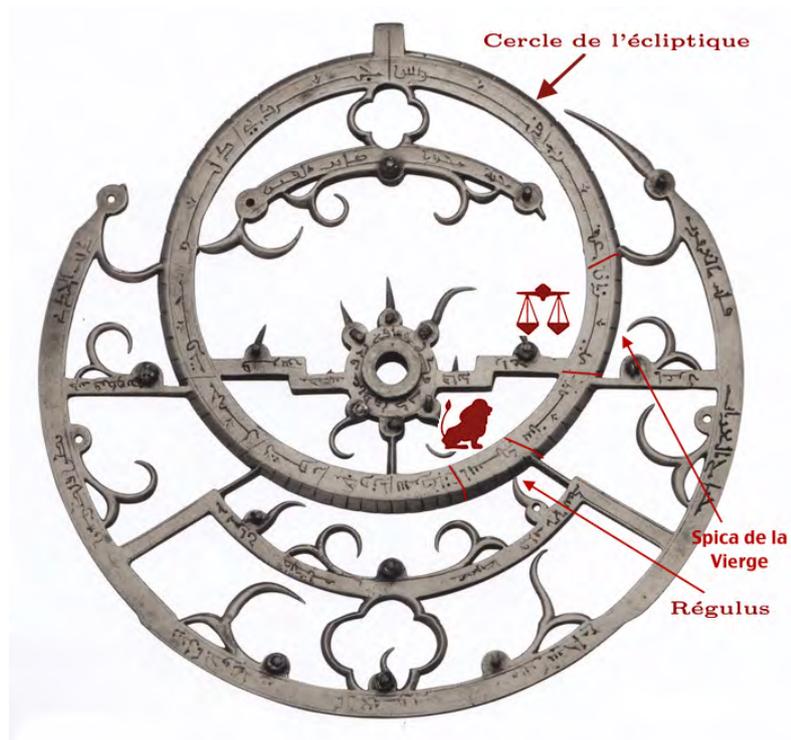


Figure 6 – Exemple d’une araignée andalouse de 1240 (Pingree 2009), *Régulus* et *Spica* sont près de l’écliptique et leur longitude écliptique peut directement être lue sur les graduations de cette dernière. Actuellement ces étoiles seraient situées respectivement à la fin du Lion et dans le dernier $\frac{1}{3}$ de la Balance.

2. utiliser l’*ascension droite* des étoiles qu’il est facile de mesurer sur un astrolabe. Bien que la variation de l’ascension droite puisse, en pratique, être considérée comme en relation linéaire avec la précession, cette relation diffère selon les étoiles. Cela nécessite un calcul supplémentaire assez lourd. D’un côté, Michel (1947) propose de n’appliquer la procédure que sur quelques étoiles sélectionnées, et il n’en utilise que quatre dans son exemple, mais d’un autre côté, il ne prend pas la peine de détailler le calcul complet car, et il le dit, c’est la troisième méthode qui a sa préférence.

de l'équinoxe, Michel (1947) ne fait aucune allusion aux manuscrits anciens et postule que les astrolabistes connaissaient et utilisaient la date exacte, selon les critères actuels, de l'équinoxe de l'année. . .

- Toutes les considérations de Michel (1947) sur l'utilisation de la médiation sont mathématiquement et astronomiquement fausses comme l'a démontré d'Hollander (1999, p. 46 à 51, 113). La figure 7 va nous permettre d'illustrer graphiquement l'erreur qui consiste à considérer qu'il y a la même relation linéaire entre la médiation et la précession qu'entre la longitude écliptique et la précession, ainsi que le prétend Michel (1947). Si, suite à la précession, l'étoile (Et) se déplace vers le colure des solstices parallèlement à l'écliptique ; et comme les points PE et P sont fixes, on conçoit que la forme du triangle sphérique (Et, M, X) va changer. Notamment l'arc (XM) va diminuer pour devenir égal à 0 si l'étoile atteint le colure. En d'autres termes, mA augmente plus vite que λ ; la relation qui les lie à la précession ne peut donc pas être la même (CQFD). On trouvera dans d'Hollander (1999, p. 46 à 51) les démonstrations complètes et les relations correctes.

Poulle (1956), fidèle à sa stratégie de n'envisager que les manuscrits, souligne les nombreuses erreurs de recopiage et/ou de calcul de précession dans ceux-ci. Il donne notamment l'exemple de tables d'étoiles qui ont été établies à 150 ans d'écart en utilisant la même valeur de la précession¹⁴. Dans ces conditions, il exprime de forts doutes sur le fait que les astrolabistes aient pu construire des instruments avec des positions correctes d'étoiles ; et donc il doute de la possibilité d'utiliser ces positions pour dater les astrolabes. Il est à noter que ni lui, ni aucun médiévaliste avant Stautz (1996), n'ont pris la peine de vérifier la précision effective des instruments qui nous sont parvenus !

Torode (1989 & 1992) a repris le travail de Michel (1947), mais, contrairement à ce dernier, il va calculer un âge à partir de l'ensemble des étoiles de l'araignée. En fait et selon ses propres termes : *Michel ne pouvait pas anticiper que les ordinateurs allaient rendre facile la prise en compte de toutes les étoiles d'un astrolabe*. Sa procédure est la suivante : grâce à une grille arbitraire centrée sur le centre de l'araignée, il calcule, au 0:1 près¹⁵, les coordonnées équatoriales de tous les index de l'astrolabe. Comme il ne sait pas lire l'arabe et qu'il avoue de grandes difficultés avec l'écriture gothique et ses abréviations, il *cherche* le nom de l'étoile la plus vraisemblable selon la position de l'index sur l'astrolabe. Puis il transporte ces coordonnées dans le repère écliptique. La différence entre la longitude calculée et la longitude actuelle de l'étoile (celle qu'il a attribuée au pointeur), lui permet de calculer un âge pour chaque étoile. Il réalise ensuite la moyenne de ces âges après avoir exclu les âges extrêmes, manifestement aberrants. C'est cette moyenne qu'il attribue à l'astrolabe.

Cette procédure appliquée à 170 instruments dont on connaît par ailleurs l'âge donne des mauvais résultats et suggère une fourchette précision de l'ordre de 400 ans (fig. 8 page suivante).

Ce travail n'est pas à l'abri de critiques. La plus importante concerne l'attribution des noms d'étoiles en *devinant*, selon leurs positions, celles qu'avait voulu indiquer l'astrolabiste. De très nombreux exemples d'erreurs très importantes concernant des positions d'étoile (Stautz 1996, d'Hollander 1999, Mercier 2018. . .) montrent qu'utiliser ce genre de procédure ne peut

14. Dekker (1992) signale, en citant Kunitzsch (1980), des tables arabes ayant plus de 250 ans d'écart mais qui utilisent la même valeur de la précession. Le problème signalé par Poulle (1956) n'est donc pas spécifique au Moyen-Âge européen.

15. Cette prétention paraît étrange car, inversement, il insiste sur la précision relative de ses mesures du fait de la difficulté à fixer précisément l'origine des mesures (c'est centre de rotation de l'araignée qui est souvent usé et déformé par l'usage) et l'échelle servant à la mesure de la déclinaison (qui nécessite de connaître précisément la position d'un tropique ou de l'équateur sur l'araignée, ce qui est souvent très difficile).

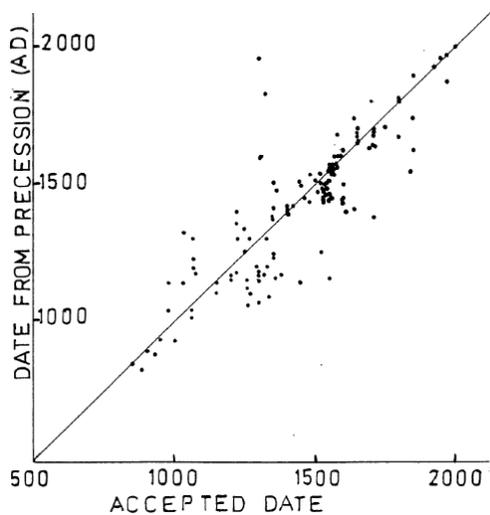


Figure 8 – Corrélation entre les âges de 170 astrolabes et les âges calculés selon la procédure de Torode (1989 & 1992). (Torode 1992).

que conduire à des erreurs d'attribution¹⁶ et par là, à des erreurs d'âge qui vont finalement peser sur le résultat final¹⁷. Par ailleurs, et comme pour Michel (1947), on peut regretter une procédure pour le moins rustique d'élimination des étoiles mal placées. La procédure proposée revient à éliminer les étoiles qui ont une longitude écliptique aberrante, alors qu'il faudrait aussi éliminer celles qui ont une latitude fautive car, dans ce cas un fort soupçon devrait peser aussi sur la longitude, même si, en première analyse, elles peuvent faire illusion.

16. Kunitzsch (2005) condamne également cette méthode.

17. Le travail de Torode (1989) a donné lieu à une critique extrêmement violente de Dekker (1992) et qui commence de la façon suivante *cet auteur a tellement échoué dans son approche historique que je me sens contrainte de démontrer que cet article aurait mieux fait d'être ignoré (par la revue qui l'a publié)*. Notons que King (1993) et Kunitzsch (1993), grands spécialistes de l'astronomie arabo-musulmane, semblent valider l'opinion globale de Dekker. D'Hollander (1999, p. 113) va dans le même sens en citant Dekker (1992), mais quelques années plus tôt (D'Hollander 1995), il avait apparemment utilisé la méthode de Torode (1989, 1992) dans son étude de l'Astrolabe dit *Carolingien* de l'Institut du Monde Arabe (voir Mercier 2017). Voyons l'argumentaire utilisé dans le réquisitoire de Dekker. Tout d'abord, il semble y avoir un quiproquo sur le travail de Torode, du moins tel qu'il l'a présenté en 1989 ; son article de 1992 (déposé en Sept. 1990 et accepté en Janv. 1991), et notamment la figure reproduite ici (fig. 8), montre qu'il ne prétend pas avoir mis au point une procédure opérationnelle et qu'il considère que des travaux plus fins sont encore nécessaires. C'est pourtant ce que lui reproche Dekker en regrettant qu'il n'ait pas respecté la règle selon laquelle toute nouvelle méthode doit être validée avant d'être publiée. Ensuite, la procédure fantaisiste de *reconnaissance* des étoiles de Torode est signalée sans être critiquée. La critique viendra quelques pages plus loin, mais elle restera très modérée par rapport au ton général de l'article. Par contre, Dekker s'acharne sur sa tentative d'identifier et d'éliminer certaines étoiles à position aberrantes. Elle va jusqu'à lui conseiller de reprendre les bases élémentaires des statistiques, conseil qui, à mon avis, pourrait lui être retourné. La suite de l'argumentaire de Dekker correspond à un long texte érudit mais confus, au moins en partie inspiré de Poulle (1956) et visant à démontrer que :

- on ne peut pas utiliser la valeur moderne de la précession pour calculer un âge car les anciens utilisaient des valeurs différentes ;

- il y a beaucoup d'erreurs dans les tables d'étoile des manuscrits ;

- et donc par voie de conséquence, la position des étoiles sur un astrolabe ne peut pas nous renseigner sur son âge.

Je reviendrai en conclusion de ce travail sur cet argumentaire. Mais d'ores et déjà, on peut constater que sur le fond, il n'y a rien de nouveau et que les critiques de Dekker (1992) auraient très bien pu être faites à Michel (1947) ... ce que Emmanuel Poulle a fait d'ailleurs, mais de façon plus policée, dans son texte de 1956, mais aussi en 1977 à l'occasion de la ré-édition (sans modifications) de l'ouvrage d'Henri Michel : il sera juste un peu plus incisif, notamment quand il évoquera « les méthodes de datation des astrolabes » qui sont « contestables » (Poulle 1977).

Ces deux critiques de fond doivent à mon avis, nous conduire à relativiser les mauvais résultats de la fig. 8 [page précédente](#) et à réenvisager le problème.

Selon Torode (1992) les astrolabes maghrébo-andalous (*Moorish*) ne s'en sortent pas mieux que leurs homologues plus orientaux ou européens (exclusion faite des instruments du XVI^e siècle). Or, j'ai montré (Mercier 2018), qu'à l'intérieur du premier groupe au moins, on pouvait distinguer les étoiles mal placées, qui au cours de siècles sont curieusement toujours les mêmes, et les étoiles généralement bien placées. À ce stade du raisonnement on doit donc soupçonner que ce sont les étoiles mal placées, qu'il est possible d'identifier, et les erreurs d'identification, qui dégradent la corrélation de la fig. 8. C'est cette idée que je vais maintenant essayer de tester dans la seconde partie de cet article.

4 Nouvel essai de détermination de l'âge des astrolabes planisphériques

La méthode de Torode (1989 & 1992) consiste donc, en première approximation, de calculer un âge pour chaque étoile de l'araignée, et de faire la moyenne de ces valeurs pour trouver l'âge de l'astrolabe. Sur le fond, c'est une idée intéressante ; la méthode de datation que je propose ne va différer que par des détails qui découlent de mes critiques précédentes ; notamment, je ferai en sorte que :

- les seules étoiles utilisées sont celles qui sont identifiées par une mention sur l'instrument ; il n'est pas question de deviner les noms des étoiles selon leurs positions.
- les seules étoiles utilisées sont seulement celles qui ont, sur l'araignée, une latitude écliptique correcte ¹⁸.

Les étapes de la méthode sont décrites dans les figures 9 et 10 ¹⁹.

Un des points critiques de la méthode réside dans la superposition de l'image de l'araignée avec celle de la modélisation. Cette superposition doit être réalisée avec beaucoup de soin. Or, nous avons vu que souvent une étape supplémentaire nécessitait d'avoir recours à une image de l'astrolabe complet (voir fig. 9 [page ci-contre](#)) de façon à « caler » l'équateur ou les tropiques avec l'araignée. La précision de ce calage supplémentaire nous échappe totalement dans la mesure où elle dépend du placement, lors de la prise de vue, du tympan par rapport à l'araignée et donc au final à de l'usure du trou central. En absolu, il serait donc préférable de travailler sur des astrolabes réels plutôt que sur des photos pour maîtriser cette incertitude. Par ailleurs, une grande précision est également nécessaire lors de l'analyse des pointés. En pratique cela nécessite des photos de très bonne qualité, nettes et ne présentant que des aberrations géométriques minimums.

Cette méthode essentiellement graphique est très proche de celle proposée, avant l'âge de l'informatique, par Price (1955 p. 249). À l'appui de sa proposition, Derek J. Price soulignait déjà qu'une méthode graphique avait l'énorme avantage de permettre d'éliminer les étoiles mal placées, ou dont l'index était déformé. Il semble qu'il ait utilisé systématiquement cette

18. Les tables d'étoiles des traités anciens utilisent généralement comme coordonnées la médiation et la déclinaison, voire l'ascension droite et la déclinaison. Toute erreur de copie sur un seul des deux termes du couple de coordonnées utilisé, va se traduire, sur l'instrument, par une altération à la fois de la longitude et de la latitude écliptique. Je considère donc ici, qu'une erreur sur la latitude écliptique (facilement détectable sur l'araignée) constitue un indice important d'altération de la donnée originale.

19. On remarquera que la précision de la lecture des âges par étoile est très variable (20 à 100 ans) selon la distance au pôle . . . Par ailleurs, l'erreur de latitude admissible pour considérer, ou non, une étoile dans le calcul de l'âge est totalement empirique. La *reproductibilité* de l'âge calculé de l'instrument n'est donc pas absolue.

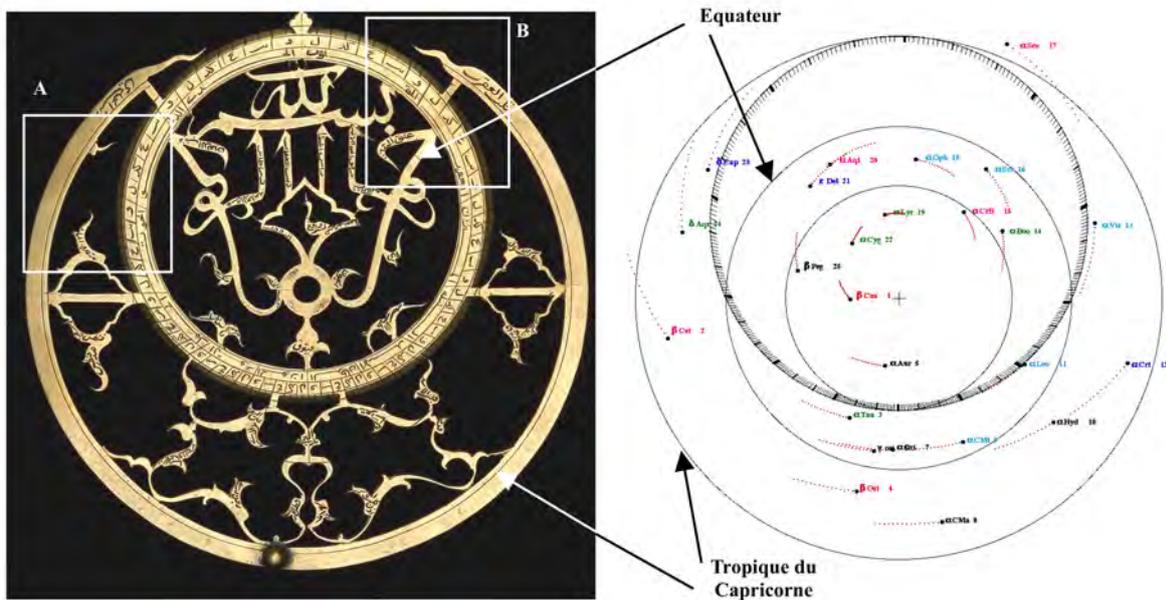


Figure 9 – Exemple d’utilisation de la méthode proposée sur l’astrolabe n° 45509 du Musée d’Histoire des Sciences d’Oxford. Il s’agit d’un instrument Perse, daté de H 1093 (1682 J.C.) et signé par Qāsim ‘Alī Qā’inī. Le catalogue en ligne inventorie la liste des étoiles reconnues sur l’araignée (voir fig. 10 page suivante). On constatera que de nombreux index de l’instrument n’ont pas été formellement identifiés. . . Les étoiles identifiées, et elles seules, sont intégrées dans un logiciel qui dessine les positions possibles de ces étoiles de 500 à 2000 J.C. avec un incrément de 100 ans. Les deux images (araignée et modélisation) sont ramenées à la même échelle et superposée (fig. 10). Dans le cas présent, cette étape ne pose pas de problème car l’équateur et le tropique du Capricorne sont indiqués sur l’araignée. Mais cela est assez rare et il faut souvent passer par une étape supplémentaire qui est de calculer l’échelle de la modélisation à partir d’une photo complète de l’astrolabe : l’équateur et au moins un des tropiques étant presque toujours gravés sur les tympan (voir discussion dans le texte).

méthode pour proposer un âge approximatif aux astrolabes non datés de son *International Checklist* de 1955. Je n’ai pas retrouvé d’indice d’une utilisation ultérieure de cette méthode ; notamment, il semble que la version suivante de l’*International Checklist* (Gibbs et al 1973) ne fasse que reprendre les évaluations anciennes de Price (1955) sans appliquer la méthode aux astrolabes nouvellement intégrés dans la liste.

5 Résultats (préliminaires)

Pour tester la méthode proposée, j’ai recherché des jeux de photos de bonne qualité²⁰ d’astrolabes bien datés, et disposant d’une liste d’étoiles publiée. Le catalogue en ligne du Museum of History of Science (Oxford)²¹ m’est apparu comme étant, de loin, la source la mieux adaptée à ce test. Ce catalogue recense 140 instruments de toutes époques et de toutes origines, dont 19 répondent aux critères recherchés. J’ai donc appliqué la méthode proposée sur

20. Les photographies disponibles pour chaque instrument, sont nombreuses et de haute définition (typiquement 2000× 1300 pixels). De plus, les vérifications effectuées montrent que les cercles ne sont pas déformés ce qui indique l’absence d’aberration géométrique.

21. <https://www.mhs.ox.ac.uk/astrolabe/catalogue/categoryReport.html>

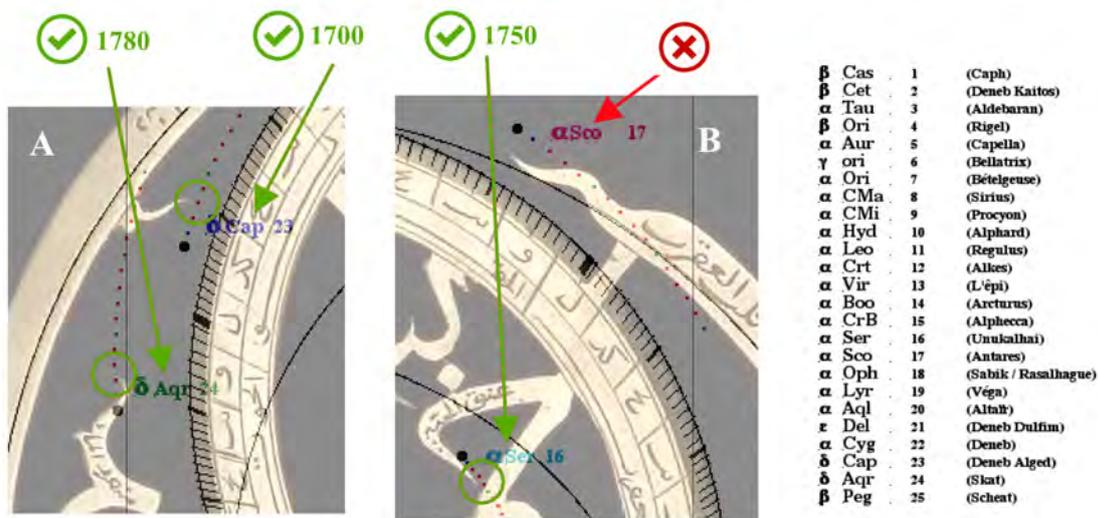


Figure 10 – La liste des étoiles indiquée sur le catalogue du Musée d'Oxford et deux agrandissements de la superposition de la modélisation avec l'araignée. Certains index sont décalés de la courbe des positions possibles : leur latitude écliptique est fautive, on n'en tiendra pas compte (exemple : étoile n° 17 de la modélisation) ; d'autres index pointent une position de la courbe et indiquent donc un âge (exemples : étoiles n° 16, 23 et 24). Au total les âges indiqués par ces *bons* index (20 sur cette araignée) sont moyennés pour fournir l'âge calculé, ici : 1789 J.C. La marge d'erreur sera discutée dans le texte, la date inscrite sur l'instrument est 1682 J.C.

ces 19 astrolabes auxquels j'ai joint les 5 astrolabes maghrébo-andalous du *Adler Planetarium & Astronomy Museum* (Pingree 2009).

La figure 11 permet de comparer l'âge calculé avec l'âge connu par ailleurs (inscrit sur l'instrument), sur ces 24 astrolabes. En dépit de la faible représentativité de l'échantillon utilisé, on peut essayer de tirer quelques conclusions préalables. On constate que de la validité de la méthode semble dépendre fortement de l'origine spatio-temporelle des instruments :

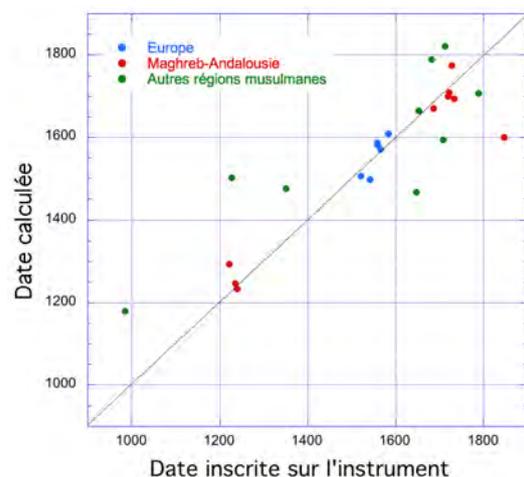


Figure 11 – Corrélation entre l'âge calculé et l'âge inscrit sur l'instrument.

1. en ce qui concerne les astrolabes européens du XVI^e siècle, les résultats sont satisfaisants et la méthode proposée semble avoir une précision de ± 50 ans au maximum. Ce résultat était prévisible, dans la mesure où Stautz (1996) avait déjà souligné l'excellente précision

des pointés d'étoiles dans ce groupe. Le même auteur a par ailleurs indiqué que la qualité était bien moindre sur les astrolabes européens plus anciens. On peut regretter que les collections photographiques disponibles ne m'aient pas permis de travailler sur ce groupe précoce.

2. Torode (1992) avait conclu à l'impossibilité de dater les astrolabes maghrébo-andalous. C'est manifestement une conséquence des manquements de sa méthode, car, si l'on exclut le XIX^e siècle qui est connu comme ayant produit de très mauvais instruments (voir Mercier 2018, fig. 11), on retrouve quasiment les mêmes résultats que pour le groupe précédent : datation possible à ± 50 ans. En fait, là encore ce résultat était prévisible car j'ai précédemment établi (Mercier 2018) que, si l'on ne tient pas compte d'une poignée d'étoiles dont les coordonnées corrompues semblent avoir traverser les siècles, la majorité des étoiles est très généralement bien placée.
3. les astrolabes musulmans orientaux (Moyen-Orient, Perse, Inde, Turquie (?)), par contre, semblent échapper à tout espoir de datation. La dispersion est énorme et la marge d'erreur atteint au moins 400 ans (± 200 ans).

6 Discussion sur le cas des astrolabes maghrébo-andalous

En dépit du caractère préliminaire des conclusions précédentes, il me semble intéressant de revenir sur les arguments de Dekker (1992) qui, non seulement condamnait la méthode de Torode (1989 & 1992), mais considérait comme impossible toute datation par une méthode astronomique²² du type de celles envisagées plus haut. Pour résumer, cet auteur insiste sur le fait qu'il y a beaucoup d'erreurs dans les tables d'étoiles des manuscrits ; elle signale, par exemple, en citant Kunitzsch (1980), des tables andalouses datées de plus de 250 ans d'écart, mais qui utilisent la même valeur de la précession. Implicitement, elle postule que les astrolabistes ont utilisé sans discernement ces manuscrits erronés²³, par voie de conséquence, que les astrolabes sont faux et donc que la position des étoiles ne peut pas nous renseigner sur son âge.

Le problème, selon moi, est qu'avant Stautz (1996), aucun médiévaliste n'a pris la peine de vérifier la précision effective des instruments. En ce qui concerne les astrolabes maghrébo-andalous, on peut même considérer que le postulat est faux. Il n'est pas possible d'identifier un astrolabe de ce groupe qui présenterait une erreur de précession de 250 ans, ni même d'ailleurs, une erreur significative de précession. En fait le degré de précision de ces instruments est remarquable (Mercier 2018) et il est clair que les astrolabistes sélectionnaient efficacement les tables d'étoiles qu'ils utilisaient ; même si celles-ci comportaient certaines erreurs redondantes.

Dekker (1992) utilise un second argument en faveur de sa thèse, elle considère qu'on ne peut pas utiliser la valeur contemporaine de la précession pour calculer un âge car les anciens utilisaient des valeurs différentes. Il s'agit d'un argument sérieux difficile à contourner. En ce qui concerne l'espace Maghrébo-andalou, ce que l'on peut dire, et cela constitue une sorte de paradoxe, c'est que si l'on utilise l'évaluation actuelle de la précession, on retombe assez précisément sur les valeurs qu'ont utilisées les anciens pour confectionner leurs astrolabes !

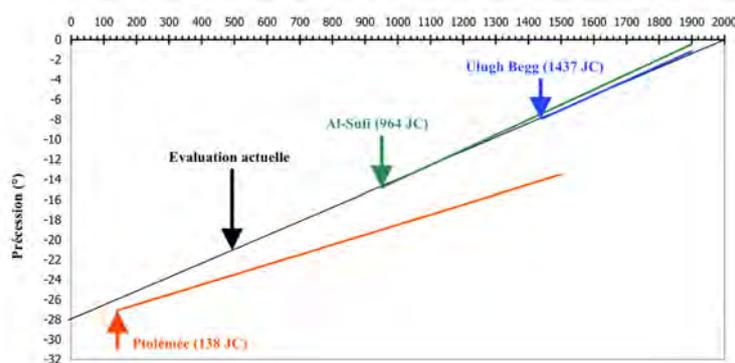
Un premier élément de réponse peut être trouvé dans l'étude des données d'observation auxquelles pouvaient, éventuellement, avoir accès les astrolabistes. Il s'agit de :

22. Comme je l'ai déjà signalé, Dekker (1992) utilise le même genre d'arguments que Poulle (1956) pour démontrer la même chose ; mais, contrairement à Elly Dekker, celui-ci avait limité son propos aux astrolabes médiévaux européens. N'ayant pas pu travailler sur ce groupe d'instruments, je laisserai ouverte la discussion sur ses arguments même si, à mon sens, son texte contient les mêmes faiblesses que celui de Dekker (1992).

23. Ce qui est également l'opinion de Poulle (1956), on l'a vu, mais aussi de Kunitzsch (2005 p. 45).

- L'*Almageste* de Ptolémée (138 J.C.) qui d'une part avait fait une erreur de 1° dans ses valeurs de la longitude écliptique, et qui évaluait la précession à $36''/\text{an}$ ($1^\circ/100 \text{ ans}$).
- La *Description des étoiles fixes* de al-Sufi (964 J.C.) qui évalue la précession à $54''5/\text{an}$ depuis Ptolémée (Schjellerup 1874).
- Le *Traité du Prince* d'Ulugh Begg (1437 J.C.) qui donne une précession de $53''1/\text{an}$ depuis Ptolémée (Knobell 1917).

Figure 12 – Comparaison entre le modèle actuel de précession, et les trois modèles issus de l'observation, potentiellement disponibles dans le monde musulman ancien. On constate que les travaux de al-Sufi et Ulugh Begg sont remarquablement précis... leurs erreurs d'évaluation de la précession résultent uniquement de la non détection du décalage initial de Ptolémée.



Quand on compile ces valeurs pour les comparer au modèle de précession actuel (fig. 12), on constate que pendant la période de production des astrolabes, des évaluations précises de la précession étaient disponibles. Le problème est de savoir si les astrolabistes maghrébo-andalous y avaient effectivement accès. L'étude, par Dekker (2013, p. 310), d'un autre type d'objet astronomique de l'islam ancien, les globes célestes, montre que la valeur de la précession de al-Sufi été connue et utilisée du X^e au XIV^e siècle (Dekker 2013, p. 310) en orient ; en ce qui concerne l'occident musulman, c'est beaucoup moins certain²⁴. Une autre question importante est de savoir pourquoi les manuscrits sur l'astrolabe sont autant entachés d'erreurs alors que les instruments eux-mêmes semblent réalisés de façon correcte.

Borrelli (2008) considère que le savoir des astrolabistes européens du XI^e siècle leur a été transmis selon des processus « non-verbaux » (et donc en dehors des manuscrits). La discussion précédente suggère que cette idée puisse être généralisée aux astrolabistes de l'espace maghrébo-andalou.

7 Conclusions

Les auteurs qui se sont intéressés à la datation des astrolabes par des méthodes astronomiques ont souvent eut une position tranchée. Soit positive comme Gunther (1923 & 1932), soit très négative comme Poulle (1956) ou Dekker (1992). Curieusement le problème ne semble jamais avoir été abordé en termes de précision : *quelle est la marge d'erreur inhérente à la méthode ?*. Le problème de savoir si cette marge d'erreur est acceptable constitue un autre problème qui est d'ordre historique et non scientifique.

Il existe donc a priori trois manières de dater un astrolabe par une méthode astronomique :

- la longitude du Périhélie qui est considérée par l'ensemble des auteurs comme impraticable ;

24. Selon Sonja Brentjes (Université de Berlin) (*Com. oral.*, Avril 2018), alors que plusieurs dizaines de copies de l'ouvrage de al-Sufi ont été réalisées en Orient, seules trois copies sont connues pour l'occident musulman (dont une manifestement re-traduite en arabe à partir d'une traduction européenne non identifiée).

- la date de l'équinoxe de printemps, inscrite sur le calendrier au dos de l'instrument. Nous avons vu que la précision de la datation ne peut pas être meilleure que ± 200 ans. Les causes de cette imprécision ne relèvent pas de problèmes théoriques, mais relèvent, à la fois, d'un problème à la source (le calcul de la date précise de l'équinoxe n'a été maîtrisé que tardivement), et de deux problèmes liés à l'interprétation des graduations du calendrier, et à la nature de la date inscrite (équinoxe moyen ou équinoxe de l'année), sur lesquels nous n'avons généralement aucune indication.
- la précession des équinoxes que l'on peut déduire de la position des étoiles sur l'araignée. Nous avons vu ici que, si l'on prend la peine de *filtrer* les étoiles selon un critère de *cohérence* et que l'on se limite à des groupes d'astrolabes particuliers (européens récents, maghrébo-andalous) la précision peut être évaluée à ± 50 ans.

Le bilan est donc mitigé, des groupes importants d'astrolabes échappent complètement à la possibilité de datation par une méthode astronomique (musulmans orientaux : précision ± 200 ans, européens médiévaux²⁵).

Je voudrais terminer cette revue par l'expression de quelques doutes et/ou réserves : dans les lignes qui précèdent, j'ai essayé de valider une méthode de datation en la testant sur des instruments datés. Bien sûr, cela n'est qu'une étape avant d'appliquer cette méthode à des instruments non datés. Implicitement cela suppose que les instruments non-datés ont été réalisés avec le même soin que les instruments datés. Or, toute personne qui a réalisé un astrolabe planisphérique sait que la validité scientifique de son instrument est limitée dans le temps. Il paraît donc très naturel de dater l'instrument. De là à penser que les astrolabistes qui n'ont pas daté leurs instruments ne sont pas très compétents, que leurs instruments ne sont pas précis et que les conclusions tirées de l'étude des astrolabes datés ne puissent pas s'appliquer... il n'y a qu'un pas. Mais il n'est pas certain qu'il faille le franchir car, inversement, lors de l'étude des étoiles des astrolabes maghrébo-andalous (Mercier, 2018) les astrolabes dépourvus de date gravée ne me sont pas apparus moins finement réalisés que les autres. La question reste donc ouverte.

Comme on le constate, la méthode proposée dans cet article et qui vise à attribuer un âge à des astrolabes non daté possède une validité limitée à quelques groupes d'instruments seulement. Elle ne peut être utilisée qu'avec beaucoup de précautions et sans doute en complément d'autres méthodes (stylistique, métallurgique...). Pour finir, et à ma grande surprise, il me faut bien constater que j'arrive à des conclusions assez proches de celles des auteurs précédents (Michel 1947 ; Poulle 1956, Dekker 1992, Torode 1992)... mais, il est vrai, pour des raisons sensiblement différentes, notamment en ce qui concerne la datation par la précession.

Références

- [1] Borrelli A. (2008) : *Aspects of the astrolabe*. Franz Steinet Verlag, 272 p.
- [2] Dekker E. (1992) : *Astrolabes and Dates and Dead-ends*. Annals of Science, XLIX, pp. 175–184.
- [3] Dekker E. (2013) : *Illustration the phaenomena*. Oxford Univ. Press ; 467 p.

25. Le cas des astrolabes européens médiévaux n'a pas pu être étudié ici, mais le résultat aurait probablement été mauvais dans la mesure où on sait (Stautz 1996) que la précision de l'implantation des étoiles est défallante dans ce groupe.

- [4] D'Hollander R. (1995) : *Étude comparative entre l'astrolabe dit « carolingien » et l'astrolabe d'Abu-Bakr ibn Yusuf de Toulouse*, in Wesley, S., Beaujouan G., Turner, A., « The oldest Latin Astrolabe », *Physis*, n° 32, 1995, fasc. 2-3, p. 405–420.
- [5] D'Hollander R. (1999) : *L'Astrolabe, Histoire, théorie et pratique*. Institut océanographique ed., 383 p.
- [6] Gibbs R. M., Henderson J. A. & Price D. J. S. (1973) : *A computerized checklist of astrolabes*, Department of History of Science and Medicine, Yale University, 118 p.
- [7] Gunther R. T. (1923) : *Early science in Oxford*, ii, Astronomy, Oxf. Hist. Soc., LXXVIII.
- [8] Gunther R. T. (1932) : *Astrolabes of the world*, vol. 1 & 2, Holland Press ed., 609 p. (ré-édité en 1976).
- [9] King D. A. (1993) : *Some medieval astronomical instruments and their secrets*, in Renato Mazzolini, ed., *Non-Verbal Sources in Science before 1900*, Florence : Leo S. Olschki, pp. 29–52.
- [10] Knobel E. B. (1917) : *Ulugh Beg's catalogue of Stars*, Carnegie Institution of Washington, 124 p.
- [11] Kunitzsch P. (1980) : *Two Star Tables from Muslim Spain*. *Journal for the History of Astronomy (JHA)* 11., p. 192–201.
- [12] Kunitzsch P. (1993) : *Zur Problematik der Astrolabsterne – eine weitere unbrauchbare Sterntael*. *Archives internationales d'histoire des sciences*, XLIII, pp. 197–208.
- [13] Kunitzsch P. (2005) : The stars on the astrolabe, p. 41–46, in Van Cleempoel K.V. : *Astrolabes at Greenwich*, Oxford Univ. Press.
- [14] Mercier E. (2017) : *L'astrolabe dit « Carolingien » de Marcel Destombes*, *Cadran-Info* n° 35, p. 75–88.
- [15] Mercier E. (2018) : *Les étoiles des astrolabes maghrébo-andalous*, *Cadran-Info* n° 37, p. 56–77.
- [16] Michel H. (1947) : *Traité de l'astrolabe*, Alain Brioux ed., 202 p. réédité en 1976.
- [17] Michel H. (1948) : *Un astrolabe latin du XII^e siècle* ; *Ciel et Terre*, 3-4, p. 73–79.
- [18] Morrison J. E. (2007) : *The astrolabe*. Janus ed., 438 p.
- [19] Pingree D. (2009) : *Eastern astrolabes*. Adler Planetarium ed., 268 p.
- [20] Poulle E. (1956) : *Peut-on dater les astrolabes médiévaux ?* *Revue d'histoire des sciences et de leurs applications*, 9, n° 4 ; pp. 301–322.

- [21] Poulle E. (1977) : Le traité de l’astrolabe d’Henri Michel, *Revue d’histoire des sciences*, 30-4, pp. 375–376
- [22] Price D. J. (1955) : *An International Checklist of Astrolabes*, *Archives Internationales d’Histoire des Sciences*, 8, p. 243–249 & 363–381.
- [23] Schjellerup H. C. F. C. (1874) : *Description des étoiles fixes composée au milieu du dixième siècle de notre ère par l’astronome Persan Abd-al-Rahman Al-Sufi.*, Académie impériale des Sciences, Saint Petersburg. 300 p. + 7 pl.
- [24] Simon B. (2007) : *Comment Képler a déterminé l’orbite de la Terre autour du Soleil.* *Cahiers Clairaut*, 117, p. 10–13.
- [25] Stauts B. (1996) : *Untersuchungen von mathematisch-astronomischen Darstellungen auf mittelalterlichen Astrolabien islamischer und europäischer Herkunft.* (Étude des représentations mathématiques et astronomiques sur les astrolabes médiévaux d’origine islamique et européenne). (Thèse soutenue le 14 juin 1996 à l’Université de Frankfurt am Main), GNT Verlag, 287 p.
- [26] Torode R. K. E. (1989) : *A Mathematical System for Identifying Stars of an Astrolabe and Finding its Age*, *Astrolabica* 5 – Études 1987–1989, éd. A. J. Turner, Paris, Institut du Monde Arabe / Société Internationale de l’Astrolabe, 1989, pp. 53–76.
- [27] Torode R. K. E. (1992) : *A Study of Astrolabes.* *JBAA*. 102, 1, pp. 25–30.
- [28] Turner A. J. (1985) : *The Time Museum Catalogue of the Collection*, V. 1, t. 1. Time Museum edt, 268 p.
- [29] Turner G. L’E. (2003) : *A critique of the use of the First Point of Aries in dating astrolabes.* In : *Renaissance astrolabes and their markers.* Ashgate-Variorum serie, (étude III, publiée initialement en Allemand, en 2000).
- [30] Webster & Webster (1998) : *Western astrolabes.* Adler Planetarium edt., 179 p.



Appréciation de l'erreur de lecture sur un cadran solaire mal positionné

par Jean Pakhomoff

1 Introduction de l'étude

Voilà ci-dessous la malheureuse histoire des deux cadrans construits pour le monastère des chanoinesses d'Azille (11).

La déclinaison gnomonique a été mesurée en utilisant l'heure d'hiver alors que l'heure d'été était encore en cours pendant deux jours. L'erreur a heureusement été décelée la veille de la pause des deux cadrans. Ceux-ci seront installés dans les jardins du monastère après les vendanges d'octobre 2018 sur deux murs construits spécialement dans les orientations correspondant aux déclinaisons gnomoniques des cadrans. Comme à toute chose malheur étant bon, cela m'a permis de faire une étude à laquelle je n'aurais jamais songé sans cette étourderie.

2 Erreur d'un cadran mal positionné

Lors de la construction des deux cadrans solaires du monastère d'Azille (11) nous avons malencontreusement fait une erreur dans le calcul de leur déclinaison gnomonique.

Les mesures ont été faites les 24, 25 et 26 octobre 2017 et par étourderie, au vu des déclinaisons négatives du soleil et de la date, nous avons considéré l'horaire d'hiver alors que celui-ci entrerait en vigueur le 29 octobre. Nous avons déduit une heure à l'heure civile alors que nous aurions dû en déduire deux.

Il s'en est suivi une erreur de près de 16° dans la valeur d'orientation des cadrans rendant fausses leurs indications.

Ainsi la déclinaison gnomonique trouvée pour le déclinant Est, suite à la mesure en horaire erroné, a été de $46:335$ Est ($313:665$ selon la définition de la CCS) et celle pour le déclinant Ouest a été de $39:745$ Ouest. Après nouvelles mesures en horaire d'hiver la déclinaison du déclinant Est s'est avérée être de $62:2$ ($297:8$) et celle du déclinant Ouest être de $23:8$. Nous

nous proposons dans le travail ci-dessous d'apprécier l'erreur entraînée par cette étourderie sur la lecture de l'heure.

Soit donc le cadran solaire $OAO'V$ vertical méridional sur un horizon de latitude f où AV est l'horizontale passant par A . Nous le faisons pivoter d'une déclinaison gnomonique égale à dg vers l'Est. On obtient alors le déclinant Est $OAO'V_1$. dg est considérée comme la déclinaison obtenue par étourderie. Le cadran sera construit à partir de celle-ci. La déclinaison réelle du mur sur lequel le cadran sera posé se révèle après mesure sans erreur être égale à dg' . Faisons alors pivoter notre cadran $OAO'V_1$ en $OAO'V_2$ de façon à le plaquer sur le mur récepteur de déclinaison dg' . La différence des déclinaisons gnomoniques est égale à :

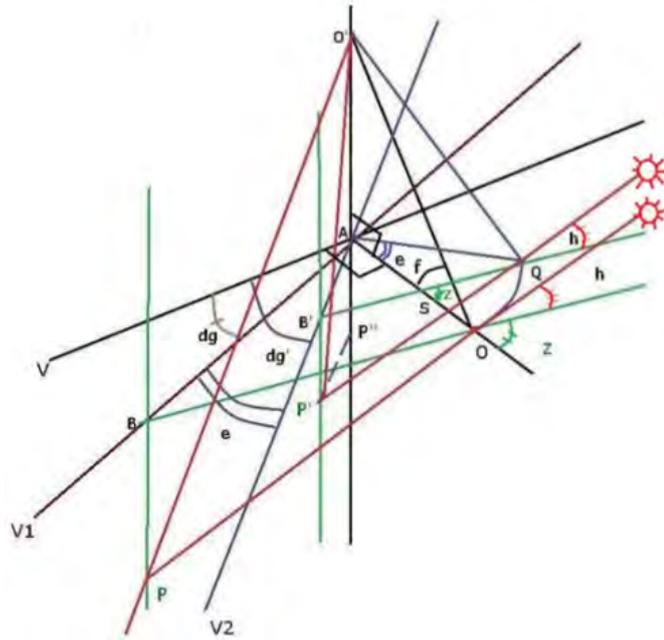


Figure 1

La différence des déclinaisons gnomoniques est égale à : $dg' - dg = e$. Le point O pivote du même angle e et vient en Q . À cet instant t sur l'horizon de latitude f le soleil a un azimut z et une hauteur h . Le cadran $OAO'V_1$ devrait donner l'angle tabulaire $AO'P$ correspondant à t . Mais mal positionné il montrera l'angle tabulaire $AO'P'$. Nous appellerons cet angle H' correspondant à un angle horaire t' .

Rappelons ici la relation démontrée par ailleurs donnant l'angle tabulaire H à l'instant t dans le cas de figure ci-dessus du vertical déclinant est lignes horaires du matin :

$$\tan H = \frac{1}{\frac{\cos dg}{\cos f \tan t} + \tan f \sin dg} \quad (1)$$

Connaissant H on retrouve t :

$$\tan t = \frac{1}{\frac{\cos f}{\tan H \cos dg} - \sin f \tan dg} \quad (2)$$

Recherchons maintenant la valeur de H' pour pouvoir apprécier le temps t' correspondant. Observons le triangle $AB'Q$ formé par le style droit AQ , la trace QB' de l'azimutal passant par Q et AB' portion délimitée par l'azimutal QB' et l'horizontale V_2 , du cadran $QO'AV_2$, passant par A . On a $B'AQ = \pi/2 - dg' + e$. Du triangle AQS on tire $AQS = AQB' = \pi - (\pi - z + e) = z - e$.

$$AB'Q = \pi - (\pi/2 - dg' + e + z - e) = \pi/2 + dg' - z$$

On peut écrire les rapports

$$\frac{AQ}{\sin AB'Q} = \frac{AQ}{\cos(dg' - z)} = \frac{AB'}{\sin(z - e)}$$

$$AB' = \frac{l \cos f \sin(z - e)}{\cos(dg' - z)}$$

$$\frac{B'Q}{\sin(\pi/2 - dg' + e)} = \frac{B'Q}{\cos(e - dg')} = \frac{AB'}{\sin(z - e)}$$

et

$$B'Q = \frac{l \cos f \cos(e - dg')}{\cos(dg' - z)}$$

$B'P = B'Q \tan h$ et $Y = l \sin f + B'Q \tan h$.

$X = P'P'' = AB'$.

$\tan H' = \frac{X}{Y}$, ce qui après développement et simplification donne :

$$\tan H' = \frac{\sin(z - e)}{\tan f \cos(dg' - z) + \cos(e - dg') \tan h} \quad (3)$$

Une fois connu l'angle tabulaire « erroné » H' on recherche la valeur de t' correspondante en se servant de la relation (2). Donnons ci-dessous quelques exemples concernant notre cas de figure du déclinant est lignes horaires du matin : Soit notre cadran Est du monastère d'Azille situé à une latitude nord de 43°27'15".

Choisissons le jour de l'hiver de déclinaison $-23^{\circ}43'6.94$. la déclinaison gnomonique erronée est de $46^{\circ}33'5$ et la déclinaison du mur porteur est de $62^{\circ}2'$ est $e = 62.2 - 46.335 = 15^{\circ}8'6.5$. À 11 h du matin l'angle horaire t est de 15° , l'azimut z de $14^{\circ}8'26$, la hauteur du soleil est égale à $21^{\circ}8'7.2$ H' est alors égal à $-1^{\circ}13'55$ ce qui correspond à $1^{\circ}13'55$ d'après-midi.

Nous sommes là dans les lignes d'après-midi et nous montrons par ailleurs que (1) devient :

$$\tan H = \frac{1}{\frac{\cos dg}{\cos f \tan t} - \tan f \sin dg} \quad (4)$$

et (2) devient

$$\tan t = \frac{1}{\frac{\cos f}{\tan H \cos dg} - \sin f \tan dg} \quad (5)$$

Notre cadran mal positionné montrera alors $t' = 1^{\circ}09'16$ ce qui équivaut à 12 h 4 min 22 s, le cadran avance donc de 1 h 4 min 22 s.

Si $t = 30^{\circ}$ (10 h du matin) alors l'azimut est de $28^{\circ}8'05$, la hauteur de $17^{\circ}8'06$. On trouve $H' = 14^{\circ}6'03.6$ et $t' = 16^{\circ}7'21.1$ ce qui correspond à 10 h 53 min 7 s : le cadran avance de $53'7''$.

Prenons les mêmes heures le jour de l'été de déclinaison $23^{\circ}43'6.94$. À 11 heures du matin l'azimut est de $36^{\circ}7'51$, la hauteur est de $66^{\circ}6'17$. On trouve $H' = 8^{\circ}28'8.88$ et $t' = 8^{\circ}7.2$ ce qui correspond à 11 h 25 min 7 s. L'avance est de $25'7''$.

À 10 heures du matin l'azimut est de 60.917° et la hauteur de $58^{\circ}33'6$ $H' = 18^{\circ}9'53.1$ et $t' = 23^{\circ}03'22$ ce qui correspond à 10 h 27 min 52 s. L'avance est de $27'52''$.

On voit que pour une erreur constante e les avances, dans le cas de figure étudié, sont variables selon les heures et les saisons. C'est pour cela qu'il n'est pas possible de corriger l'heure lue au cadran par une valeur constante.

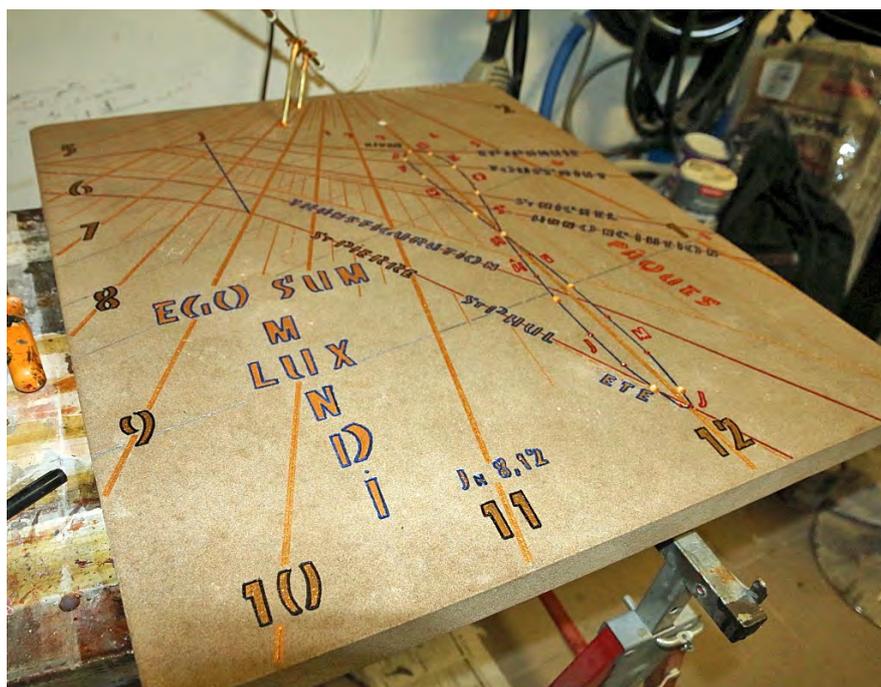


Figure 2 – Cadran déclinant à l'Est.

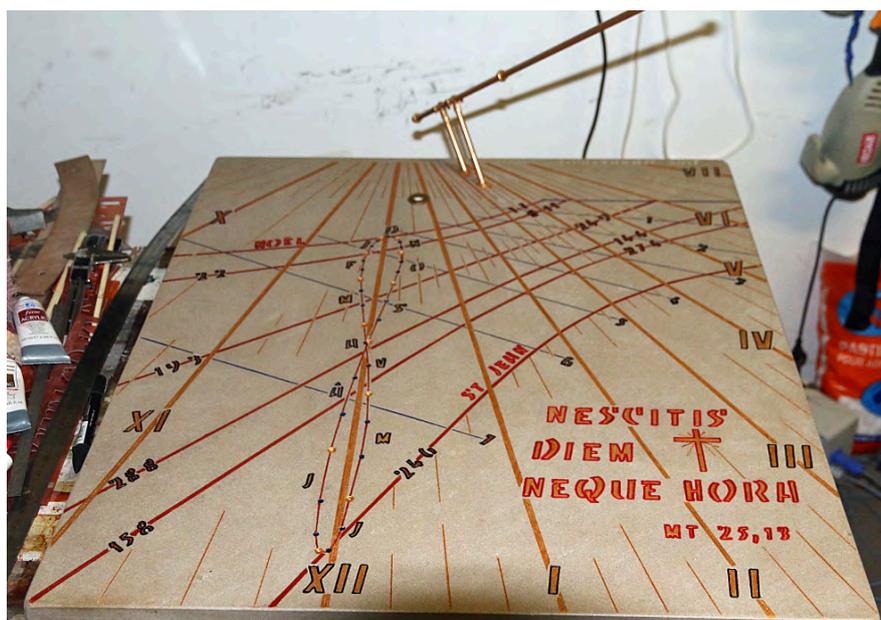


Figure 3 – Cadran déclinant à l'Ouest (Le M manquant à HORAM a depuis été rajouté).

3 Déclinaisons gnomoniques moyennes

Les cadrans prévus pour ces murs devront, suite à mon étourderie, être décalés selon un angle calculé rectificatif de $63^{\circ}5' - 46^{\circ}33'5'' = 17^{\circ}16'5''$ pour le déclinant Est et de $39^{\circ}7'43'' - 23^{\circ} = 16^{\circ}7'5''$ pour le déclinant Ouest.

Table 1
Relevé Google Earth et mesure de l'azimut du cadran déclinant Est

Mur	Google Earth	Mesure azimut	Moyenne à retenir
Intérieur Est	64°9'56" Est	62°2' Est	63°5'
Intérieur Ouest	22°15' Ouest	23°8' Ouest	23°

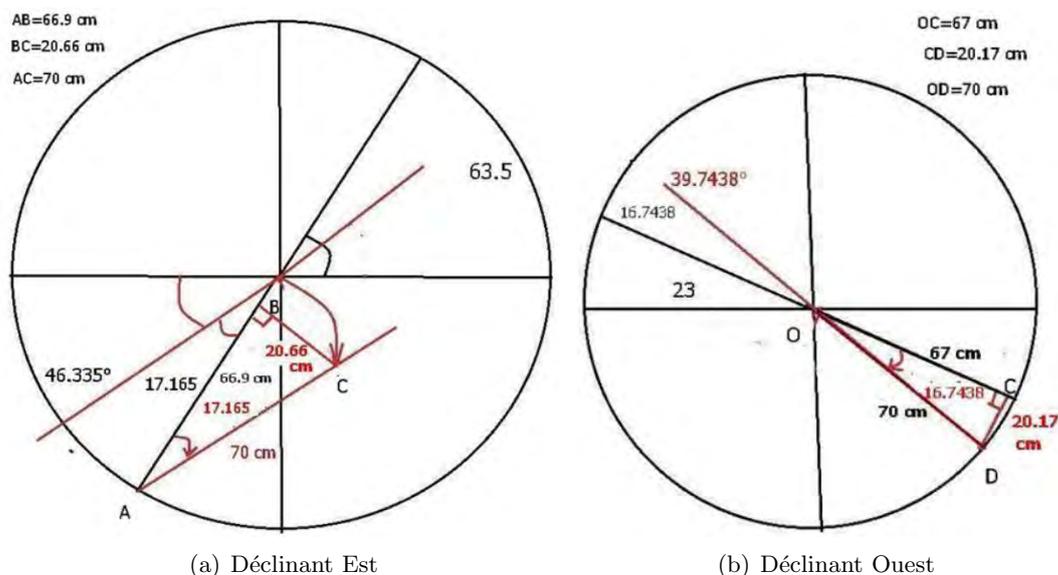
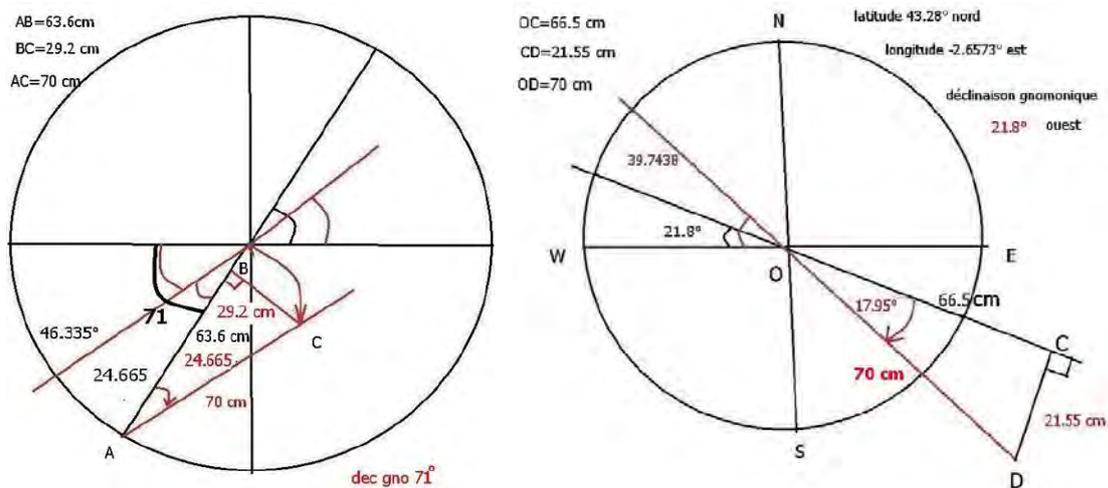


Figure 4 – Déclinaison gnomonique des cadrans prévus.

Le cadran déclinant Est pourrait être également placé sur un mur du cimetière du monastère et le déclinant ouest sur un autre mur proche du cimetière. Les décalages seront à peine différents :

Table 2
Relevé Google Earth et mesure de l'azimut du cadran déclinant Ouest

Mur	Google Earth	Mesure azimut	Moyenne à retenir
Mur du cimetière	70°53'6" Est	71°3' Est	71°
Mur du cimetière	21°20'2" Ouest	22°37'6" Ouest	21°8'



(a) Déclinant Est sur le mur du cimetière du monastère (b) Déclinant Ouest sur le mur près du cimetière

Figure 5 – Déclinaison gnomonique des cadrans placés au cimetière du monastère.



Pierre Charles Le Monnier et la méridienne de Saint Sulpice¹

par Denis Savoie

Le tracé en 1743 de la plus grande méridienne de France, dans l'église Saint Sulpice à Paris, s'est déroulé dans un contexte scientifique particulier qu'il est important de rappeler pour comprendre les enjeux que s'était fixés son concepteur. C'est un instrument astronomique unique et tout à fait original pour l'époque : outre le fait qu'il y a deux œilletons dont l'un est muni d'une lentille, on n'y observe qu'aux solstices d'été et d'hiver.

1 La variation de l'obliquité de l'écliptique

La question de la variation de l'obliquité de l'écliptique agissait déjà les esprits depuis quelques siècles² sans que l'on tranche véritablement sur le statut de cette « constante » fondamentale en astronomie puisque l'inclinaison de l'écliptique sur l'équateur (autre nom de l'obliquité de l'écliptique, qui est aussi la distance angulaire entre le pôle nord de l'écliptique et le pôle nord céleste) intervient dans de nombreux problèmes (saisons, latitudes, heures, équation du temps, etc.).

Dans les années 1714-1716, le chevalier de Louville (1671-1732) fait plusieurs communications à l'Académie royale des sciences de Paris montrant que l'obliquité diminue de 1' par siècle³. Il se base sur une analyse de dix-huit valeurs rapportées par les Anciens et notamment celle effectuée par Pythéas de Marseille au IV^e siècle av. J.-C. (que l'on connaît par Strabon)

1. Cet article est issu du séminaire qui s'est tenu le 10 avril 2018 à l'Observatoire de Paris, « Physique et astronomie aux XVII^e et XVIII^e siècles ». SYRTE, Observatoire de Paris, PSL Research University, CNRS, Sorbonne Universités, UPMC Univ. Paris 06, LNE, 61 avenue de l'Observatoire, 75014 Paris, France, et Musée des Arts et Métiers, 60 rue Réaumur, 75003 Paris.

2. C'est le cas par exemple de Copernic qui pense que l'obliquité oscille entre 23° 28' et 23° 52' en 1717 années de 365 jours (*De rev*, III, 2). Voir *De revolutionibus orbium coelestium*, sous la dir. de M. Lerner, A. Segonds et J.-P. Verdet, coll. Sciences et Humanismes, Les Belles Lettres, 2015, vol. 1, p. 352.

3. Voir par exemple *HARS (Histoire Académie Royale des Sciences)*, 1716, p. 48-54; il s'agit d'un compte-rendu (rédigé sans doute par Fontenelle) où on lit que les autres astronomes de l'Académie pensent que l'obliquité est constante. Aucun mémoire de Louville sur l'obliquité n'a été imprimé dans les Mémoires de l'Académie, ce qui en dit long sur le dérangement que provoque l'hypothèse de Louville. On trouvera la table

et qui est la plus ancienne mesure européenne connue à l'époque, qu'il reproduit sur le site de Marseille en 1714 (fig. 1). Il se réfère également à Hérodote qui rapporte une tradition

**294 ACTA ERUDITORUM
TABULA DIMINUTIONIS OBLIQUITATIS ECLIPTICÆ.**

	Anni ante.Ch	Oblivitas non correcta	Oblivitas correcta	Anni elapsi	Differentia ab hodierna	Error observati-onum
Pytheas	360	23 49' 10"	23 49 10	2075	21' 0"	
Eratosthenes	200	23 51 20	13 51 20	1965	23' 30"	1'18" per Excess.
Almamon	post C. 830	23 35 0	23 36 31	885	8 6	1' 24 per defect.
Albategnius	969	23 35 0	23 36 31	746	7 50	0 17 per Exc.
Arzachel	1070	23 34 0	23 34 50	645	6 26	0 1 per Exc.
Thebit benCorz	1150	23 33 30	23 34 17	550	5 53	0 3 per Exc.
Almæon	1150	23 33 30	23 34 17	550	5 53	0 3 per Excess.
Prophatius	1300	23 32 0	23 32 50	415	4 25	0 17" per Exc.
Regiomontanus	1490	23 29 13	23 29 13	225	0 49	1'26" per defect.
Copernicus	1540	23 28 8	23 30 3	175	1 39	0 6" per defect.
Prin. Hafiz	1575	23 30 28	23 30 28	140	2 0	0 40" per defect.
Tycho Braheus	1595	23 29 25	23 29 25	120	1 1	0 11" per defect.
Iuft. Byrgius	1592	23 28 55	23 28 55	123	0 31	0 44 per defect.
Hevelius	1661	23 29 7	23 29 7	54	0 43	0 17" per exc.
Flanstedius	1691	23 28 32	23 28 32	24	0 8	0 7" per defect.
Richerius	1672	23 28 54	23 28 54	44	0 30	0 4" per exc.
Blanchinus	1703	23 28 35	23 28 25	12	0 1	0 7" per defect.
per meas observat.	1715	23 28 24	23 28 24	0	0	0

NIC.

Figure 1 – Liste des auteurs anciens sur laquelle se base le chevalier de Louville pour affirmer la diminution de l'obliquité de l'écliptique. Il conclut qu'entre Pythéas (360 av. J.-C.) et ses propres mesures en 1715, l'obliquité a diminué de 23° 49' 10" à 23° 28' 24", soit 1' par siècle.

égyptienne comme quoi l'écliptique et l'équateur étaient perpendiculaires; et qu'à terme, l'équateur sera confondu avec l'écliptique.

L'attitude des astronomes de l'Académie est réservée, pour ne pas dire hostile, à cette variation dont les conséquences à terme sont catastrophiques d'un point de vue climatique. C'est le cas des astronomes La Hire, de Jean-Dominique Cassini (et en Angleterre de Flamsteed), du mécanicien céleste d'Alembert et surtout de Pierre Charles Le Monnier comme on le verra par la suite : tous pensent que l'obliquité est constante. Il faut dire qu'un astronome réputé, G.-B. Riccioli (1598-1671), qui observa longtemps à la méridienne San Petronio de Bologne, avait déjà examiné la littérature ancienne concernant l'obliquité et en avait conclu à sa parfaite

des valeurs de ce dernier dans *Acta Eruditorum*, année 1719, Leipzig, p. 281-294. Voir également l'excellente introduction générale au problème de la variation de l'obliquité de M. Chapront-Touzé et J. Souchay dans Jean le Rond d'Alembert, « Précession et nutation 1749-1752 », *Oeuvres complètes*, série 1, vol. 7, éd. CNRS, Paris, 2006, p. xix-xlii. On consultera également avec profit l'excellent ouvrage de J. L. Heilbron, *Astronomie et église*, éd. Belin-Pour la Science, Paris, 2003, p. 232-238.

stabilité. Dans son *Astronomia Reformata* paru à Bologne en 1665, Riccioli publie une table contenant une trentaine de valeurs⁴ de l'obliquité, depuis la plus ancienne (celle de Pythéas) jusqu'à celle qu'il a effectué avec Grimaldi à San Petronio (fig. 2). Riccioli conclue que

**Obliquitas Eclipticae, seu Declinatio
Solis Maxima.**

N ^o . margin.	Auctores (supranominati sub numeris marginalibus.)	Obliqu. Eclip.		Anni ante Christum.
		Gr.	l'	
1	Pytheas Massiliensis	23	52 41	324
2	Hipparchus ex Strabonis relata	23	33 57	140 140
3	Sed ex Ptolemaeo	23	51 20	
3	Geminus, Proclus, Achilles Tatius rotundo numero	24	0 0	Post Christum
3	Ptolemaeus	23	51 20	140
5	Ptolemaeus aliunde	23	30 0	140
6	Pappus Alexandrinus	23	30 0	350
4	Eratosthenes fallaciter vel	23	46 0	Ante Chr. 230
7	Sed necessitati correctus	23	31 5	Ante Chr.
7	Albatentius	23	35 0	880
8	Arzachel Hispanus	23	34 0	1070
8	Almaon Almanforis	23	33 30	1140
8	Tebbit Cora filius	23	33 30	1210
8	Prophatius Iudaeus	23	32 0	1300
9	Purbachius, & Regiomon- ianus, sed elegit hic po- stea	23	28 0	1460
10	Bernardus Vualtherus non maiorem, nec minorem	23	30 0	1476 1498
10	Dominicus Maria Ferrar.	23	29 0	1500
10	Ioannes Vermerius	23	28 30	1500
10	Copernicus fallaciter, sed correctus	23	28 30 30 5	1525
11	Petrus Apianus, & Oratius	23	30 0	1530
11	Petrus Nonius	23	30 0	1555
11	Egnatius Dantes fallaciter, sed correctus	23	29 0 30 35	1570
12	Christophorus Rothmannus, & Byrgius	23	30 20	1570
12	Ioannes Homelius correct.	23	30 0	1570
13	Tycho, sed fallaciter sed correctus, vt summū & bis	23	31 30 30 27 30 22	1587
13	Keplerus	23	30 30	1627
14	Lansbergius fallaciter sed correctus	23	30 10 30 40	1589
11	Clavius, Galileus, Scheiner.	23	30 0	1612
15	Petrus Gassendus nō maior Nos ex Vendelino	23	31 0 30 6	1636
15	Gottfriedus Vuendelinus	23	30 24	1650
16	Nos cum Patre Grimaldo	23	30 20	1646
17	Vincelaus de Nona Piltza	23	30 30	1416

Figure 2 – Liste des auteurs anciens sur laquelle se base Riccioli pour affirmer que l'obliquité de l'écliptique est invariable. On notera les différences énormes avec le chevalier de Louville pour l'interprétation de la mesure de Pythéas et la valeur obtenue par Riccioli en 1646.

l'obliquité vaut 23° 30' 31", non sans commenter minutieusement la valeur de chaque auteur⁵.

4. G.-B. Riccioli, *Astronomiae reformatae*, Bologne, 1665, p. 18-23 (chap. VI, *Obliquitatis Eclipticae Observationes*). Riccioli avait déjà traité de la stabilité historique de l'obliquité dans son *Almagestum novum*, Bologne, 1651, chap. *De Sol*, 27, p. 162. À cette époque, Riccioli prend Aristarque de Samos comme la plus ancienne référence avec 24° 0' 0" pour obliquité.

5. Sur la valeur de l'obliquité déduite par Riccioli d'après Pythéas et sur une discussion générale de cette mesure (sur laquelle on reste très ignorant), voir la remarquable analyse effectuée par le Baron de Zach,

La réponse à ce problème de la variation sera donnée par Euler qui remporte en 1756 le prix de l'Académie des Sciences en montrant que l'obliquité contient un terme séculaire (dû principalement à l'attraction de Vénus et Jupiter sur la Terre) de $-48''$ par siècle (valeur actuelle $46''.8$) qui provoque sa diminution, mais que l'obliquité oscille entre deux valeurs extrêmes. Lagrange donnera en 1774 une démonstration mathématique à cette diminution séculaire, qui sera reprise également par Laplace (cf. *infra*). Cette découverte de la mécanique céleste tombe en plein dans la période où Le Monnier effectue ses mesures à la méridienne de St-Sulpice.

Quelques années auparavant, une autre découverte importante avait été faite par l'astronome royal James Bradley (1693-1762), celui-là même qui avait découvert l'aberration stellaire en 1727. Poursuivant ses observations, Bradley soupçonne dès 1737 que l'axe de rotation de la Terre est affecté d'une oscillation — la nutation —, dont le terme principal d'environ $9''$ est lié à la période de révolution des nœuds lunaires de 18,6 ans (fig. 3). Bradley

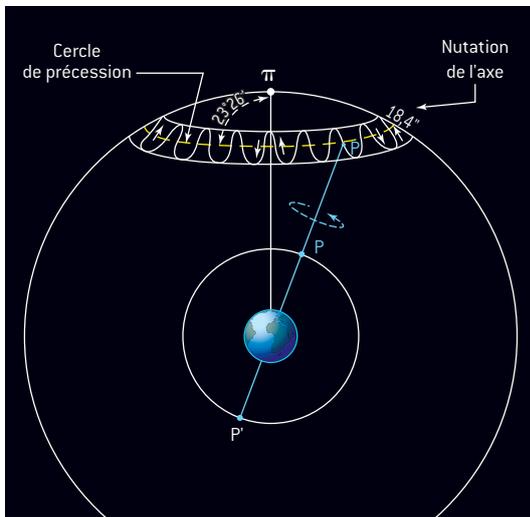


Figure 3 – L'axe de rotation de la Terre P oscille de part et d'autre d'une position moyenne en décrivant des festons : c'est la nutation, laquelle fait varier la distance entre le pôle de l'écliptique π et le pôle P (obliquité vraie).

attend une révolution complète du nœud pour publier sa découverte⁶ en 1748 ; mais étant en correspondance avec Le Monnier, ce dernier est mis au courant très tôt de l'importance de la nutation et de son impact dans l'obliquité de l'écliptique qui semble osciller. La formule suivante résume les deux principales variations de l'obliquité ϵ :

$$\epsilon = \epsilon_0 - kT + k' \cos \Omega \quad (1)$$

où ϵ_0 est l'obliquité moyenne à l'époque origine (par exemple 1700). Le terme $[kT]$ correspond à la variation séculaire de l'obliquité (T est le temps compté en siècles) et le terme $[k' \cos \Omega]$ correspond au terme principal de la nutation (Ω est la longitude du nœud ascendant de la Lune qui se déplace d'environ $-19^{\circ}354$ par an). En d'autres termes, l'obliquité est soumise à une inégalité périodique d'amplitude k' autour d'une valeur moyenne (fig. 4 page suivante).

L'attraction des montagnes, t. 2, Avignon, 1814, p. 515-542 et p. 573-578. De Zach obtient une obliquité de $23^{\circ} 47' 54''$ pour Pythéas, à comparer avec les $23^{\circ} 49' 10''$ de Louville et les $23^{\circ} 52' 41''$ de Riccioli.

Baron de Zach, « Gnomons, méridiennes filaires », *Correspondance astronomique, géographique, hydrographique, et statique*, 3^e vol., Gênes, 1819, p. 265-279, plus spécialement p. 275-276 sur les résultats de Le Monnier (critique).

6. J. Bradley, « A Letter to the Right honourable George Earl of Macclesfield concerning an apparent Motion observed in some of the fixed Stars », *Philosophical Transaction of the Royal Society*, n° 485, janvier 1747-48, p. 1-43.

Avec les valeurs modernes, on a aujourd’hui :

$$\varepsilon = \varepsilon_0 - 46''{,}8T + 9''{,}2 \cos \Omega + \dots$$

$$\varepsilon_0 = 23^\circ 26' 21''{,}45.$$

Sur le graphique 5, on a tracé la variation de l’obliquité : à un instant donné, l’obliquité vraie, c’est-à-dire la distance angulaire entre le pôle de l’écliptique et le pôle céleste, se lit sur la courbe rouge sinusoïdale. Pour mettre en évidence la variation séculaire, donc la pente de

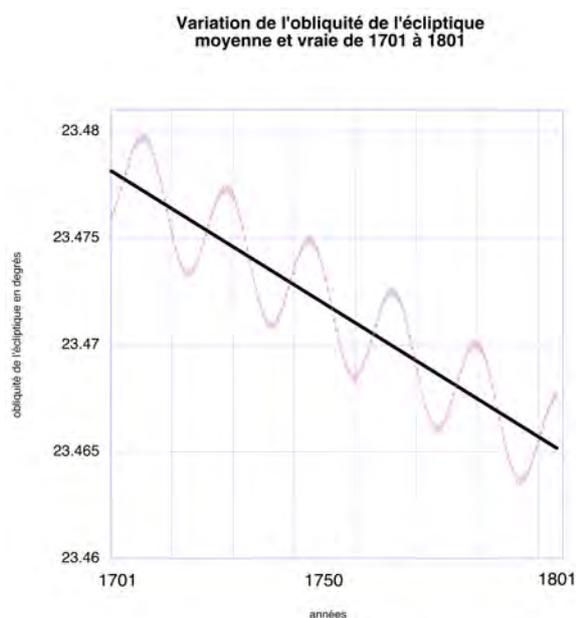


Figure 4 – Variation séculaire de l’obliquité de l’écliptique entre 1701 et 1801 : la diminution est de 47'' en un siècle (pente de la droite en noir). À cette diminution se superpose la nutation qui oscille autour de l’obliquité moyenne. À un instant donné, l’obliquité vraie est la somme de l’obliquité moyenne et de la nutation.

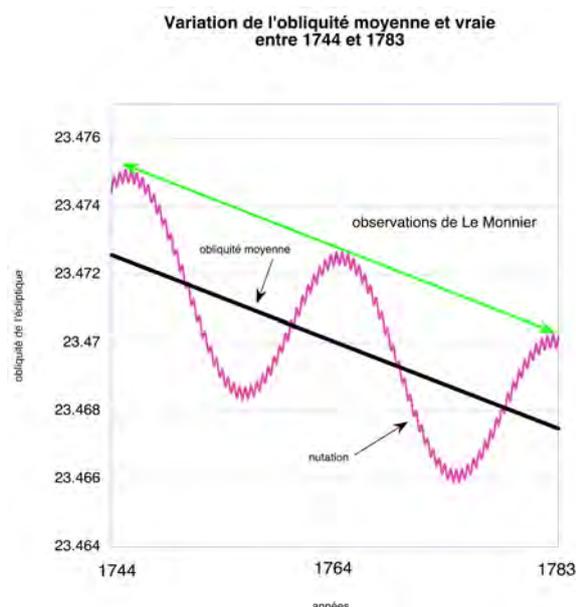


Figure 5 – Pour mettre en évidence la diminution de l’obliquité (pente de la droite en noir), Le Monnier doit mesurer avec la méridienne de S^t-Sulpice la valeur de l’obliquité entre deux sommets de la nutation (pente de la droite en vert). Entre le début de ses observations en 1744 et la fin en 1782, l’obliquité a diminué de 18''.

la droite, il faut décorrélérer la nutation, par exemple en effectuant une mesure de l’obliquité lorsque la longitude du nœud lunaire est nulle et en attendant que le nœud ait effectué un tour complet du ciel. C’est ce que fera Pierre Charles Le Monnier qui commencera ses mesures à S^t-Sulpice à une époque où la nutation passe par un maximum ⁷ (la longitude du nœud était nulle en 1745) puis la conclura 19 ans plus tard en 1764 une première fois, et en 1782 une seconde fois. Entre ces deux dates, l’obliquité aura diminué de presque 18'' : tel était l’enjeu de la méridienne de S^t-Sulpice. On notera qu’entre deux sommets successifs de la courbe de nutation (par exemple lorsque $\Omega = 0^\circ$ et $\Omega = 180^\circ$), l’obliquité varie de 18''⁴ (fig. 6 page ci-contre).

7. Le calcul de la longitude du nœud ascendant de la Lune est basé sur les éléments de la solution ELP-2000/85, et la nutation est calculée d’après la théorie de Wahr : voir *Connaissance des Temps 1993*, Bureau des longitudes, éd. Service Hydrographique et Océanographique de la Marine, p. xxxi-xxxiii et p. xxxvii. On calcule ainsi que la longitude du nœud passe par des valeurs remarquables aux dates suivantes : $\Omega = 0^\circ$ en novembre 1745 et en juin 1764 (et en février 1783) ; $\Omega = 270^\circ$ en juillet 1750 et en février 1769 ; $\Omega = 180^\circ$ en mars 1755 et en octobre 1773 ; $\Omega = 90^\circ$ en novembre 1759 et en juin 1778.

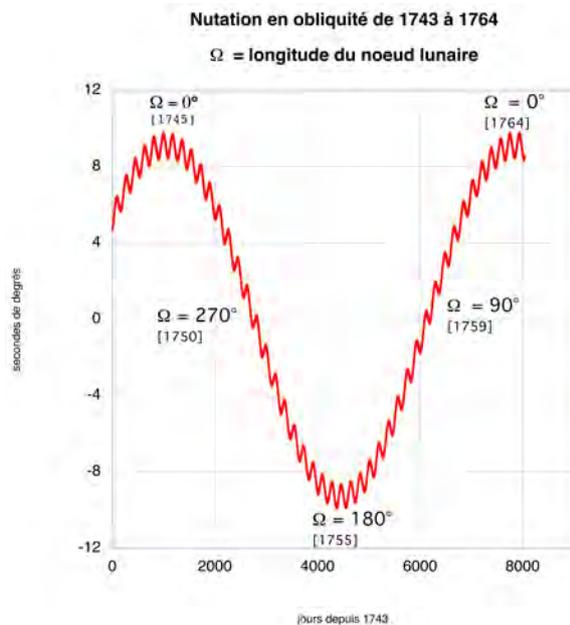


Figure 6 – En une révolution du noeud lunaire (18,6 ans), la nutation passe par des valeurs maximales qui atteignent $\pm 9''.2$ lorsque la longitude est nulle ou vaut 180° .

2 La première méridienne

C'est dans le *Mercur de France* 1728 que l'horloger anglais Henri Sully (1680-1729) décrit la méridienne qu'il a réalisée dans l'église S^t-Sulpice⁸. Ses caractéristiques sont les suivantes : longue de 176 pieds au sol (57,17 m), avec un œilleton placé à 75 pieds de haut (24,4 m), de diamètre 1 pouce (2,7 cm), la méridienne se prolonge sur le mur Nord (de novembre à février) sur un obélisque de 25 pieds de haut (8,1 m). La verticale de l'œilleton est scellée dans le pavement Sud ; de même l'image du Soleil au solstice d'été le 21 juin 1728 est gravée dans le sol. En raison de l'orientation générale du bâtiment, la méridienne fait un angle d'environ 11° avec l'axe du transept.

La méridienne est accompagnée de deux graduations le long de son parcours : les millièmes la distance zénithale et la « distance du zénith du tropique du Cancer » : comme cette quantité est fixe (égale à $\varphi - \varepsilon$), il faut certainement comprendre la déclinaison du Soleil. On trouve également les heures de lever et de coucher du Soleil de 5 en 5 minutes, les signes du zodiaque, la tangente (sans doute de la distance zénithale) multipliée par 10 000, la déclinaison du Soleil. Sur la ligne méridienne sont indiqués de 10 jours en 10 jours les lieux de passage du disque solaire.

Dans cet article du *Mercur de France*, Sully parle au présent d'une méridienne très sophistiquée par le nombre de ses indications, et dont la fonction, comme le souligne d'emblée son auteur, est exclusivement d'indiquer avec précision le midi solaire par l'observation de la tache : Sully est un horloger et c'est dans cette optique d'un référent horaire qu'il crée cet instrument. Sully donne d'ailleurs dans ce même article une table où il indique le temps que met la tache de lumière à franchir la méridienne en fonction de la date. Des vestiges de cette méridienne sont encore visibles à S^t-Sulpice, à 45 cm environ à l'Est de la méridienne de Le Monnier⁹. Il est difficile de savoir quand cette méridienne fut effacée.

8. *Mercur de France*, juillet 1728, p. 1591-1607.

9. On trouvera une description dans l'article général et qui reste le plus complet à ce jour sur cette méridienne par G. Camus, P. de Divonne, A. Gotteland, B. Taillez, « Les méridiennes de l'église Saint-Sulpice à Paris », *L'astronomie*, mai 1990, p. 195-214.

3 La méridienne de Le Monnier

Pierre Charles Le Monnier (1715-1799) débute sa carrière d'astronome en accompagnant l'expédition visant à mesurer un degré de méridien en Laponie en 1736-1737. Ses contributions à l'astronomie touchent de nombreux domaines¹⁰. Il publie en 1746 son ouvrage le plus important, *Les Institutions astronomiques*, considéré comme une référence, qui sera supplanté par ceux de son élève, Jérôme Lalande. L'ouvrage est très pompeusement dédié à Jean-Baptiste Languet de Gergy, curé de S^t-Sulpice, qui fut un allié de poids pour Le Monnier en l'autorisant à installer sa méridienne dans l'église. La longue introduction de 63 pages, intitulée « Essai sur l'histoire et sur le progrès de l'astronomie », s'oriente rapidement vers le problème de la variation de l'obliquité de l'écliptique : c'est un plaidoyer pour une obliquité fixe. Le Monnier reprend quelques-uns des auteurs examinés par Louville (ne perdant jamais l'occasion de le critiquer, y compris dans la méthode de ses observations et dans ses résultats) et Riccioli, ajoutant que Gassendi a montré lui aussi que l'obliquité était invariable tout comme le montrent les mesures des astronomes plus récents (Tycho Brahe, Picard, Richer, Flamsteed). Pour Le Monnier, les différentes valeurs de l'obliquité obtenues au fil du temps sont dues à des erreurs instrumentales et à la nutation (dont il connaît les grands principes en raison de sa correspondance avec Bradley, p. xlviij). Autrement dit, Le Monnier pense que la formule (1) se réduit à : $\varepsilon = \varepsilon_0 + 9''2 \cos \Omega$.

Le Monnier décrit ensuite sa méridienne (p. xxxiv), montrant les avantages qu'elle possède grâce à sa lentille de 80 pieds (environ 26 m) de focale qui peut selon lui rivaliser avec les meilleurs quarts de cercle, en plus de sa stabilité sur une période de deux décennies pour mettre en évidence un phénomène très sensible. Par contre Le Monnier insiste longuement sur les problèmes liés à la réfraction au voisinage du solstice d'hiver¹¹ (un thème récurrent chez cet astronome) et qui peuvent altérer notablement le repérage de la tache lumineuse (p. xxxix). Le Monnier conclut son chapitre en évoquant le problème de la variation de la latitude des étoiles découvert par Halley (conséquence de la variation de l'obliquité), dont il cherche en vain la cause.

Tout ce long chapitre à charge sera ruiné moins de dix ans plus tard par Euler qui démontrera¹² non seulement la variation de l'obliquité (confirmée selon lui par les mesures des Anciens dont à nouveau celle de Pythéas) mais aussi son incidence sur la latitude écliptique des étoiles. Du coup Le Monnier va devoir admettre la formule (1) dans sa globalité :

$$\varepsilon = \varepsilon_0 - kT + 9''2 \cos \Omega$$

10. Sur la carrière astronomique de Le Monnier, voir M. Chapront-Touzé, « Aspects de l'œuvre et de la vie de Pierre-Charles Le Monnier, astronome et académicien, collègue de Grandjean de Fouchy », *Revue d'Histoire des Sciences*, 2008/1, t. 61, p. 89-104. Pour une vision détaillée de son oeuvre, voir l'éloge qu'en fit son élève Jérôme Lalande, « Éloge de Pierre Charles Le Monnier », *Magasin encyclopédique*, 3^e année, t. 4, 1797, p. 352-365.

11. Il est intéressant de noter que Le Monnier a utilisé une des tours de l'église Saint Sulpice pour y observer la réfraction et l'amplitude du Soleil à son coucher : « Diverses observations faites aux solstices et sur les réfractions, à Saint-Sulpice, en 1774 », *HARS*, p. 252-253, et « De l'amplitude du Soleil à son coucher observé à Saint-Sulpice », *HARS*, 1776, p. 558-560. Rappelons que la réfraction relève la hauteur du Soleil : pour obtenir la hauteur vraie, il faut soustraire la réfraction de la hauteur apparente. Des variations accidentelles de la réfraction provoquent des sursauts de la hauteur d'au moins une dizaine de secondes de degrés.

12. L. Euler, « De la variation de la latitude des étoiles fixes et de l'obliquité de l'écliptique », *Histoire de l'Académie Royale des Sciences et Belles Lettres de Berlin*, 1754, p. 296-336. Dans ce long article, Euler revient sur les *Institutions astronomiques* de Le Monnier, qu'il loue dans un premier temps avant de ruiner, dans sa conclusion les affirmations.

Sa méridienne va avoir pour but de déterminer k précisément et de vérifier, si comme Louville l'affirme, on a $\varepsilon = \varepsilon_0 - 60'' T + 9'' 2 \cos \Omega$. Car dans ce cas dit Le Monnier, en une révolution du noeud lunaire, k aura varié de $\approx 11''$.

Le Monnier s'adresse en 1743 au meilleur constructeur d'instrument de l'époque, Claude Langlois, pour réaliser techniquement la méridienne, qui est une bande de laiton de 40,3 m au sol qui se prolonge sur un obélisque haut de 10,72 m (fig. 7). Il est probable que la direction



Figure 7 – La méridienne de St-Sulpice vue depuis la plaque du solstice d'été. La bande de laiton s'étire au sol du Sud vers le Nord sur près de 40 m et remonte sur près de 12 m sur l'obélisque en hiver.

Nord-Sud géographique a été déterminée à la fois à l'aide d'horloges pour caler l'instant de passage au méridien (connaissant l'équation du temps) de la tache de lumière, complété par la méthode des hauteurs égales.

À la base de l'obélisque (réalisé par le décorateur G. N. Servandoni), on trouve un texte latin¹³ (en partie mutilé à la Révolution) qui laisse entendre que la méridienne a joué ou joue un rôle dans le problème de l'équinoxe lié à la date de Pâques (fig. 8 page suivante). Il n'en est rien. Il est tout à fait évident qu'en 1743, le problème de la détermination de l'équinoxe est résolu depuis plus d'un siècle et demi, avec la réforme grégorienne¹⁴ promulguée par Grégoire XIII en 1582, et qu'il n'y a aucune hésitation quant à la détermination précise de l'instant où le

13. Voir la traduction donnée dans G. Camus, P. de Divonne, A. Gotteland, B. Taillez, « Les méridiennes de l'église Saint-Sulpice à Paris », *L'astronomie*, *op. cit.*, p. 206-207.

14. Voir G. V. Coyne, M. A. Hoskin, O. Pedersen, *Gregorian Reform of the Calendar, Proceedings of the Vatican conference to commemorate its 400 th anniversary 1582-1982*, Cité du Vatican, 1983. On trouvera un texte présentant la méridienne, de ses enjeux et de la date pascale dans « Dimensions de l'Obélisque & du



Figure 8 – Texte gravé au pied de l’obélisque, en partie mutilé à la Révolution française. Le lien entre la méridienne et la détermination de la date de Pâques est purement fictif.

Soleil franchit l’équateur céleste. Il faut voir dans ce texte gravé, qui renvoie au concile de Nicée tenu en 325 et à Clavius (un des « astronomes habiles ») une sorte de justification flatteuse à l’endroit du curé Jean-Baptiste Languet de Gergy, faisant le lien entre le lieu de culte et un instrument scientifique. La position équinoxiale de la tache est matérialisée par une plaque en cuivre elliptique sur le chœur de l’église (fig. 9 page suivante), surélevée de 36 cm par rapport au sol de l’église¹⁵. À moins que l’instant de l’équinoxe tombe précisément à l’instant où le Soleil passe au méridien de l’église St-Sulpice (longitude $2^{\circ} 20' 6''$ E = 9 m 20 s, soit 1 seconde d’écart avec le méridien de l’Observatoire de Paris), la tache de lumière équinoxiale est le plus souvent un peu au-dessus ou un peu au-dessous de la plaque, la déclinaison du Soleil variant de 1' par heure à ces époques. Alors que le problème du nivellement des méridiennes était un enjeu d’importance à San Petronio et à Santa Maria del Fiore à Florence¹⁶, le problème ne se pose pas à Saint Sulpice puisque les observations se font uniquement au voisinage des solstices. Ce qui explique la rupture en altitude — peu orthodoxe — qu’on observe pour la partie équinoxiale de la méridienne se prolongeant sur le chœur (la ligne de laiton étant même absente au sud de la plaque de cuivre), confirmant au passage que la marque des équinoxes est surtout présente pour le décorum.

Gnomon élevés aux extrémités de la ligne Méridienne de l’Église de S. Sulpice », *Mercur de France*, janvier 1744, p. 176-185.

15. Pour les détails techniques de la méridienne, mesurés en 1987 par un géomètre-expert, voir A. Gotteland, « Mesure de la méridienne de Le Monnier à St Sulpice », *Observations & Travaux*, 1987, p. 23-36.

16. L. Ximenes, *Del Vecchio e nuovo Gnomone Fiorentino*, Florence, 1757. Sur cette méridienne construite par Ximenes à Santa Maria del Fiore, avec un oeilleton situé à 91 m de haut, voir les explications de Delambre, *Histoire de l’astronomie au XVIII^e siècle*, Paris, 1827, p. 394-406.



Figure 9 – Partie de la méridienne au voisinage des équinoxes, surélevée dans le chœur de l'église. Un ovale marque l'image du Soleil à cet instant. On notera que la bande est laiton s'arrête brutalement. Les deux arceaux en laiton qui coupent la méridienne servent de guide aux deux petites portes qui permettent d'accéder au chœur.

Dans la description que donne Le Monnier de sa méridienne¹⁷ en 1743, il explique les raisons pour lesquelles il dû installer deux oeillets (corniche extérieure portant ombre sur l'oeillon du haut), — ce qui est une première pour une méridienne —, dans le vitrail du transept Sud de l'église, vitrail qui fut opacifié pour rendre plus sombre le lieu et ainsi avoir un meilleur contraste (fig. 10 page suivante). L'oeillon le plus haut (80 pieds \approx 26 m) est utilisé pour le solstice d'hiver, tandis que l'oeillon le plus bas (75 pieds \approx 24,4 m) est utilisé pour le solstice d'été (fig. 11 page suivante). Le Monnier justifie également l'emploi d'une lentille pour observer la tache solaire au solstice d'été, lentille qui était habituellement rangée et calée dans son réceptacle¹⁸ ouvert seulement au voisinage du 21 juin.

Seules les extrémités de la méridienne sont graduées, bien qu'une partie de la plaque de marbre du solstice d'été ait été effacée. Cette dernière était recouverte d'une protection en cuivre (les attaches sont encore visibles) et n'était découverte que lors des observations¹⁹. Cela permettait de protéger les graduations des piétinements inévitables, qui ont depuis effacé des indications cruciales (fig. 12 page 103). Le Monnier a gravé sur cette plaque la position

17. « Sur le gnomon et l'obélisque de la méridienne de Saint Sulpice », *HARS*, 1743, p. 142-147, suivi dans le même volume de « Construction d'un obélisque à l'extrémité septentrionale de la méridienne de l'église Saint Sulpice », p. 361-366.

18. « Sur le gnomon et l'obélisque de la méridienne de Saint Sulpice », *HARS*, *op. cit.*, p. 145 : « L'objectif qui constitue cette nouvelle ouverture, & qui est d'environ 4 pouces de diamètre, est renfermé dans une boîte ou espèce de tambour qui ferme à clef, et que l'on ouvre que quand il s'agit de faire l'observation du solstice ».

19. On trouve dans la prolongation de la bande de laiton, juste au-dessus de la plaque de marbre, quatre traits de laiton perpendiculaires à la méridienne, écartés respectivement de 32 cm, 57 cm et 43 cm. Ces traits ne semblent pas correspondre à des hauteurs particulières du Soleil avant le solstice, mais à des ancrages de la méridienne dans le marbre.



Figure 10 – Vue extérieure du vitrail Sud de l'église St-Sulpice. On voit nettement sur la gauche les deux entrées qui font office d'œilleton. Une corniche située au-dessus du vitrail projette une ombre en été qui empêche la lumière de pénétrer dans l'œilleton du haut. D'où la nécessité qu'a eu Le Monnier d'installer un deuxième œilleton un peu plus bas.



Figure 11 – Vue intérieure du vitrail Sud de l'église St-Sulpice. Les deux œilletons sont visibles sur la droite. Ils sont situés dans le plan méridien. L'œilleton du bas est actuellement trop bas.

du solstice d'été le 21 juin 1745 (qui tombait à 11 h UT) en matérialisant les bords inférieurs et supérieurs de l'image²⁰ du Soleil (fig. 13 page suivante) : « *Les termes du grand axe de l'image du Soleil, gravés sur le marbre en 1745, sont marqués par des traits noirs d'une épaisseur assez sensible pour être vus sans loupe ; ces termes ont été gravés dans la plus grande élévation du Soleil, c'est-à-dire lorsque le noeud de la Lune était dans le Bélier* ». Le Monnier a également fait graver sur le marbre²¹ : *Obliquitas eclipticae maxima 23° 28' 40''*. Le dessin de la gravure²², donné dans le mémoire de 1764, n'existe plus aujourd'hui sur le marbre.

Les graduations de l'obélisque qui matérialisent l'image du Soleil au solstice d'hiver sont elles encore visibles aujourd'hui, entourant le signe zodiacal du Capricorne (fig. 14 page 104). Il est évident que Le Monnier devait utiliser une sorte d'échelle pour repérer avec précision les bords de la tache solaire quasi-circulaire aux alentours du solstice de décembre. C'est d'ailleurs un avantage dont il faut souligner le mérite : la projection sur l'obélisque de la tache de lumière issue de l'œilleton, bien que de déplacement rapide (4 mm/s en hiver contre 2 mm/s

20. « Sur les observations solsticiales faites à Saint Sulpice », *HARS*, 1762, p. 128-131. La précision relative au « noeud de la Lune dans le Bélier », c'est-à-dire ayant une longitude nulle, signifie que le terme de la nutation en obliquité était maximale, d'où une hauteur également maximale du Soleil.

On trouvera une analyse magistrale, à la fois historique et méthodologique, du problème de la diminution de l'obliquité par J. Lalande, « Mémoire sur la diminution de l'obliquité de l'écliptique et sur les conséquences qui en résultent », *HARS*, 1780, p. 285-314.

21. Le calcul moderne donne $23^{\circ} 28' 28''{,}77$, soit $11''{,}23$ d'écart avec la valeur de Le Monnier. Au solstice d'hiver du 21 décembre 1744, la déclinaison maximale du Soleil était de $-23^{\circ} 28' 28''{,}08$. On notera que si h_e est la hauteur du Soleil au solstice d'été et h_h la hauteur du Soleil au solstice d'hiver, on a $2\varepsilon = h_e - h_h$.

22. « Solstices d'été observés avec le verre objectif de 80 pieds de foyer fixé dans le plan du Gnomon ou de la Méridienne, tracée dans l'église de Saint-Sulpice », *HARS*, 1762, p. 266 bis.

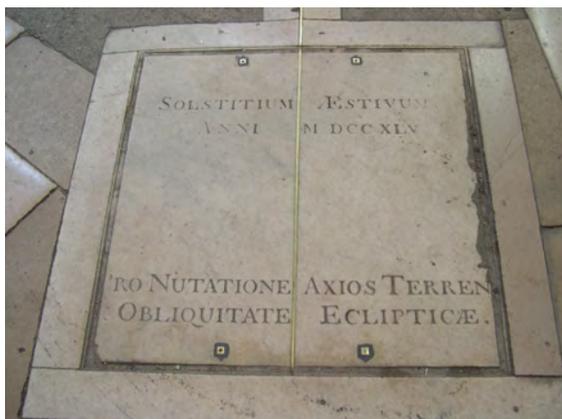


Figure 12 – Plaque de marbre où se projetait l'image du Soleil (ayant traversé une lentille) au solstice d'été, matérialisée par Le Monnier en 1745. Les marques ont été effacées. Les quatre poinçons encore visibles en haut et en bas servaient à fixer une plaque en laiton qui protégeait le marbre, découvert uniquement lors des mesures.

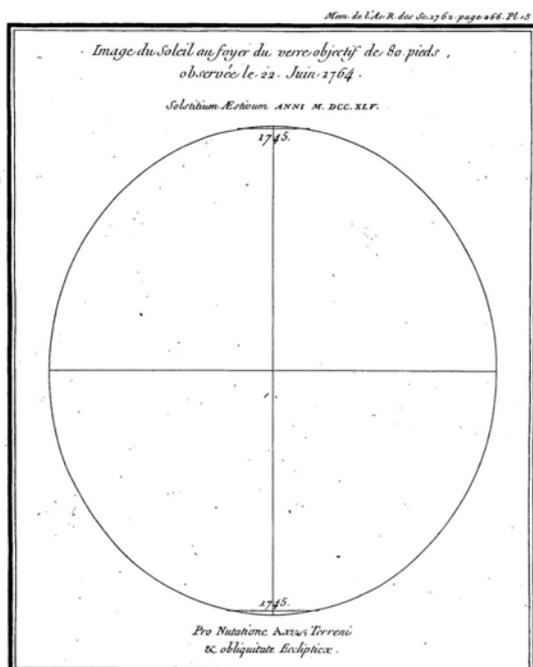


Figure 13 – Dessin de Le Monnier représentant l'image du Soleil matérialisée en 1764 : on voit aux deux extrémités de l'ellipse solaire les traits des bords inférieurs et supérieurs du Soleil gravés en 1745. Pour Le Monnier, la quasi-coïncidence des bords à 19 ans d'intervalle prouve que l'obliquité n'a pas diminué.

en été) est presque circulaire et permet de déterminer avec plus de précision les bords de la tache, contrairement aux méridiennes classiques horizontales où la tache d'hiver atteint des proportions énormes²³ (par exemple 1,84 m de grand axe à San Petronio).

Le Monnier insiste également dès 1743, et il y revient à plusieurs reprises, sur la stabilité du bâtiment, condition essentielle il l'a bien compris pour ne pas compromettre les mesures : un affaissement du portail Sud aurait des conséquences désastreuses sur la mise en évidence de la variation de l'obliquité, ce que l'astronome Lalande ne manquera pas se soulever dans un premier temps devant l'absence de résultats de la méridienne.

23. Le Monnier souligne cette particularité dès 1743, *HARS*, « Construction d'un obélisque à l'extrémité septentrionale de la méridienne de l'église Saint Sulpice », *op. cit.*, p. 364. Sur la méridienne de Bologne construite par Cassini, voir G. Paltrinieri, *La Meridiana della Basilica di San Petronio in Bologna*, 2001, p. 65-67. Cette méridienne, où l'oeilleton est placé à 27,07 m de haut, avec un diamètre de 27,07 mm, mesure 66,811 m de long (latitude 44° 29' 37''6). Sur la méridienne des Chartreux à Rome, voir A. Schiavo, *La Meridiana di S. Maria degli Angeli*, Istituto Poligrafico e Zecca Dello Stato, Libreria Dello Stato, 1993, p. 87-91.



Figure 14 – Image du Soleil au voisinage du solstice d'hiver sur l'obélisque. Au-dessus et en-dessous du symbole zodiacal du Capricorne, on voit encore nettement les graduations de Le Monnier effectuées en 1743 et 1744.

Sa méthode générale d'observation est la suivante²⁴ : « [...] *Il marqua sur le marbre avec du crayon, pendant quelques jours, devant & après le solstice, la trace des deux bords supérieur & inférieur de l'image, & calculant ensuite la déclinaison par la distance du Soleil au solstice, il en tira la position du point solsticial* ». En d'autres termes, Le Monnier fait une interpolation pour déterminer l'instant du solstice, celui-ci correspondant à la déclinaison maximale du Soleil.

Le Monnier explique qu'il a gravé le « *terme solsticial* », c'est-à-dire la position de l'image du Soleil à sa déclinaison maximale, « *en minutes et demi-minutes* », en décembre 1744 et donne le dessin de ses graduations et observations²⁵, accompagné d'un plan général de la méridienne : avec la représentation de l'image du Soleil en été, c'est le seul dessin de Le Monnier sur son instrument.

4 Les résultats obtenus avec la méridienne

Les observations de Le Monnier vont s'étaler à Saint Sulpice de 1743 à 1782. Plusieurs autres astronomes vont y faire des mesures (Lalande, Grandjean de Fouchy, La Condamine, Le Gentil, J. W. Wallot, Duvaucel, Tuillier...), qui n'ont lieu, rappelons-le, qu'au voisinage des solstices. Ce n'est donc pas du tout le même programme observationnel que celui mis en place par exemple à San Petronio, où près de 4500 observations quotidiennes de hauteurs du Soleil²⁶ vont s'étaler de 1655 à 1736 ; ou encore de celui qui se déroule non loin de Saint Sulpice, à l'Observatoire de Paris, où Jacques Cassini, qui a achevé sa méridienne en 1732,

24. « Sur la comparaison des hauteurs solsticiales d'hiver, observées en 1762 & 1764, avec celles qui ont été vues à l'Obélisque du Gnomon de St. Sulpice en 1743 & 1744 », *HARS*, 1765, p. 75-77.

25. « Comparaison des hauteurs solsticiales aux environs du tropique du Capricorne observées en 1762 & 1764, avec celles qui ont été vues à l'obélisque du Gnomon de St Sulpice en 1743 & 1744 », *HARS*, 1765, p. 432-434. La figure annoncée par Le Monnier de la graduation de l'obélisque se trouve dans « Suite des observations faites à Saint-Sulpice, au foyer du Verre objectif, qui est distant de quatre-vingt pieds », *HARS*, 1773, p. 66 bis.

26. On trouvera la somme des observations effectuées à San Petronio dans E. Manfredi, *De Gnomone Meridiano Bononiensi Ad Divi Petronii*, Bologne, 1736. On y trouve une table de réfraction d'après Cassini (p. 11), une table de la parallaxe du Soleil en fonction de la hauteur (p. 45) et des exemples clairs de réduction de hauteur apparente en hauteur vraie. Pour chaque jour, le nom de l'observateur est inscrit, ainsi que l'état du ciel, et les hauteurs (en fait la distance zénithale) des bords du Soleil.

observera pendant 25 ans les hauteurs du Soleil²⁷, sans pour autant se prononcer sur une valeur fiable de la diminution de l'obliquité.

Le raisonnement de Le Monnier pour mettre en évidence une éventuelle diminution de l'obliquité était le suivant : en fixant l'image du Soleil aux deux solstices de 1744, époques où la nutation passe par un maximum, il suffit d'attendre une révolution complète du nœud lunaire pour retomber sur la même valeur de nutation, ce qui annule cette composante. S'il n'y a pas une diminution de l'obliquité, alors l'image du Soleil en 1763 recouvrira exactement l'image de 1744 ; ou plus précisément, les bords inférieurs et supérieurs du Soleil seront à nouveau en coïncidence.

Au contraire, s'il y a une diminution de l'obliquité²⁸, l'image du Soleil au solstice d'été sera décalée vers le Nord (puisque la hauteur solsticiale sera plus petite) tandis que l'image du Soleil au solstice d'hiver sera décalée vers le bas (fig. 15 & 16 page suivante).

Dès 1762, Le Monnier publie dans l'Histoire de l'Académie Royale des Sciences (HARS) ses premiers résultats²⁹ qui sont très attendus : il fait le compte-rendu de ses observations des solstices d'été des années 1747, 1748 (observés par La Condamine et Le Gentil), 1749, 1750, 1751, 1752, 1754, 1755, 1761, 1763, 1764. Pour les observations des solstices d'hiver, on ne dispose que des comparaisons entre 1743-1744 et 1762-1764, ce qui témoigne d'une confiance moyenne dans les hauteurs d'hiver, affectées par une réfraction parfois imprévisible (fig. 17 page 107). La conclusion est la suivante : « *Il paraît donc résulter de la suite des observations, faites au gnomon de Saint-Sulpice, & communiquées par M. le Monnier, que l'obliquité de l'écliptique n'a eu d'autres variations que celles qu'y occasionnent la nutation dont nous avons parlé en 1745, & dont on trouvera les principes en ce volume dans l'Éloge de M. Bradley; il faut donc abandonner la diminution absolue de l'écliptique, que la comparaison des observations anciennes aux modernes, semble donner de 45 secondes en un siècle, ou au moins la supposer beaucoup plus petite, puisqu'elle n'aurait produit aucune différence sensible*

27. Voir l'article fondamental de P. Descamp, « La ligne méridienne de l'Observatoire de Paris : une analyse des registres des observations de Cassini II de 1730 à 1755 », *Revue d'Histoire des Sciences*, t. 67, 2014/1, p. 35-70. Cassini IV publie des résultats en 1778 dans *HARS*, p. 484-504, « Mémoire sur l'obliquité de l'écliptique déterminée par les observations faites à l'Observatoire royal de Paris depuis 1739 jusqu'en 1778 », et donne un tableau à la fin où la diminution séculaire varie de 60'' à 88'' par siècle. À aucun moment il n'est question de Le Monnier et de sa méridienne.

28. Le calcul moderne montre que de 1744 à 1764, l'obliquité a diminué de $\approx 8''$. Si l'on prend comme latitude pour l'église Saint Sulpice $48^\circ 51' 3''$, on a comme hauteurs vraies à midi solaire aux solstices :

$$\begin{array}{ll} \text{été 1745 : } h = 64^\circ 37' 26'' & \text{été 1764 : } h = 64^\circ 37' 15'' \\ \text{hiver 1745 : } h = 17^\circ 40' 28'' & \text{hiver 1764 : } h = 17^\circ 40' 38'' \end{array}$$

En prenant une hauteur de l'œilleton de 75 pieds (= 2436,3 cm) pour l'été, cela représente un déplacement théorique de la tache au sol de 0,16 cm vers le Nord (l'image se forme à 1155,7 cm environ de la verticale de l'œilleton). Et en prenant une hauteur de l'œilleton de 80 pieds (= 2598,72 cm) pour l'hiver, cela représente un déplacement théorique de la tache sur l'obélisque de 0,14 cm vers le bas.

L'écart entre la variation séculaire ($\approx 8''$) et l'écart obtenu avec les différences de hauteurs (10'' à 11'' est dû au fait que l'instant du solstice ne tombe pas à midi vrai, et donc que la déclinaison a varié entre l'instant du solstice (défini comme celui où la longitude écliptique apparente vaut 90° ou 270°) et l'instant de la mesure sur la méridienne.

Quant à l'effet de nutation (en une demie période du nœud ascendant de la Lune, soit $18''$ d'amplitude), il se traduit au sol par un déplacement de 0,26 cm et par 0,25 cm sur l'obélisque.

29. *HARS*, « Sur les observations solsticiales faites à Saint Sulpice », p. 128-131, et « Solstices d'été observés avec le verre objectif de 80 pieds de foyer fixé dans le plan du Gnomon ou de la Méridienne, tracée dans l'église de Saint-Sulpice », p. 263-266, et « Sur la comparaison des hauteurs solsticiales d'hiver, observées en 1762 & 1764, avec celles qui ont été vues à l'Obélisque du Gnomon de St Sulpice en 1743 & 1744 », *op. cit.*, p. 75-77.

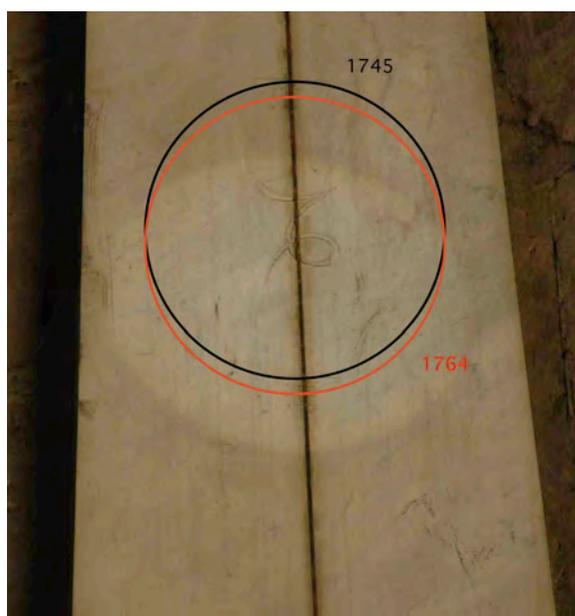


Figure 15 – Si l’obliquité de l’écliptique diminuait, Le Monnier aurait dû observer à 19 ans d’intervalle (période de la nutation) un abaissement de l’image du Soleil aux solstices d’hivers entre 1745 et 1764 (il s’agit ici d’une simulation exagérée).

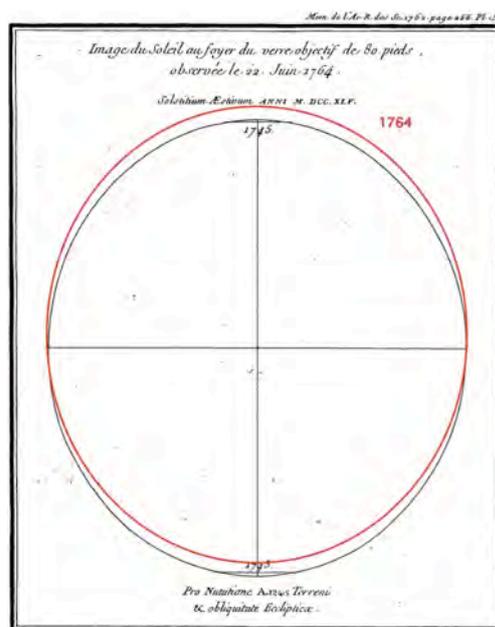


Figure 16 – Si l’obliquité de l’écliptique diminuait, Le Monnier aurait dû observer à 19 ans d’intervalle (période de la nutation) un déplacement vers le Nord de l’image du Soleil aux solstices d’étés entre 1745 et 1764 (il s’agit ici d’une simulation exagérée).

dans l’espace de dix huit ans, & il paraît effectivement que M. le Monnier inclineroit à la regarder comme très petite ».

Immédiatement après ce mémoire de Le Monnier, Jérôme Lalande, convaincu lui d’une variation séculaire de l’obliquité, publie un texte³⁰ où il propose d’expliquer l’absence de résultats probants avec la méridienne par un abaissement de l’objectif de « *une ligne en dix huit ans pour faire paraître constante l’obliquité de l’écliptique* ». Il ajoute : « [...] *je suis même étonné que le gnomon de Saint-Sulpice ne fasse pas paraître une augmentation dans l’obliquité de l’écliptique : il est difficile de concevoir qu’un mur de quatre-vingt pieds, dont le poids est immense, & et qui porte une voûte terrible, ne se soit pas surbaissé ou affaissé que d’une ligne en dix-huit ans, surtout un mur presque neuf & qui n’a pas encore acquis toute sa consistance* ».

Le Monnier réplique en 1765 aux doutes de Lalande sur la stabilité de l’édifice³¹, bâti lui a-t-on assuré « sur le roc » ; pour la première fois, il semble observer, mais c’est au conditionnel, une variation de l’obliquité, qu’il estime de 12'' en vingt ans. Mais deux ans plus tard, il affirme qu’il n’observe toujours pas de diminution³², y compris avec son quart-de-cercle mobile, et conclut : « *D’où l’on voit, après tant de preuves accumulées, que l’obliquité de l’écliptique*

30. « Mémoire sur la manière dont on peut concilier les Observations faites à Saint-Sulpice, avec la diminution connue de l’obliquité de l’Ecliptique », *HARS*, 1762, p. 267-268. Lalande trouve comme le calcul moderne une diminution de 8'' pour l’obliquité entre 1745 et 1763. Rappelons que une ligne = 2,256 mm.

31. « Comparaison des hauteurs solsticiales aux environs du tropique du Capricorne, observées en 1762 & 1764, avec celles qui ont été vues à l’obélisque du Gnomon de St. Sulpice », *HARS*, 1765, p. 432-434.

32. « Solstice d’été de 1767, observé au foyer d’une Verre objectif de 80 pieds, à l’Église de Saint-Sulpice, avec d’autres Observations du Soleil & d’Arcturus faites aux Quarts-de-cercle mobile », *HARS*, 1767, p. 417-422.

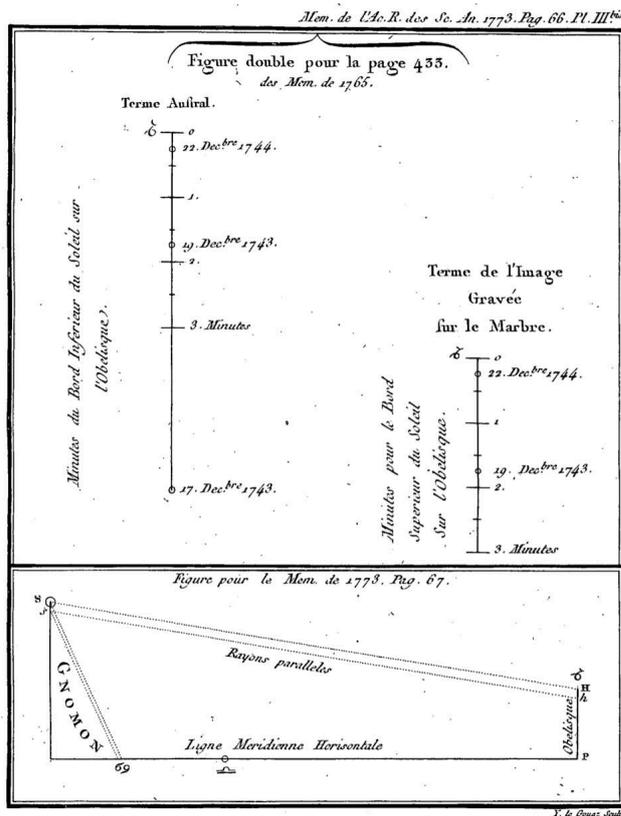


Figure 17 – Dessin de Le Monnier représentant l'image du Soleil matérialisée sur l'obélisque aux solstices d'hiver de 1743 et 1744. La confiance de Le Monnier pour les mesures aux solstices d'hivers était entachée par l'influence de la réfraction qui a tendance à relever l'image du Soleil. On trouve un autre dessin qui montre les conséquences sur l'image du Soleil d'un affaissement de l'œilleton.

n'a pas varié sensiblement pendant vingt-cinq à trente ans, ainsi que je l'avais déjà remarqué autrefois à l'occasion des hauteurs solsticiales de Mrs Picard & de la Hire ».

Nouveau compte-rendu d'observations en 1773 où Le Monnier admet une diminution de l'obliquité mais bien plus faible que la proposition de Louville ; l'auteur revient à nouveau sur la stabilité de l'édifice et argumente en montrant les conséquences d'un affaissement (avec un schéma) qui ne se produit pas selon lui. Il est fort possible de cet argument lui ait été soufflé par J. W. Wallot qui va publier en 1775 un savant mémoire de gnomonique³³ sur les conséquences, dans l'observation, d'un défaut de positionnement de l'œilleton.

Enfin, en 1774, Le Monnier conclut ses observations solsticiales³⁴ d'été et d'hiver par une valeur de « 10'' à 11'' pour la diminution d'obliquité » en 30 ans, soit 33'' par siècle. Ce cours mémoire est précédé par une introduction³⁵ (sans doute du secrétaire perpétuel) qui discute de la différence entre la diminution déduite par Le Monnier (33'') et la valeur déduite par Lagrange (56'') obtenue la même année (cf. *infra*) ; il est évident que la confiance va au résultat de Lagrange, bien que la conclusion ménage Le Monnier en proposant de nouvelles observations à Saint Sulpice.

33. J. W. Wallot, « Méthode directe de démêler par la comparaison des observations solsticiales faites à un gnomon, l'effet de la variation de l'obliquité de l'Ecliptique d'avec celui d'un dérangement supposé dans le stile du même gnomon », *Historia et Commentationes, Acta Academiae Theodoro-Palatinae*, t. 3, Manheim, 1775, p. 319-341. L'astronome démontre qu'un affaissement de l'œilleton provoque une augmentation de l'obliquité pour les mesures faites au solstice d'été, et une diminution de l'obliquité pour les mesures faites au solstice d'hiver.

34. « Diverses observations faites aux solstices et sur les réfractions à Saint-Sulpice, en 1774 », *HARS*, 1774, p. 252-253.

35. « Observations faites au gnomon de Saint-Sulpice », *HARS*, 1774, p. 45-46.

Dans les années qui suivent, Le Monnier ne publie de nouvelles observations³⁶ qu'en 1783 où il relate ses mesures du solstice d'été 1782 ; il explique que ses mesures ne sont pas altérées par la conjonction Jupiter-Saturne qui influence, selon lui, la nutation (?). Il semble que ce soit la dernière observation sur les solstices observés à la méridienne, ce qui se conçoit puisqu'en 1783, la longitude du nœud lunaire est à nouveau nulle : il s'est écoulé 38 ans depuis 1745, soit deux révolutions du nœud.

Il faut ajouter que deux événements majeurs sont intervenus et qui expliquent que Le Monnier soit moins catégorique, et qui l'obligent, dans une certaine mesure, à justifier que sa méridienne donne enfin des résultats : le premier est la publication par Lagrange en 1774 et en 1778 de deux importants mémoires de mécanique céleste³⁷, démontrant et confirmant les découvertes d'Euler sur la diminution de l'obliquité. Lagrange estime cette diminution à 56'' par siècle (Euler 48''), l'incertitude portant sur la masse de Vénus dont le rôle dans la diminution de l'obliquité est prépondérant. Or Vénus n'ayant pas de satellite, il est très difficile d'en déduire la masse qui est l'élément fondamental pour calculer la variation séculaire. Le problème est plus simple pour Jupiter où l'utilisation d'un satellite (le quatrième) permet de déduire la masse avec suffisamment de précision³⁸.

Le deuxième événement est la publication par Lalande en 1783 (lu en 1780 à l'Académie) d'un volumineux et remarquable mémoire³⁹ sur la diminution de l'obliquité qui constitue un tournant. Lalande y affirme qu'il ne fait plus aucun doute qu'il existe une diminution séculaire de l'obliquité et il revient sur la méridienne de Saint Sulpice et sur ses résultats qu'il synthétise, abandonnant au passage son hypothèse d'un tassement du bâtiment pour expliquer l'absence de résultats en 1762. Lalande en profite pour évoquer une autre méridienne où il a observé le solstice d'été en 1765, celle de Florence, construite par L. Ximenes en 1757. Le gnomon de Santa Maria del Fiore donne une diminution de 34'' par siècle, tandis que la méridienne de San Petronio (selon Ximenes) donne 30'' par siècle. Lalande adopte une diminution de 33'' par siècle (la valeur véritable est 46''8).

C'est en 1788 que l'on trouve, semble-t-il, le dernier mémoire de Le Monnier consacré à sa méridienne⁴⁰ et à l'obliquité en général. Il y fait une confession et une proposition : « *Nous n'avons pas toujours la commodité de vérifier dans les grandes églises dont les portes sont ouvertes, & où les courants d'air nuisent à l'état naturel d'un fil vertical d'environ 75 pieds, la distance de l'image à l'égard de l'aplomb qui répond au zénith [...]. Mais il serait à désirer, puisque l'Observatoire royal est bientôt rétabli, qu'on y continuât les observations d'été &*

36. « Observations faites en 1782, au solstice d'été, au gnomon et verre objectif de Saint-Sulpice », *HARS*, 1783, p. 47-48.

37. Grange (Lagrange), « Recherches sur les équations séculaires des mouvements des nœuds, et des inclinaisons des orbites des Planètes », *HARS*, 1774, p. 97-174 (p. 169 sur l'obliquité). Lagrange, « Sur la diminution de l'obliquité de l'écliptique », Mémoire lu par Lagrange à l'Académie des Sciences de Berlin, le 26 février 1778. Ce dernier mémoire contient une discussion très intéressante sur la détermination de la masse de Vénus et Lagrange propose même qu'on utilise la diminution séculaire de l'obliquité, mesurée à partir des gnomons et de l'analyse des données historiques, pour estimer la masse de la planète. Voilà une utilisation tout à fait originale d'une méridienne !

38. Ce problème est traité par Laplace, *Traité de Mécanique Céleste*, t. III, Paris, 1802, p. 63, qui déduit la masse de Vénus de la diminution séculaire de l'obliquité de l'écliptique. Voir J. K. Fotheringham, « The mass of Venus and the obliquity of the ecliptic », *Astronomische Nachrichten*, n° 6121, 1935, p. 2-18.

39. Lalande, « Mémoire sur la diminution de l'obliquité de l'écliptique sur les conséquences qui en résultent », *HARS*, *op. cit.*. Ce mémoire magistral mériterait à lui seul une longue analyse. Lalande passe en revue toutes les observations contemporaines et anciennes, et discute des conséquences d'une modification de la masse de Vénus déduite de la diminution séculaire de l'obliquité.

40. « Nouvelles comparaisons des hauteurs solsticiales faites au quart de cercle mobile, suivies de quelques autres dont la date est moins ancienne, & qui ont été faites soit au foyer d'un verre objectif de 80 pieds, soit au plus grand des quarts de cercle muraux », *HARS*, 1788, p. 4-8.

celles d'hiver à la méridienne tracée dans la grande salle, & dont l'Académie a supporté les grands frais en l'année 1732. Il n'y manque que d'y fixer pour le solstice d'été un verre objectif de 30 à 40 pieds de foyer ». On voit bien que la confiance de Le Monnier dans les résultats de la méridienne de Saint Sulpice, est un peu ébranlée par les difficultés qu'il y a à y faire des mesures dans une atmosphère adéquate. Sa proposition de placer un objectif en verre à la place de l'ocillon de la méridienne de Cassini à l'Observatoire de Paris sera réalisée puisqu'une lentille biconvexe de 85 mm de diamètre, modulable en inclinaison, fait désormais office d'ocillon, sans que l'on sache dater en quelle année a eu lieu ce changement.

La méridienne de Saint Sulpice va alors tomber dans un certain oubli, supplantée par les quarts-de-cercle bien plus précis. Le problème de la valeur de la diminution séculaire ne sera pas pour autant résolu tout de suite. Laplace⁴¹ à son tour, s'attaque à l'examen des sources anciennes qu'il sélectionne, en discutant et corrigeant les valeurs, avec, à son avantage, des mesures chinoises remontant au XI^e siècle avant notre ère rapportées par le père Gaubil. Le mécanicien revient également sur les mesures de Pythéas, d'Eratosthène, de Ptolémée ; il prend en considération deux sources arabes, puis prend en compte des sources chinoises tardives, ainsi que les mesures d'Ulugh Begh à Samarkande. Laplace compare les onze valeurs d'obliquités choisies à celles issues des formules de sa Mécanique céleste et conclut à la diminution incontestable de l'obliquité. À aucun moment il ne prend en compte les mesures effectuées depuis le XVII^e siècle avec des méridiennes. Quant à Delambre, il adopte une valeur⁴² de 50".

L'objectif que c'était fixé Le Monnier avec sa méridienne de Saint Sulpice est donc atteint, même si le résultat est quelque peu mitigé ; l'astronome a pu mettre en évidence une diminution de l'obliquité de l'écliptique sur presque 40 ans d'observations, mais sa valeur reste inférieure à la valeur réelle de 13" : ce n'est pas si mal ! Delambre, dans son ouvrage posthume⁴³, a bien résumé la situation en 1827 : « *Il y a grande apparence qu'on ne fera plus de gnomons nouveaux ; mais il faut conserver au moins les anciens ; et il n'en coûterait pas beaucoup pour les consulter tous les ans. Il paraît qu'on les néglige. Depuis longtemps on n'a rien dit de celui de Saint-Sulpice, et nous ne voyons pas qu'à Florence on ait mis une importance plus réelle au gnomon gigantesque, restauré avec tant de peines et de dépenses en 1755. Tout ce qu'on peut dire en leur faveur, c'est que, s'ils n'ont pas fait connaître la quantité précise de la diminution d'obliquité, ils ont au moins mis cette diminution hors de doute. Le Monnier, qui la contestait opiniâtrement, a été obligé de l'admettre, mais la moindre qu'il a pu. Les gnomons ont donné probablement une diminution beaucoup trop faible ; les géomètres l'ont faite probablement un peu trop forte ; les astronomes ne la croient que 45 ou 46" par siècle. Le temps seul pourra décider cette question difficile* ».

En 2018, l'état de la méridienne devient très préoccupant. Il y a presque 30 ans, les auteurs d'une étude sur la méridienne insistaient déjà sur l'urgence de protéger la plaque de marbre du solstice d'été⁴⁴, piétinée par les nombreux visiteurs et paroissiens. C'est encore plus vrai aujourd'hui et la bande de laiton est par endroits abîmée comme le marbre qui la supporte. Il faudrait protéger l'ensemble avec des plaques de plexiglas souple et transparent, comme cela se fait avec la méridienne de Cassini à l'Observatoire de Paris.

41. Laplace, « Mémoire sur la diminution de l'obliquité de l'écliptique qui résulte des observations anciennes », *Connaissance des Temps pour l'an 1811*, Paris, 1809, p. 429-450.

42. Delambre, *Astronomie théorique et pratique*, Paris, 1814, t. 3, p. 185. Delambre commente à son tour les valeurs d'obliquité mesurées par les Anciens.

43. Delambre, *Histoire de l'astronomie au XVIII^e siècle*, op. cit., p. 406.

44. G. Camus, P. de Divonne, A. Gotteland, B. Taillez, « Les méridiennes de l'église Saint-Sulpice à Paris », *L'astronomie*, op. cit., p. 214.

L'œilleton du bas, qui sert théoriquement à projeter une image au solstice d'été, n'est toujours pas opérationnel (il est trop bas), de sorte qu'on ne voit aucune image vers le 21 juin. Quant aux multiples trous du vitrail, ils projettent au sol et sur l'obélisque plusieurs taches de lumière parasites qui rendent la simple lecture du midi solaire vrai impossible pour le néophyte (fig. 18).

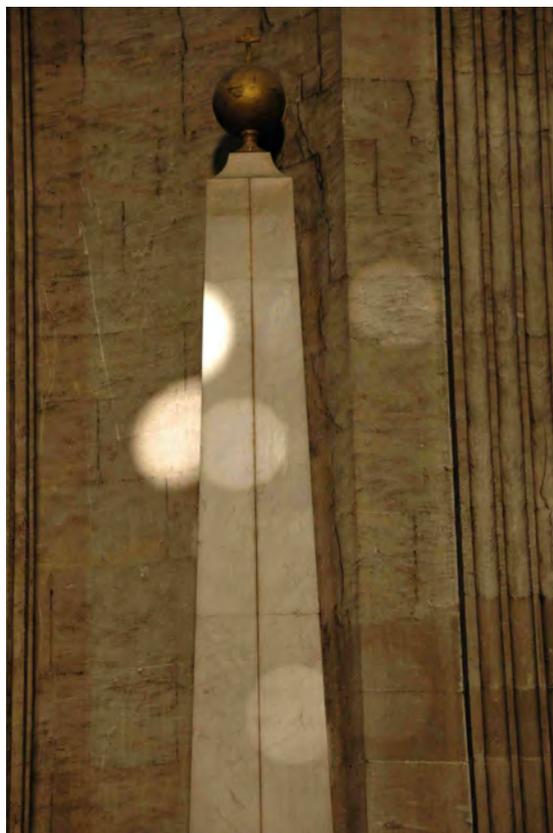


Figure 18 – Images parasites du Soleil en hiver dues aux ouvertures inappropriées dans le vitrail. À l'époque de Le Monnier, le vitrail était opaque.

De plus, cette méridienne n'est pas mise en valeur ; or c'est un instrument astronomique unique autour duquel il y a beaucoup à dire et à faire découvrir pour le public, qu'il soit adulte ou scolaire.

Il serait dommage qu'un tel patrimoine scientifique disparaisse par négligence !



Le double cadran solaire horizontal de Benjamin Scott du musée des Arts et Métiers

par Denis Savoie¹

Description du double cadran solaire horizontal exposé au musée des Arts et Métiers à Paris.

Le musée des Arts et Métiers à Paris expose dans sa collection d'objets scientifiques un cadran solaire exceptionnel, réalisé en 1713 par le constructeur d'instruments mathématiques² Benjamin Scott (1688-1751). On appelle ce type de cadran « double cadran » car il combine deux cadrans solaires sur une même platine : un cadran classique à style polaire en projection gnomonique, et un cadran à style droit en projection stéréographique³ (fig. 1 page suivante). Il s'agit d'un instrument typiquement d'origine anglaise, imaginé par le mathématicien William Oughtred (1574-1660) dont on connaît actuellement une trentaine d'exemplaires⁴. En France,

1. SYRTE, Observatoire de Paris, PSL Research University, CNRS, Sorbonne Universités, UPMC Univ. Paris 06, LNE, 61 avenue de l'Observatoire, 75014 Paris, France, et musée des Arts et Métiers, 60 rue Réaumur, 75003 Paris.

2. On trouvera une courte biographie (et la description d'un cadran plus classique tracé par B. Scott) dans J. Davis, « A Benjamin Scott horizontal Dial », *Bulletin of the British Sundial Society*, vol. 22 (iii), septembre 2010, p. 18-22 et dans J. Davis et M. Lowne, *The Double Horizontal Dial*, Monograph N° 5, éd. British Sundial Society, 2009, p. 151.

3. On consultera avec profit l'étude de L. Janin, « Astrolabe et cadran solaire en projection stéréographique horizontale », *Centaurus*, 1979, vol. 2, n° 4, p. 298-314, qui se conclut par une photo du cadran de B. Scott du musée des Arts et Métiers. Cet aspect de la projection stéréographique appliqué à un cadran solaire est abordé de façon succincte dans R. D'Hollander, *L'Astrolabe, histoire, théorie, pratique*, éd. Institut Océanographique, Paris, 1999, p. 290-291 tout comme H. Michel, *Traité de l'astrolabe*, Paris, 1947, p. 129-130.

4. L'étude incontournable et la plus complète sur ces doubles cadrans est due à J. Davis et M. Lowne, *The Double Horizontal Dial, op. cit.* (241 pages), qui contient un inventaire des doubles cadrans connus. Sur les querelles liées à la priorité de l'invention du double cadran, voir A. J. Turner, « William Oughtred, Richard Delamain and the Horizontal Instrument in Seventeenth Century England », *Annali dell' Instituto e Museo di Storia della Scienza di Firenze*, année VI, fasc. 2, 1981, p. 99-125. Notons qu'on ne connaît qu'un seul exemplaire de double cadran réalisé par B. Scott.



Figure 1 – Le double cadran solaire de Benjamin Scott de 52 cm de diamètre.

ce type de cadran n'a pas eu le même succès qu'en Angleterre et très peu d'auteurs le mentionnent ⁵.

L'intérêt principal de combiner deux cadrans sur une même platine repose sur la facilité d'orienter l'ensemble dans la direction du méridien, uniquement par rotation : il faut que les deux cadrans indiquent la même heure pour que la direction Nord-Sud géographique soit déterminée. Cette particularité, mise en avant par de nombreux auteurs, n'est jamais véritablement démontrée (cf. *infra*). Mais elle ne justifie pas à elle seule la réalisation d'un tel cadran : il faut y voir plus qu'un simple cadran solaire. C'est en effet un véritable instrument de calcul qui permet de résoudre des problèmes d'astronomie liés au mouvement du Soleil au cours de la journée et de l'année. La finesse de la gravure du double cadran de Benjamin Scott, alliée à l'extrême précision et justesse de ses tracés, font de cette pièce harmonieusement composée un chef d'oeuvre. Ajoutons que nombre de ces doubles cadrans ornent toujours

5. Le seul auteur qui explique la réalisation de ce type de cadran est Jacques Ozanam dans le tome 5 de son *Cours de mathématique*, Paris, 1697 (qui contient un traité de gnomonique très original). Le problème X s'intitule « Décrire un astrolabe horizontal » est accompagné d'une planche où un double cadran est dessiné (planche 8). Il faut dire que l'invention par le français Vaulezard en 1640 du cadran analemmatique, — qui est aussi un cadran d'azimut mais à style mobile —, popularisé par Lalande notamment, a occulté en France cette invention anglaise d'Oughtred. Sur une application moderne de ce type de cadran, voir D. Collin, « L'astrolabe d'Oughtred », *Cadran Info* n° 27, 2013, p. 21-38.

certains parcs anglais depuis plusieurs siècles, signe qu'ils ne sont pas tous destinés à passer leur vie exposé dans un musée.

On se propose ici de décrire dans le détail cet objet ⁶ et de donner pour la première fois une traduction commentée en français du texte composé par Scott pour accompagner son cadran, qui semble être entré au musée ⁷ des Arts et Métiers avant 1818.

1 Description générale

Le double cadran est une platine de 52 cm de diamètre en laiton très peu altéré, épaisse d'environ 1 cm et pesant 19,57 kg (fig. 2). Une première couronne de 4 cm de large comportant les chiffres romains de IIII à VIII indiquant l'heure solaire constitue le cadran en projection gnomonique, fonctionnant avec le style polaire épais de 39 cm de long. Le style robuste est maintenu perpendiculaire à la platine à l'aide de deux cales latérales et fixé par une clavette sous la platine.

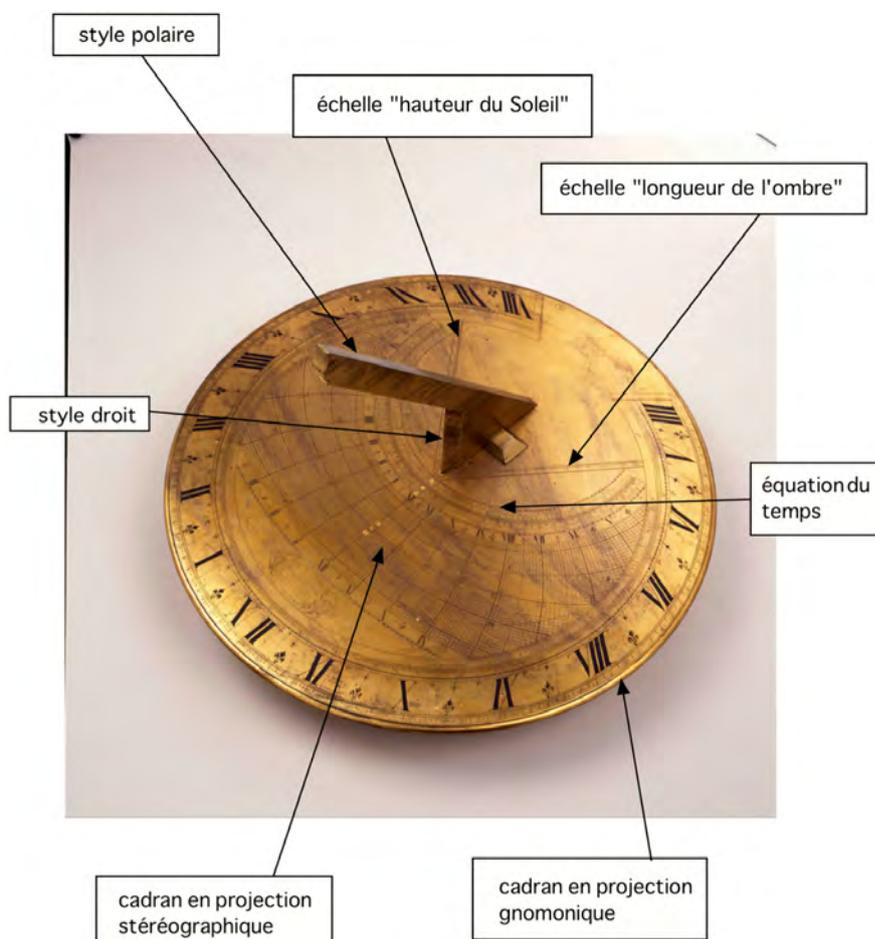


Figure 2 – Détails sur les informations astronomiques figurant sur le double cadran.

6. Le cadran a déjà fait l'objet d'une description sommaire par A. Turner, « Le cadran solaire de Benjamin Scott », *La Revue*, musée des Arts et Métiers, Paris, septembre 1998, p. 55-57. Voir également J. Davis et M. Lowne, *The Double Horizontal Dial*, *op. cit.*, p. 179.

7. Lors du récolement général de 1849, le cadran est inscrit sous le numéro d'inventaire 3876 (qu'il porte toujours) au titre des « objets entrés avant 1849 » sans mention de provenance. Dans le catalogue des collections de 1818, il figure sous le numéro 257 (numéro d'ordre) : « Cadran solaire indiquant les longitudes, par Benjamin Scott » ; il est alors placé dans la salle de l'éventail. Peut être s'agit il d'une saisie de la Révolution.

L'essentiel du tracé est occupé par le cadran en projection stéréographique qui fonctionne avec le style droit biseauté perpendiculaire à la platine et situé quasiment au centre, sous le style polaire, et qui mesure 10,5 cm de haut ⁸. De son pied partent deux échelles graduées : vers le Sud-Est l'échelle permettant la lecture de la hauteur du Soleil ; vers le Sud-Ouest l'échelle donnant la longueur de l'ombre.

1.1 Cadran en projection gnomonique (fig. 3)



Figure 3 – Photographie rapprochée de la partie correspondant aux heures du matin. On voit nettement au-dessus de la couronne en chiffres romains le canevas stéréographique avec les deux arcs de cercle de l'écliptique.

En raison de son épaisseur, la ligne midi est coupée entre le X et le II du chiffre XII. C'est dans le croissant séparant les deux projections que Benjamin Scott a signé son œuvre, *Benjamin Scott A Londres* (fig. 4 page ci-contre).

1.2 Cadran en projection stéréographique (fig. 5)

Le cadran solaire en projection stéréographique se comporte, à l'instar de l'astrolabe, comme un abaque de calcul qui permet de résoudre des problèmes d'astronomie de position liés au mouvement du Soleil. Cette projection, rappelons-le, est conforme, ce qui signifie qu'elle conserve les angles que font entre elles les courbes tracées sur la sphère céleste. La surface qu'il occupe sur la platine est bien la preuve que c'est lui qui est le principal instrument, le cadran en projection gnomonique périphérique n'étant finalement là que pour l'orientation de l'ensemble et pour donner l'heure solaire. Si le tracé d'un tel cadran « astrolabique » est d'une grande facilité puisqu'il est composé uniquement d'arcs de cercles, son usage demande cependant de connaître la date, c'est-à-dire la déclinaison du Soleil, ce qui suppose de posséder

Le limbe le plus extérieur est gradué de la façon suivante (la lecture se fait pour un observateur extérieur au cadran) : on trouve d'abord les dizaines des minutes en chiffres arabes, marquées par un trait long de 0 à 60, les cinquièmes de minutes par un trait plus court surmonté d'un point. On trouve ensuite une petite bande qui contient toutes les minutes de 1 à 60. Dans la partie où sont inscrites les heures en chiffres romains, les demi-heures sont marquées par une fleur de lys vers le bas et les quarts d'heure par un trait fini par trois épis vers le haut ; faisant face aux fleurs de lys on trouve un trait fini par un as de carreau entouré de trois points. C'est entre ce système multiple d'indication que se trouvent des noms de villes du monde et indirectement leur longitude (cf. *infra*).

Ces quatre centimètres de diamètre terminent la partie strictement gnomonique du cadran, fonctionnant avec le

8. La valeur minimale que doit mesurer le gnomon pour que l'ombre atteigne l'arc au solstice d'été le tracé est de 9,2 cm.



Figure 4 – Cartouche contenant la signature du cadran : « Benjamin Scott A Londres ».

une table *ad hoc*. Le cadran fonctionne avec l'ombre du style droit de 10,5 cm de haut : l'heure se lit à l'intersection d'un cercle horaire et un cercle de déclinaison⁹.

Séparé par une couronne de points noirs de la partie gnomonique, on trouve une échelle graduée des azimuts, comptés depuis le point cardinal Est de 0° à 90° vers le Nord et vers le Sud du cadran (avec son équivalent vers l'Ouest, l'origine des azimuts étant le point cardinal Ouest). Midi correspond donc à 90° d'azimut ; les graduations sont gravées à la fois de 1° en 1° et de 0:5 en 0:5 dans l'échelle adjacente.

Une échelle des mois se trouve au-delà de celle des azimuts, avec indication des noms des mois en français. Elle débute au solstice d'hiver (qui semble être placé vers le 22-23 décembre). Les mois sont gradués de jours en jours, l'équinoxe tombant entre le 20 et le 21 mars, le solstice d'été vers le 21 juin. Notons que ces dates de début de saison sont celles du calendrier grégorien, que la France a adopté dès 1582. Or la Grande Bretagne, en 1713, utilise toujours le calendrier julien où les dates des saisons sont les suivantes : 9 mars, 10 juin, 12 septembre et 10 décembre. Benjamin Scott a donc converti les dates spécifiquement pour l'usage français.

Cette partie du cadran est évidemment en lien avec les cercles de déclinaison du Soleil, au nombre de 49, gradués de 1° en 1° jusqu'à $\delta = \pm 23:5$. L'équateur est en trait gras, accompagné à chaque intersection avec un cercle horaire par le chiffre arabe donnant l'ascension droite, qui croît de 0 à 12 de l'Est vers l'Ouest puis de 12 à 24 de l'Ouest vers l'Est. Les déclinaisons $\pm 10^\circ$ et $\pm 20^\circ$ sont aussi en gras, tandis que les valeurs $\pm 5^\circ$ et $\pm 15^\circ$ sont en traits fins alternés avec des points. Les cercles horaires coupent perpendiculairement les cercles de déclinaison, gradués de 5' en 5' ; ceux des heures sont en trait gras au bout desquels on trouve en chiffre romain l'heure solaire (de V à VII). Les cercles horaires des demi-heures sont en traits fins qui alternent avec des points épais et se terminent par une fleur de lys. Les quarts d'heures sont aussi en traits fins qui alternent avec des points mais de diamètre plus petit que ceux des demi-heures.

9. C'est le défaut des cadrans en projection stéréographique azimutale : si le cadran ne comportait que les courbes des solstices et des équinoxes, on ne pourrait y lire l'heure que quatre fois par an. Cela oblige donc le constructeur à munir son cadran de nombreux cercles de déclinaison (49 dans le cas du cadran de Scott) en veillant à ne pas trop surcharger le tracé.

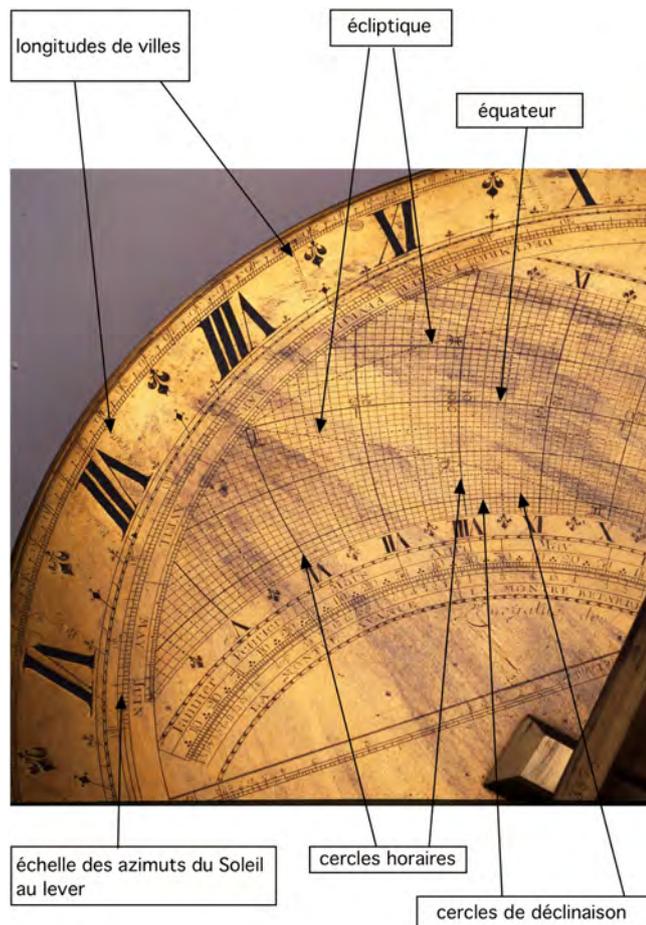


Figure 5 – Détails sur les informations astronomiques figurant de la partie correspondant aux heures du matin.

Le réseau de cercles horaires et de déclinaisons est coupé obliquement par deux arcs de cercles d'écliptique semestriels en traits fins alternant avec des points, accompagnés des symboles zodiacaux¹⁰. Les deux arcs se coupent sur l'équateur dans les parties Est et Ouest du cadran et tangent évidemment les deux arcs des solstices sur la ligne midi.

1.3 Autres indications

Benjamin Scott a inscrit d'autres quantités sur le cadran en les incorporant de façon harmonieuse : l'équation du temps¹¹ et deux échelles (hauteur du Soleil et longueur de l'ombre). Sous le cadran en projection stéréographique se trouve une couronne des mois de janvier à décembre, graduée de jours en jours, avec sous la date la valeur de l'équation du temps appelée *Équation des jours naturels* (fig. 6 page suivante).

10. On calcule les points de l'écliptique en utilisant les formules données dans D. Savoie, *La Gnomonique*, Les Belles Lettres, Paris, 2007, p. 162-166, en faisant varier la déclinaison du Soleil telle que : $\tan \delta = \tan \varepsilon \sin \alpha$ avec $H = \alpha - 90^\circ$ pour α variant de 0° à 180° et $H = \alpha + 90^\circ$ pour α variant de 180° à 360° . L'ascension droite est donc la seule variable.

11. L'équation du temps est la différence entre le temps solaire moyen et le temps solaire vrai. En 1713, Scott bénéficie des avancées dans la définition de cette importante quantité, longtemps restée floue : en 1672, l'astronome royal John Flamsteed remet à plat la définition de l'équation du temps, avec un retour aux deux raisons fondamentales qui produisent les « inégalités du jour naturel » : *De Inaequalitate Dierum solarium Dissertatio Astronomica*, 1672, Londres.

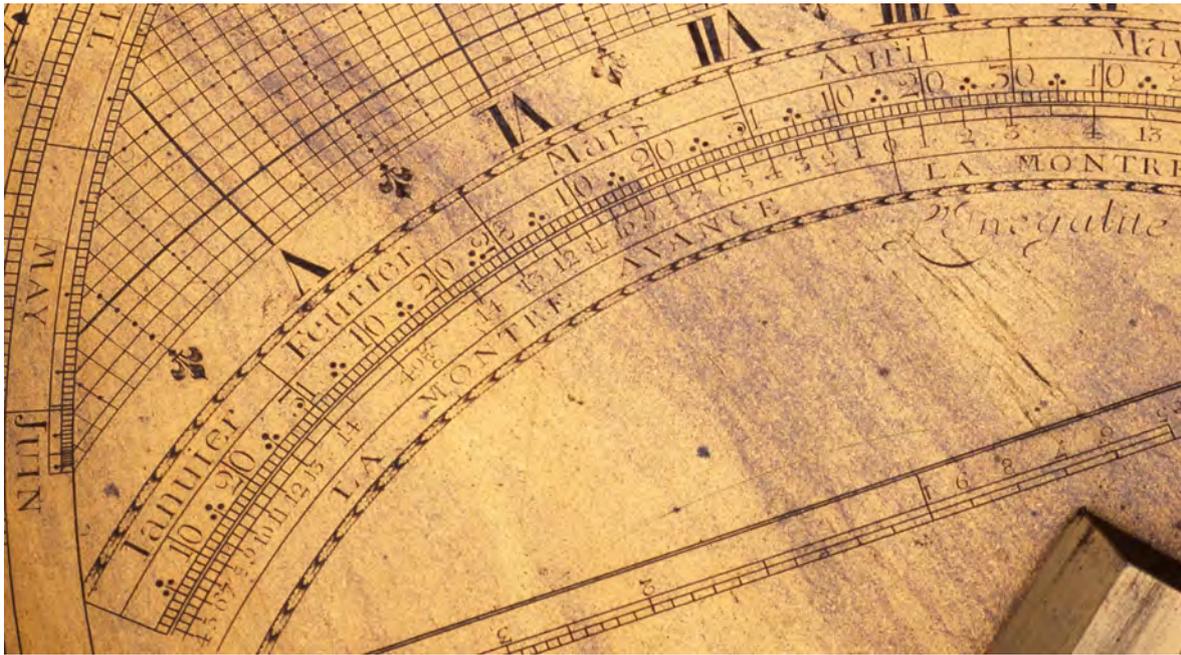


Figure 6 – Détail sur la partie contenant l'équation du temps (*Inégalités des jours naturels*).

Les valeurs données sont très correctes et Scott a inscrit par deux fois, quand il disposait de place, la valeur de l'équation du temps avec les secondes : on trouve ainsi pour le 10 février la valeur de 14 m 49 s [14 m 48 s valeur moderne] ; le 26 juillet la valeur de 5 m 46 s [5 m 54 s valeur moderne]. On note que du 1^{er} janvier au 15 avril l'équation du temps est positive (la montre avance) ; que du 16 avril au 17 juin l'équation du temps est négative (la montre retarde) ; que du 18 juin au 31 août l'équation du temps est à nouveau positive (la montre avance) ; et que du 1^{er} septembre au 23 décembre l'équation du temps est négative (la montre retarde). Puis à nouveau l'équation du temps redevient positive le 24 décembre.

Depuis le pied du style droit part vers le Sud-Est une échelle qui porte le nom *Hauteur du Soleil* : elle est graduée de 0° à 65°, de 0:5 en 0:5. Le point 0° de l'échelle correspond évidemment avec l'horizon Ouest du cadran en projection stéréographique. Depuis le centre du cadran, les graduations de l'échelle des hauteurs s'obtiennent par $\left[\frac{R \cos h}{1 + \sin h} \right]$ où h est la hauteur considérée et R le rayon du cadran. Cette échelle s'utilise avec un compas dont on place la pointe au pied du style droit ; on fixe ensuite l'ouverture sur la hauteur recherchée et l'on décrit sur le cadran en projection stéréographique un arc de cercle. L'intersection avec un cercle horaire ou de déclinaison permet de connaître la hauteur du Soleil à un instant donné. On peut aussi utiliser cette échelle pour déterminer les instants de crépuscule (*cf.* la traduction du texte) ou inversement chercher qu'elle est la hauteur du Soleil à une date et un instant donnés.

Une autre échelle part du pied du style droit dans la direction Sud-Ouest et porte le nom de *Longueur de l'ombre*. Elle est graduée de 5 à 1, puis de 1 à 10, de 10 à 20 et de 20 à 30. Alors que Benjamin Scott décrit dans sa notice (*cf.* la traduction du texte) l'utilisation des différentes parties de son cadran, il passe sous silence cette règle des ombres dont la graduation reste difficile à comprendre. Il s'agit sans doute d'une échelle des cotangentes de la hauteur du Soleil ou d'une échelle logarithmique.

2 Détermination des paramètres primaires

Un frottage sur du papier de faible grammage du tracé de l'après-midi a permis de faire avec précision une empreinte du cadran et de mesurer des angles et des distances¹². En premier lieu, on a déterminé la latitude pour lequel le double cadran est tracé ; comme on le sait, les lignes horaires les plus avantageuses pour déterminer la latitude¹³ sont celles qui bissectent l'éventail horaire 12 h – 18 h, soit ici 15 h 30 m, l'angle tabulaire H' entre une ligne horaire et celle de midi étant donné par : $\tan H' = \sin \varphi \tan H$. Plusieurs mesures ont donné une latitude¹⁴ de $49^\circ \pm 0.2$.

La détermination du rayon du cadran en projection stéréographique a été effectuée à la fois directement sur le cadran puis en mesurant des cordes entre des points de coordonnées (H, δ) et en les comparant au calcul théorique¹⁵. On a déduit un rayon de 19,4 cm, ce qui permet ensuite de vérifier que l'obliquité adoptée¹⁶ est de $23^\circ 30'$.

La cohérence de l'obliquité et de la latitude s'observe sur les quatre cornes du tracé horaire qui sont les intersections du cercle de l'horizon avec les deux arcs solsticiaux. Il est possible de lire très précisément l'azimut A de ces points (mesuré depuis les points Est ou Ouest) que l'on calcule par $\sin A = \frac{\sin 23.5}{\cos \varphi}$. Le résultat du calcul est 37.4 et on lit sur le cadran que $37^\circ < A < 37.5$.

Le double cadran est donc bien tracé pour la latitude de Paris comme le confirment à la fois les exemples donnés dans la brochure explicative et dans les longitudes figurant sur le limbe (*cf. infra*).

3 Les longitudes

Dans la couronne de 4 cm de large, au bord du cadran, se trouvent 28 villes où est indiqué par un trait fin l'heure solaire qu'il est à Paris lorsqu'il est midi dans la ville considérée, ce qui est une façon d'indiquer la longitude puisque celle-ci est la différence des temps solaires entre deux lieux. La longitude de la ville est alors égale à l'heure du midi vrai de la ville - 12 h pour les lieux situés à l'Est du méridien de Paris, et à 12 h + l'heure du midi vrai de la ville pour les lieux situés à l'Ouest du méridien de Paris (fig. 7 page ci-contre)

Par exemple la première ville est Pékin où on lit que lorsqu'il est midi solaire, il est 4 h 22 m à Paris, soit une longitude de -7 h 38 m. Les longitudes étant données par rapport au méridien de Paris, on voit que Marseille a une longitude de - 13 min et Londres une longitude de + 9 min.

12. L'accès au cadran a été possible grâce à l'aide de Cyrille Foasso, responsable de collection au musée des Arts et Métiers.

13. D. Savoie, *La Gnomonique*, *op. cit.*, p. 352-355.

14. Dans son ouvrage *The description and use of an universal and perpetual mathematical instrument*, Londres, 1733, p. 118, Scott donne pour Paris une latitude de $48^\circ 51'$ et une longitude par rapport à Londres de $2^\circ 30'$ Est, soit en temps - 10 min. Dans la liste des villes pour lesquelles il donne une longitude sur le cadran, Londres est placée à 9 min de longitude, soit $2^\circ 15'$. Notons que si Scott a tracé son cadran solaire avec une latitude de $48^\circ 51'$ (et non 49°), la mise en évidence de cette différence sur le cadran est quasiment impossible puisque l'écart maximal (pour $H = \pm 53^\circ$) vaut $0^\circ 3' 55''$, soit 0,3 mm.

15. Par exemple on mesure la distance entre le point ($H = +30^\circ$ et $\delta = -20^\circ$) et le point ($H = +90^\circ$ et $\delta = 0^\circ$) : on obtient 17,8 cm. Dans le calcul en coordonnées rectangulaires, on détermine la distance théorique $\rho_0 = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$ où Δx et Δy sont les différences des coordonnées. En faisant varier de rayon de 10 cm à 25 cm avec un pas de 1 mm, on obtient un rayon $R = 19,4$ cm pour la valeur qui correspond le mieux aux mesures de cordes. Huit distances ont ainsi été mesurées sur le cadran. On vérifie également que l'incertitude de 0.1 en latitude a très peu d'influence sur le rayon.

16. L'obliquité réelle est de $23^\circ 29'$ à cette époque.

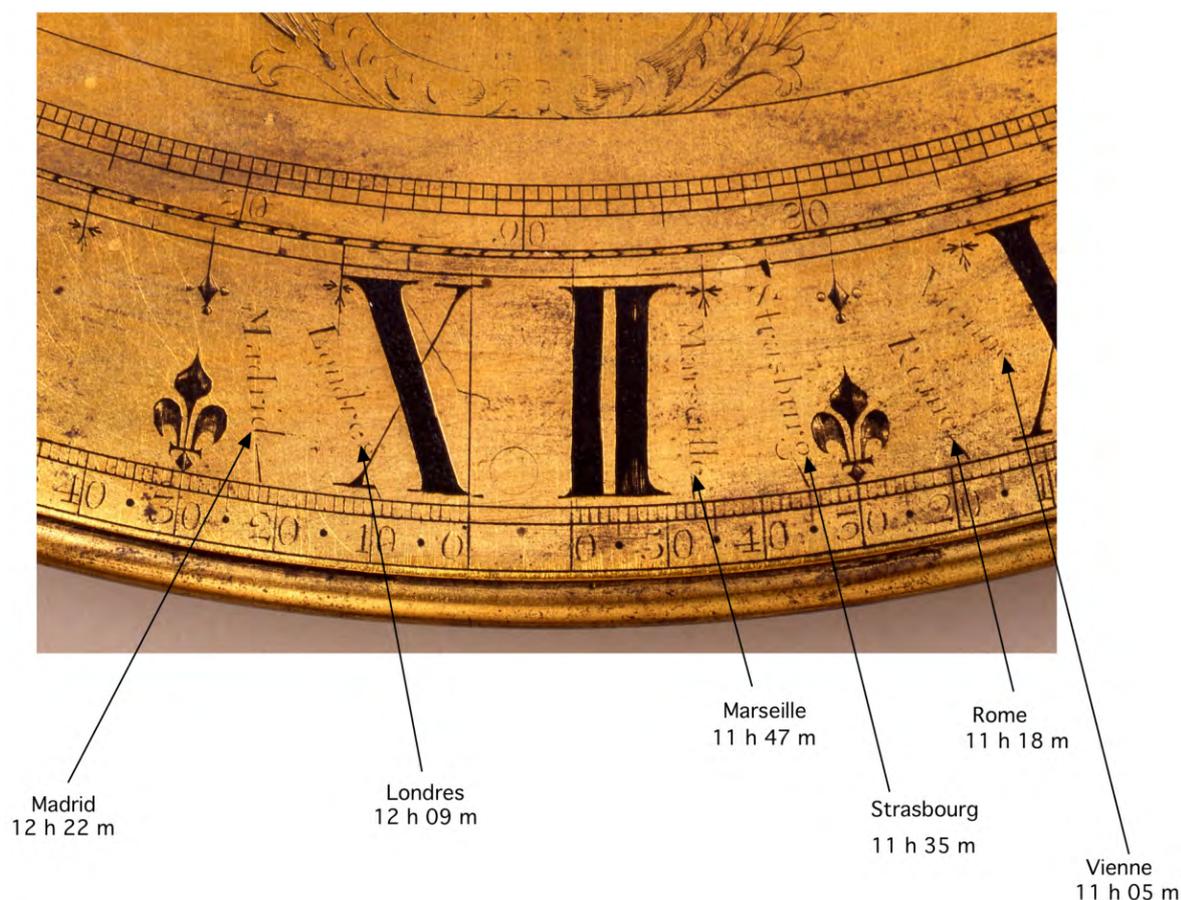


Figure 7 – Détail montrant la couronne gnomonique avec la ligne midi du cadran où le X est séparé du II en raison de l'épaisseur du style polaire. On a indiqué quelques villes où le midi solaire est marqué.

4 Principe d'orientation du double cadran

Rappelons qu'un double cadran se compose d'un cadran solaire à style polaire où la détermination de l'angle horaire est directe (l'ombre du style s'aligne sur une ligne horaire), et d'un cadran solaire à style droit où la mesure de l'angle horaire se fait par l'intermédiaire de l'azimut et de la déclinaison du Soleil (l'ombre coupe deux cercles). À priori, on ne connaît pas la direction Nord-Sud géographique, de sorte que la platine, maintenue parfaitement horizontalement, doit être tournée manuellement autour d'un axe imaginaire passant par le zénith. Cela a deux conséquences : d'une part le style polaire pointe successivement vers des directions différentes sur un parallèle de hauteur, de sorte que l'ombre du style coupe successivement des lignes horaires. Et d'autre part, pour une déclinaison donnée, l'ombre du style droit coupe les cercles horaires d'azimuts variés. Il n'existe qu'un seul instant¹⁸ où l'ombre du style polaire indique la même heure que l'ombre du style droit : c'est lorsque la

18. En fait il existe une deuxième solution lorsque le style polaire pointe vers le Sud, c'est-à-dire lorsque l'on fait une rotation de 180° de la ligne midi. Ce procédé d'orientation utilisant deux cadrans de principes différents dans la détermination de l'angle horaire du Soleil, qui a donné par exemple des boussoles solaires, s'applique également au cadran solaire analemmatique horizontal, qui est aussi un cadran d'azimut, mais qui utilise la projection orthographique, ce qui réduit le cadran à une seule ellipse mais implique le déplacement du gnomon en fonction de la déclinaison du Soleil. Voir C. Macrez, « Cadrans solaires d'azimut (projections orthographique et stéréographique) », *L'Astronomie*, octobre 1976, p. 435-438.

Table 1
Heure du midi vrai des 28 villes gravées sur le cadran de Scott.

Villes	Heure à Paris lorsqu'il est midi vrai dans une ville (inscrite sur le cadran)	Heure moderne ¹⁷
Pékin	4 h 22 m	4 h 24 m
Siam [Bangkok ?]	5 h 26 m	5 h 27 m
Bengale [Calcutta ?]	6 h 10 m	6 h 16 m
Pondichéry	6 h 49 m	6 h 50 m
Surate	7 h 08 m	7 h 18 m
Ispahan	8 h 23 m	8 h 43 m
Bagdad	8 h 55 m	9 h 12 m
Alep	9 h 30 m	9 h 41 m
Jérusalem	9 h 40 m	9 h 48 m
Alexandrie	10 h 08 m	10 h 10 m
Constantinople [Istanbul]	10 h 15 m	10 h 13 m
Dantzig [Gdansk]	10 h 52 m	10 h 55 m
Vienne	11 h 05 m	11 h 04 m
Rome	11 h 18 m	11 h 19 m
Strasbourg	11 h 35 m	11 h 38 m
Marseille	11 h 47 m	11 h 48 m
Londres	12 h 09 m	12 h 09 m
Madrid	12 h 22 m	12 h 24 m
Lisbonne	12 h 49 m	12 h 46 m
Madère [Funchal ?]	1 h 18 m	1 h 17 m
Pernambouc [Recife ?]	2 h 45 m	2 h 29 m
Cayenne	3 h 45 m	3 h 39 m
Martinique	4 h 13 m	4 h 13 m
Québec	4 h 50 m	4 h 54 m
Lima	5 h 26 m	5 h 17 m
Panama	5 h 38 m	5 h 27 m
Mexico	7 h 04 m	6 h 46 m
Acapulco	7 h 20 m	6 h 49 m

platine est alignée sur le méridien du lieu. D'un point de vue astronomique, cela signifie que pour un azimut et une déclinaison donnés du Soleil ne correspond qu'un seul angle horaire possible, ce que le triangle sphérique de position résume bien.

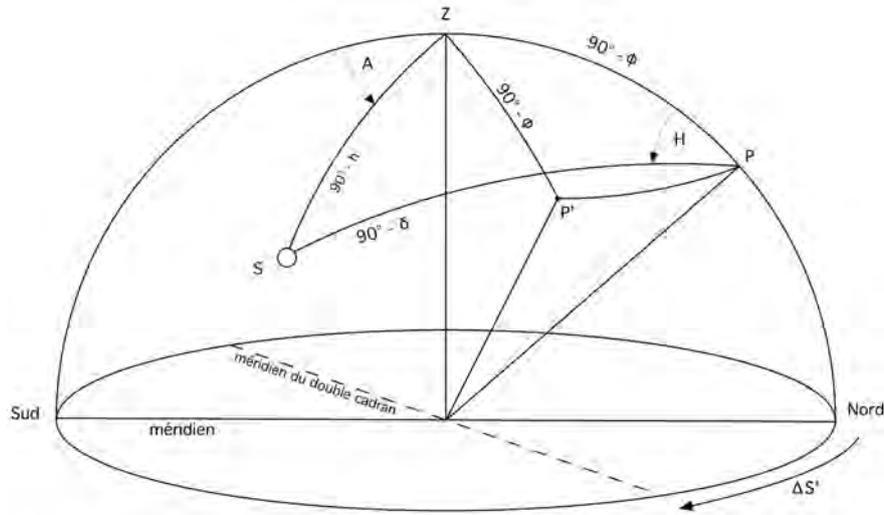


Figure 8 – Pour orienter le double cadran sur le méridien, on le fait pivoter autour de la verticale du lieu (zénith) d'un angle $\Delta S'$: au lieu de pointer vers le pôle céleste Nord P , le style polaire pointe ici en P' (Nord-Est). Les deux cadrans solaires, dont un dépend de l'azimut et de la déclinaison du Soleil, indiquent le même angle horaire uniquement si le style pointe vers P .

D'un point de vue gnomonique, on se trouve devant un problème d'orientation de style (fig. 8) : l'ombre du style polaire, qui ne pointe pas dans la bonne direction, recouvre une ligne horaire à un instant incorrect¹⁹ ; de même, l'ombre du style droit coupe le réseau de cercles horaires à un autre instant incorrect. Appelons F_{pol} l'angle horaire (fautif) indiqué par le style polaire dû à une rotation $\Delta S'$, et F_{az} l'angle horaire (fautif) indiqué par le style droit dû à une rotation $\Delta S'$. L'angle de rotation $\Delta S'$ (qui est en fait un azimut) est positif lorsque la ligne midi du cadran horizontal pointe vers le Nord-Est. H est l'angle horaire vrai du Soleil, δ sa déclinaison et φ la latitude du lieu. On a :

$$\begin{cases} A = \sin \varphi \tan \delta + \cos \varphi \cos H \\ B = \sin \varphi \cos H - \tan \delta \cos \varphi \end{cases} \quad \tan F_{pol} = \frac{\sin H - A \cot \varphi \sin \Delta S'}{\sin \varphi (B + A \cot \varphi \cos \Delta S')}$$

Quant au cadran en projection stéréographique, au lieu d'indiquer l'azimut A correct du Soleil, il indique un azimut erroné A' tel que $A' = A - \Delta S'$. Il s'agit donc d'extraire de la formule classique l'angle horaire erroné F_{az} :

$$\tan A' = \frac{\sin F_{az}}{\sin \varphi \cos F_{az} - \cos \varphi \tan \delta}$$

avec

$$\tan A = \frac{\sin H}{\sin \varphi \cos H - \cos \varphi \tan \delta}$$

A étant du même signe que H .

On obtient F_{az} de la façon suivante :

$$\tan M = \sin \varphi \tan A' \quad M \text{ étant du même signe que } A'$$

19. Ce problème est traité par D. Savoie, *La Gnomonique*, op. cit., p. 325-329.

$$n = \frac{\sin \varphi}{\sin M}$$

$$F_{az} = M - \arcsin \left(\frac{\cos \varphi \tan \delta}{n} \right)$$

Pour un angle horaire et une déclinaison du Soleil donnés, on fait varier $\Delta S'$, par exemple de $+45^\circ$ à -45° , donc du Nord-Est au Nord-Ouest. On constate alors que les deux courbes d'erreurs s'annulent à un seul instant qui correspond à $\Delta S' = 0^\circ$, c'est-à-dire lorsque la ligne midi du double cadran est orientée exactement vers le Nord géographique (fig. 9). On alors $F_{pol} = F_{az}$.

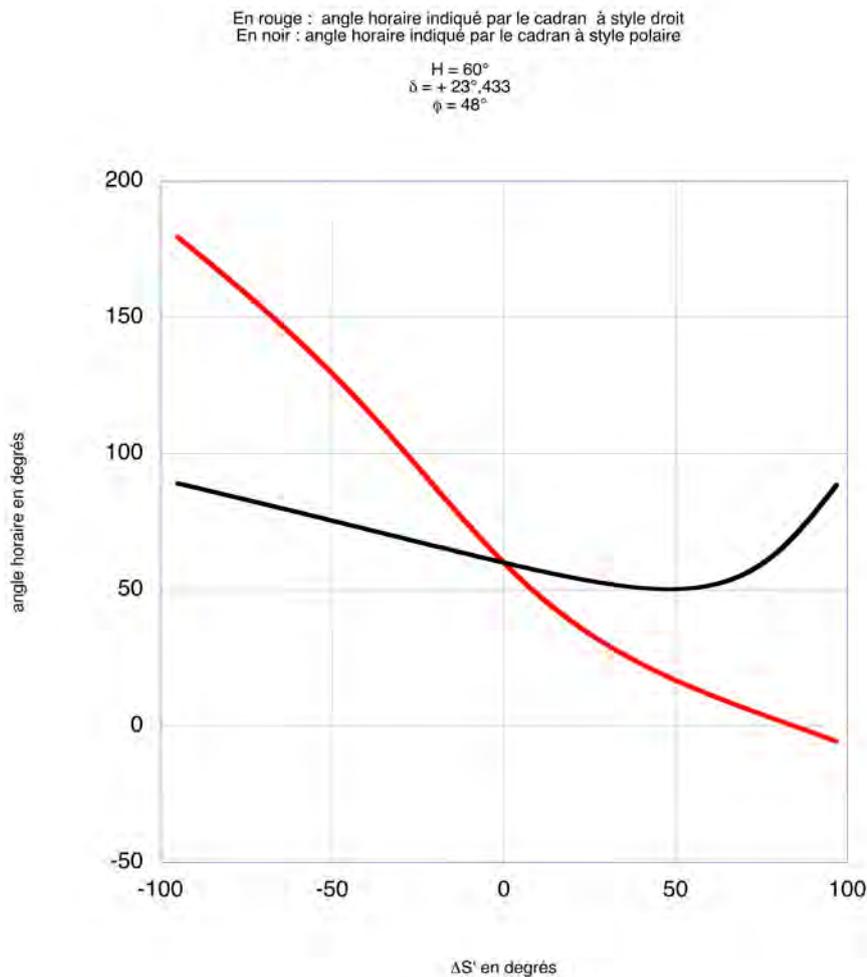


Figure 9 – Les deux courbes tracées indiquent l’heure solaire d’un double cadran dont on cherche l’orientation au solstice d’été. On oriente l’ensemble un peu au hasard au début, en partant ici du Nord-Ouest pour aller vers le Nord-Est. Plus on se rapproche de la direction du méridien, plus les deux cadrans indiquent une heure voisine jusqu’à la coïncidence : le cadran est alors dans le plan méridien.

5 Traduction commentée du texte de Benjamin Scott

Le texte suivant est la traduction en français de la brochure manuscrite (réf. Sloane MS 2040, British Library), sans doute écrite de la main de Benjamin Scott en 1713, pour

accompagner le double cadran solaire horizontal qu'il a calculé et gravé pour Paris²⁰. Le manuscrit comporte 7 pages, seule la page de titre est imprimée.

Description et quelques exemples d'utilisations du double cadran horizontal

Année 1713

Par Mr Scott

Utilisation du cadran

Le cercle le plus extérieur du cadran horizontal contient toutes les minutes [des heures], le suivant étant le cercle des azimuts (ou des amplitudes), divisé en degrés et chiffré 10, 20, 30, 40 etc, de l'Est et de l'Ouest, [tantôt] vers le Nord et [tantôt] vers le Sud. Chaque cinquième [de degré] est caractérisé par une division plus longue et tous les degrés sont biseautés par un trait plus court.

Dans la partie Ouest [qui contient] les heures du matin, les jours et les mois vont du milieu de l'hiver [solstice d'hiver] au milieu de l'été [solstice d'été], et dans la partie Est [qui contient] les heures de l'après-midi [on trouve] du milieu de l'été au milieu de l'hiver, chaque cinquième jour est caractérisé par un trait plus long que les autres. Au sein de ces divisions, il faut noter que les jours du mois sont situés sur un cercle concentrique de la partie extérieure du limbe.

Dans les parties Est et Ouest de l'horizon sont tracés 49 arcs de cercles; celui qui est tracé au milieu, du 21 mars au 23 septembre, est appelé [cercle] équatorial; les autres cercles sont appelés parallèles de déclinaison. C'est le cas de ceux situés entre le cercle équatorial et le centre des parallèles de déclinaison nord et ceux situés entre le cercle équatorial et le centre des parallèles de déclinaison sud. Les deux [en trait épais] qui sont comptés depuis l'équateur sont numérotés 10°, 20° à 23:5. Sur l'équateur dans les parties Est vers Ouest de l'horizon, [on trouve] l'ascension droite du Soleil comptée de 1 à 12 et [on trouve] à nouveau [l'ascension droite] de 12 à 24 de l'Ouest vers l'Est.

Croisant les parallèles [de déclinaison], on a tracé toutes les 5 minutes les cercles horaires, les heures rondes comportant un trait plus épais, tandis que les demi-heures et les quarts d'heures sont figurés par des pointillés. Depuis l'intersection entre l'horizon et le cercle équatorial, on a dessiné deux arcs de cercles qui représentent les deux moitiés de l'écliptique, laquelle est gravée à la fois avec des caractères des douze signes zodiacaux Υ , ϑ , Π , \ominus etc., chaque signe étant divisé en 30° par des pointillés.

Depuis le centre de l'horizon, on a délimité deux échelles sous forme de règles, la première représentant la hauteur du Soleil graduée 10°, 20°, 30°, etc., jusqu'à la hauteur maximale du Soleil; tous les 5° on a tracé un trait plus long afin de distinguer les divisions tandis que chaque degré est représenté par un trait plus court. L'autre partie de la règle est appelée longueur de l'ombre où l'on trouve les nombres 5, 6, 7, 8, 9, 1, 2, 3 etc. jusqu'à 30, divisé de 3 à 4 tous les dixièmes, de 4 à 10 tous les demis, de 10 à 20 toutes les unités et de 20 à 30 seulement une fois en 25.

Entre ces échelles et les parallèles de déclinaison, on trouve un autre calendrier des mois et des jours contre lequel se trouve l'équation du temps. À la périphérie [du limbe] sont gravés de nombreux noms de villes qui montrent la différence des méridiens; par exemple Madrid tombe sur l'index 22, ce qui signifie qu'il est 12h 22m à Paris lorsqu'il est midi à Madrid. Le style est double: une première partie est effilée et perpendiculaire au plan depuis le centre du cadran, tandis que l'autre partie est inclinée et épaisse. Le style oblique sert au cadran

20. La présente traduction est basée sur la transcription donnée dans J. Davis et M. Lowne, *The Double Horizontal Dial*, op. cit., p. 16-18.

horizontal classique pour déterminer l'heure du jour grâce à l'ombre latérale du style sur les graduations les plus extérieures. Alors que le style droit sert à déterminer l'heure du jour à l'aide des cercles horaires.

Parmi les problèmes que l'on peut résoudre grâce à ce type de projection, certains nécessitent qu'il y ait du Soleil, d'autres qu'il y en ait ou pas. Voyons d'abord ceux qui peuvent être résolus lorsqu'il n'y a pas de Soleil. La date et le jour étant donnés, on peut trouver les quantités suivantes relatives au Soleil : déclinaison, position, ascension droite, ascension oblique, amplitude, instants de lever et de coucher, longueur du jour et de la nuit, commencement et fin du crépuscule, équation du temps, ce qui représente en tout 9 problèmes différents²¹. Neuf des problèmes suivants supposent que l'on soit le 12 août.

Problème 1 — Trouver la déclinaison du Soleil

Cherchez la division qui correspond à la date du 2 septembre, à l'endroit où un cercle de déclinaison coupe l'horizon. On doit trouver que ce cercle de déclinaison correspond à $15^{\circ} 5'$ qui est la déclinaison du Soleil pour la date du 2 septembre²².

Problème 2 — Trouver l'instant de lever du Soleil

Regardez sur l'horizon où le cercle horaire du matin rencontre le cercle de déclinaison [du jour en question]. Dans cet exemple, on doit trouver que le Soleil se lève à 4 h 48 m. En procédant de la même façon, on peut trouver l'heure de coucher du Soleil²³.

Problème 3 — Trouver l'amplitude du Soleil à son lever-coucher

Posez le bord d'une règle droite (ou imaginez une ligne droite) depuis le pied du style droit jusqu'à son intersection avec l'horizon, soit avec le jour du mois considéré, soit avec un cercle de déclinaison. L'intersection de la droite avec le cercle des amplitudes (qui vaut dans cet exemple $23^{\circ} 15'$) donne alors l'azimut du jour considéré²⁴.

Problème 4 — Trouver la durée du jour et de la nuit

Le double de l'heure du lever du Soleil donne la durée de la nuit. Le double de l'heure du coucher du Soleil donne la longueur du jour²⁵.

Problème 5 — Trouver le début du crépuscule

21. Le texte donne 90 problèmes : faute de frappe.

22. Il y a de toute évidence un problème de date car l'auteur dit une ligne plus haut qu'il faudra considérer la date du 12 août alors qu'il prend ici le 2 septembre. La valeur de la déclinaison donnée $\delta = 15^{\circ} 5'$ correspond bien à la date du 12 août (1713). Les $5'$ sont illusoirement en précision, bien qu'un examen précis du cadran montre que le cercle de déclinaison 15° intercepte le cercle d'horizon un peu au-dessus du 12 août. 1° en déclinaison correspond sur le cadran à 0,33 cm pour le cercle horaire en question (19 h 10 m) ; donc $5'$ correspondent à 0,028 cm, quantité inappréciable à l'oeil nu sur le cadran. Le calcul moderne basé sur la théorie VSOP87 donne une déclinaison du Soleil de $15^{\circ} 0'$.

23. On vérifie que l'arc demi-diurne H_0 ($\cos H_0 = -\tan \varphi \tan \delta$ avec $\varphi = 49^{\circ}$ et $\delta = 15^{\circ} 5'$) vaut $108^{\circ} 4'$, ce qui divisé par 15 et soustrait de 12 h donne bien 4 h 48 m. L'heure du coucher du Soleil vaut 19 h 12 m [$12 \text{ h} + (108^{\circ} 4' / 15)$].

24. On appelle amplitude (*ortive* pour l'Est et amplitude *occise* pour l'Ouest) l'azimut du Soleil compté depuis les points cardinaux Est et Ouest. L'azimut A du Soleil au coucher (compté depuis le Sud) se calcule par $\cos A = -\sin \delta / \cos \varphi$, soit $113^{\circ} 22'$, d'où l'on soustrait 90° pour obtenir l'azimut depuis l'Est ou l'Ouest, ce qui donne $23^{\circ} 22'$. Il y a une légère différence avec la valeur de Scott, sans doute due à un arrondi de la déclinaison à 15° . Les minutes sont de toute façon très difficiles à apprécier sur le cadran.

25. On vérifie en effet que (4 h 48 m) multiplié par 2 = 9 h 36 m = durée de la nuit ; et que l'heure du coucher (qui vaut 7 h 12 m) multipliée par 2 donne une durée jour de 14 h 24 m. La durée du jour se calcule par $2 H_0 / 15$.

Placez la pointe d'un compas sur le centre du cadran²⁶ et l'autre extrémité sur le 15° degrés de l'échelle des hauteurs du Soleil. Faites tourner le compas autour de sa pointe de telle sorte que son autre extrémité tombe sur le parallèle de déclinaison 15° Sud si la déclinaison du Soleil est positive (et inversement 15° Nord si la déclinaison est négative), dans la partie correspondant aux heures avant midi. La pointe du compas tombe alors sur une courbe horaire qui indique depuis combien de temps le crépuscule a commencé, ce qui dans notre exemple est de 2 h 30 m. En procédant de la même façon, on obtient la fin du crépuscule du soir si l'on connaît l'heure de crépuscule du matin.

Problème 6 — Trouver la position [longitude] du Soleil

Regardez où le parallèle de déclinaison coupe l'écliptique dans la partie comprise entre le jour considéré et le méridien; on obtient alors la longitude écliptique du Soleil qui est dans cet exemple²⁷ de $\Omega 19^\circ 25'$.

Problème 7 — Trouver l'ascension droite du Soleil

Regardez précisément le long d'un cercle horaire où passe l'intersection entre la position écliptique du Soleil et l'équateur; celle-ci indique alors l'ascension droite, qui dans notre exemple²⁸ est de 9 h 27 m.

Problème 8 — Trouver l'ascension oblique

Comptez combien de temps s'est écoulé entre le lever du Soleil et 6 h (avant ou après), et ajoutez l'ascension droite si la déclinaison du Soleil est négative (soustrayez l'ascension droite si la déclinaison est positive) ce qui donne dans notre exemple une ascension oblique²⁹ de 18 h 15 m.

Problème 9 — Trouver l'équation du temps

26. L'auteur cherche depuis combien de temps le crépuscule du matin a commencé (depuis minuit), soit $(180^\circ - H)$, H étant l'angle horaire du Soleil lorsque sa hauteur vaut h_0 calculée par $\cos H = \frac{\sin h_0 - \sin \varphi \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta}$.

En général on prend $h_0 = -18^\circ$ et non $h_0 = -15^\circ$ comme le précise l'exemple (faute de frappe ou confusion entre déclinaison et hauteur) pour déterminer à quelle heure la nuit totale finit ou commence. La déclinaison du Soleil étant de $+15^\circ$, on a $H = 142^\circ 738$, d'où heure de commencement = $(180^\circ - H)/15 = 2 \text{ h } 29 \text{ m}$ du matin (Scott = 2 h 30 m). Comme le tracé du cadran est limité aux hauteurs positives (alors qu'un astrolabe peut indiquer les hauteurs négatives et donc les angles horaires du Soleil sous l'horizon), Scott contourne la difficulté habilement : on décrit sur le cadran un cercle de hauteur $+18^\circ$ centré sur le zénith, interceptant le matin le cercle de déclinaison opposé en signe à la déclinaison réelle soit -15° , de telle sorte que l'on puisse lire directement sur le cercle horaire l'angle horaire H' qui vaut $(180^\circ - H)$. Ce qui revient à déterminer H' tel que : $\cos H' = \frac{\sin h'_0 - \sin \varphi \sin \delta'}{\cos \varphi \cos \delta'}$ où $\delta' = -\delta$ et $h'_0 = -h_0$. On vérifie en effet que $(H + H' = 180^\circ)$. Pour le crépuscule du soir, on en déduit qu'il finit à 2 h 30 m avant minuit, soit à 21 h 30 m (21 h 29 m valeur correcte).

27. La longitude écliptique étant tracée ici comme croissante de l'Ouest vers l'Est, Scott précise bien de considérer ici la partie située après le méridien (puisque le cercle de déclinaison coupe aussi l'écliptique dans le signe du Taureau, la déclinaison du Soleil prenant deux fois la même valeur au cours de l'année). La valeur de la longitude, qui signifie $19^\circ 25'$ dans le signe du Lion, vaut donc $120^\circ + 19^\circ 25' = 139^\circ 25'$. Il est difficile de dire ici si cette valeur résulte réellement d'une lecture sur le cadran ou du calcul théorique. De la longitude écliptique λ se déduit la déclinaison δ et l'ascension droite α par les relations : $\sin \delta = \sin \varepsilon \sin \lambda$ et $\tan \alpha = \cos \varepsilon \tan \lambda$, l'obliquité ε valant ici $23^\circ 30'$.

28. Cette valeur est cohérente avec la longitude écliptique mais résulte sans doute du calcul.

29. L'ascension oblique ρ est l'arc d'équateur qui se lève simultanément avec un arc de longitude. On a $(\rho = \alpha - n)$ avec $\sin n = \tan \varphi \tan \delta$. Avec les valeurs de Scott, on a $\alpha = 141^\circ 45'$ (9 h 27 m) et $n = 18^\circ 4'$ d'où $\rho = 123^\circ 41'$ soit 8 h 15 m. Scott donnant 18 h 15 m, il y a une faute de frappe : il faut lire 8 h 15 m.

Cherchez le jour du mois considéré sur le cercle de l'équation du temps et vous aurez la valeur qui peut varier lentement ou rapidement ; dans notre exemple³⁰ elle est additive et vaut 4 m 30 s. Comme il a été mentionné, la hauteur du Soleil et la longueur de l'ombre étant données, on peut déterminer d'autres quantités. De plus, deux valeurs étant données comme la hauteur et l'azimut du Soleil, sa déclinaison, l'heure du jour, les autres quantités peuvent être déterminées, produisant 6 problèmes différents comme les deux suivants.

Problème 10 — La hauteur et la déclinaison étant données, trouver l'heure

Placez la pointe du compas au centre du cadran et ouvrez le compas en fonction de la hauteur donnée [sur l'échelle] ; décrivez un cercle et notez où a lieu l'intersection avec un parallèle de déclinaison (en utilisant les heures du matin si on est avant midi et les heures de l'après-midi si on est après le midi) ; l'endroit où se coupent les deux cercles donne alors l'heure indiquée par un cercle horaire³¹.

Problème 11 — La hauteur et la déclinaison étant données, trouver l'azimut

Prenez une règle (ou imaginez une droite) passant par le centre [du cadran] et le point du parallèle de déclinaison sur lequel se trouvait le repère du compas lors du problème précédent. Alors l'intersection de cette droite avec le cercle des azimuts vous donne l'azimut du Soleil³², comptés depuis l'Est le matin et comptés depuis l'Ouest l'après-midi. Notez qu'au lieu de la déclinaison, toutes les quantités mentionnées dans les neuf premiers problèmes (ou à la place de la hauteur on peut substituer la longueur de l'ombre, l'heure et l'azimut) peuvent être déterminées, ce qui multiplie considérablement les problèmes qui peuvent être résolus.

Problèmes pouvant être résolus lorsque le Soleil brille

Problème 12 — Le cadran étant correctement placé, comment connaître l'heure du jour par les cercles horaires ?

Regardez où l'ombre du style droit coupe le cercle de déclinaison du jour donné : son intersection avec le cercle horaire donne l'heure.

Problème 13 — Pour installer le cadran

Vérifiez en premier que la surface du piédestal est bien horizontale. Puis tournez le cadran sur lui-même jusqu'à ce que l'heure du jour indiquée par l'ombre du style oblique indique la même heure que l'ombre indiquée par l'ombre du style droit.

Le cadran étant correctement orienté et le Soleil brillant, on peut déterminer sa déclinaison, sa [longitude écliptique], son ascension droite, son ascension oblique, le mois et le jour, les heures de lever et de coucher, le début et la fin du crépuscules, son amplitude, sa hauteur, son azimut, la longueur de l'ombre, l'équation du temps.

30. Valeur en excellent accord avec le calcul moderne pour le 12 août 1713 à 12 h UT qui donne 4 m 32 s pour l'équation du temps.

31. Ce problème revient à déterminer l'angle horaire H du Soleil connaissant la hauteur h et la déclinaison δ , ce qui se résume par : $\cos H = \frac{\sin h - \sin \varphi \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta}$. La règle est gravée pour donner la hauteur du Soleil de 0° à 65° ; il s'agit de la projection de cercles de hauteurs concentriques dont le style droit est le centre. Imaginons que le 12 août on cherche l'heure alors que la hauteur du Soleil est de 40° l'après-midi : on obtient $H = 45:082$ soit 3 heures solaire.

32. Cela revient à chercher l'azimut par la formule $\cos A = \frac{\cos \delta \sin H}{\cos h}$. En reprenant l'exemple 10 où $h = 40^\circ$, $H = 45^\circ$ et $\delta = +15^\circ$, on obtient $A = 26:8$.

Ainsi, regardez en premier l'heure solaire du jour sur la graduation extérieure du cadran puis l'intersection de l'ombre du style droit avec un cercle horaire en fonction de la déclinaison. À partir de là, comme dans les neufs premiers problèmes, on peut déterminer la longitude du Soleil, son ascension droite, son ascension oblique, et connaissant le jour du mois, l'instant de lever et de coucher, le début et la fin du crépuscule, l'azimut ortive et occase, l'équation du temps, et comme dans les douzièmes et treizièmes problèmes, on peut trouver à un instant donné l'azimut, la hauteur et la longueur de l'ombre.



Figure 10 – Détails sur les informations astronomiques figurant dans la partie correspondant aux heures de l'après-midi. Les deux cercles de l'écliptique se rencontrent sur l'équateur qui est aussi l'intersection avec le cercle horaire VI, le 23 septembre. En dessous le cercle des amplitudes indique 0.

Crédits photos : © Musée des arts et métiers — Cnam / photos : Michèle Favareille.



Causes probables de la rareté des cadrans canoniaux bretons

par Denis Schneider

On ne compte, en retirant une copie et des spécimens plus que douteux, que six ou sept cadrans canoniaux dans notre inventaire et ce n'est pas faute d'avoir cherché !

Certains ont pu penser que la roche bretonne était peu propice à la gravure d'où, pendant longtemps, le désintérêt voire l'ignorance envers l'art roman breton. L'excuse est que la plupart des églises bretonnes ont été soit détruites soit remaniées. Il faut donc rechercher la cause dans les modifications apportées aux façades à l'époque gothique et à la Renaissance. Après un historique sur l'évangélisation de la Bretagne continentale, sur l'originalité de l'Église Bretonne, il est évoqué les destructions par les Normands au IX^e siècle. Il y eut un renouveau religieux du XII^e au XV^e siècles avec une campagne importante de construction d'églises mais la guerre de Succession de Bretagne au XIV^e siècle en endommagea beaucoup avant une nouvelle campagne de construction. Revisiter l'inventaire des canoniaux bretons aura permis d'évincer de faux-semblants et d'analyser plus finement d'autres.

Pleumeur-Bodou ! Littéralement, la « grande paroisse de l'ermite Podo ou Bodo », presque étymologiquement *la plebs magna Podou*. *Plebs*, le peuple chrétien qui y a fondé une paroisse principale avant de créer des *treb* (trèves), des églises tréviales, c'est-à-dire des églises succursales pour des lieux éloignés, tel Trébeurden (trève des bretons).

Nous réunissant en Terre bretonne si riche en cadrans, je ne pouvais que me pencher sur les causes de la rareté des cadrans canoniaux bretons ; Côte d'Armor, Finistère, Morbihan, Ille-et-Vilaine et même la Loire-Atlantique, qui fait partie de la Bretagne historique, et qui, elle, n'en compte aucun.

Certains gnomonistes ont pu penser que la nature pétrographique du matériau était peu propice à la gravure comme l'ont écrit Stendhal et Prosper Mérimée à propos de la sculpture. Pour cette raison, les historiens de l'art se sont intéressés tardivement à cette région. Il aura fallu le travail de Roger Grand (*L'art roman en Bretagne*, A. et J. Picard, 1959), de Louise-Marie Tillet (Éditions Zodiaque, *Bretagne romane*, 1982), et d'Anne Autissier (*La sculpture romane en Bretagne XI^e-XII^e siècles*, 2005) pour faire connaître l'art roman breton.

Ce qui est particulier à cette région, c'est qu'un même édifice religieux, à l'origine roman, compose très souvent avec le style gothique et celui de la Renaissance. Il reste peu d'édifices

au style roman pur. Un chœur gothique, une façade Renaissance recèlent une nef purement romane. L'art roman breton se voit donc davantage à l'intérieur des églises qu'à l'extérieur.

Un peu d'histoire : une première évangélisation eut lieu, venue de l'est par saint-Marvin (saint-Martin) au IV^e dans les centres urbains gallo-romains, puis par l'ouest un peu plus tard (V-VI^e) par saint-Guérolé à Landévennec en introduisant le rite scotique. Avant l'arrivée d'Irlande des moines celtes au V^e siècle, après le départ des troupes romaines de la Bretagne insulaire, des ermites vécurent sur de petites îles ou des terres données par des aristocrates avant que ne soient fondées des *plou* (paroisses) avec des églises en bois (par manque de chaux) qui furent incendiées au IX^e siècle par les Normands. Une dernière vague d'immigration fut provoquée par l'invasion anglo-saxonne (VI^e siècle) et la pression des Pictes et des Scotts et bien des habitants du Pays de Galles et de Cornouailles s'installèrent en Armorique, la Bretagne continentale, fuyant aussi la peste bubonique. On ne connaît pas en Bretagne de cadrans canoniaux sous forme de stèle comme en Irlande.

Le mode d'organisation de l'Église bretonne fut original, de type horizontal, avec des paroisses autonomes (ce sont les paroisses qui fondèrent les évêchés et non l'inverse) et une liturgie marquée par la Règle de Colomban avec un comput de la date de Pâques différent. Il n'y eut jamais d'implantation clunisienne mais Marmoutier, réformée par Cluny au X^e siècle, créa en Bretagne un important réseau de prieurés en lien avec comtes et ducs.

Un renouveau religieux eut lieu du XII^e au XV^e siècles avec une importante vague de construction d'églises en pierre grâce au mécénat des ducs et de la haute noblesse mais la guerre de Succession de Bretagne au XIV^e siècle (partie bretonne de la guerre de Cent Ans) en endommagea avant qu'une campagne de reconstruction sans précédent avec la poussée démographique ne modifient les édifices en les agrandissant, en les remplaçant, en ouvrant des porches méridionaux surtout en Basse Bretagne (XV^e-XVI^e siècles) ; il y eut enfin au XVII^e siècle une vague de conversion avec élévation de nombreux sanctuaires.

Les spécialistes de l'art roman breton distinguent la Bretagne occidentale ou Basse Bretagne de la Bretagne orientale ou Haute Bretagne par des caractéristiques sculpturales propres à ces parties dont la frontière recouvre la frontière linguistique : la Bretagne bretonnante et la Bretagne gallèse, romane (oil), comme la séparation géologique (granit/schiste). Il ne subsiste pas assez de cadrans canoniaux pour voir si cette partition eut une influence sur leur distribution mais cela est très peu probable parce que les commanditaires des églises étaient des dignitaires ecclésiastiques et des nobles.

Non seulement les cadrans canoniaux sont très peu nombreux dans l'inventaire mais encore a-t-il fallu en retirer : une copie à Dinan (22) du canonial de Kirkdale en Angleterre, une pierre à Gosné (35) (Ph. 1 [page suivante](#)) montrant le monogramme du Christ cerclé, sans trou, avec quelques rayons évoquant la barre d'un bateau, une stèle douteuse remise chez un marchand de pierres à Landivisiau (29) (Ph. 2) non retenue dans l'inventaire et un canonial à Saint-Maugan (35), volé après 2003, malheureusement non documenté, probablement sur ardoise pour qu'il ait pu être subtilisé. De plus, il est apparu que sur les six ou sept restants, un, voire deux, étaient peut-être encore en place !

Celui de l'église Saint-Martin à Landévant (56) (Ph. 3 [page suivante](#)) est un réemploi au XIX^e siècle lors de la reconstruction totale de l'église. Sa belle gravure, comme les inscriptions en alphabet latin avec écriture gothique, prouvent que le granit peut se travailler admirablement. Ernst Zinner en 1964 croit lire « HOC AN MCCX » alors que la construction de l'église primitive s'est déroulée entre 1413 et 1512. Sur la fiche technique de notre inventaire il est marqué : « HORAI MIAI ? » et un site web de Pierre Robino (Société d'Archéologie et d'Histoire du Pays de Lorient) interprète « HORA NUNC » (l'heure maintenant), lecture reprise par les auteurs du livre *Cadrans solaires de Bretagne* avec au-dessous du canonial « ceste



Figure 1 – Gosné — Monogramme du Christ.



Figure 2 – Landivisiau.

ygliste fut com(mencée l’an) mil quatre cent et quatre (vingt. . . ?) ». Le Corpus des Inscriptions Médiévales de France (vol. 23) s’arrête à 1300 et les fichiers du CESCMI qui vont jusqu’au XV^e siècle ne mentionnent pas cette inscription (reprise sur un édifice du XIX^e siècle!).



Figure 3 – Landévant, église Saint Martin.



Figure 4 – Landévant, chapelle de Locmaria-er-Hoët.

La paléographe Ingrand Varenne croyait lire « HORAN M(E)DIA » et Paul Gagnaire consulté voyait « HORAM MIRA » (regarde l’heure) qui semble pertinent à la condition que la lettre finale de chaque mot soit endommagée. . . avant de se rallier à P. Robino pour voir « HORAQ » et proposer « HORAQue MOX » (et aussi, par l’heure, bientôt). Je n’avais alors pas beaucoup de mérite d’entrevoir « HORAQ NOX » (sans compter l’Heure la nuit) alors que des chartistes proposaient « HORAQue MORTIS » (et l’heure de la mort) avant que P. Robino ne voie « HORAE INDEX » (l’indicateur d’heures) ce que confirmait la paléographe avec D et E accolés ! Le doute est encore permis. . .

Toujours à Landévant (56) (Ph. 4), la chapelle de Locmaria-er-Hoët édifée aux XI^e- XII^e siècles (chapelle de l’hospital) et remontée aux XV-XVI^e siècles était une étape de pèlerinage

du *Tro Breiz* entre les XII^e et le XIV^e siècles. Le cadran retourné de 180° est placé sur la face Est d'une pierre d'angle du transept Sud qui abrite la chapelle dédiée à saint-Barthélémy et non à sainte-Anne comme il est dit dans l'inventaire ; il présente encore cinq lignes horaires limitées par un demi-cercle.

À Caro (56) (Ph. 5), chez Madame Jeanne Lebel au lieu-dit « La Ville Hervé », un cadran canonial de facture remarquable est placé comme pierre décorative dans le jardin ; le cadran, sur une pierre rectangulaire légèrement cassée, comporte, dans une couronne, vingt-quatre pétales qui se terminent chacun par deux *boutons*. C'est son père qui l'a découvert en 1980 lors du remaniement d'une grange au hameau du Boulay alors qu'il avait été maçonné face retournée. La pierre avait donc été réemployée comme simple pierre à bâtir lors de la construction de cette grange à la fin du XVIII^e siècle. Le Dr. P. Mahéo et P. Huet ont écrit l'histoire de la commune de Caro et pensent que ce cadran provient de la chapelle Saint-Yves (début XII^e siècle) qui desservait d'autres hameaux que celui du Boulay. Jusqu'en 1745, on y célébra des cérémonies mais plus aucune au-delà. En 1794, la chapelle fut vendue comme bien national et les enfants de l'acheteur firent don à la commune en 1817 de la « mesure de la chapelle Saint-Yves », l'expression en disant assez sur son état. À la fin du XVIII^e siècle, des pierres, dont celle du cadran, avaient dû être récupérées (la grange est située à 700 m de la chapelle). Il peut paraître étonnant qu'un cadran canonial si joliment travaillé ait été sculpté pour une chapelle, même d'importance.



Figure 5 – Caro, chez un particulier.



Figure 6 – Runan, église Notre-Dame de Miséricorde.

À Runan (22) (Ph. 6), l'église Notre-Dame de Miséricorde construite entre 1435 et 1438 fut fondée par les Hospitaliers de Jérusalem installés au Palacret à Saint-Laurent. Le cadran canonial situé sous la banquette ouest du porche méridional ajouté est clairement un réemploi sans égard à sa fonction. À l'origine, il y avait une chapelle édifiée au XII^e siècle par les Templiers à cet endroit nommé alors « Runargant », trêve de Plouëc-du-Trieux. Il y eut dévolution des biens des Templiers aux Hospitaliers après 1312. Sont-ce les Templiers qui ont gravé le cadran canonial à dix secteurs égaux dans un demi-cercle avant 1312 ou les Hospitaliers après ?

Au Conquet (29) (Ph. 7 page suivante), une pierre de dallage du lavoir de Lochrist pourrait provenir d'un édifice religieux car on y discerne, dans un bandeau demi-circulaire, huit lignes convergentes délimitant neuf secteurs et nommée cadran solaire par les anciens.

À Tourc'h (29) (Ph. 8 page suivante), l'inventaire signalait un cadran canonial sur le moulin du Rivier. Son propriétaire, Monsieur Comi, m'indiquait qu'il se trouvait en fait sur le



Figure 7 – Conquet, lavoir de Lochrist.



Figure 8 – Tourc'h, entre deux fenêtres d'un manoir privé.

manoir d'à côté. Ce cadran est gravé sur une pierre carrée entre deux fenêtres du premier étage et présente quatorze secteurs égaux dont deux au-dessus de l'horizontale. Les surprises du web me firent entrer en relation avec Florence Delneufcourt qui étudiait de façon très poussée l'histoire de cette commune. Elle confirmait la présence d'un cadran sur une bâtisse qu'elle ne considérait pas être le manoir premier mais la maison du meunier. En effet, cette demeure du XVIII^e siècle (linteau daté 1740) possède des éléments architecturaux bien antérieurs (linteau de fenêtre à meneaux dans la cheminée, porte ogivale rehaussée) provenant très certainement d'un autre manoir dont on ne trouve trace dans les textes qu'en 1540 dans un aveu d'Allain de La Rivière. Cependant, en 1481, le seul noble de Tourc'h à cette époque s'appelait Jehan de La Rivière et devait, noblesse oblige, posséder un manoir que F. Delneufcourt placerait volontiers, en raison de la micro-toponymie, non loin dans le coude du chemin menant du lieudit La Rivière (aujourd'hui Le Rivier). À Guénégant. Le moulin du Rivier ou de Rier n'apparaît dans les textes qu'en 1678. Ce cadran est probablement un réemploi ; s'agit-il d'un rare cas de cadran canonial civil prélevé sur le manoir précédent l'actuel ou est-ce un cadran à style polaire très maladroit ?

À Le Loroux (35) (Ph. [9 page ci-contre](#)), le cadran canonial sur l'église Saint-Martin (XV^e-XVIII^e siècles) est le seul à être en place et encore à la condition qu'il ne provienne pas de l'église primitive du XII^e siècle, possession de l'abbaye de Savigné (Manche) ; Le Loroux vient du latin « loratirio » (l'oratoire). Les douze secteurs égaux sont inscrits dans la moitié inférieure d'une couronne centrée sur un trou carré.

Jean-Paul Cornec m'a fait connaître au Faou (29) (Ph. [10](#)) ce qu'il a considéré dans le livre « Cadran solaires de Bretagne » comme un cadran canonial horizontal gravé sur le socle en kersantite du calvaire (XV^e siècle) de l'église Notre-Dame de Rumengol dans son placître (partie de l'enclos). Notre inventaire note : « cadran canonial horizontal ? » Le porte-ombre est un fût octogonal et ses arêtes se relaient en fonction de l'azimut du soleil. Des chiffres romains écrits en gothique sont gravés au bout de certaines des six lignes évidemment non concourantes mais dont les angles avec midi sont irréguliers. La paléographe Ingrand Varenne estime que ces caractères ont pu être tracés jusqu'au milieu du XV^e siècle (Ph. [11](#)).

Enfin, un scoop de Jean-Paul Cornec m'apprit qu'à l'Île aux Moines, en face de Perros-Guirec (22) (Ph. [12 page suivante](#)), se trouvait le plus septentrional des cadrans des Côtes d'Armor et qu'il avait l'apparence d'un cadran canonial avec cinq lignes convergentes vers un joint entre pierres d'où on remarque une coulée de rouille. Il existe aussi quelques caractères curieux en bout de ligne ! Si tel était le cas, (l'île fut habitée par des franciscains d'où son



Figure 9 – Loroux, église Saint-Martin.



Figure 10 – Canonial horizontal. Faou, église Notre-Dame de Rumengol.



Figure 11 – Faou, église Notre-Dame de Rumengol. **Figure 12** – Cadran canonial à l'Île-aux-Moines. Détail des chiffres romains

nom), il s'agirait là aussi d'un réemploi car il se trouve sur l'un des deux piliers d'entrée de la caserne ; une garnison fut créée et habitée du XVII^e au XIX^e siècles pour lutter contre les attaques anglaises et les contrebandiers. Elle fut bâtie avec les pierres de l'ancien monastère. Un historien local pense que le cadran solaire servit plutôt à assurer le tour de garde.

En conclusion, le très faible nombre de cadrans canoniaux bretons, tous réemployés à l'exception peut-être de celui de Le Loroux (35), s'explique par les campagnes d'agrandissement et de reconstruction des édifices religieux. Il n'aura pas été inutile non plus de re-visiter notre inventaire pour en retirer les faux-semblants tout comme pour revoir la description des authentiques et mieux connaître leur histoire.



Le cadran solaire du petit palais de Napoléon I^{er} à l'île d'Elbe (Italie)

par Jean Scordia

À la suite de sa défaite à Leipzig en 1813, de l'invasion des Alliés et du traité de Fontainebleau en avril 1814, Napoléon I^{er} dû abdiquer. Par ce Traité il renonça à sa souveraineté sur l'Empire français et sur le royaume d'Italie. Il accepta de s'exiler sur l'île d'Elbe, située au niveau de la Toscane italienne et peu éloignée de sa Corse natale. Il résida neuf mois sur l'île érigée en *principauté de l'île d'Elbe*. Il sera le propriétaire de ce petit territoire, disposera d'un revenu élevé, effectuera des réformes et réalisera l'unité de l'île. Cette terre très accidentée fut auparavant possession de l'illustre famille des Médicis, de Florence. Napoléon résida dans l'ancienne demeure construite en 1724 par le Grand Duc Jean Gaston de Médicis, qu'il aménagea en petit palais de style « empire ». La *Maison Napoléon* est placée à l'intérieur de l'imposante forteresse du port principal de l'île, Portoferraio ; elle domine l'entrée de l'île et fait face à un panorama paradisiaque. Après le départ de l'empereur pour reconquérir son trône, le 26 février 1814, elle devint une caserne puis changea de fonction : elle se nomme aujourd'hui *Villa dei Mulini* (Villa des Moulins). La plaque commémorative sur l'aile ouest (fig. 2 page 136) porte l'inscription suivante, que je traduis partiellement :

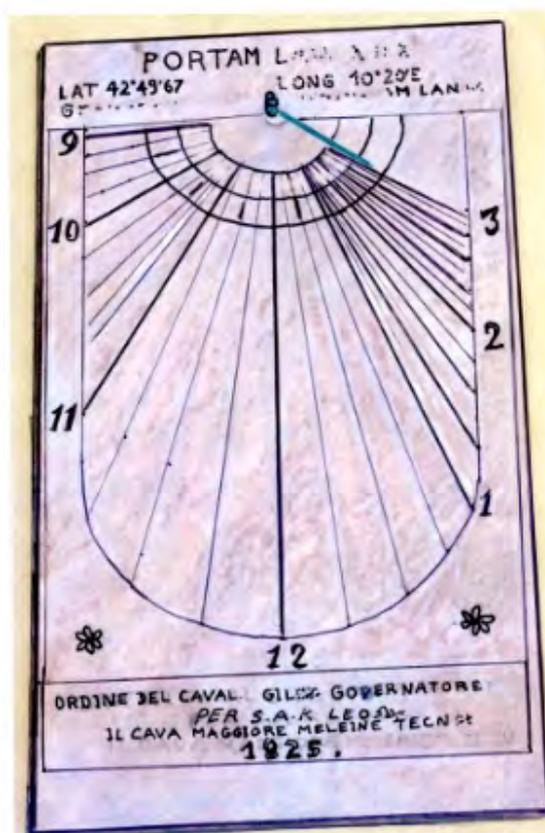




Figure 1 – *Maison Napoléon* (Villa dei Mulini).



« 5 MAI 1814 – 26 FEVRIER 1815 – CETTE DEMEURE ETROITE ET AUGUSTE ... FUT PENDANT PRESQUE UN AN SEJOUR DU PREMIER EXIL DE NAPOLEON LE GRAND. ON LUI DOIT (?) L'UNITÉ D'UNE ELBE DIVISÉE ... – 5 MAI 1921 – »

L'aile droite méridionale du palais présente un cadran solaire, malheureusement très difficile à lire par l'état de la table (fig. 3 page suivante) ; il est placé symétriquement à la plaque commémorative fixée sur l'aile gauche, facilement lisible. Le cadran semble être de marbre blanc, obscurci par un dépôt poussiéreux ou l'oxydation. Ses dimensions peuvent être estimées à 100 cm de haut sur 60 cm de large, plus ou moins ; l'épaisseur serait d'environ 3 cm. Ce vertical déclinant Ouest possède un style de teinte verte, en bon état mais, semble dévier vers la droite d'un angle au voisinage de 30°. La devise, les lignes horaires, les chiffres arabes et les informations en italien se devinent péniblement ; la date 1825 se distingue tout en bas. La latitude affichée est 42° 49' 67" (?) ; la longitude est quasiment effacée : elle serait 10° 20' E.



Figure 2 – Plaque commémorative sur l’aile Ouest du palais.



Figure 3 – Cadran solaire vertical déclinant Ouest sur l’aile droite méridionale du palais.

Ce cadran est donc postérieur à l’occupation de la demeure par Napoléon et pourrait avoir été réalisé par les militaires italiens de la caserne ayant succédé au petit palais.

Étant donné le peu d’heures affichées (de 9 h du matin à 3 h de l’après-midi), il n’est pas possible d’effectuer un « test des tangentes » ; mais ce qui étonne est l’importance des angles horaires, atteignant sans correction de la perspective au moins 33° entre 11-12 h et 26° entre 12-1 h. Ce qui semble excessif. Apparemment le mur ne souffre pas d’inclinaison. Une simulation sur le logiciel *Shadows*, dans la version simple, ne m’a pas permis de retrouver ou de comprendre le tracé du cadran photographié ; l’angle 11-12 h devrait voisiner 19°, celui de 12-1 h, environ 12°. Quelqu’un peut-il expliquer cet écart ? J’ignore donc si le tracé est juste et si mon interprétation est erronée. Je n’ai pas trouvé ce cadran dans l’inventaire 2017 de la CCS, dans la partie « Italie ».

L’île d’Elbe (Elba) a gardé un souvenir bienveillant du bref séjour de Napoléon mais est restée très discrète sur la mise en valeur du patrimoine le concernant. L’essor récent du tourisme français vers cette petite île incite celle-ci à mettre en évidence les nombreux lieux emblématiques de sa présence ; jusqu’à, pour le propriétaire d’un restaurant bien placé, inscrire en italien sur la façade l’amusante annonce : « Ici, Napoléon n’a jamais mangé » !

Illustrations

- Figure 4 [page ci-contre](#) : vue sur le port et la forteresse de Portoferraio.
- Figure 5 [page suivante](#) : panorama depuis les appartements du petit palais de Napoléon (jardin, baie et côte de l’île).

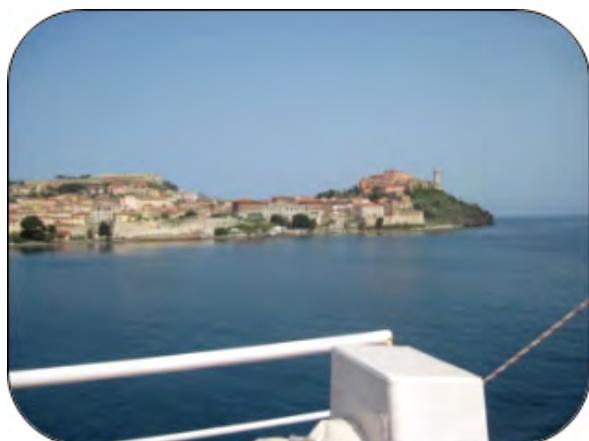


Figure 4



Figure 5



Figure 6



Figure 7



Figure 8

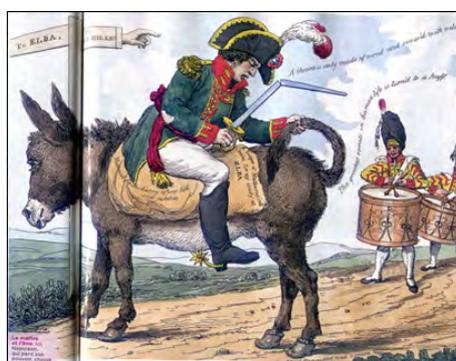


Figure 9

- Figure 6 & 7 page précédente : décoration intérieure : buste de l'empereur, tableau d'après David (*Bonaparte franchissant les Alpes*).
- Figure 8 page précédente : un cadran plus récent sur le pignon d'un hôtel de Marciana Marina (Devise : *Vero mezzodi alla meditur hotel* (« Midi vrai à l'Hôtel Méditour »)).
- Figure 9 : caricature anglaise : Napoléon et l'âne (1814).
[©Universal History Archive/UIG/ Bridgeman Images]. Gravure extraite du magazine *Collection contes : Sur les pas de La Fontaine*, n° 6, mai 2018, et illustrant la fable « Le vieillard et l'âne » (changer de maître ne change rien).



Sauvegarde des archives

Comme toutes les diapositives, celles des cadrans solaires archivées à la SAF, vieillissent.

Didier Baret et François Seillier ont mené à bien la numérisation de 19 842 diapositives remises dans une armoire métallique de la rue Beethoven. Ce travail est complété par la réalisation de fiches d'analyses.

Bravo et merci.

Exemple de perte de qualité des supports :



Cadran de Bourg-en-Bresse, photo de M. Sagot. Cadran de Villebois, photo de M. Rongeot.

La langue de quelques cadrans

par Jean Scordia

À la suite de la réunion gnomonique de Lannion (Côtes-d'Armor, région Bretagne), en mai 2018, voici une tentative de réponses à certaines questions sur la langue régionale et d'éclaircissements sur des inscriptions de quelques cadrans solaires exposés (reproductions photographiques, projection numérique) ou des cadrans observés lors de l'excursion dominicale.

La langue régionale est le breton, dernière langue celtique du continent européen, après la disparition de la langue gauloise, et cousine du gallois de la Bretagne dite Grande. Étant donnée la géographie très compartimentée de la région, il en existe plusieurs variantes phonétiques et orthographiques, qui ne sont pas des dialectes : ici, celle du Trégor (Lannion) et celle du Léon vers l'Ouest (Morlaix). De nombreux panneaux indicateurs de lieux ou de bâtiments sont bilingues. Mais pas tous. Les mots bretons les plus souvent aperçus (modernes et anciens)



Figure 1 – Cadran solaire à Pont-L'Abbé.



Figure 2 – Cadran solaire – Chapelle Saint-Samson.

étaient : Ti/Ty = *maison, chez* ; Ker/Kêr = *ville, maison, chez, hameau, manoir, château* [Ti ker : *maison de ville* = Mairie, Hôtel de ville ; château de Kerduel] ; Pleu/Plou = *paroisse* [Pleumeur-Bodou, Plougasnou] ; Tré (normalement le e se prononce é, et ne doit pas être accentué, à l'instar de « l'île d'Oleron, le Luberon et retable ») peut, selon l'emplacement du lieu, être l'altération de Traezh = *plage*, Treiz/Trez = *grève* ; il signifie aussi *village* [Trébeurden

— en bord de mer, Trégastel — plus à l'intérieur des terres] et *trève* ; après l'annexion par la France, les noms nouveaux seront, par exemple, *St-Michel-en-Grève*, *Plestin-les-Grèves* ; *Loc* (du latin *locus*) est un *lieu*, en général consacré [Locquirec, Locronan] ; *Lan/Lann* : ce toponyme, rencontré dans des mots composés, suggère la fondation d'une ancienne *chapelle* [Lannion/Lanuron, Lanvellec, Lanmeur].

L'ouvrage de MM. Cornec et Labat, les *Cadrans solaires de Bretagne* (Éditions Skol Vreizh, 2010, Morlaix), donne la traduction française des devises en breton, en latin et autres. Ainsi, un cadran contemporain de Locquirec portait l'inscription *AN HEOL A ZO VA BUHEZ* = *Le soleil* [Heol : *Helios* en grec] *est ma vie*. Réponse à une question posée sur le cadran de Pont-l'Abbé (1817) dont la devise est *HEP KEN* : le cadran est située sur l'ancienne forteresse des seigneurs Du Pont, qui protégeait l'accès de la ville par un pont ; elle se rend par *sans égal, sans pareil* ; le sens actuel est un peu différent : *hep* = sans, *ken* = *autre* mais aussi *seulement, sans plus* ; la simplicité et le dépouillement du cadran rappelle le sens de *tout simplement, seulement* (uniquement les heures, les lignes, pas de décoration).

La traduction française de la devise latine du cadran de la chapelle Saint-Samson, près de Trégastel, est aujourd'hui peu claire à cause de l'orthographe phonétique et libre de l'époque, et d'une ponctuation incomplète. L'analyse grammaticale du texte latin [*sit* est le subjonctif présent du verbe *esse* – être ; « voy = vois-toi » ; *Limage* [pas d'apostrophe comme dans *Lan*], qui n'est pas dans le texte latin, est une traduction large et poétique] donnerait comme version littérale contemporaine : *L'ombre, qu'elle te soit un vieillard le matin, qu'elle te soit le soir un nouveau-né/un jeune qui grandit* ; ou bien : *L'ombre du matin : vois-en l'image du vieillard ; pour celle du soir, vois celle du bas âge*. La partie manquante, « ... r », en français est vraisemblablement *pour*, correspondant à un datif *tibi* = *pour toi* ou à un ablatif de temps *le soir...*, *pour le soir...*



Figure 3 – Cadran solaire de l'église de Landévant (Morbihan).

Après de désespérantes recherches sur l'inscription latine en écriture gothique du cadran très ancien de l'église de Landévant (Morbihan), car la lecture « *hora nunc* = l'heure maintenant » ne me convenait pas, il me semble approcher du but. Le texte est bref, apparemment composé de deux termes mais aux lettres très serrées. Le texte français, sur la pierre en-dessous, serait : *Faite par Mr All(ain) Cam // mil quatre cents quatre*. Son écriture, également gothique, permet la comparaison. La devise latine du cadran, en deux mots séparés en haut par une légère coupure et en bas par l'orifice du style, serait peut-être : *horAe mora* : *intervalle des heures* (c'est-à-dire « instrument découpant le temps en tranches ») ? *mora* est également traduit par *le temps*. L'analyse latine, à cause des déclinaisons des mots, limite le nombre de possibilités : *hora* est certain ; mais il est terminé par une lettre supplémentaire dégradée ; elle ne peut correspondre qu'à un complément de noms (génétif), à un complément direct

(accusatif) d'un nom singulier ou pluriel : ce ne peut qu'être e, m ou s (*horae/horam/horas*). J'ai pensé également à un nom complément direct d'un verbe, du genre « marquer l'heure,



Figure 4 – détail des inscriptions sur le cadran solaire de l'église Landévant (Morbihan).

mesurer l'heure », il annonce l'heure [*horas nuntiat*], heures diurnes ; ou à un qualificatif religieux (« heures divines »). Quant au mot suivant, placé après l'orifice du style, de combien de lettres se compose-t-il ? L'avant-dernière ressemble à un c, suivi d'un signe difficile à interpréter : est-ce une marque de fin d'inscription, de fermeture ou coupure, un d minuscule, un a minuscule (mais le premier A est majuscule, et le a de *Faicta* est encore différent !)? Je pense lire les lettres M, o, r, a : *mora. L'intervalle des heures*, un éventail des heures : une interprétation assez proche de la première. Peut-être à revoir.

M. Cornec a aussi présenté plusieurs cadrans, ainsi qu'un menhir [*men/maen* = pierre, *hir* = longue], ornés des *instruments de la Passion*. Certains de ces cadrans (Quimper : cadran de Qvéav — prénommé Lav[rent] à Plomodiern) atteignent les sommets de la virtuosité *cadrannière* ou artistique. Dans son livre *Patrimoine sacré en Bretagne* (Éditions Coop Breizh, 2006, Spézet), Y.-P. Castel donne la liste exhaustive des instruments gravés, environ 32, dont les 30 deniers, la colonne de la flagellation, l'oreille tranchée par Pierre, la main qui souffleta le Christ (remplacée parfois par un gant), la lanterne (remplacée par erreur par un peigne sur un premier cadran de Qvéav — à Lothey, cf. cliché à droite!), le *titulus* INRI ou IHS (le H grec = ê/é, S = Σ : Iézous/Jésus), etc. Fut présenté également l'ostentatoire cadran de Saint-Potan, à la belle écriture gothique, mais sur lequel le graveur a oublié l'heure X et gravé deux fois XII! Le commanditaire savait-il bien lire le gothique ou les chiffres ?



Figure 5 – Cadran de Qvéav, à Lothey.

Essai de traduction de quelques inscriptions grecques et égyptiennes hiéroglyphiques sur certaines « horloges à ombre » anciennes dites « en L » et « à plan incliné »

par Jean Scordia

Par un e-mail de la C.C.S. de janvier 2018 nous est parvenue une copie d'un article d'un *bulletin de la Société italienne des cadrans solaires*. Il s'agit d'une étude récente des cadrans solaires de l'Égypte Ancienne, dont la présentation a été faite au Séminaire National de Gnomonique, à Valdobbiadene (Trévis, près de Venise) en mars 2017, par Gabriele Vanin. L'exposé fait le bilan des connaissances actuelles sur ces artefacts, illustré par des figures de grande netteté, certaines classiques d'autres originales, et appuyé par des notes et références. Plusieurs de ces objets de mesure du temps sont visibles, par exemple, sur le site internet d'une université canadienne : <http://aea.physics.mcmaster.ca> ou sur le site espagnol de l'A.A.R.S., italien brunelleschi.imss.fi.it, britannique collection.org.uk/objects/co500. Plusieurs des cadrans sont inscrits, en grec ou en égyptien, mais je ne trouve pas de traduction de ces inscriptions, excepté pour l'un d'eux (sites *astronomie-quebec* et *Science Museum Group Collection, London*). Les gravures sont parfois peu lisibles, tronquées ou énigmatiques. Je tenterai ici une traduction partielle, que des lecteurs plus experts corrigeront, amélioreront et compléteront.

Des inscriptions semblent *autobiographiques* (révélant l'identité du propriétaire, ce qui est exceptionnel) et *eulogiques* (des prières, des invocations à des divinités — et peut-être à un pharaon ou une région). Les inscriptions en grec, mélangeant majuscules et minuscules, indiquent par abréviations les mois. Les textes égyptiens se lisent face à l'orientation des signes, en général à partir de la droite ; les grecs à partir de la gauche. Curieusement, certains hiéroglyphes sont sans raison inversés ! Est-ce une distraction du hiérogrammate, du copiste, de l'égyptologue dessinateur ? Une difficulté du traducteur est qu'il n'existe aucune ponctuation, aucune séparation des mots ni articulation de la pensée visible dans l'écriture ; certains mots ont des sens multiples. *Fiat lux !*

1 Premier objet

Le premier objet (figures 1(a), 1(b), 1(c), 1(d) page ci-contre) est incomplet, il lui manque le gnomon ; comme pour tous les autres à plan incliné, que le sillon du gnomon fragilise. Ce

cadran à plan incliné est visible sur le site internet du *UCL Petrie Museum* de Londres, qui le montre des deux côtés et de dos. Sa fiche indique [traduco] : UC 16376, période ptolémaïque, longueur 136 mm, hauteur 90 mm ; stéatite. Il lui manquerait une incrustation (figure 1(d) qui

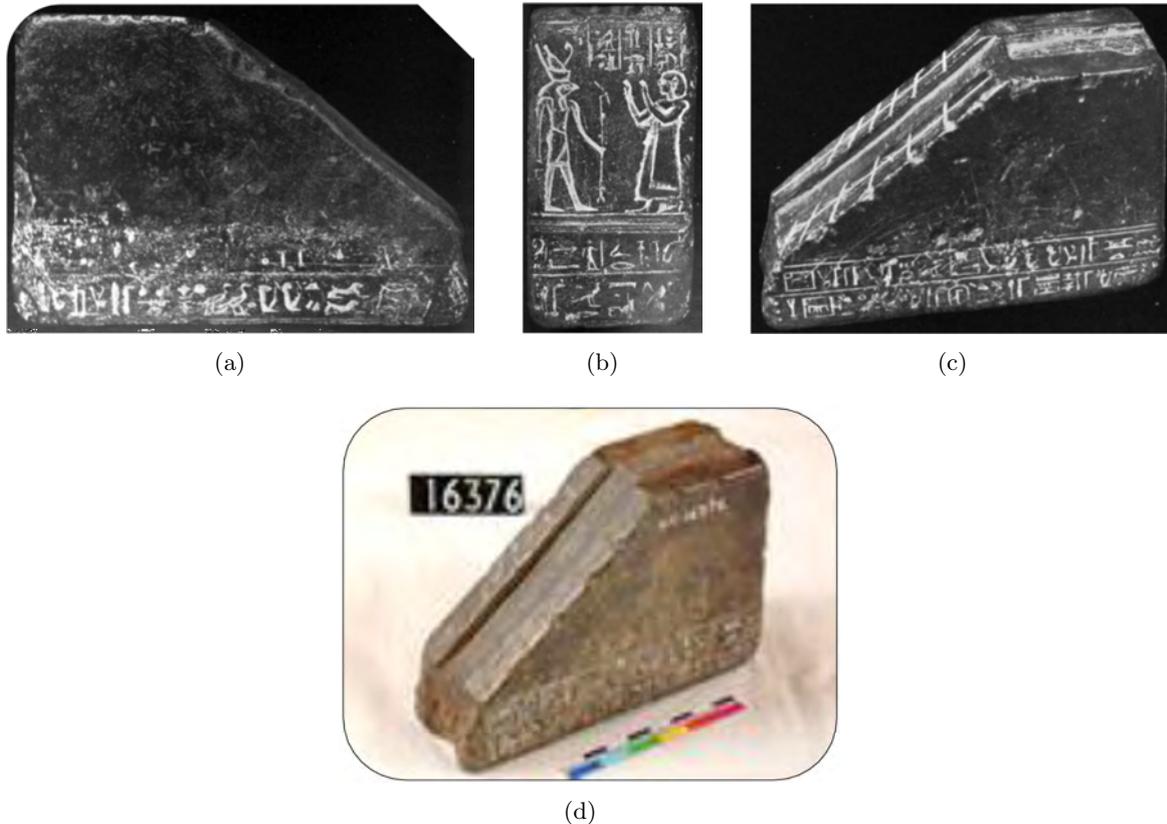


Figure 1 – Premier objet — UC 16376, Londres.

prenait place dans le canal creusé sur le versant et le sommet. Cet insert est conservé sur l'objet de la figure 8. Le texte est gravé sur les trois côtés, sur deux registres ; mais je ne sais s'il s'agit de trois tableaux plus ou moins indépendants ou bien d'un texte unique qui se lit en entier sur le niveau supérieur puis inférieur, en faisant le tour de l'objet. De plus sont en lacune les deux ou trois passages du gnomon.

1.1 Première proposition

Registre du haut. Cf. figure 1(a), registre du haut (cf. fig. 2 page suivante) : [lacune du gnomon] ... *donner* [une offrande] ... [deux corbeilles proches] *les Deux Maîtresses/la Haute et Basse-Égypte (?)*...

Registre du bas : [lacune du gnomon] ... *du Nord. Routy* [1^{er} couple divin, un lion et une lionne], *fille et fils du Soleil qui résident dans Gebtys (?)*. *Le prêtre d'Isis //* ;

Cf. figure 1(b), (dos, en haut).

... *des biens scellés, le puissant dignitaire Daout (?)* ; *(dos, bas) de Mout du ciel* [image d'un vautour], *le grand prêtre //* ; (cf. figure 1(c), haut) ... *(?) de la bien-aimée. Le prêtre des dieux du temple Aou (?)*, *le prêtre des dieux du temple d'Eternité (?)* [lacune du gnomon]



Figure 2 – Registre du haut et du bas.

... de Ptah, Sokar, du grand dieu qui réside dans Sheta/la Butte secrète (?); le prêtre ... le pavillon divin, le prêtre en charge des travaux (?) de la Maison de l'or/de Hatnoub [temple d'Abydos], Senou/Sennou // [lacune du gnomon]

1.2 Deuxième proposition

[lacune] ... donner ... dieu ... le Nebty ...// des biens scellés le puissant dignitaire Daout // ... la bien-aimée, le prêtre des dieux du temple d'Aou, le prêtre des dieux du temple d'Éternité (?) ... [lacune] // ... septentrional. Routy, fille et fils de Rê, qui résident dans Gebtys. Le prêtre d'Isis, // de la Mout céleste, le grand prêtre ...// de Ptah, de Sokar, du grand dieu qui réside dans Sheta/la Butte secrète; le prêtre ... le pavillon divin, le prêtre ... en charge (?) des travaux de Hatnoub/la Maison de l'or, Senou ... [lacune].



Notez que sur ce dos (figure 1(b) page précédente) le signe la main est à contresens; comparez avec le bras, bien orienté! Isis, Mout, Ptah, Sokar, Osiris, ainsi que Rê et Horus sont les divinités les plus connues de la religion égyptienne. Gebtys, Daout, Aou, Sheta me sont inconnus.

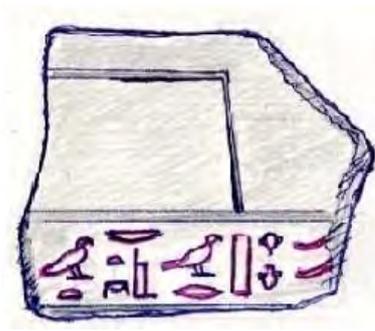
Exceptionnel sur un cadran portatif aussi ancien, le portrait du grand dignitaire, portant perruque et robe particulières, le possesseur de l'instrument, qui apparaît dans la partie supérieure du dos, en attitude d'adoration d'Horus, le dieu solaire sous l'apparence d'un homme à tête d'épervier. L'inscription signifie : (les deux colonnes à droite) *Le prêtre du dieu Osiris/défunt, Senou* ; (les deux colonnes à gauche) *Horus, fils d'Isis, qui agit bien/Réciter (?)*. Une seconde anomalie apparaît dans la gravure du dos : le hiéroglyphe en forme de silhouette assise symbolise habituellement *l'enfant* ; ce dût être un personnage debout, tenant un bâton, comme la silhouette en-dessous du pied d'Horus! Mais ce signe trompeur peut vouloir dire aussi *aide, assesseur*.

2 Second objet

Le second cadran (figure 3(a) page ci-contre), en faïence, est également incomplet, encore plus que le précédent. On devine comme décor une chapelle ou porte de chapelle. Il est conservé dans les Musées Royaux d'Art et d'Histoire, de Bruxelles. Sa fiche indique : 399-380, n° E.07 303; H : 6 cm, L : 7 cm, ép. : 2,5 cm. Dans le bas, le lambeau de la dédicace qui semble être : ... qui réside dans le Pilier/Iounou/Héliopolis (?), le grand maître de la Place/du Trône de



(a)



(b)

Figure 3 – Second objet — Musée Royal d’Arts et d’Histoire, Bruxelles.

l’or S’il s’agit vraiment du glyphe d’un pilier, d’Iounou (Héliopolis en grec), c’est la cité du dieu solaire Rê.

3 Troisième objet

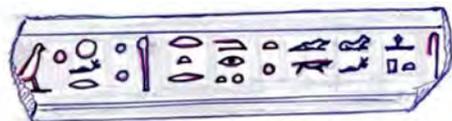
Le troisième cadran (figure 4) serait inventorié à Florence.

L’inscription tronquée pourrait se rendre par (en bas) : ... *offrande à son lion, à Sobek; le fil à plomb (?) de l’instrument de mesure du temps (?)* (?)

En haut, le tableau de deux divinités, qui sont le dieu crocodile *Sobek* représenté deux fois; il est surmonté d’un bandeau d’étoiles symbolisant le ciel ou la nuit; devant la couronne, trois glyphes peu lisibles : *Les deux yeux de [Sobek]*; devant le dieu, une colonne de signes dégradés, colonne répétée, qui signifierait : *C’est toi Sobek ... (?)*.



Figure 4 – Troisième objet — Florence.



(a)



(b)

Figure 5

Ce gnomon (figure 6) d’un cadran en L, en bois, était chevillé dans une règle horizontale.



Figure 6 – Gnomon d'un cadran en L.

Il appartient au Ägyptisches Museum de Berlin : ÄM 14573, H : 46 mm, L : 30 mm, épaisseur : 13 mm ; bois ; le cartouche du propriétaire contient le nom du pharaon *Amenhotep/Aménophis III Heqa Ouaset, Nebmaâtrê* (vers 1380 av. J.-C.). Il fait une offrande au dieu solaire faucon ; les signes gravés devant son disque solaire se traduisent par *Rê-Horakhty*, c'est-à-dire *Rê, Horus de l'horizon*, le Soleil sous forme de faucon au zénith. Voir Cadran Info n° 30, en version numérique.

4 Quatrième objet

Le British Museum de Londres détient ce fragment de plan incliné (figure 7) : EA 744841, datant des années 200 avant notre ère ; H : 73,5 mm, L : 39 mm, épaisseur : 39 mm ; décor : porte de chapelle. Le texte du bandeau inférieur est quasiment illisible ; je ne distingue au milieu que le signe en forme de corbeille, *neb*, qui peut signifier *maître/seigneur* ou bien *tout*.



Figure 7 – Fragment de plan incliné — British Museum.

5 Cinquième objet

Un autre musée londonien conserve un cadran en L original (figure 8 page suivante), qui, à première vue m'a paru être un faux. Il s'agit du Science Museum Group Collection. La première image que j'en ai obtenue se trouvait sur un site . . . *astronomie-quebec* . . . : la couleur de l'objet m'a étonné, puis la tête d'Horus à l'extrémité de la règle ; une fois posée, la règle n'est plus horizontale ; l'absence de perforation pour fixer le fil à plomb, l'absence de la ligne repère de verticalité du gnomon ; de plus, au début du bandeau à gauche il manque la lettre H du nom d'Horus ; au milieu du bandeau des signes gravés, il s'en trouve un à contresens (celui en forme de faucille est tracé en sens inverse de tous les autres ; de même, les signes



Figure 8 – Cadran en L — Londres.



Figure 9

dans ce centre sont confus). Après quelques recherches, il s'avère qu'il s'agissait d'une réplique à but pédagogique.

La fiche d'identité du musée londonien du cadran original lève le doute : Matière : bronze, électrum ; objet n° 1929-585 ; merkhet, circa 600 BC ; crédit : Dr Hovard Carter (Collection of Egyptian and Classical Antiquities) ; inscription : propriété du prêtre astronome (du dieu Horus d'Edfou), Bes, fils de Kensardais (en égyptien) ou Kensirtis (en grec). En égyptien, merkhet/merkyt désigne tout instrument de mesure du temps. Sur l'image en noir et blanc du site web, les inscriptions sont illisibles, je me réfère donc à la copie québécoise, malgré les défauts sus-indiqués, pour vérifier le sens du seul côté visible.

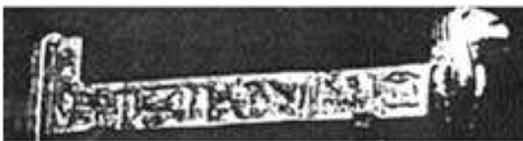


Figure 10



Figure 11

Carter est l'archéologue découvreur de la tombe de Toutankhamon, en 1922. Lecture de gauche à droite : *Horus Béhédéty/de Béhédet, grand dieu, seigneur du ciel. J'appartiens (?) à Bes [] fils de [] Kensardais []*. Un des sites internet signalés au début écrit que la 5^e heure du jour se nomme *nesebet* : il s'agit sans doute d'une coquille (peut-être due à la proximité de la 3^e heure : *makit nebes*), car le nom gravé sur certaines règles est bien *neseryt/nsry.t/*.

6 Sixième objet

Le plan incliné de ce cadran (figure 12 page suivante), aujourd'hui perdu, a été dessiné par G.A. Legrain en 1894 ; l'objet appartenait à la Collection Hoffmann, de Paris (d'après la note de la figure 13 de l'étude de G. Vanin, citée en introduction). Il est signalé remontant à l'an 25 avant J.-C. Je comparerai l'inscription grecque, après l'avoir complétée, à celle d'un autre cadran (figure 13 page suivante ; j'ai complété également les noms des mois) détenu par le Musée de Berlin, de Al Qantara, de datation différente (entre 380 et 342 av. J.-C.), afin de discuter la datation du premier. En effet, l'emplacement du mois de plus grand ensoleillement

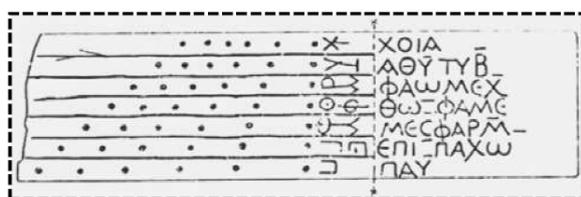


Figure 12



Figure 13

a changé! En haut du plan incliné, deux rangées de lettres grecques, initiales des mois; et sur le sommet, deux autres séries d'abréviations plus complètes des mêmes mois. Les lettres sont orthographiées en majuscules sauf oméga (Ω; en minuscule; ω); l'ordre des mois du plan incliné est bizarrement inversé à partir du milieu à droite! Les noms des mois (les orthographes varient) sont les suivants, en grec (période lagide et ptolémaïque, de -332 à -30; vocabulaire emprunté aux Égyptiens) [voir Cadran Info n° 30], en égyptien (orthographié à la française) et en copte (langue d'origine pharaonique), à partir du premier mois de l'année qui est Thot (du 19 juillet au 17 août) : 1= Thot/Djéhouty/Tout, 2= Paophi/Pan Opet/Babah, 3= Athir/Hathor/Hâtour, 4= Khoiak/Ka heri ka/Keihak, 5= Tybi/Ta-aâbet/Toubah, 6= Mékhir/Pan Mekhir/Amchir, 7= Phamenoth/Pan Amenhotep/Barmahat, 8= Pharmouthi/Pan Renenoutet/Barmoudah, 9= Pakhon/Pan Khonsou/Bachnas, 10= Payni/Pan Init/Bounah, 11= Epiphi/Ip-ip/Abib, 12= Mésoré/Mesout-Râ/Masari. Le mois correspondant au solstice d'été est Mésoré (14 juin – 13 juillet), qui est suivi de 5 jours *supplémentaires*, épagomènes. L'année civile débute avec le lever héliaque de l'étoile Sirius, le 19 juillet, qui coïncide habituellement avec le début de la bénéfique crue du Nil. Le solstice d'hiver a lieu au début Méchir (16 décembre – 14 janvier). Pour la mesure du temps, les Égyptiens possèdent plusieurs calendriers, dont le *civil* basé sur une année solaire de 365 jours justes (au lieu d'un calendrier julien de 365,25 jours ou un *tropique* d'exactlyment 365,2421875 jours!). Ce décalage constant d'un quart de jour par an



Figure 14

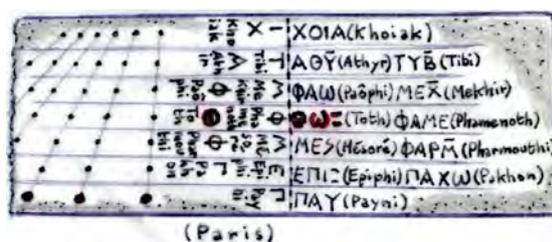


Figure 15

par rapport au lever héliaque de l'étoile Sirius, qui n'a pas varié pendant 3000 ans, et aux saisons entraîne le fait, favorable, qu'au bout d'environ 1460 années ce calendrier coïncide de nouveau avec les saisons et le calendrier *agricole*. Aucune correction ne fut appliquée pour rattraper l'avance ou le retard. Sur les cadrans solaires de l'époque gréco-romaine, certains graveurs ont pensé faire une mise à jour en déplaçant le nom des mois et en les mettant en correspondance avec la durée d'ensoleillement tracée sur le plan incliné. On le vérifie sur les figures 12 et 13. Connaissant les très rares années du lever de Sirius un 19 juillet (le dernier eut lieu en 139 de notre ère) ainsi que le décalage d'un jour tous les 4 ans (4 ans × 365 jours = 1460 années; ou 4 × 365,25 = 1461 années dans le calendrier julien), il est possible de retrouver approximativement quand a été réalisé le cadran solaire. Le cycle réel (qui serait entre 1453 et

1456 années!) ne correspond pas parfaitement au cycle théorique [voir à ce sujet l'annexe 1, *La chronologie*, p. 489, dans l'ouvrage *Toutankhamon* de Marc Gabolde, éd. Pygmalion, 2015].

7 Septième objet

Sur le cadran de la figure 12 & 15 page précédente, le mois où les jours sont les plus longs est Payni/mi avril-mi mai, c'est-à-dire 2 à 2,5 mois avant le 19 juillet, début de l'année et du lever de Sirius juste avant le soleil. Par calcul, on obtient 60 à 75 jours d'écart ; avec un écart de 1 jour tous les 4 ans, on trouve entre 240 et 300 années. En retranchant ce résultat à l'an de référence, 139 après J.-C., on obtient comme fourchette -101 à -161. Ce qui supposerait que cet objet remonterait aux règnes de Ptolémée VIII à Ptolémée X, plutôt qu'à l'époque de la colonisation romaine. Il serait antérieur d'un siècle à la date estimée. Sur le cadran de Qantara (figure 13 & 14 page ci-contre), Pharmouthi/mi février-mi mars est placé devant les jours les plus longs, *i.e.* 4 à 4,5 mois avant le 19 juillet ; un écart de 120 à 135 jours. Par calcul, comme pour l'objet précédent, on obtient une datation située entre -341 et -401. Ce cadran est en effet daté des années 380 à 342 avant notre ère. Mais un cadran peut avoir été copié sur un autre antérieur, sans mise à jour, ou bien se trouver dans un contexte archéologique anachronique.

À la suite de ce survol épigraphique, nous remarquons d'inévitables coquilles peu après l'apparition de l'écriture ; mais nous découvrons également avec intérêt l'identité de propriétaires d'antiques *horloges à ombre*, royaux, nobles ou prêtres savants, astronomes ; le plus ancien instrument remontant à la première moitié du second millénaire avant notre ère. Ce sont : Thoutmosis III, Amenhotep III, Bes, Senou. Il reste à en découvrir d'autres.

Illustrations



Figure 16 – Dessin original des inscriptions du cadran du Pétrie Museum (Londres).

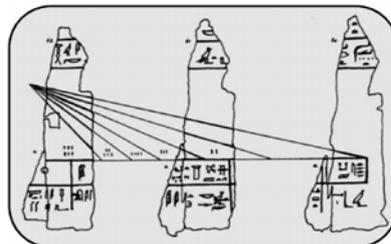


Figure 17 – Schéma d'un cadran en L sur un papyrus en mille morceaux (Londres).



Figure 18 – Relief du dieu Sobek (temple de Kom Ombo, Haute-Égypte) (L'image a été inversée).



Figure 19 – Cadran complet à plan incliné, avec la figure du dieu Thot (Louvre). **Figure 20** – La divinité Horus, emblème de la compagnie Égyptair.

Ci-dessous : modèle d'un convertisseur-calculateur, en carton, à deux disques rotatifs maintenus par une cheville ou une petite manivelle. Il convertit le calendrier « civil » égyptien en calendrier grégorien, il visualise les trois saisons du premier et les quatre du second. Sur un cercle intérieur sont affichées des dates de plusieurs cycles de 1460 années, des décalages du lever héliaque de Sirius. Le petit disque supérieur, avec un index et une fenêtre, permet de viser le mois d'un lever héliaque, d'afficher dans la fenêtre une, deux ou trois dates selon les cycles. Le cercle de 360 degrés (1460 années) est divisé en 4 secteurs principaux, eux-mêmes subdivisés en tranches plus fines.

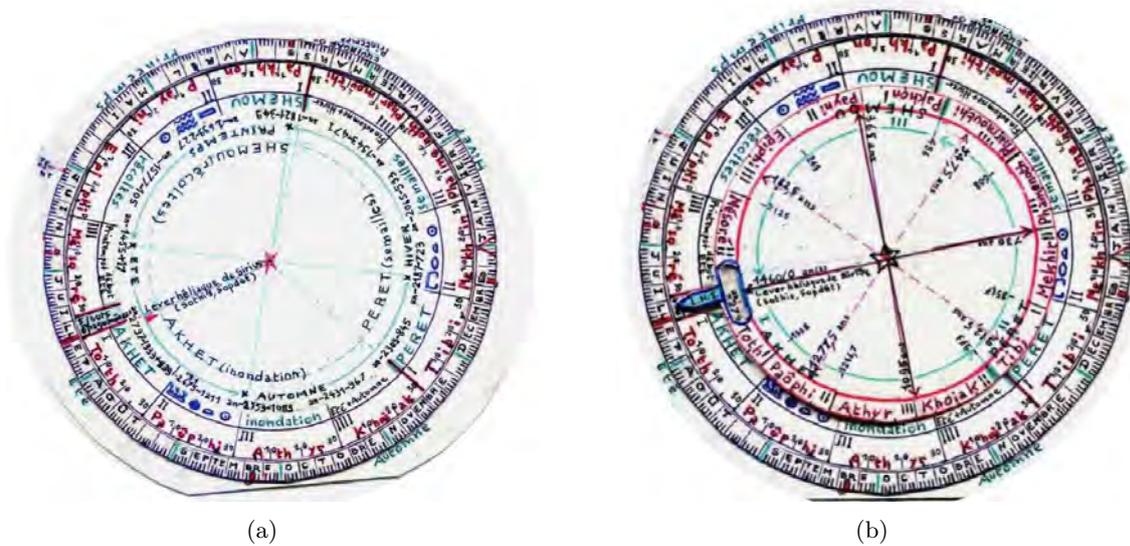


Figure 21 – Modèle de convertisseur-calculateur du calendrier égyptien au calendrier grégorien.

Le C.H.A.R.

par Michel STEINER

Dans le livre « Cadran solaire, théâtre de l'ombre »¹ sont présentées deux méthodes universelles pour tracer un C.I.D., (Cadran Incliné Déclinant). L'une utilise le concept de C.H.E., acronyme de Cadran Horizontal Équivalent. L'idée est connue et trouve dans le livre un développement particulier. L'autre, en revanche, est nouvelle et propose une approche radicalement différente pour tracer un C.I.D.. La méthode du C.H.A.R., c'est son nom, utilise aussi un cadran horizontal, mais il est situé au même endroit que le C.I.D.. La table d'un C.I.D. est d'orientation quelconque, avec une inclinaison et une déclinaison gnomonique fruits du désir du concepteur du cadran, les cadrans verticaux ou horizontaux n'étant que des cas particuliers de C.I.D.. Le choix de traiter le C.I.D. dans toute sa généralité est fait pour exprimer le caractère universel de la méthode.

Engageons-nous sur les traces du C.H.A.R. . . .

1 Présentation

Pour tracer le C.I.D. en un point A de la Terre, on s'appuie sur un cadran horizontal en ce point. De là vient l'acronyme C.H.A.R. attaché à la méthode, correspondant à Cadran Horizontal en A de Référence. L'idée est simple. Elle part d'un constat. Les méthodes habituelles pour tracer les lignes horaires d'un cadran considèrent un point, le centre du cadran, et cherchent un deuxième point de chaque ligne horaire sur l'équinoxiale. Or, cette ligne est difficile à trouver. La méthode du C.H.A.R. cherche à éviter cette difficulté. Pour cela elle prend le problème à l'envers. Elle considère les points horaires de chaque ligne horaire sur une ligne d'accès facile, la ligne horizontale, et se propose de trouver la position du seul point C_i , centre du cadran. Tous ces points seront trouvés grâce à leurs coordonnées dans un repère orthonormé.

Raisonnons : en tout point de la table d'un C.I.D., il est possible de trouver une ligne horizontale. Elle est la trace, dans la table du C.I.D., d'un plan horizontal qui peut très bien être la table d'un cadran lui aussi horizontal, le C.H.A.R.. La photographie [1 page suivante](#) aide à visualiser la situation. On y voit le C.I.D. et le C.H.A.R. se coupant selon une ligne

1. Michel Steiner, *Cadran solaire, théâtre de l'ombre*, septembre 2017. Ouvrage en vente chez www.amazon.fr, broché : 635 pages, ISBN : 978-1549596872.

Voir le site : <https://sites.google.com/site/cadransolairemichelsteiner/home>

horizontale. L'idée constructive de la méthode y apparaît aussi. On voit sur le C.H.A.R. les lignes horaires bien distribuées symétriquement autour de la ligne de midi. Ces lignes horaires coupent la ligne horizontale du C.I.D. en des points horaires qu'elles partagent avec les lignes horaires visibles sur la table du C.I.D.. Connaissant le C.H.A.R., ces points sont connus. La question est donc simplement de trouver la position du centre C_i du C.I.D. Cette position sera donnée par les coordonnées du point C_i dans un repère orthonormé que l'on aperçoit aussi. Il s'agit maintenant de bien paramétrer le problème.

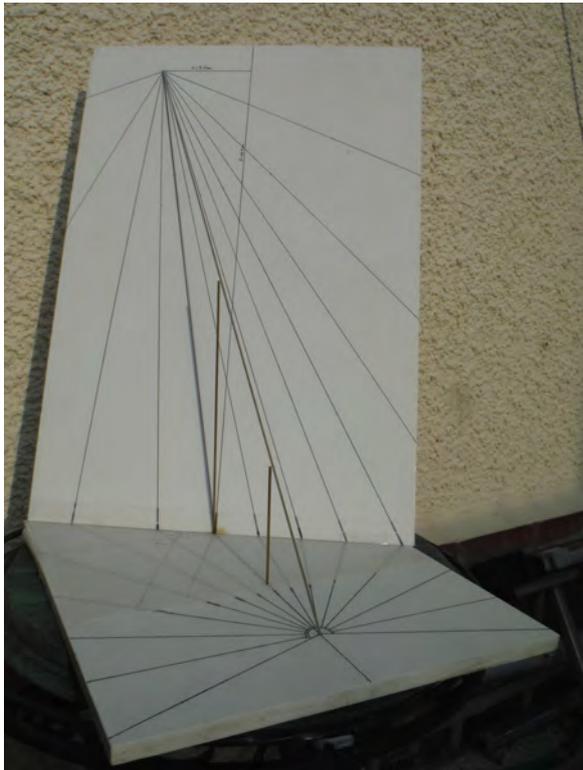


Figure 1 – C.I.D. et C.H.A.R.

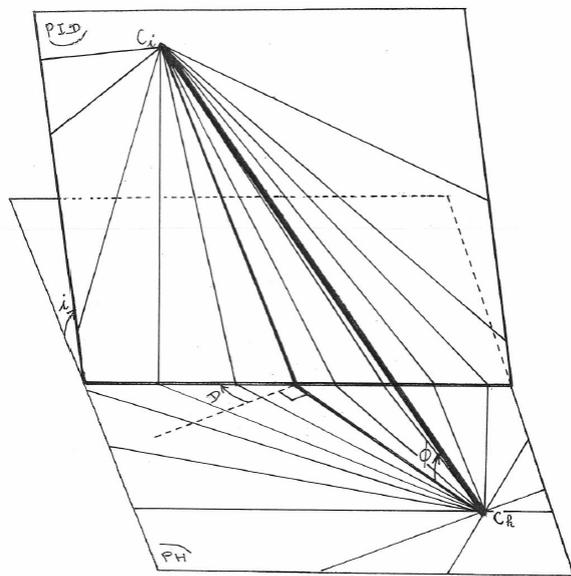


Figure 2 – Inclinaison i et déclinaison D .

2 Paramétrage

Le rôle des différents paramètres va apparaître dans cette séquence avec l'aide de dessins.

Le premier dessin 2, reprend la photographie 1 en permettant de visualiser l'inclinaison i du C.I.D. et sa déclinaison gnomonique D . On y voit aussi la latitude du point A , à savoir φ . Il s'agit maintenant de suivre une évolution des plans références aboutissant à cette situation.

2.1 Considérons d'abord la déclinaison gnomonique D

Le dessin 3(a) page ci-contre, montre PH , le plan horizontal support du C.H.A.R.. L'axe polaire le traverse au centre C_h . Le plan PVM est le plan vertical méridional. Il coupe le plan PH selon une ligne perpendiculaire à la ligne de midi du C.H.A.R.. La déclinaison gnomonique correspond à une rotation du plan PVM d'un angle D autour de la verticale passant par O . On obtient alors le plan PVD , plan vertical déclinant. La perpendiculaire en O à ce plan fait un angle D avec la ligne de midi du C.H.A.R., c'est-à-dire OC_h .

On retrouve ces éléments sur le dessin 3(b), débarrassé du plan PVM . Le point C_v est le centre d'un cadran vertical déclinant qui serait porté par le plan PVD .

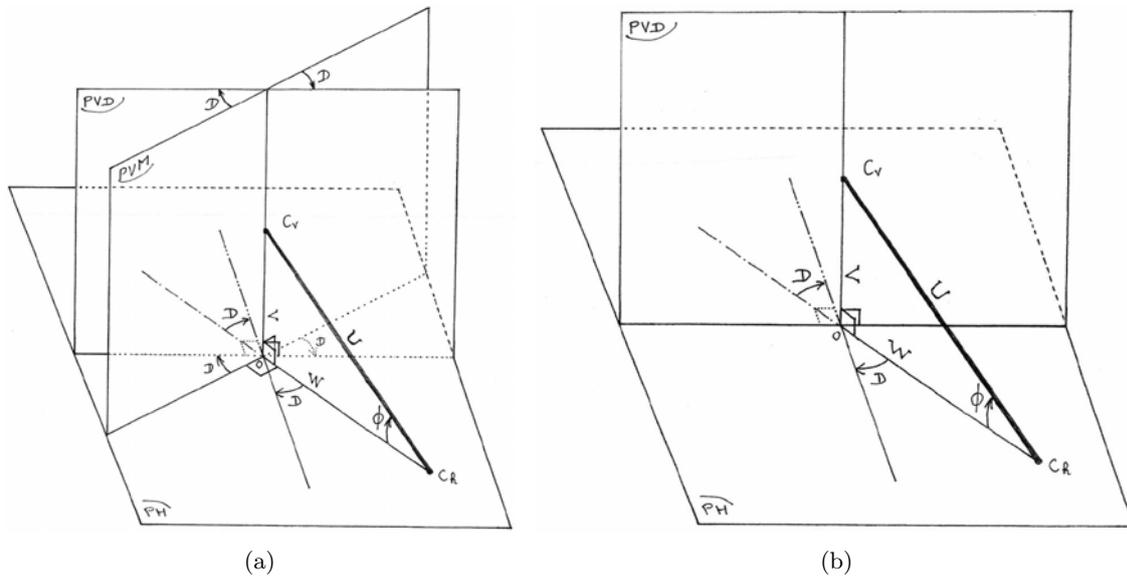


Figure 3 – Déclinaison gnomonique D .

2.2 Considérons maintenant l'inclinaison i

Le dessin 4 illustre l'évolution du plan PVD devenant le plan PID , plan incliné déclinant, table support du C.I.D., le cadran recherché. L'inclinaison i est toujours évaluée à partir d'une ligne horizontale telle qu'elle apparaît sur le dessin. La trace du plan PVD a été conservée car sa présence permet de mettre en lumière tous les éléments nécessaires aux calculs.

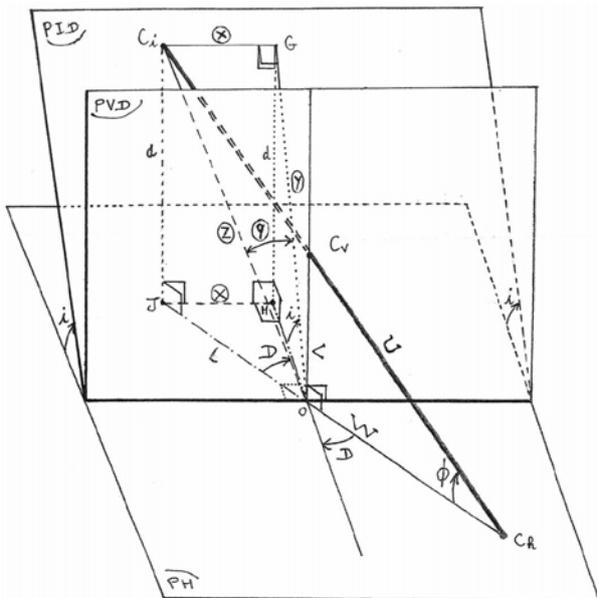


Figure 4 – Inclinaison i .

2.3 Regardons d'abord les éléments nouveaux

Il y a la création d'un réseau de lignes de plus grande pente. Celle qui figure sur le dessin s'appelle GO et est perpendiculaire en O à la ligne horizontale. Le centre du C.I.D. est noté C_i . Il s'obtient en prolongeant l'axe polaire jusqu'à la table du cadran. Le centre C_i pourra être repéré de deux manières sur la table du cadran.

Première manière : le repérage cartésien par les coordonnées X et Y de repérage dans le repère formé par la ligne de plus grande pente OG et l'horizontale (on y reviendra pour préciser l'orientation).

Deuxième manière : le repérage polaire par la distance Z représentée par la longueur du segment OC_i et par l'angle entre la direction OC_i et la ligne de plus grande pente OG . Cet angle est noté q sur le dessin.

2.4 Le paramètre du C.H.A.R.

Il faut un paramètre exprimant le plus ou moins grand éloignement du C.H.A.R. par rapport au C.I.D.. Ce paramètre est W correspondant à la distance OC_h . En fait, il n'y a rien de plus à dire concernant le C.H.A.R. une fois que celui-ci est construit et bien positionné à l'aide de D . Le paramètre W est *le paramètre facilement accessible du C.H.A.R.*

2.5 Le repère d'observation de la table du C.I.D.

Origine O au point d'intersection de la ligne horizontale du C.I.D. avec la ligne de midi du C.H.A.R..

Axe horizontal orienté positivement dans le sens correspondant à l'orientation positive du C.H.A.R. (positive dans le sens horaire).

Axe *pseudovertical*, dans le P.I.D., perpendiculaire à l'axe horizontal et orienté positivement dans le sens *vers le haut*.

2.6 Coordonnées X et Y du centre C_i

Les démonstrations des expressions suivantes sont renvoyées à la fin de l'article.

Coordonnées cartésiennes de C_i :

$$\begin{cases} X = -\frac{W \tan \varphi \tan D}{\tan i - \frac{\tan \varphi}{\cos D}} \\ Y = \frac{W \tan \varphi}{\sin i - \frac{\tan \varphi \cos i}{\cos D}} \end{cases}$$

Coordonnées polaires de C_i :

$$\begin{cases} Z = \sqrt{X^2 + Y^2} \\ q = \arctan(\cos i \tan D) \end{cases}$$

On constate que seul le paramètre W caractérise le C.H.A.R..

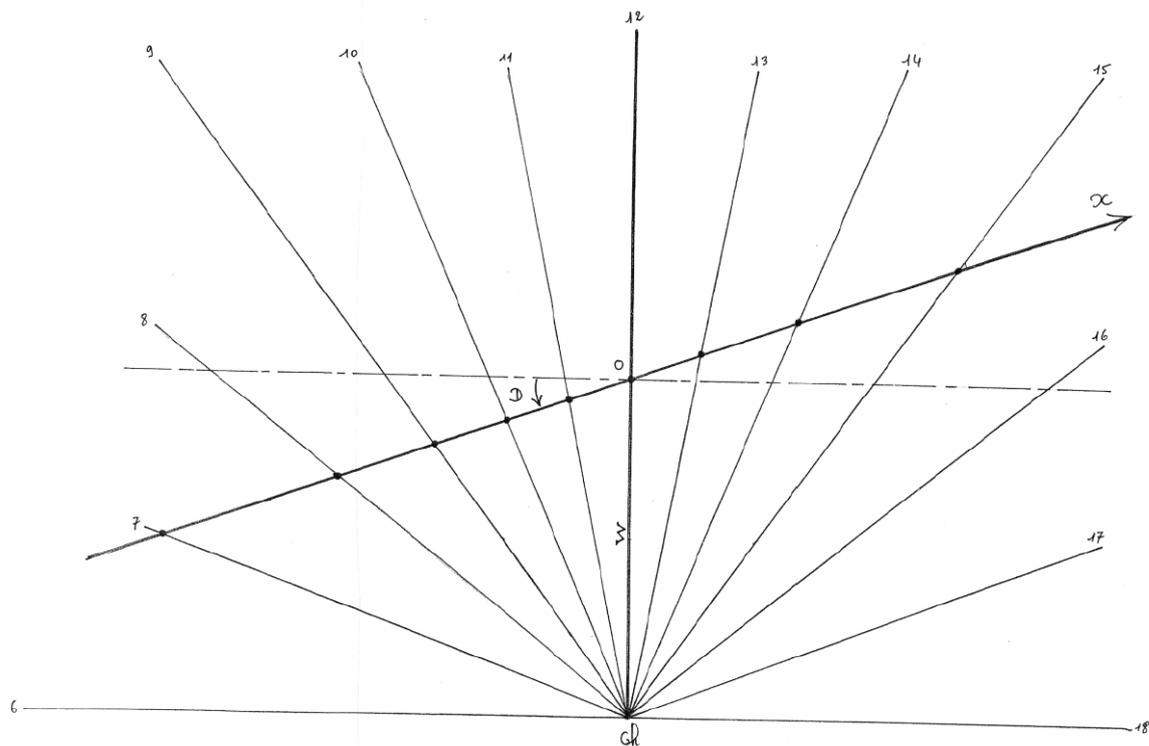
3 Réalisation effective du C.I.D.

Deux voies possibles :

3.1 Voie semi géométrique

On réalise le C.H.A.R. en vraie grandeur. Le paramètre W étant choisi, on trace directement sur le C.H.A.R. la ligne représentant la ligne horizontale correspondant à l'intersection avec la table du C.I.D. en tenant compte de la déclinaison gnomonique D . Le dessin 5(a) représente le C.H.A.R. muni de cette ligne (avec $W = 8,06$ cm, à l'échelle de représentation près, et $D = -20^\circ$). Les positions des points horaires sont repérées directement sur la ligne et reportées sur la ligne horizontale du C.I.D.. Ce report est réalisé juste en dessous sur le dessin représentant l'axe horizontal (cf. dessin 5(b)).

C'est la partie géométrique.



(a) Le C.H.A.R. muni de Ox , intersection avec le C.I.D.



(b) Position des points horaires sur la ligne Ox

Figure 5 – Voie semi géométrique.

On poursuit la démarche par le calcul des coordonnées de C_i . L'exemple est construit avec $\varphi = +46^\circ 20'$; $i = +70^\circ$; $D = -20^\circ$ et $W = 8,06$ cm.

Résultats :

$$\begin{cases} Y = \frac{8,06 \times \tan(+46^{\circ}20')}{\sin(+70^{\circ}) - \frac{\tan(+46^{\circ}20') \times \cos(+70^{\circ})}{\cos(-20^{\circ})}} = +15,0 \text{ cm} \\ X = -\frac{8,06 \times \tan(+46^{\circ}20') \times \tan(-20^{\circ})}{\tan(+70^{\circ}) - \frac{\tan(+46^{\circ}20')}{\cos(-20^{\circ})}} = +1,9 \text{ cm} \end{cases}$$

On peut compléter l'étude par le calcul des coordonnées polaires

$$\begin{cases} Z = \sqrt{1,9^2 + 15,0^2} = 15,1 \text{ cm} \\ q = \arctan(\cos(+70^{\circ}) \times \tan(-20^{\circ})) = -7^{\circ}1' \end{cases}$$

Avec ces valeurs, le point C_i est reporté sur la table. Voir le dessin 6.

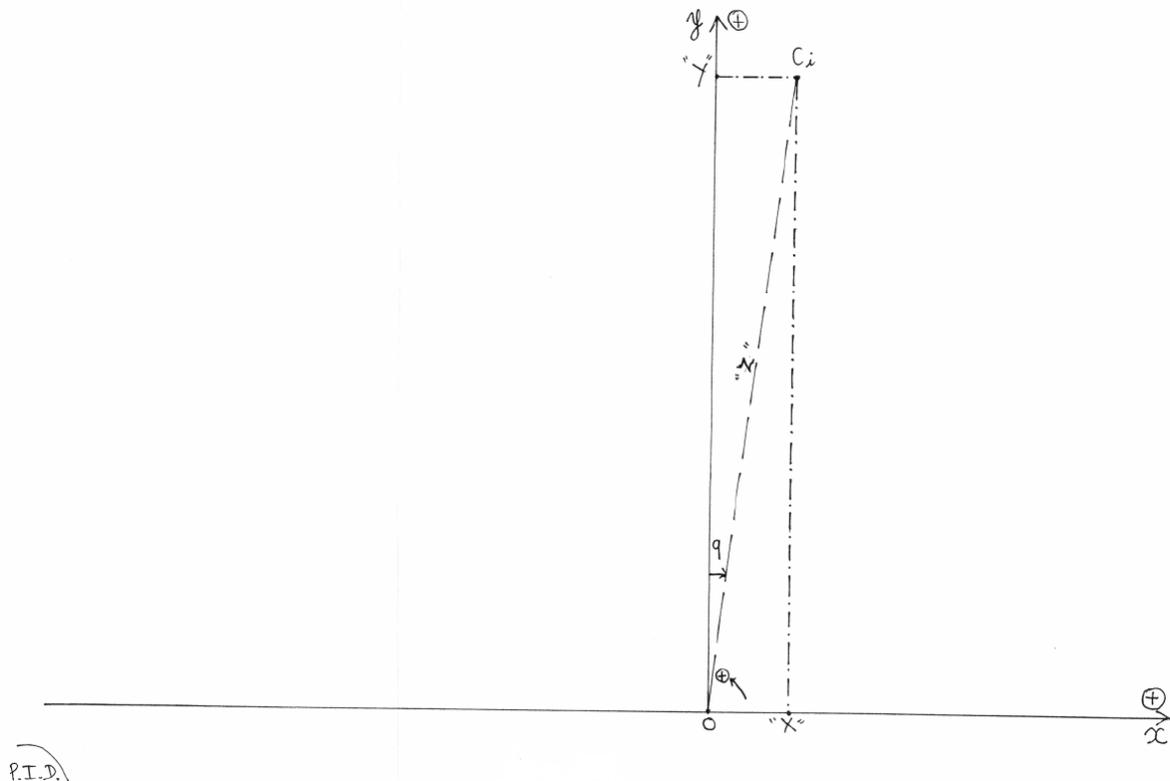


Figure 6 – Report du point C_i .

Les lignes horaires sont alors tracées (cf. fig. 7 page ci-contre).

On constate qu'il manque des lignes horaires. Elles peuvent être tracées par la méthode de la plage des 6 heures développée dans le livre cité au début de l'article. Le résultat est illustré par le dessin 8 page 158 où la table apparaît complète.

3.2 Voie numérique

La position des points horaires sur la ligne horizontale peut être obtenue par voie numérique. La démonstration de l'expression de l'abscisse x_I du point horaire recherché est reportée à la

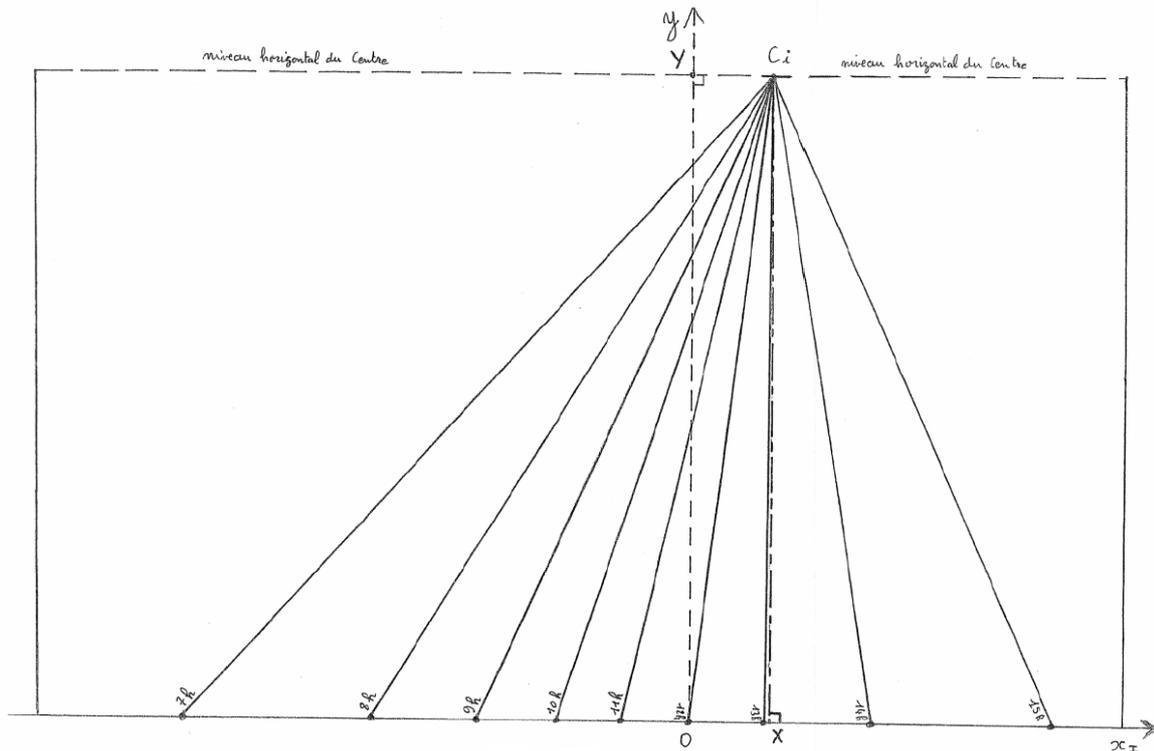


Figure 7 – Lignes horaires complètes.

fin de l'article. Dans la figure dédiée, les points horaires sur la ligne, I ou I' , sont désignés à travers l'angle horaire tabulaire H' . On obtient :

$$x_I = OI = \frac{W \sin \varphi \tan H}{\sin D \sin \varphi \tan H + \cos D}$$

Expression où apparaît l'angle horaire H .

Voici le tableau 1 page suivante des résultats obtenus avec les valeurs de l'exemple.

On constate que certains points, (abscisses x_I en italique dans le tableau), dépassent les limites de la table fixées à : x matin = -15,0 cm et x soir = +10,0 cm.

Le tracé des lignes horaires correspondantes demande un traitement numérique.

3.2.1 Traitement numérique de lignes horaires

Le dessin 9 page 159 montre la situation de la table d'un C.I.D.. Le tracé des lignes horaires sortantes sera possible si on connaît la position du point où la ligne horaire sort de la table.

La position du problème est simple. De la ligne horaire, on connaît les coordonnées de deux points, à savoir :

- Le centre C_i de coordonnées (X et Y).
- Le point de la ligne horaire sur la ligne horizontale de coordonnées (x_I et 0).

Par conséquent, son équation dans le repère de la table est déterminée et pourra être obtenue. Du point de la ligne horaire au bord de la table, on connaît l'une des coordonnées. Donc, en reportant cette coordonnée dans l'équation de la ligne horaire, on connaîtra la

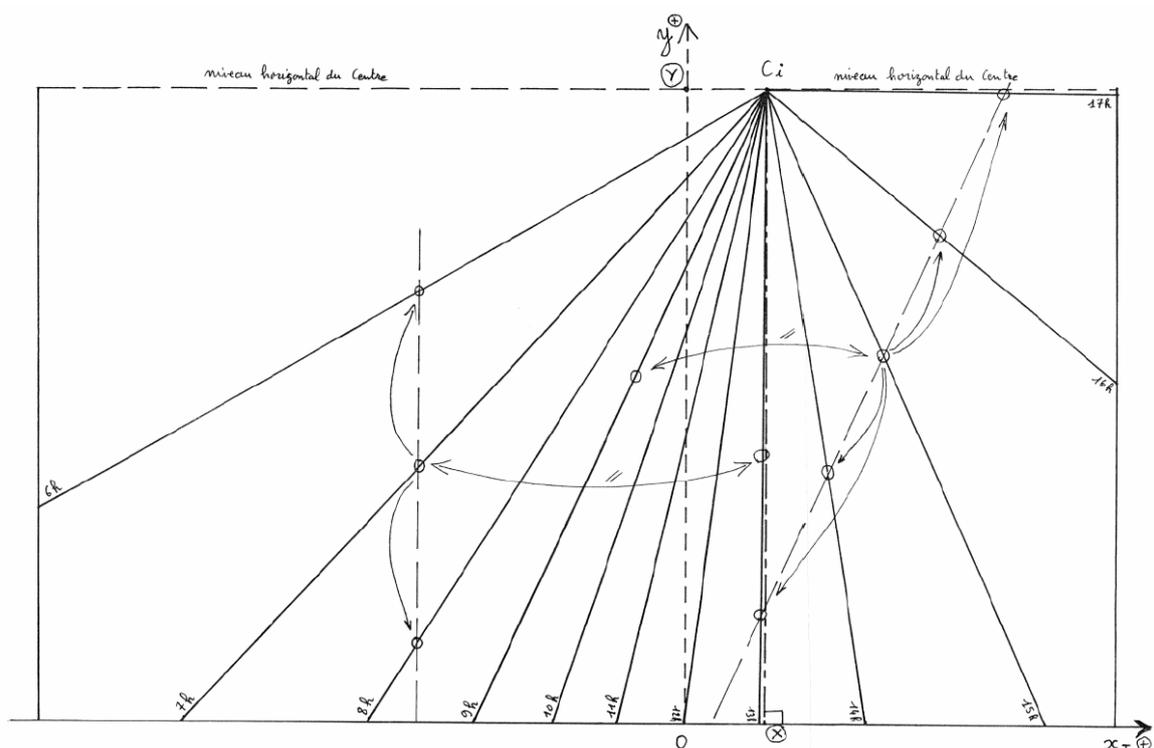


Figure 8 – Aspect complet de la table.

Table 1
Tableau des abscisses

Heure H (en °)	x_I (en cm)
6 h	-90° -23,558
7 h	-75° -11,663
8 h	-60° -7,367
9 h	-45° -4,901
10 h	-30° -3,103
11 h	-15° -1,549
12 h	0° 0,000
13 h	+15° +1,784
14 h	+30° +4,212
15 h	+45° +8,394
16 h	+60° +19,669
17 h	+75° +1178,823

deuxième coordonnée et le point pourra être placé sur le bord de la table. Ainsi, Le problème est résolu. Le détail de la construction des équations est reporté à la fin de l'article. On a :

$$y \text{ bordure} = -0,0127439 \times ((+10,000) - (+1,867)) + 14,999 = +14,895 \text{ cm} \approx +14,90 \text{ cm}.$$

On peut contrôler ces résultats en regardant le dessin de la table complète donné plus haut.

Il est possible de se demander si la méthode utilisant l'équation cartésienne des lignes horaires est générale.

3.2.2 Cas général

Il n'y a pas d'obligation pour le point C_i à se trouver dans la table du C.I.D.. Il peut se trouver à l'extérieur de la table. Le dessin 10 montre une telle situation.

Qu'en penser ?

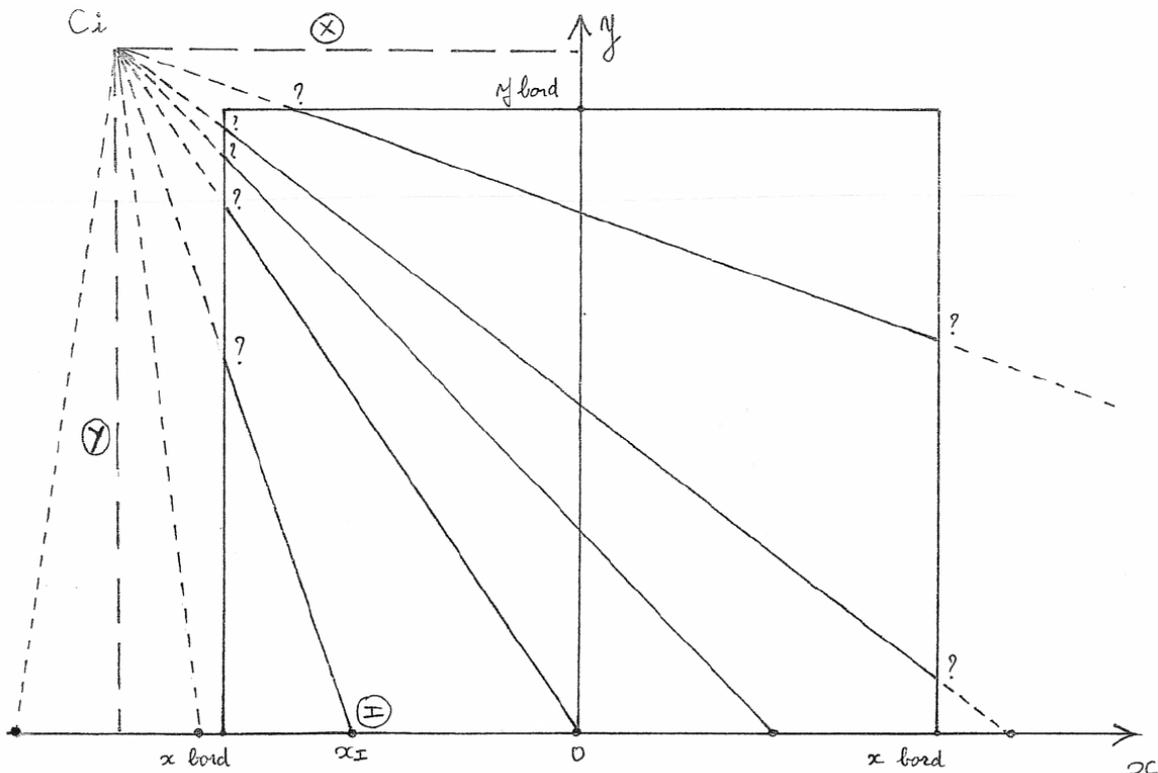


Figure 10 – Cas du point C_i hors de la table.

Le calcul donnant les coordonnées du point C_i et des *points horaires sur l'horizontale* est indépendant des dimensions propres de la table. L'équation de la ligne horaire peut toujours être obtenue. Quel que soit le bord de la table traversé par la ligne horaire, une des coordonnées du point du bord est connue. En conséquence la seconde le sera aussi à partir de l'équation de la ligne horaire. Ainsi, les deux points des bords traversés par la ligne horaire peuvent être obtenus. Si la ligne horaire provient d'un point C_i extérieur à la table, la ligne horaire pourra être tracée à partir des deux points où elle traverse les deux bords concernés.

Dans tous les cas la ligne horaire peut être tracée.

Il reste à préciser la manière de positionner le style.

3.2.3 Position du style

Regardons le dessin suivant.

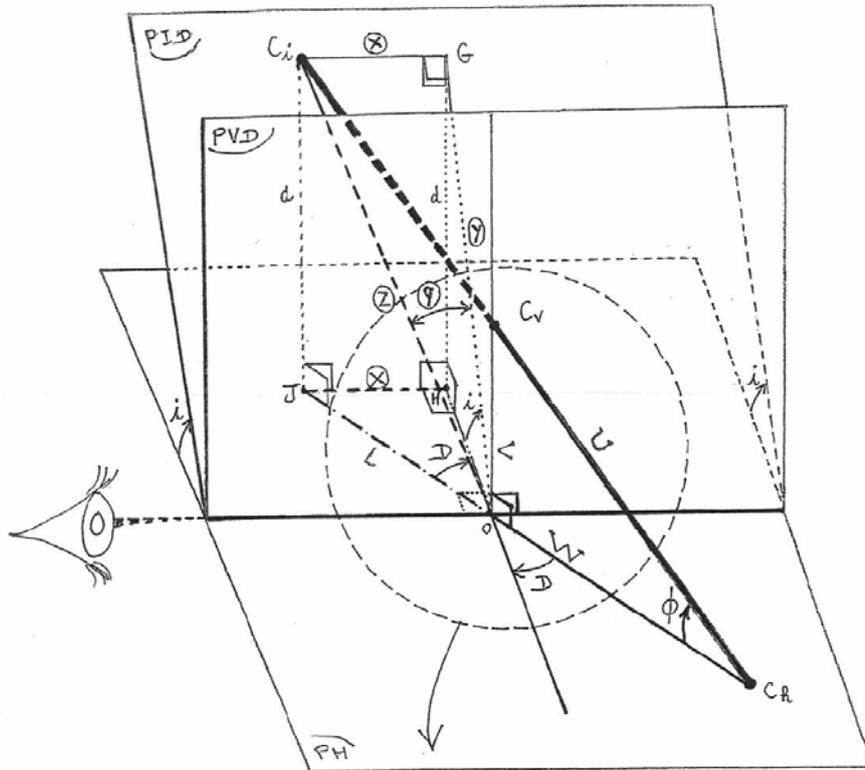


Figure 11 – Position du style.

Il reprend le dessin déjà vu et y ajoute, en 12, le dessin du plan GOC_v vu par l'œil placé sur la ligne horizontale. Les points G , P' , C_v et O sont dans ce plan. Les points C_i et C_h sont,

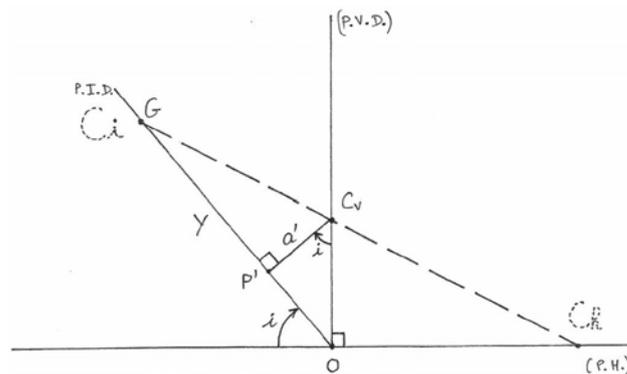


Figure 12 – Position du style.

l'un en avant et l'autre en arrière de ce plan. Nous cherchons à obtenir C_v afin de positionner le style entre C_i et C_v , ces deux points appartenant à l'axe style. Pour cela, on plantera en P' , perpendiculairement à la table, une tige de longueur a' . P' est forcément situé sur la ligne de

plus grande pente GO . Il peut être positionné à partir de O . La formule est démontrée à la fin de l'article.

On a :

$$OP' = W \tan \varphi \sin i$$

Et la longueur a' à donner à la tige $P'C_v$ est donnée par (démonstration à la fin de l'article également) :

$$a' = W \tan \varphi \cos i$$

Remarque : On sait que la projection orthogonale du style sur la table du cadran donne la sous-style. P' est le résultat d'une telle projection du point C_v . On conclura donc que P' est le point où la sous-style coupe l'axe Oy , lequel est porté par la ligne de plus grande pente passant par O .

Il reste maintenant à discuter les situations limites.

4 Discussion

En voyant le dessin précédent, on peut se demander ce qu'il advient lorsque le plan du C.I.D. et l'axe polaire deviennent parallèles. On se rend compte qu'il existe une inclinaison pour laquelle le point C_i est rejeté à l'infini. On a alors :

Y tendant vers l'infini.

L'expression de y est :

$$Y = W \frac{\tan \varphi}{\sin i - \frac{\tan \varphi \cos i}{\cos D}}$$

D'après cette expression, Y tend vers l'infini quand le dénominateur s'annule. La valeur i correspondante notée $i \text{ lim}$ vérifiera donc :

$$0 = \sin(i \text{ lim}) - \frac{\tan \varphi \cos(i \text{ lim})}{\cos D}$$

Soit :

$$\tan(i \text{ lim}) = \frac{\tan \varphi}{\cos D}$$

Il y a deux cas :

- Si $i > i \text{ lim}$, alors le point C_i se trouve positionné vers le haut comme dans notre exemple.
- Si $i < i \text{ lim}$, alors le point C_i se trouve en bas de la table.

En fait, il n'y a pas lieu de vraiment s'en préoccuper car le signe de Y indiquera la position de C_i par rapport à O sur l'axe Oy , et le signe de X sa position par rapport à O au regard de l'axe Ox . Le calcul de $i \text{ lim}$ et la valeur de i par rapport à $i \text{ lim}$ peut indiquer, par avance, le positionnement de C_i et ainsi optimiser le choix de la position à donner à l'horizontale sur le C.I.D., à savoir plutôt vers le haut ou plutôt vers le bas.

Il y a un *point* un peu particulier à respecter si on veut optimiser la réalisation du cadran.

5 Optimisation

C'est un point très simple résumé par cette affirmation :

C'est le C.I.D. qui commande !

Par là, on veut dire que c'est de la dimension de la table du C.I.D., le long de la ligne de plus grande pente, qu'on déduira le positionnement du C.H.A.R. à travers le calcul de W . Il suffit pour cela de reprendre l'expression de Y à l'envers. On appliquera donc :

$$W = Y \frac{\sin i - \frac{\tan \varphi \cos i}{\cos D}}{\tan \varphi}$$

C'est ce qui a été fait dans notre exemple où la dimension 15,0 cm de la table du C.I.D. a conduit à la valeur $W = 8,06$ cm.

Finalement, la marche à suivre sera résumée par cette petite liste de points à suivre.

6 Protocole à suivre

On suppose connaître l'inclinaison i et la déclinaison gnomonique D du C.I.D..

1. On calcule l'angle limite i lim. On déduit la position *en haut* ou *en bas* du centre C_i .
2. On trace alors une ligne horizontale sur le P.I.D. munie d'une origine O (ou le P.V.D., s'il s'agit d'un cadran vertical). On trace un repère avec Ox horizontale orientée, Oy perpendiculaire à Ox . On estime la valeur de Y pour C_i .
3. On calcule, en lien avec Y , la valeur de W du C.H.A.R..
4. On calcule les positions x_I des points horaires sur Ox . On les positionne.
5. On calcule alors les coordonnées de C_i , à savoir X et Y . On positionne C_i . On contrôle cette position par q et Z (ou l'inverse).
6. On trace les lignes horaires.
7. On complète le cadran avec les lignes horaires inaccessibles. (méthode de *la plage des 6 heures* ou calcul de la coordonnée manquante du point horaire sur les bords). C'est inutile au-delà de l'horizontale passant par C_i .
8. On numérote les lignes horaires.
9. On calcule OP' et on positionne P' .
10. On calcule a' et on installe le *style droit* de longueur a' .
11. On positionne le style entre C_i et le sommet du style droit.
12. On met une devise qui nous plaît.
13. On invite des amis pour inaugurer le cadran... un jour où le soleil luit.

7 Conclusion

La conduite du C.H.A.R. est finalement très souple. Par l'usage des coordonnées cartésiennes des points, elle représente une nouvelle méthode de réalisation de tout type de cadran plan. Elle ne souffre d'aucune limitation dans son champ d'application et est donc une méthode universelle de réalisation d'un cadran plan.

8 Annexe

Démonstration des expressions utilisées.

8.1 Paramètres positionnels du centre C_i

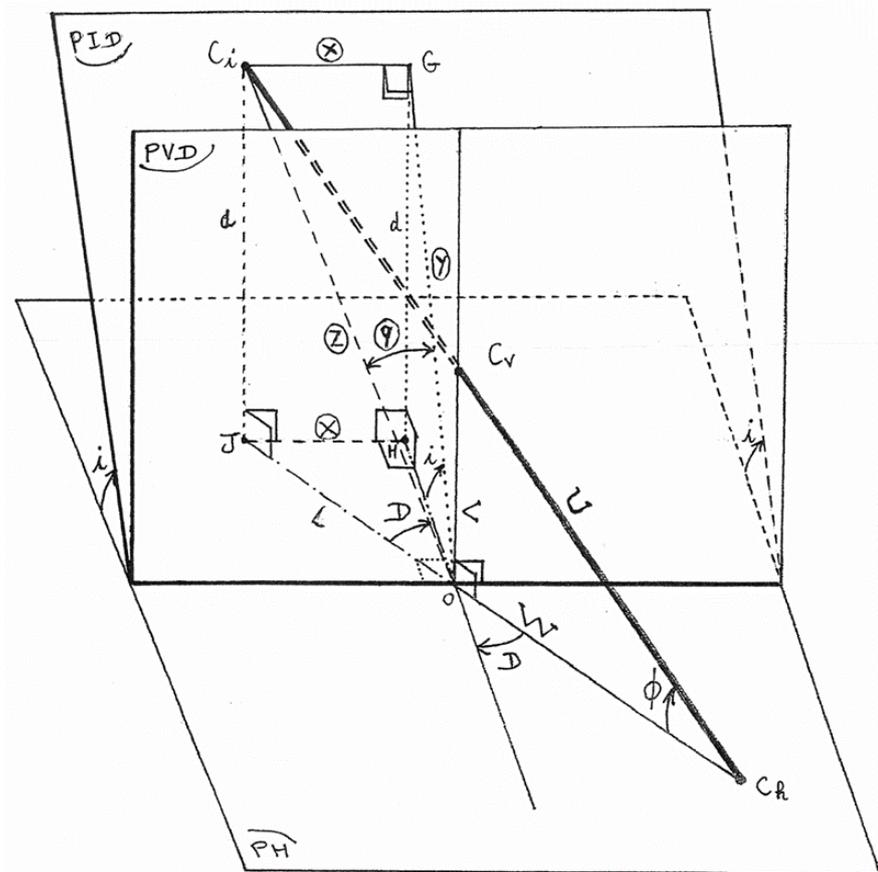


Figure 13

8.1.1 Le paramètre q

Le paramètre q est l'angle entre OC_i et OG , ligne de plus grande pente dans la table du C.I.D., laquelle porte l'axe Oy . J est la projection verticale de C_i dans le plan horizontal $P.H.$ et G se projette en H dans le même plan (dessin 13). Le quadrilatère C_iJHG est muni de quatre angles droits. C'est un rectangle. Les côtés se faisant face sont égaux. On a donc JH de même longueur que le côté C_iG . Par conséquent : $JH = X$ (abscisse du centre C_i dans le repère de sommet O). Dans le triangle JHO rectangle en H on a :

$$X = OH \tan D$$

Le triangle GHO est rectangle en H . L'hypoténuse GO représente le paramètre Y (ordonnée du centre C_i dans le repère de centre O). On a :

$$OH = Y \cos i$$

En remplaçant OH dans la première expression on trouve :

$$X = Y \cos i \tan D$$

Qui donne :

$$X/Y = \cos i \tan D$$

Dans le triangle C_iGO , l'angle $\widehat{C_iOG}$ est l'angle q entre la ligne de midi et la ligne de plus grande pente. On a :

$$\tan q = X/Y$$

Et en rapprochant les deux expressions :

$$\tan q = \cos i \tan D$$

Par la suite, il conviendra de donner à q un caractère algébrique en orientant le plan autour de O . Cela permettra de lier entre eux les signes des trois paramètres et de donner à cette formule toute sa généralité.

8.1.2 Le paramètre d et l'angle l'inclinaison limite

Considérons le triangle rectangle JHO , rectangle en H . JO est l'hypoténuse de longueur L .

On a :

$$L = OH / \cos D$$

Par ailleurs, dans le triangle GHO , rectangle en H , où d représente le côté GH , on a :

$$OH = d / \tan i$$

Ces deux expressions rapprochées donnent :

$$L = \frac{d}{\tan i \cos D}$$

Considérons les deux droites C_hC_i et C_hJ sécantes en C_h . Elles sont coupées par deux droites C_iJ et C_vO toutes deux perpendiculaires au plan P.H. et donc parallèles. Le théorème de Thalès (aussi appelé théorème des proportions) permet d'écrire en utilisant les longueurs des segments :

$$\frac{d}{L + W} = \frac{V}{W}$$

En faisant le produit en croix :

$$d \times W = V \times (L + W)$$

En remplaçant L par son expression :

$$\begin{aligned} d \times W &= V \left(\frac{d}{\tan i \cos D} + W \right) \\ d \times W &= \frac{d \times V}{\tan i \cos D} + V \times W \\ d \times W - \frac{d \times V}{\tan i \cos D} &= V \times W \end{aligned}$$

$$d \times \left(W - \frac{V}{\tan i \cos D} \right) = V \times W$$

$$d = \frac{V \times W}{W - \frac{V}{\tan i \cos D}}$$

Cette expression montre que d tend vers l'infini quand le dénominateur tend vers zéro. Dans ces conditions, le centre C_i est rejeté à l'infini. Les lignes horaires deviennent alors parallèles. On est en présence d'un *cadran polaire*. Soit $i \text{ lim}$ l'inclinaison conduisant à cette situation. On a :

$$W - \frac{V}{\tan(i \text{ lim}) \cos D} = 0$$

$$\tan(i \text{ lim}) \cos D = V/w$$

Or, dans le triangle rectangle C_vOC_h , on a :

$$\tan \varphi = V/w$$

On peut donc écrire :

$$\tan(i \text{ lim}) \cos D = \tan \varphi$$

$$\tan(i \text{ lim}) = \frac{\tan \varphi}{\cos D}$$

Cette formule donne la valeur de l'angle $i \text{ lim}$ par l'expression suivante :

$$i \text{ lim} = \arctan \left(\frac{\tan \varphi}{\cos D} \right)$$

On peut en faire le calcul numérique en prenant les mêmes valeurs que pour le C.I.D. donné en exemple plus haut :

- $\varphi = +46^\circ 11' 52'' = +46:20$,
- $i = +70^\circ$ et $D = -20^\circ$.

Cela donne :

$$i \text{ lim} = \arctan \left(\frac{\tan(+46:20)}{\cos(-20^\circ)} \right) = +47:977 = +47^\circ 58' 37''$$

Ici, on a donc :

$$i > i \text{ lim}$$

De cette inégalité découle le positionnement de C_i . C_i se trouve placé vers le haut du cadran, conformément aux explications données plus avant.

Remarquons que $i \text{ lim}$ n'est pas un bornage, c'est une frontière *ouverte* que l'on peut traverser. Le franchissement de la frontière $i \text{ lim}$ entraîne le basculement du centre C_i de l'autre côté de l'axe-style. Sur le dessin précédent, le centre C_i est derrière le P.V.D.. Ceci correspond au cas où $i > i \text{ lim}$. Pour $i = i \text{ lim}$, l'axe-style est parallèle à la table du C.I.D. et correspond au rejet de C_i à l'infini. Enfin, si on a l'inégalité $i < i \text{ lim}$, l'axe-style traverse le P.I.D. en avant du P.V.D. sur notre dessin. Le centre C_i du C.I.D. se trouve alors *dans le dos* de C_h .

La formule $\tan q = \cos i \tan D$ donnant l'angle q n'est pas affectée par ce basculement du centre C_i , ni par la valeur de $i \text{ lim}$. Elle donne des résultats s'inscrivant dans une continuité.

8.1.3 Les coordonnées de C_i

La connaissance des paramètres d et q va nous permettre d'accéder aux coordonnées X et Y du centre C_i . Le but est de les connaître en fonction des seuls autres paramètres que sont D et i propres au C.I.D. et de W qui est en lien avec la position du C.I.D. par rapport au C.H.A.R..

Rappel du repère utilisé :

- *Origine* : point O où la ligne de midi du C.H.A.R. atteint le P.I.D..
- *Axe des ordonnées Oy* : ligne de plus grande pente du P.I.D. passant par O .
- *Axe des abscisses Ox* : ligne horizontale du P.I.D. passant par O .

Orientation des axes :

- L'axe des abscisses sera orienté dans la continuité de l'orientation du C.H.A.R., lequel est orienté positivement dans le sens horaire.
 x : orienté positivement comme pour le C.H.A.R..
- L'axe des ordonnées sera orienté positivement vers le haut de la table du C.I.D..
 y : orienté positivement vers le haut.

L'angle q est défini à partir de l'axe Oy au lieu de l'axe Ox comme il est fait habituellement dans les repères où l'espace est orienté dans le sens trigonométrique direct (sens antihoraire). q sera donc négatif à droite de l'axe Oy en regardant dans le sens de l'axe et positif s'il est à gauche. q a donc le même signe que D et la formule donnant q en fonction de i et D est valable en grandeur et en signe telle qu'elle est.

$$\tan q = \cos i \tan D$$

8.1.3.1 Expression de l'ordonnée Y . Dans le triangle GHO rectangle en H on a :

$$Y = d/\sin i$$

En reportant l'expression de d :

$$Y = \frac{V \times W}{\sin i \left(W - \frac{V}{\tan i \cos D} \right)}$$

$$Y = \frac{V \times W}{W \sin i - \frac{V \sin i}{\tan i \cos D}}$$

$$Y = \frac{V \times W}{W \sin i - \frac{V \cos i}{\cos D}}$$

$$Y = \frac{V}{\sin i - \frac{V \cos i}{W \cos D}}$$

$$Y = \frac{V}{\sin i - \frac{V}{W} \times \frac{\cos i}{\cos D}}$$

Or, on a vu : $\tan \varphi = V/W$, d'où :

$$Y = \frac{V}{\sin i - \frac{\tan \varphi \cos i}{\cos D}}$$

On a aussi, $V = W \tan \varphi$ qui sera reporté dans l'expression précédente d'où :

$$Y = W \frac{\tan \varphi}{\sin i - \frac{\tan \varphi \cos i}{\cos D}}$$

8.1.3.2 Expression de l'abscisse X. Dans le triangle GHO rectangle en H on a :

$$OH = d/\tan i$$

En reportant l'expression de d :

$$OH = \frac{V \times W}{\tan i \left(W - \frac{V}{\tan i \cos D} \right)}$$

$$OH = \frac{V \times W}{W \tan i - \frac{V}{\cos D}}$$

$$OH = \frac{V}{\tan i - \frac{V}{W} \times \frac{1}{\cos D}}$$

Compte tenu de $\tan \varphi = V/W$ et de $V = W \tan \varphi$, l'expression devient :

$$OH = \frac{W \tan \varphi}{\tan i - \frac{\tan \varphi}{\cos D}}$$

Dans le triangle JHO , rectangle en H , on a JH de longueur égale à X et par ailleurs :

$$X = -OH \tan D$$

(le signe $-$ en conformité avec le dessin où X est négative quand D est positive). D'où :

$$X = -\frac{W \tan \varphi \tan D}{\tan i - \frac{\tan \varphi}{\cos D}}$$

8.1.4 Coordonnées polaires

Le théorème de Pythagore permet d'obtenir l'hypoténuse C_iO du triangle rectangle C_iGO :

$$Z^2 = X^2 + Y^2$$

$$Z = \sqrt{X^2 + Y^2}$$

La valeur Z permet de contrôler le repérage de C_i par les coordonnées X et Y d'une autre manière, à savoir directement sur la ligne de midi C_iO tracée grâce à l'angle q . Rappel :

$$q = \arctan(\cos i \tan D)$$

Les coordonnées du centre C_i du C.I.D. sont données en fonction de φ , i , D et W en accord avec les intentions initiales.

8.1.5 Détail de la réalisation du C.H.A.R.

Il faut connaître le paramètre W du C.H.A.R.. Le voici : $W = 8,057$ cm. Cette valeur provient d'un calcul. Le détail est donné plus loin. Il faut se mettre dans l'idée que c'est le C.I.D. qui commande le C.H.A.R. et pas l'inverse. On désire réaliser un C.I.D. d'une certaine dimension. On choisit alors une valeur du paramètre Y du C.I.D.. W est calculé à partir de la valeur de Y choisie. C'est l'étape numéro 3 page 163 du protocole à suivre. Ici, on désire réaliser le C.I.D. déjà vu. Pour lui, la valeur de Y est $Y = 15,00$ cm. Le calcul par la formule vue au paragraphe 5 donne alors : $W = 8,057$ cm.

On a le calcul suivant donnant les coordonnées du centre C_i :

$$\begin{cases} X = -\frac{8,057 \times \tan(+46:20) \tan(-20^\circ)}{\tan(+70^\circ) - \frac{\tan(+46:20)}{\cos(-20^\circ)}} = +1,867 \text{ cm} \\ Y = \frac{8,057 \times \tan(+46:20)}{\sin(+70^\circ) - \frac{\tan(+46:20) \cos(+70^\circ)}{\cos(-20^\circ)}} = +14,999 \text{ cm} \\ \begin{cases} q = \arctan(\cos(+70^\circ) \tan(-20^\circ)) = -7:096 \\ Z = \sqrt{X^2 + Y^2} = \sqrt{(-1,867)^2 + (+14,999)^2} = +15,115 \text{ cm} \end{cases} \end{cases}$$

Ces résultats permettent de positionner le centre C_i du C.I.D.. (Les valeurs sont données avec un nombre de décimales excessif pour la réalisation du cadran mais nécessaire pour la précision des calculs).

8.1.6 Calcul de la position des points horaires sur la ligne horizontale

Le dessin 14 page suivante du C.H.A.R. est réduit à la ligne de midi et à deux lignes horaires, une du matin et une du soir. La *ligne des points horaires* barre le cadran en biais du fait de la déclinaison gnomonique D (positive dans cet exemple). Elle est orientée *comme le cadran*. Cette orientation sera conservée sur le C.I.D.. Deux points horaires sont figurés notés I et I' .

8.1.6.1 Regardons du côté vespéral Deux expressions indépendantes peuvent être écrites, l'une à partir des triangles C_hFI et OFI , rectangles en F , l'autre d'après la ligne de midi :

$$\begin{aligned} IF &= OF \tan(90^\circ - D) = C_hF \tan H' \\ W &= C_hF + OF \end{aligned}$$

$$OF \left(\tan H' + \frac{1}{\tan D} \right) = W \tan H'$$

$$OF = \frac{W \tan H'}{\tan H' + \frac{1}{\tan D}}$$

Par ailleurs, dans le triangle rectangle OFI rectangle en F , on a :

$$OI = \frac{OF}{\sin D}$$

D'où :

$$OI = \frac{W \tan H'}{\sin D \left(\tan H' + \frac{1}{\tan D} \right)}$$

Il s'agit maintenant de faire apparaître l'angle horaire H par l'intermédiaire de la formule propre aux cadrans horizontaux :

$$\tan H' = \sin \varphi \tan H$$

En remplaçant dans l'expression de OI , on obtient :

$$OI = \frac{W \sin \varphi \tan H}{\sin D \left(\sin \varphi \tan H + \frac{1}{\tan D} \right)}$$

Après développement de $\tan D$ et simplification :

$$OI = \frac{W \sin \varphi \tan H}{\sin D \sin \varphi \tan H + \cos D}$$

8.1.6.2 Regardons maintenant côté matinal Les développements de $I'F'$ et de W seront :

$$I'F' = OF' \times \tan(90^\circ - D) = C_h F' \times \tan H'$$

$$C_h F' - OF' = W$$

Une transformation identique des formules conduit à :

$$OI' = \frac{W \sin \varphi \tan H}{-\sin D \sin \varphi \tan H + \cos D}$$

Les situations du matin et du soir conduisent à une formule unique dans la mesure où l'angle horaire H conserve son caractère algébrique :

- Matin : $H < 0$ et $\tan H < 0$
- Soir : $H > 0$ et $\tan H > 0$

abscisse x_I du point I de la trace horizontale orientée du P.I.D. au croisement de la ligne horaire correspondant à H :

$$x_I = OI = \frac{W \sin \varphi \tan H}{\sin D \sin \varphi \tan H + \cos D}$$

8.1.7 Équation cartésienne des lignes horaires

Chaque ligne horaire passe par deux points connus, le centre C_i et le point I de la ligne horizontale confondue avec l'axe des abscisses. Elle est donc bien déterminée.

Calcul du coefficient directeur ou pente noté p . La ligne horaire passe par les points dont les coordonnées sont : $C_i(X; Y)$ et $I(x_I; 0)$.

Par définition on a : $p = \frac{y_I - y_{C_i}}{x_I - x_{C_i}}$

$$\text{coefficient directeur : } p = \frac{0 - Y}{x_I - X}$$

L'équation est (avec b représentant l'ordonnée y pour $x = 0$ cm) :

$$y = px + b$$

Le centre C_i appartient à la ligne horaire. On a donc :

$$Y = pX + b$$

D'où :

$$b = Y - pX$$

L'équation $y = px + b$ de la ligne horaire devient :

$$y = px + Y - pX$$

Ou encore :

$$\text{équation de la ligne horaire : } y = p(x - X) + Y$$

8.2 Cas particulier du cadran vertical déclinant (C.V.D.)

Il suffit de donner à l'inclinaison i la valeur $+90^\circ$ dans les formules du C.I.D. pour avoir celles du C.V.D..

Examinons d'abord le paramètre W du C.H.A.R. :

$$W = Y \frac{\sin(+90^\circ) - \frac{\tan \varphi \cos(+90)}{\cos D}}{\tan \varphi}$$

$$W = \frac{Y}{\tan \varphi}$$

Voyons ensuite les coordonnées de C_i .

Le centre C_i peut être obtenu par : Les coordonnées cartésiennes dans le repère xOy :

$$\begin{cases} X = -\frac{W \tan \varphi \tan D}{\tan(+90^\circ) - \frac{\tan \varphi}{\cos D}} \\ Y = \frac{W \tan \varphi}{\sin(+90^\circ) - \frac{\tan \varphi \cos(+90^\circ)}{\cos D}} \end{cases} \quad (1)$$

Donnant :

$$\begin{cases} X = 0 \text{ cm} \\ Y = W \tan \varphi \end{cases}$$

Et les *coordonnées dites polaires* :

$$\begin{cases} q = \arctan (\cos(+90^\circ) \tan D) \\ Z = \sqrt{x^2 + Y^2} \end{cases}$$

Donnant :

$q = 0^\circ$, qui signifie que la ligne de midi est verticale dans un cadran vertical.

$Z = Y$ (qui n'apporte rien d'intéressant).

Position des points horaires sur la ligne horizontale formée par l'intersection du Plan Vertical Déclinant (P.V.D.) support du C.V.D. et du Plan Horizontal (P.H.) portant le C.H.A.R..

Matin : $H < 0$ et $\tan H < 0$;

Soir : $H > 0$ et $\tan H > 0$.

Abscisse x_I du point I de la trace horizontale orientée du P.V.D. au croisement de la ligne horaire correspondant à H :

$$x_I = OI = \frac{W \sin \varphi \tan H}{\sin D \sin \varphi \tan H + \cos D}$$

Il n'y aucune modification à apporter, cette formule étant indépendante de i .

En y réfléchissant, cela paraît logique. La trace du cadran déclinant étant portée sur le C.H.A.R., il n'importe pas que le cadran ainsi déclinant soit incliné ou non. Les points horaires sont issus du C.H.A.R. et ne dépendent que de lui.

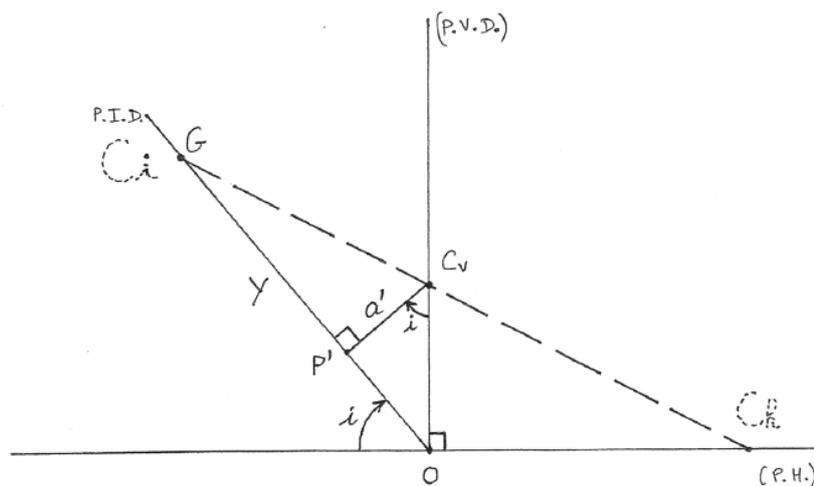


Figure 15 – Position du style.

Installation du style : Le dessin [15 page précédente](#) reprend le point de vue d'un œil situé sur la ligne portant l'axe Ox . Les points C_v , P' et O sont dans le plan du dessin. Le point C_v appartient au style.

Pour obtenir le point C_v , nous fixons une tige perpendiculairement au plan P.I.D. au point P' de la ligne de plus grande pente passant par O .

Le point P' est distant du point O d'une longueur :

$$OP' = OC_v \sin i$$

La longueur a' à donner à la tige est fournie par :

$$a' = OC_v \times \cos i$$

Par ailleurs, dans le triangle C_vOC_h rectangle en O , on a :

$$OC_v = OC_h \tan \varphi = W \varphi$$

En reportant cette expression dans les précédentes on obtient finalement :

$$OP' = W \tan \varphi \sin i$$

$$a' = W \tan \varphi \cos i$$

Et concrètement :

Le style est fixé entre C_i et C_v .

Il est possible de remplacer le style par une plaque perpendiculaire à la table dont l'arrête est située entre C_i et C_v . Elle peut être *plantée* perpendiculairement au P.I.D. entre C_i et P' . On déduit que :

P' est nécessairement le point où la sous-stylaire coupe l'axe Oy

Résultats pour un cadran vertical déclinant (C.V.D.) :

$$a' = W \tan \varphi \cos 90^\circ = 0 \text{ cm}$$

$$OP' = W \tan \varphi \sin 90^\circ = W \tan \varphi = OC_v$$

En conclusion :

Le point P' est confondu avec le point C_v .

On s'en serait douté!



Une table de 1737

par M. Ugon, P. Gagnaire & P. Labat

C'est au début de l'année 2017 que Pierre Labat réussit à joindre Michel Ugon dans sa retraite et à le convaincre d'étudier cette table de 1737 marquée LAVAL.

C'est avec l'aide remarquable et impromptue de Paul Gagnaire que nous pouvons donner enfin un résultat aujourd'hui. Malgré cette aide très importante et bienvenue, nous avons passé beaucoup de temps sur le cadran lunaire, qui comme on le verra, présente au moins trois erreurs sur lesquelles nous reviendrons.

1 Généralités sur cette table

Il s'agit d'une table horizontale octogonale en schiste de 59 cm de côté et pesant 18 kg datée 1737¹. Marquée sur la ligne de midi : LAVAL (latitude : 48° 4' N. ; longitude : -0.46 Est) et gravée en creux. Les lignes horaires sont chiffrées en caractères latins VII, XIII, IX, X, XI, XII, I, II, III, IV, V, dans la bordure pour les heures solaires du grand cadran et en chiffres arabes 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 1, 2, 3 dans l'entourage du petit cadran, le style polaire épais est déformé, mais il servira à déterminer la latitude du lieu.

Alors, question² : ne serait-ce pas un cadran du secteur de Laval/Argentré qui aurait été réalisé au temps des anciens propriétaires Famille BERSET. Un cadran riche d'informations existait au Château des Hauterives, et il a disparu il y a quelques dizaines d'années ? Le cadran¹ a été vendu en salle des ventes de Brest Adjug'art Maître Cosquéric Yves, rue Traverse à Brest le 26/07/2016 pour 1250 euros, hors frais de 22 % en plus.

Comme à notre habitude, nous subdiviserons les cadrans figurant sur cette table ainsi qu'il est montré sur le cliché reproduit sur la figure [1](#) page suivante.

2 M13 : la devise

Elle se lit sur la bordure sud¹ :

Cernis qua vivis ⊗ qua moriere latet

1. D'après Pierre Labat, *Cadran solaire 29 — Finistère*, Édition du 05/03/2017.

2. D'après Paul Gagnaire.

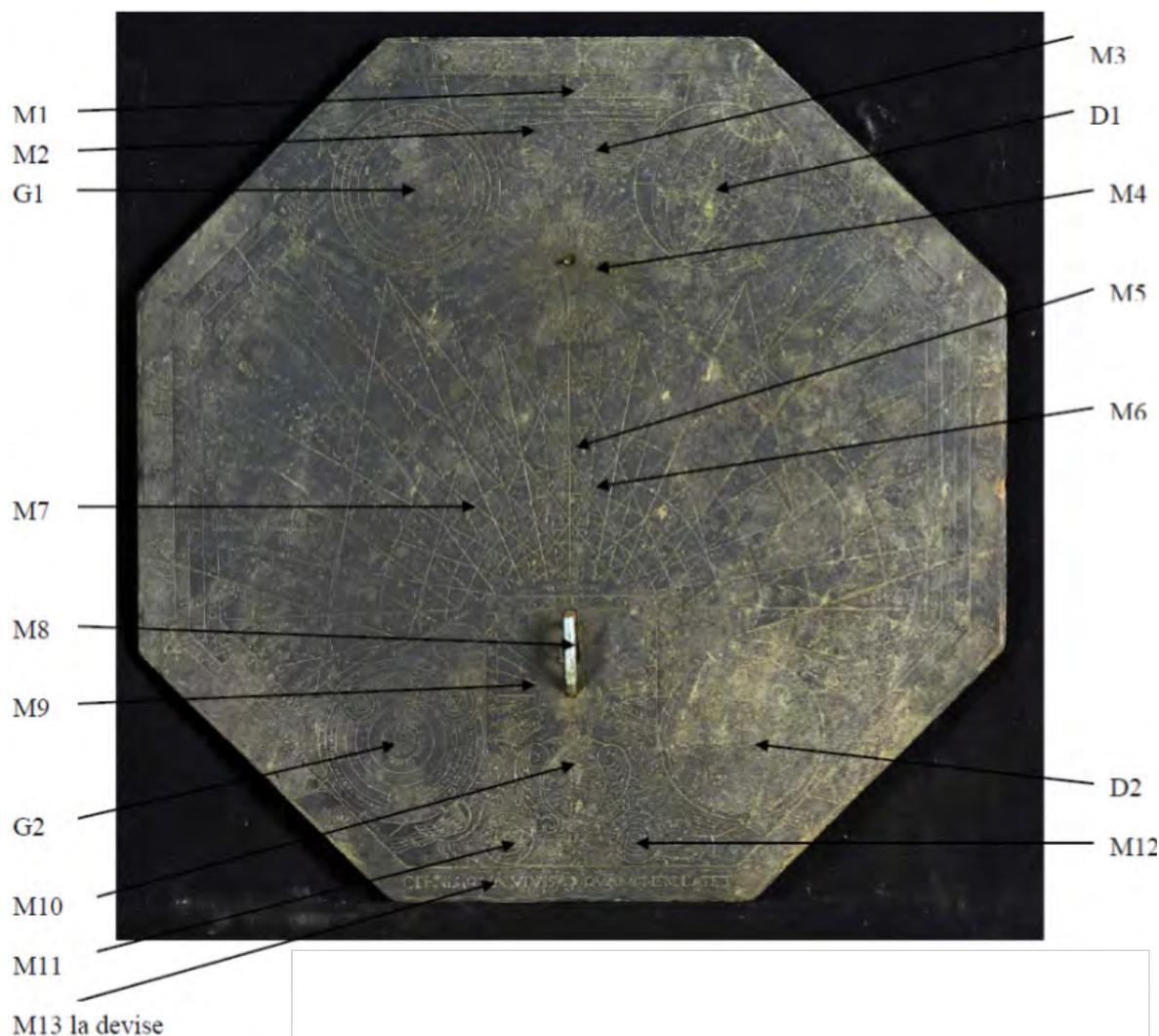


Figure 1 – La table de 1737 et repères de ses cadrans.

Ce qui peut se traduire par :

Tu connais l'heure que tu vis ⊗ tu ignores celle où tu mourras²

3 Inscriptions au dos du cadran

Cette table présente au dos les inscriptions suivantes¹ :

P : ANGELICUS RHEDONAEVS 1737 et 72 CAPV nv ... ER dos PRAEDITOR
 FE; AN;DO; 1737 AET : 72 RELIG 53 ...
 COTTEREAU APIO LIAVI...?? REPARAVIT 1803

Que l'on peut traduire par :

*Le Père Angelicus de Rennes, capucin... prédicateur, m'a fait en l'an du seigneur 1737 en la
 72^e année de son âge et la 53^e année de sa profession religieuse
 Cottereau l'a réparé en 1803¹*

Rhedonadeus = de Rennes. L'ancien nom de la ville de Rennes, est bien sûr, Condate, mais aussi Rhedones-um. Évidemment une fâcheuse malencontre aurait pu faire qu'il existât un individu du nom de Rhodanaeus, mais c'est assez peu probable.

Capu : de l'ordre des Frères Capucins¹.

Praeditor : supérieur ou prédicateur¹.

Nous retiendrons surtout que cette table a été réalisée en 1737 par ce père Capucin.

4 Inscription en M1

Cette inscription est assez difficile à lire, notamment parce qu'elle est rayée et à l'envers, elle apparaît sur la figure 2 ci-après ¹ :

*Si tu t'arrette icy confidere l'ouvrage
ne porte pas la main elle y ferait damage...
point de mains mais seulement des yeux
pour (aqir) (?) icy l'heure qui eft en divers lieux*

(?) ici *aqir* vraisemblablement pour acquérir.

Ce qui peut se traduire par² :

*Si tu t'arrête ici, respectes cet ouvrage. N'y portes pas la main, tu l'endommagerais, mais
seulement les yeux pour y prendre l'heure de maints endroits du monde*

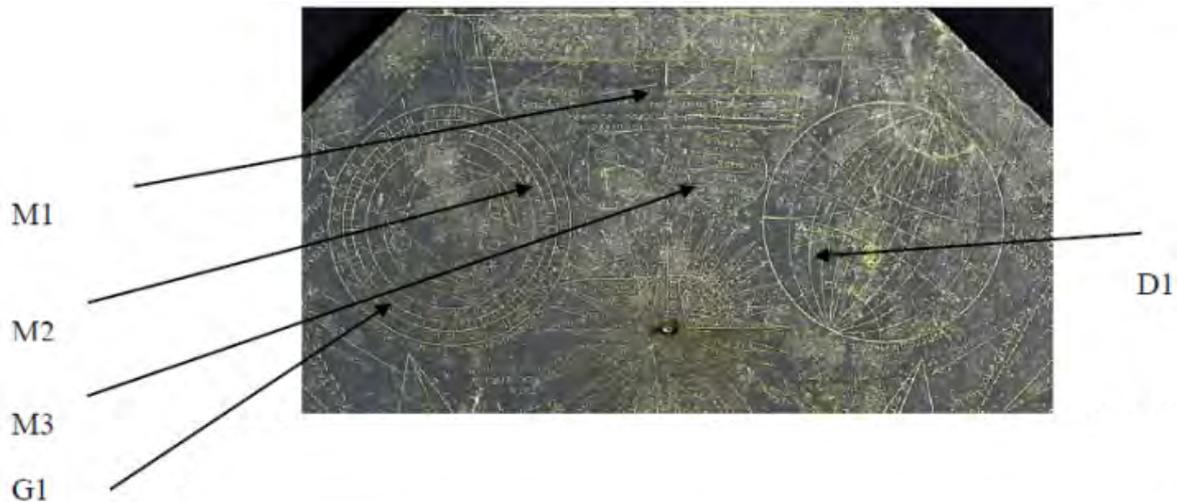


Figure 2 – Les cadrans proches du nord et l'inscription rayée M1.

5 Les cadrans M2 et M3

Sur le cadran M2 on peut déchiffrer différentes zones : (*nordique*), torride et (*tropicale*). On peut parler de climats. En 1737 on connaît pas mal de découpages non seulement météorologiques mais aussi fondés sur l'accroissement de la durée des jours solsticiaux, en général par pas de 1/2 heure.

Sur le cadran M3, il doit s'agir d'une carte avec une flèche orientée vers le Nord. Les motifs sont très difficiles à lire, mais on peut déchiffrer seulement : (*meridienne*) du monde.



Figure 3 – Les cadrans M2 et M3.

6 Le cadran lunaire G1

6.1 Le cadran

Ce cadran est nommé « Cadran lunère et pour les marées » entre 2 heures et 8 heures sur le côté. On est frappé par les figures géométriques qui se trouvent au centre et marquées sur les côtés par des petits dessins liés à leur forme, mais nous pensons en avoir l'explication. Ce diagramme central est maintes fois utilisé en astrologie pour définir ou mesurer (par les alidades) les aspects des planètes sur un horoscope : trigone (triangle équilatéral = 60°), puis la quadrature (un carré = 90°), et sextile (hexagone = 120°). L'expression usuelle est de dire que *les planètes A et B se regardent en quadrature* (par exemple). Le mot « aspect » est le latin de *aspectare* (regarder vers). Les figures sont identifiées par des miniatures de carrés, de triangles et d'hexagones.

Aux quatre angles du carré figurent des Lunes humanisées : PL, NL, PQ, DQ. Les images sont alignées sur 6 et 12 heures. Dans le triangle central on a pointé le centre de la figure et l'on l'a entouré d'un cercle décalé. C'est sans doute dû à la date de la lunaison au début de l'année marquée 13,1 que nous verrons plus loin (et qui est erronée).

On peut également y voir quatre couronnes, des graduations et des symboles. De la périphérie vers l'intérieur, on trouve :

6.1.1

Une première couronne de 28 cases d'à peine plus de 12° chacune, plus une case de 18° . Comme la circonférence complète ne peut pas mesurer seulement 354° , nous allons porter le contenu de chacune des 28 cases à $12:2$. Ainsi nous arriverons à $28^\circ \times 12,2 = 341:6$ et la 29^e case mesurera $18:4$. Nous ne pensons pas faire là une faute de jugement inacceptable. Les cases sont d'ailleurs numérotées de 1 à 29. Ce qui milite en faveur d'une division de la circonférence en 29,5 jours, soit la durée moyenne d'une lunaison à cette époque (voir plus loin l'erreur qui apparaît).

6.1.2

Une couronne intermédiaire de 24 heures (par jour) avec quatre divisions par heure et un tiret un peu plus long toutes les quatre cases, soit $96/4 = 24$ heures. Donc nous trouvons 96 divisions sur cette couronne.

6.1.3

Une autre couronne est subdivisée comme il se doit en deux fois douze heures, soit 24 heures par jour. Angélicus place les quatre phases remarquables de la Lune aux quatre angles du carré du diagramme central, ce qui donne les durées pour que la Lune passe d'une phase à la suivante (fractions de jour mesurées sur les graduations de la couronne intermédiaire).

6.1.4

La couronne intérieure contient les signes du zodiaque. Demeurent seuls identifiables : Verseau, Poissons, Bélier, Taureau et Gémeaux. Après ces descriptions, ce cadran présente d'emblée une première anomalie que nous vous laissons deviner (voir la figure 4).



Figure 4 – Le cadran lunaire G1.

6.1.4.1 La première anomalie concerne la valeur de la lunaison : ici 29,2 alors qu'il est connu depuis longtemps qu'elle est plutôt 29,53059 jours³, ce qui entraîne une erreur de 1,1321 % sur cette valeur. Vous allez nous dire que cette erreur est très faible, mais vous allez voir que ceci est néanmoins important pour la suite. En effet, ce cadran lunaire possède au moins trois erreurs.

6.1.4.2 La deuxième erreur est plus subtile : elle consiste à indiquer sur le dessin de la figure 5 page suivante une valeur angulaire de 18° pour la lunaison du début de l'année tandis que celle de Pleine lune (PL) de 14,6 tandis que 13,1 est observé pour le début de l'année

3. Ptolémée — *Almageste*.

soit une différence $14,6 - 13,1 = 1,5$ jours lunaires. Or si l'on prend une valeur de la lunaison de 30 jours, ce qui était plus habituel à cette époque au lieu de la valeur réelle de 29,53059 vue ci-dessus, on trouve un angle lunaire journalier de $\frac{360^\circ}{30} = 12^\circ$ par jour, soit 18° pour la différence ci-dessus. Voilà pour la deuxième erreur.

6.1.4.3 La troisième erreur encore plus délicate porte sur la valeur de Pleine Lune (PL), (16 janvier à 18 h 17 min UT⁴ soit 16,761805) nous lisons sur la figure plutôt la valeur de 14.65 qui donne 16,3732 en tenant compte de l'erreur de lunaison vue plus haut et du décalage de 13,1 observé au début de l'année comme nous l'avons vu. Ce décalage est de 1,55 fois.

Or en 1737 la valeur de PL devrait être 16.759675 jours en tenant compte de l'erreur de lunaison vue plus haut et du décalage de longitude de Laval de $-46'$. Il s'agit donc d'une troisième erreur de ce Capucin gnomoniste. Cette erreur qui est donc d'environ de 0,386475 jours correspond à plus de 9 heures ! Il faudrait que notre Capucin Angélicus revoie la valeur de la lunaison, ainsi que les éphémérides de la Pleine Lune l'année de la conception de cette table.

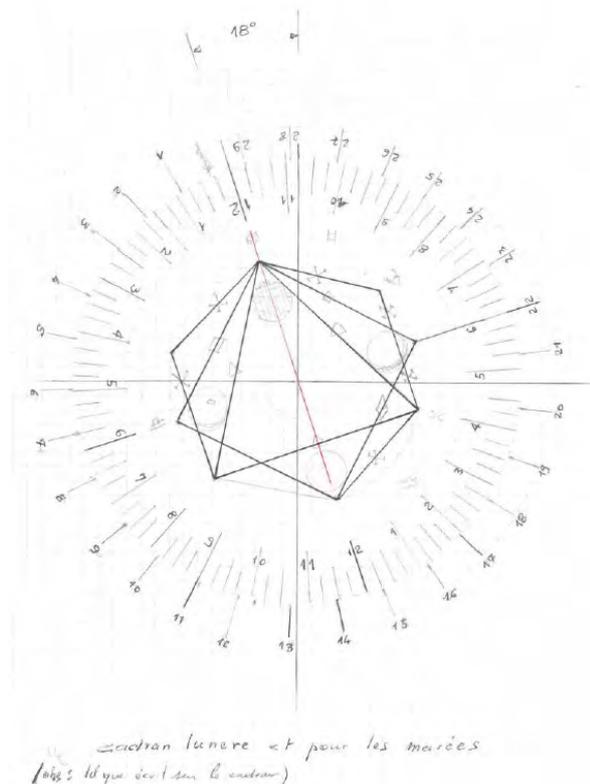


Figure 5 – Dessin du cadran lunaire G1¹.

6.2 Les marées

On avait remarqué depuis longtemps qu'elles étaient liées aux mouvements de la Lune et on s'était aperçu très tôt également⁵ que pour un point donné du littoral, la haute mer suivait

4. Ephémérides 1737.

5. D'après René Rohr — Les Cadrans Solaires — Oberlin, 1986.

avec une certaine régularité le passage au méridien de la Lune après un certain intervalle de temps dont la durée ne s'écartait que faiblement d'une valeur moyenne. Cette valeur moyenne s'appelle aujourd'hui *l'établissement du port*.

Pour se rappeler les valeurs des établissements du port des différents endroits qu'ils fréquentaient, les marins d'autrefois dessinaient un cadran de deux fois 12 heures et portaient alors les noms de ces endroits radialement en face des chiffres des heures qui correspondaient aux valeurs des établissements des ports respectifs. Donc en général on place plusieurs villes, chacune sur la ligne horaire qui indique l'établissement des ports. Sur cette table il nous semble qu'il n'y ait rien de ce genre et Laval n'a rien d'un port de mer. Alors on pourrait choisir le port de Brest, soit 3 h 46 min. Cette valeur représente le retard de la Pleine mer à Brest mais nous n'en avons aucune preuve.

7 Le cadran M4

C'est une rose des vents (voir figure 6).



Figure 6 – Le cadran M4.

Pour toutes les tables gnomoniques qui comportent ce genre de motifs, il faut consulter l'ouvrage d'Honorin Victoire sur les Vents de France (Éd. Lattès, 2001) qui recense 630 vents. Pour la Bretagne (île de Groix) on trouve, selon les 31 rhumbs :

Table 1
Les 31 rhumbs de l'Île de Groix.

Rhumbs	Île de Groix	Rod-en Aveliou
Nord	Nort	Sterenn Norzh
	Nort 1/4 Biz	Nortzh -1/4 Biz
	Biz-Nort	Biz-Norzh
	Biz-1/4 Nort	Biz-Uhel
	Biz	Biz
	Biz-1/4 Reter	Biz-Izel
	Reter-1/4 Biz	Reter-Uhel
Est	Reter	Reter
	Reter-1/4 Gevred	Reter-Izel
	Reter-Gevred	Reter-C'Hevred
	Gevred-1/4 Reter	evred-Uhel
	Gevred	Gevred
	Gevred-1/4 Su	Gevred-Izel
	Su- Gevred	Su-C' Hevred ou MerGevred
Sud	Su-1/4 Gevred	Su-Kard- Gevred
	Su	Su
	Su-1/4 Méruéant	Su-Kard-Mervent
	Su-Verdéant	Su-Vervent
	Méruéant-1/4 Su	Mérvant-Izel
	Méruéant	Mervent
	Méruéant-1/4 Konorg	Mervent-Uhel
Ouest	Konorg-Izel	Mervent-Gornaoueg
	Konorg-1/4 Méruéant	Konaoueg-Izel
	Konorg	Kornaoueg
	Konorg-1/4 Goulern	Kornaoueg-Uhel
	Konorg-Votant	Gwalarn-Gornaoueg
	Goulern-1/4 Kernog	Gwalarn-Izel
	Goulern	Gwalarn
	Goulern-1/4 Nort	Gwalarn-Uhel
	oulern-Steren	Gwalarn-Sterenn
	Nort-1/4 Goulern	Norzh-Kard- Gwalarn

Mais tout n'est pas dit aussi simplement. Par exemple, vous avez toutes sortes de Biz : Le Biz de Groix, la Biz de Plestin, la Biz Nort, la Biz Norzh, etc.

Sur la table elle-même, nous lisons difficilement : greco, greco- ??? nante, libeccio, greco-levante, ponente-libeccio ... donc rien de breton. Nous arrivons à lire seulement : « ponente » à l'Ouest.

8 Le cadran central M5

Voir sur la figure 7 la longitude des lieux indiqués :



Figure 7 – Le cadran central M5.

Nous pouvons calculer les lignes horaires du cadran central, notamment pour déterminer les heures de midi pour lequel il a été conçu ;

Table 2
Angles horaires du cadran central M5.

Heure	Lieu marqué sur la table	Longitude ¹	Angle horaire ¹	Angle horaire calculé
6 h	Q ()	?	?	?
6 h 30	KIRMAN (Iran)	57° 5' Est	10,04	10,06
7 h	ORMVS (Iran)	56° 28' Est	19,81	19,808
7 h 30	ISPAHAN (Iran)	51° 41' Est	29,11	29,109
8 h	MOCNA (Yemen)	43° 14' 50''	38,81	37,815
8 h 30	JERUSALEM (Israel)	35° 13' Est	45,99	45,99
9 h	MOSCOV (Russie)	37° 36' 56''	53,35	53,354
9 h 30	CONSTANTINOPLE (Turquie)	28° 58' Est	60,28	60,281
10 h	BELGRADE	20° 28' 5''	66,76	66,756
10 h 30	VARSOVIE (Pologne)	21° 1' Est	72,87	72,874
11 h	ROME (Italie)	12° 50' Est	78,73	78,727

Suite page suivante

Suite de la table 2

Heure	Lieu marqué sur la table	Longitude ¹	Angle horaire ¹	Angle horaire calculé
11 h 30	ALGER (Algerie)	3° 2' Est	84,41	84,406
12 h	LAVAL (France)	-0° 46' Ouest	90	90,00
12 h 30	LISBONNE (Portugal)	-9° 48' Ouest	84,41	84,406
13 h	ISLE CANARIES	-16° 44' Ouest	78,73	78,727
13 h 30	?		72,87	72,784
14 h	?LINDE	-34° 50' Ouest	66,76	66,756
14 h 30	RIO DE GENERIO (Brésil)	-43° 17' Ouest	60,28	60,281
15 h	TERRE NEVVE (Terre Neuve)	-59° 39' Ouest	53,35	53,354
15 h 30	GRONELADE (Voir si pas la Grenade)		45,89	45,887
16 h	LA MARTINIQUE (Les Antilles)	-59° 39' Ouest	37,81	37,815
16 h 30	?	29,11	29,109	
17 h	LIMA (Pérou)	-77° 1' Ouest	19,81	19,808
17 h 30			10,04	10,046
18 h			0	0
18 h 30				10,036
19 h				19,808

On peut déduire de ces calculs faits à partir des coordonnées GPS d'aujourd'hui que le lieu de cette table est bien LAVAL (Latitude : 48° 4' ; Longitude : -0° 46').

Les portions de cercles indiquent des hauteurs ou almicantrats de 5° en 5°. Par contre pas d'autre trace de l'équinoxiale qu'une indication, ce qui fait douter de notre gnomoniste (*cf.* figure 8 page suivante).

Pour les lieux de midi, c'est plus délicat car les longitudes des lieux était approximatives. Nous donnons ci-après un tableau pour ceux dont les noms peuvent poser quelque petit problème :

Table 3
Nom orthographique des lieux.

Lieu	Orthographe actuel
KIRMAN	Kerman
ORMVS	Détroit d'Ormou
ISPAHAM	Ispahan
MOCNA	Mocha (Yemen)
MOSCOV	Moscou
ISLE CANARIES	Ténériffe
?LINDE (Brésil)	Olinda
RIO DE GENERIO	Rio de Janeiro
TERRE NEVVE	Terre Neuve et Labrador (Canada)

Suite page suivante

Suite de la table 3

Lieu	Orthographe actuel
GRONELADE	Groenland

La figure 8 montre les courbes de dates (Solstice d’hiver, équatoriale et Solstice d’été). Ces courbes sont assez difficiles à voir mais elles apparaissent mieux en couleur. Elles ont été trouvées par Paul Gagnaire.

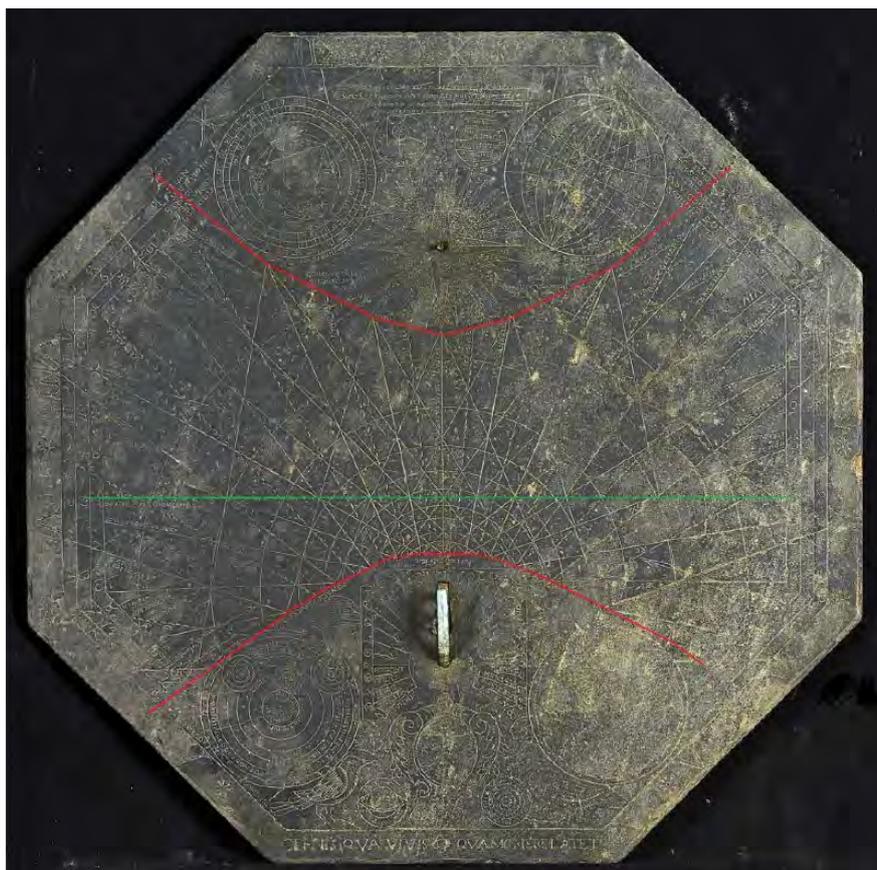


Figure 8 – Les courbes de dates.

9 Les cadrans M6 et M7

Ces deux cadrans sont des *Babylonique* (M6) et *Italique* (M7) ainsi qu’il est indiqué sur la gravure. (voir figure 6 — gravure en face de Kirman pour M6 : *Heures Babiloniennes*). Il est possible, en effet, d’indiquer depuis combien d’heures le Soleil s’est levé (M6) et combien d’heures se sont écoulées depuis le précédent coucher du Soleil (M7). Les lignes italiques et babyloniennes se coupent sur une ligne d’heure ou sur une ligne de demie. De plus, sur l’équatoriale, les intersections comportent quatre lignes : l’équatoriale, une ligne d’heure, une babylonique et une italique.

Pour un cadran horizontal, comme c'est le cas ici, le plus simple consiste à calculer directement les coordonnées rectangulaires de l'intersection d'une ligne avec les deux arcs solsticiaux, voire en ajoutant un troisième point sur la ligne équinoxiale⁶ c'est le cas pour LAVAL (cf. figure 8 page précédente). Les annexes démontrent les caractéristiques de ces cadrans qui sont effectivement calculées pour ce lieu.

10 Le style M8

Le style se mesure par sa base qui est un octogone de 590 mm de côté. On mesure sur la base $(14/132) \times 590 = 62,575$ mm. Donc le style droit a a pour hauteur $62,575 \times \tan \varphi$. Comme $\tan \varphi = 1,113$ car ($\varphi = 48,066$) il vient $a = 69,645$. Soit environ 70 mm.

11 Le petit cadran central M9¹

Ce cadran est la suite du cadran central M5. Nous pouvons voir qu'il est parfaitement compatible avec ce dernier entre 4 h et 6 h puis entre 18 h et 20 h .

Table 4
Petit cadran central M9.

Heure	Lieu de la table	Pays	Nom actuel	Latitude	Longitude
4 h	SIMMATRA	Nouvelle Galles du Sud	Sumatra	0° 25' 32"	102°
4,5 h	PONTICHERY	Inde	Pondicheri	11° 54' 53"	79° 43' 53"
5 h	DELLI	Inde	Delli-Bebu-Nagar	12° 56' 17"	80° 11' 44"
5,5 h	SURAT	Inde	Surate	21° 10' 18"	72° 49' 50"
6 h	BADE'CH(ou BALECH	Inde (Radjastan)	Badechi	24° 30' 49"	72° 27' 49"
18 h	?				
18,5 h	FLORIDE	USA	Floride	27° 46' 19"	81° 34' 54"
19 h	MEXIQVE	Mexique	Mexique		
19,5 h	NOLEBISCAI	Noele Bicao			
20 h	Ste ROY	USA	Santa-Fe	46° 47' 4"	-71° 17' 15"

12 Le motif M10

Il s'agit d'un emblème probablement héraldique dont la figure apparaît ci-dessous (figure 9 page ci-contre) :

Comme le frère Angelicus était capucin (donc franciscain), Paul a eu la curiosité d'aller voir chez Ménestrier ce qu'il dit des armes de cet ordre religieux tiré de : *les recherches du blason*, Paris, MDCXXIII, pages 181-182 et planche 194.

l'ordre de S. François a diverses armoiries : les plus ordinaires font une Croix de Calvaire, traversée de deux bras en fautoir... Cette interprétation donne la figure 10 page suivante ci-après :

Il faut aussi signaler la présence de 2 oiseaux avec un fruit dans le bec.

6. D'après Denis Savoie : *La Gnomonique*, 2007.



Figure 9 – Les motifs M10, M11 et M12.



Figure 10 – Interprétation possible de M10.

13 Le motif G2

Il s'agit ici de repérer la position des planètes du système solaire (cf. figure 11).



Figure 11 – Le motif G2.



Figure 12 – Dessin de la position des planètes.

Donnons d'abord le dessin des orbites de la figure 12 : Ce qui est le plus intéressant est que l'on est en présence d'un système héliocentrique où l'on distingue les différentes orbites sur des cercles concentriques s'éloignant du Soleil : *Orbe de Mercure, Orbe de Venus, Orbe de*

la Terre, Orbe de la Lune, Orbe de Mars, Orbe de Jupiter, Orbe de Saturne et ses satellites, puis Firmament immobile.

Dans les cercles fourmillent des quantités d'informations du genre *91 Foy plus grand que la Terre* mais nous vous laissons découvrir les autres, notamment les signes du zodiaque sur la dernière couronne.

14 Inscriptions religieuses

Table 5
Inscriptions religieuses sur la table de 1737.

Lieu sur la table	Notes gravées sur la table du cadran	Commentaires
6 h 30	St Jac s'phi A 25 St Marc St urne fen ?????	St Jacques et St Philippe 25/04 -évangéliste
7 h 00	25 annonce de la Vierge (Marie) St Joseph	C'est le 25 mars C'est le 19 mars
7 h 30	St Tho d'aq	st Thomas d'Aquin, théologien – Italie- 1228//1274, le 7/03) ordre des dominicains
8 h 00	St Mathias	24/02 Apôtre qui a remplacé Judas – acte des apôtres chapitre 1 verset 23-26
8 h 30	Purifi on de la vierge Paul Juli CON..... ? PA	Le 2/02 soit 40 jours après la date de naissance du Christ, le 25/12, et présentation de Jésus au temple ^(*)
9 h 00	Les Roy .. ?	
9 h 30	Circoncision chir	Circoncision du Christ : Normalement 8 jours après la naissance
10 h 30		
14 h 30	Immaculée conception de la Ste Vierge	Le 8/12
15 h 00	St ..arnu.. ???	
15 h 30	St Luc eutre ?? (18)	Apôtre, évangéliste
16 h 00	ST Francois d'A Ange gardiens 2	Sans doute d'Assises 4/10 créateur de Franciscains Fête le 2 octobre

(*) La Purification de la Vierge Marie eut lieu quarante jours après la Nativité du Seigneur. Cette fête a été nommée ordinairement de trois manières, la Purification, Hypopante ou rencontre, et la Chandeleur. On la nomme Purification parce que, quarante jours après la naissance du Seigneur, la Vierge vint au Temple se purifier, selon la coutume introduite par la loi, quoique cette loi ne l'obligeât point. En effet au Lévitique (XII), la loi ordonnait que la femme qui, ayant usé du mariage, enfanterait un fils, serait impure pendant sept jours, impure au point de s'abstenir de toute espèce de commerce avec les hommes, et de l'entrée du temple.

Mais après les sept jours ; elle redevenait pure ; de sorte qu'elle pouvait se trouver avec les hommes mais elle avait encore trente trois jours à attendre avant de pouvoir entrer dans le temple à raison de

son impureté. Enfin après quarante jours, elle entra dans le temple et offrit son enfant avec des présents. Si elle avait enfanté une fille, les jours étaient doublés pour ses rapports avec les hommes et pour l'entrée du temple.

Article : abbaye saint Benoît.

15 Conclusion

Nous sommes bien conscients que l'analyse de cette table de 1737 n'est pas terminée notamment sur D1, D2, M2, M11 et M12. Nous en laissons le soin au lecteur, néanmoins, malgré beaucoup de temps passé sur les anomalies du cadran lunaire. Nous pensons avoir traduit ici la pensée de ce moine capucin du 18^e siècle qui a commis des erreurs sur ce cadran.

À ce jour, au moins 14 personnes ont participé à l'analyse de cette table.

Plus de 100 échanges de courriels entre les intervenants, et le mot "fin" n'est pas encore écrit.

Ceci pour montrer que ce travail de synthèse est un collectif, et merci à tous les intervenants qui sont de la Commission des Cadran Solaires et d'ailleurs.

N'hésitez pas à compléter cette analyse de vos commentaires et observations, ce sera avec plaisir qu'elles seront intégrées.

16 Annexes

16.1 Cadran horizontal — Coordonnées cartésiennes

La figure ci-dessous va servir aux démonstrations qui vont suivre. P étant le pôle Nord, Z le zénith et A la position du Soleil et O le pied du style droit et l'origine des axes, x vers l'Est et y vers le Nord (sur la ligne de Midi). Dans le triangle sphérique PZA , $PZA = H$, l'arc $PZ = \pi/2 - \varphi$, l'arc $PA = \pi/2 - \delta$, et S l'angle horaire de la sous-style.

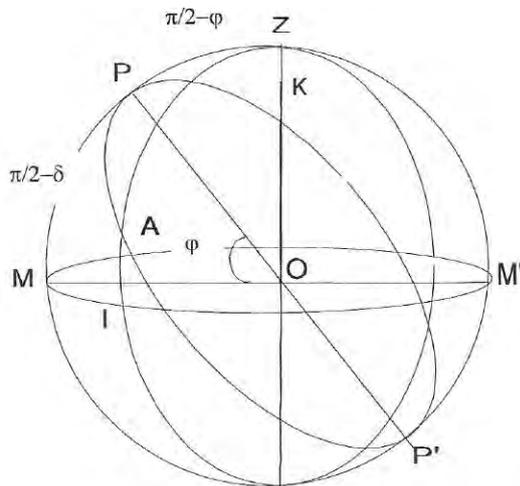


Figure 13 – Sphère céleste.

Si on considère donc l'origine au pied du style droit OK , on peut appliquer les relations de Gauss [Carl Friedrich Gauss (1777- 1855), « le prince des Mathématiques ».] dans le triangle sphérique PKA ou PZA (car ici K qui est le sommet du style droit se trouve confondu avec Z). On a $\cos AK = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos(H - S) = [\sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos(H - S)] \cos \delta$. Comme $\cos \varphi \cos \delta \cos(H - S) = \cos H \cos \varphi$.

(Car $S = 0$ sur cette table horizontale).

On a $\cos AK = Q \cos \delta$.

En posant $Q = \sin \varphi \tan \delta + \cos \varphi \cos H$.

Comme $x = \frac{a \sin H \cos \varphi}{\cos AK}$, il vient : $x = a \frac{\sin H}{Q} = a \frac{\sin H}{\sin \varphi \tan \delta + \cos \varphi \cos H}$

Toujours dans le même triangle sphérique nous obtenons en appliquant les relations de

Gauss : $y = a \frac{N_y}{Q}$ avec $N_y = \sin \varphi \cos H - \cos \varphi \tan \delta$.

Donc

$$y = a \frac{\sin \varphi \cos H - \cos \varphi \tan \delta}{\cos \varphi \cos H + \sin \varphi \tan \delta}$$

Les ordonnées respectives de l'équatoriale ($\delta = 0$) et du centre du cadran sont : $y_e = a \tan \varphi$

et $y_c = -\frac{a}{\tan \varphi}$.

16.2 Lignes babyloniennes et Italiques

Relation fondamentale de la ligne babylonienne B_{12} .

D'après ce qui précède, les lignes Babyloniennes B et Italiques I sont symétriques par rapport à la ligne de midi, car $H_i = B_i - H_0 = I_i + H_0$, avec $\cos H_0 = -\tan \varphi \tan \delta$, qui correspond à l'angle horaire du Soleil au lever et au coucher.

Les lignes Italiques et Babyloniennes⁷ se coupent sur une ligne d'heure ou de 1/2 heure. Par exemple la ligne B5 coupe I19 sur la ligne horaire XII; B6 coupe I₂₁ sur la ligne XIII^{1/2}; etc.

De plus sur l'équatoriale, les intersections comportent quatre lignes : l'équatoriale, une ligne d'heure, une Babylonienne et une Italique.

Pour la ligne Babylonienne B_{12} , on a $B_{12} = 12 \times 15^\circ = \pi$.

Donc :

$$H_{12} = \pi - \arccos(-\tan \varphi \tan \delta)$$

car

$$\cos H_i = \cos(B_i - H_0) = \tan \varphi \arctan \delta = -\cos H_0$$

Puis :

$$y = a \frac{\sin \varphi \tan \varphi \tan \delta - \cos \varphi \tan \delta}{\cos \varphi \tan \varphi \tan \delta + \sin \varphi \tan \delta} = a \frac{\tan \delta (\sin^2 \varphi - 1)}{2 \tan \varphi \tan \delta} = \frac{a}{2 \left(\tan \varphi - \frac{1}{\tan \varphi} \right)}$$

Et la ligne Babylonienne 12 est parallèle à la ligne équinoxiale (puisque y ne dépend pas de δ) et située à équidistance de celle-ci et du centre du cadran. Elle possède une ordonnée y telle que :

$$\tan \varphi - \frac{1}{\tan \varphi} = 2y$$

D'où

$$\tan \varphi + \frac{1}{\tan \varphi} = 2 \frac{\tan \varphi \cos H - \tan \delta}{\cos H + \tan \varphi \tan \delta}$$

Soit

$$\left(\tan \varphi + \frac{1}{\tan \varphi} \right) (\cos H + \tan \varphi \tan \delta) = 2 (\tan \varphi \cos H - \tan \delta)$$

7. D'après Denis Savoie, « La Gnomonique », 2007.

Ce qui donne

$$\cos H_{12} = \tan \delta \left(\frac{\tan^2 \varphi - 1}{\tan \varphi - \frac{1}{\tan \varphi}} \right) = \tan \delta \tan \varphi = -\cos H_0$$

Car $\cos(B_{12} - H_0) = \cos H_0 = -\tan \varphi \tan \delta$. Nous retrouvons le résultat précédent.

Soit en appliquant pour $\varphi = 49^\circ$ et $\delta = 23^\circ 44'$, on trouve $\cos H_{12} = 0,4987626$.

Avec $H_{12} = 60^\circ 08' 18,83''$ et $B_{12} = 180^\circ = \pi$ radians et $H_0 = 119^\circ 9' 18,17''$.



INFORMATIONS DIVERSES

Décès de monsieur Jean Kovalevsky



Le 21 août dernier nous apprenions avec grande émotion le décès de notre premier président par un courriel de Denis Savoie :

« C'est avec une grande tristesse que nous avons appris le décès de Jean Kovalevsky survenu dans la nuit de vendredi à samedi 17-18 août à l'hôpital de Grasse.

Jean Kovalevsky avait 89 ans. Il était astronome émérite de l'Observatoire de la Côte d'Azur, et avait mené une part importante de sa carrière à l'Observatoire de Paris, depuis les années 50 jusqu'au milieu des années 80. Il était membre du Bureau des Longitudes depuis 1968 et de l'Académie des Sciences depuis 1988. Parmi ses nombreuses responsabilités, on peut citer celles de Directeur du Centre d'études et de recherches géodynamiques et astronomiques (CERGA, 1974-1982, puis 1988-1992), Président du Bureau national de métrologie (1995-2004), Président du Comité international des poids et mesures (1997-2004), Président de la Société astronomique de France (1970-1973) et premier président de la Commission des cadrans solaires créée en 1972.

C'était un spécialiste mondialement reconnu de mécanique céleste et d'astrométrie. Toute sa carrière a été marquée par le développement et l'usage de techniques de pointe à tous moments, en commençant par le calcul numérique sur ordinateur pour la mécanique céleste avant 1960, la création du Service de Calcul et de Mécanique Céleste du Bureau des Longitudes, puis l'introduction des méthodes lasers et interférométrie au Plateau de Calern avec la création du CERGA en 1974 dont il fut le premier directeur, suivi par son rôle de tout premier plan dans la conception et la sélection de la mission Hipparcos et la direction du Consortium FAST jusqu'à la fin de la mission en 1996.

Il suivait Gaia de très près et en était un fervent admirateur et promoteur. Il avait participé au premier symposium scientifique Gaia à Nice en avril 2017.

Le service funèbre aura lieu mercredi 22 août à la Chapelle St Roch (église orthodoxe) à Antibes à 14 h 30 ».

D. Savoie

Monsieur J. Kovalevsky a été président de la Commission des Cadrans Solaires de 1972 à 1975. C'est par sa notoriété mondialement reconnue, que notre commission, a pu dès sa mise

en place être considérée comme un groupe scientifique à prendre en considération. Fort de ce lancement, J. Kovalevsky confia la présidence à Robert Sagot expert en gnomonique.

Ci-dessous extrait du compte-rendu de la réunion de la CCS en date du 29 Mai 1976.

COMMISSION DES CADRANS SOLAIRES

par **Robert SAGOT**

Président de la Commission

La quatrième réunion de la Commission s'est tenue à Meudon, le samedi 29 mai 1976, de 16 h 50 à 18 heures, en présence d'une soixantaine de participants.

Comme le laissait prévoir la lettre de M. Jean KOVALEVSKY, lue lors de notre précédente séance, notre président a demandé à être libéré des responsabilités qu'il assumait depuis 1972. Le Conseil de la Société, accédant à cette demande, a désigné comme nouveau président M. Robert SAGOT, secrétaire. Celui-ci rend un juste hommage à M. KOVALEVSKY qui, en apportant dès le début l'appui de son autorité et de sa compétence à la nouvelle Commission, a largement facilité son démarrage.

Compte rendu d'activité

Quelle a été la vie de la Commission depuis un an ? Quelques chiffres vont permettre de répondre à cette question. Le nombre des membres et correspondants est passé de 80 à 90, ce qui correspond à une augmentation d'un peu plus de 10 %. Il est hors de doute que notre effectif doit pouvoir encore progresser, si l'on en juge par le nombre de personnes étrangères à la Commission qui se déplacent, téléphonent ou écrivent pour obtenir des renseignements sur la gnomonique. L'importance du public assistant à la conférence du 18 février 1976, exclusivement consacrée aux cadrans solaires, témoigne également de l'attrait qu'ils présentent pour beaucoup d'amateurs.

En dehors du travail de routine consistant à répondre aux multiples demandes de conseils qui lui ont été adressées, l'activité du secrétariat a été surtout consacrée au projet de répertoire des cadrans français, dont il sera parlé plus loin.

Manfred BOUSSONVILLE



Notre collègue Serge Grégori aimait échanger sur la gnomonique et chasser le cadran solaire avec Manfred. Né en 1934, en Sarre, l'université était alors sous administration française d'où sa connaissance de notre langue. Directeur du lycée de Blieskastel, la famille Boussonville a vécu cinquante ans dans cette ville près de Homburg. Passionné de la montagne, de la photographie, de musique et bien sûr de cadrans, Manfred a souhaité honorer notre Commission de sa collection de livres et de quelques photos. Après son décès en décembre 2017, son épouse et sa fille ont donc remis par l'intermédiaire de Serge, une collection d'ouvrages et d'images encadrées :

- La liste des 64 livres français et allemands, est donnée en annexe. Elle sera reprise dans notre bibliographie gnomonique.
- Les tableaux concernent :

- cadran à ROCCAIONE (30x45);
- cadran à ROCCAIONE (28x35);
- cadran à BRA (28x35);
- cadran allemand (28x35);
- cadran allemand (20x30).



Figure 1 – Reportage photo.

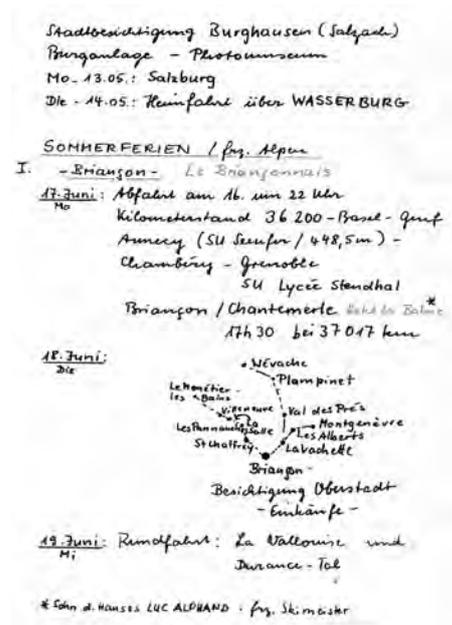


Figure 2 – Son Carnet de chasse.

À noter que M. Boussonville a écrit un article dans notre premier numéro de Cadran Info de février 2000 : *Calcul de l'inclinaison, de la déclinaison et de la latitude du lieu d'un cadran déterminées par les angles des lignes horaires pour temps solaire vrai.*

Dans la version numérique, vous trouverez en annexe :

- le fichier : Livres Manfred Boussonville.ods.

1 Dernières réalisations ou découvertes

— Au château Thurant

Maurice Kieffer a découvert par hasard au château Thurant à Alken en Allemagne un cadran solaire.

Ce magnifique cadran solaire de type « multiple », est en forme d'étoile à 12 branches. Il date de 1725. Celui d'Annecy du frère Arsène a 7 branches et date de 1874. Jusqu'à présent, il n'a pas été trouvé d'information sur Google ou sur les sites consultés par Jean-Claude Berçu :

- <http://www.sonnenuhren-lindner.de/sundials.html>
- <http://www.infraroth.de/slinks.html>



Figure 3 – Chateau Thurant (Alken, Allemagne).



Figure 4 – Localisation.

- <http://www.ta-dip.de/sonnenuhren/sonnenuhren-aus-nah-und-fern/sonnenuhren-in-t-h-ue-r-i-n-g-e-n/sonnenuhren-in-gorsleben.html>



Figure 5 – Cadran solaire de type « multiple ».



(a)



(b)



(c)

Figure 6

— Sur l'église de Saint-Point-Lac (25)

Un cadran découvert par Joseph Theubet dans le Doubs.



Figure 7 – Église de Saint-Point-Lac (Doubs).



Figure 8 – Cadran solaire.

— Cadran de Joseph Auvray — Atelier Acacia

Ce cadran en lave émaillée a été mis en place le 5 mai 2018 à Saint-Crépin.



Figure 9 – Atelier Acacia — Cadran de Joseph Auvray.

Commentaires et explications. Le repère de lecture des heures comme des courbes, est constitué par une tache lumineuse issue de l'ocillon du style métallique (en laiton) en haut à droite du cadran.

Le cadran donne l'heure solaire vraie, c'est-à-dire l'heure locale de Saint-Crépin. Cette heure locale est marquée par les chiffres romains depuis 1 h PM jusqu'au coucher du Soleil.

Compte tenu de l'orientation très déclinante de la façade, le grand espace entre 1 h et 2 h (donc le déplacement assez rapide de la tache lumineuse) a permis de tracer les quarts d'heure pour affiner la lecture. Par ailleurs, indépendamment du profil d'horizon de la montagne qui cache le soleil en fin de journée, la ligne marquée « horizon » (en haut à droite) donne l'heure solaire du coucher du Soleil pour un horizon théorique (donc sans montagne).

Pour connaître l'heure légale à partir de l'heure solaire, il faut ajouter la correction consignée dans le tableau de la plaque explicative et reproduite ci-dessous (*cf.* fig. XX). On peut également connaître cette correction grâce à la courbe fournie après le tableau.

La courbe en 8 qu'on appelle aussi analemma, marque 14 h légales en heures d'hiver et 15 h légales en heure d'été. À cette heure légale, la tache lumineuse est exactement bissectée par la portion de courbe correspondant à la date. Les flèches indiquent cette portion de courbe. Par exemple le 20 mars à 14 heures légales, la tache de lumière sera sur l'intersection de la courbe en 8 et de l'équinoxiale proche de l'indication « printemps » en rouge. La couleur rouge désigne tout ce qui a trait à la courbe en 8.

Une anecdote : le jour de la pose du cadran, le 5 mai à 15 h légale, la tache lumineuse doit se trouver à la fois sur la courbe rouge et sur la ligne 13 h 30 mn en heure solaire. Pourquoi ? Parce qu'il y a 1 h 30 d'écart entre l'heure solaire et l'heure légale quasiment le 4 et le 23 mai ; ce qui est bien visible sur la courbe présentée plus bas.

On peut lire également les dates des solstices et des équinoxes grâce aux courbes (solstices) et à la droite (équinoxiale) marquées par les signes cardinaux du zodiaque (les signes cardinaux inaugurent une saison).

En haut le Soleil entre dans le signe du capricorne et suit la courbe du solstice d'hiver le 21 décembre.

Compte tenu du profil montagneux, cette courbe ne verra pas la tache lumineuse, le soleil étant trop bas sur l'horizon à cette époque.

L'équinoxiale sera suivie par la tache de lumière (image du Soleil) les 20 mars, équinoxe de printemps, quand le Soleil entre dans le signe du Bélier et 23 septembre, équinoxe d'automne, quand le Soleil entre dans le signe de la Balance.

Sur le côté droit, le Soleil entre dans le signe du Cancer et suit la courbe du solstice d'été le 21 juin.

Une curiosité : la longueur du jour peut être déduite de la lecture du cadran solaire, qu'il y ait ou non du Soleil. Il suffit de relever l'heure du coucher du Soleil suivant la date et de multiplier par deux pour connaître la durée du jour tout au long de l'année, puisque l'heure solaire est comptée à partir du méridien, plan qui matérialise le milieu de la course du Soleil entre son lever et son coucher.

Le 21 décembre, jour inaugurant l'hiver, la courbe correspondant à cette date intercepte la ligne d'horizon à 4 h 20 min solaire. La durée du jour, le plus court de l'année, sera $4\text{ h }20\text{ min} \times 2 = 8\text{ h }40\text{ min}$.

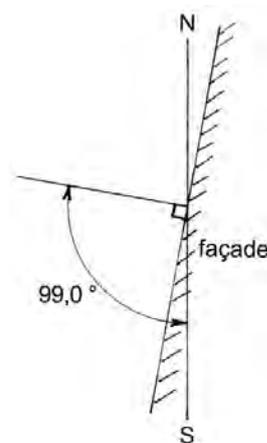
Les jours d'équinoxe, le 20 mars pour le printemps et le 23 septembre pour l'automne, la durée du jour égale celle de la nuit. Elle est donc de h. Il est facile de vérifier que l'équinoxiale coupe bien l'horizon sur la ligne de 6 h.

Le 21 juin, jour le plus long de l'année, quand le Soleil entre dans le signe du Cancer, le Soleil se couche quand la tache lumineuse atteint la ligne d'horizon. C'est-à-dire à 7 h 40 min solaire.

La durée de ce jour le plus long sera : $7\text{ h }40\text{ min} \times 2 = 15\text{ h }20\text{ min}$ (durée qui d'ailleurs, égale la durée de la nuit la plus longue du solstice d'hiver).

Caractéristiques techniques du cadran solaire

- Latitude : $44^{\circ} 42' 17''$ N.
- Longitude : $6^{\circ} 35' 25''$ E. (ou $-26\text{ min } 22\text{ s}$).
- Déclinaison de la façade : $99^{\circ}0$ Ouest.
- Inclinaison : 0° (la façade est verticale).

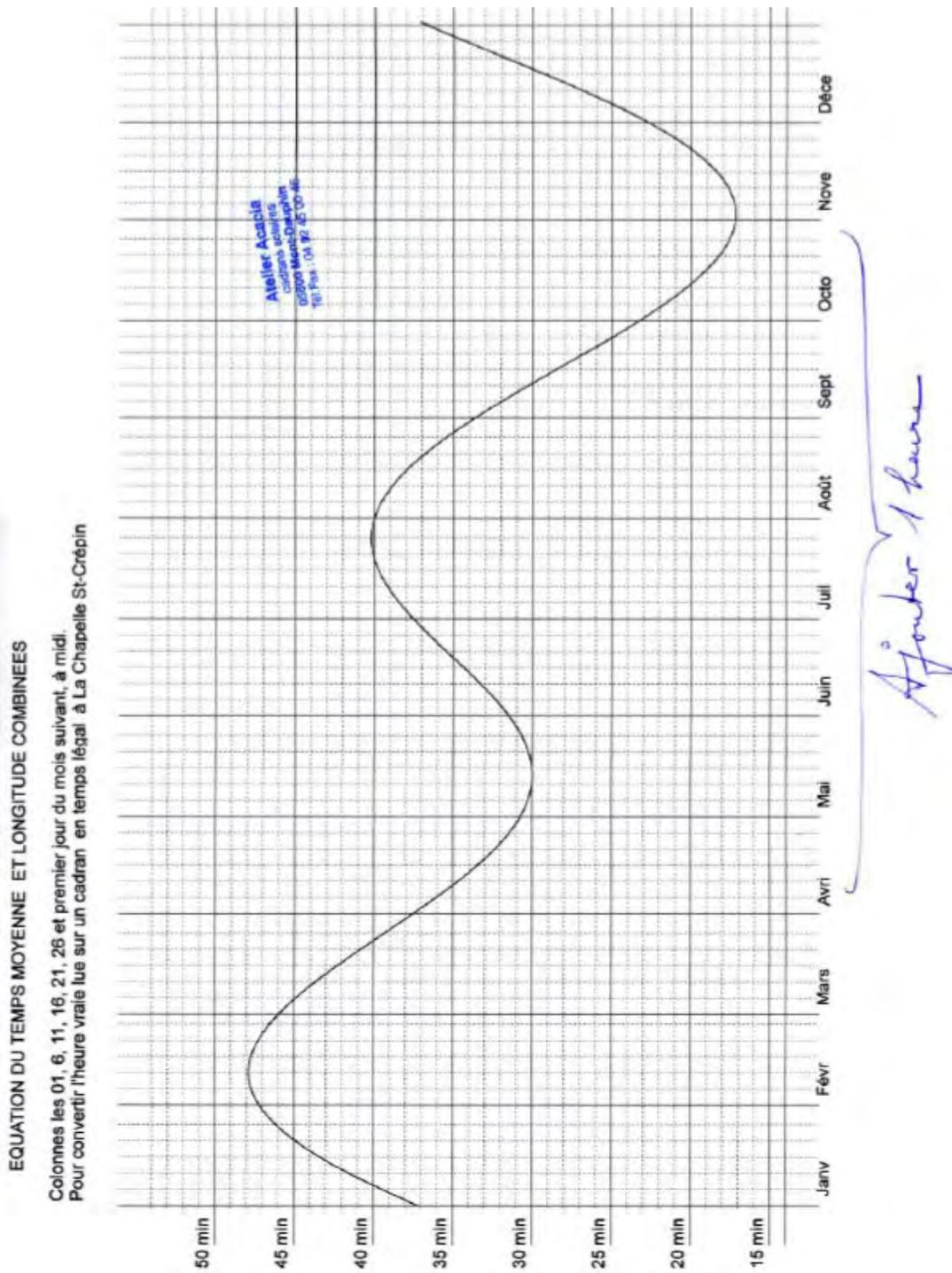


Techniquement on dira que ce cadran solaire est vertical, déclinant 99° Ouest avec un œilleton et présentant l'heure solaire vraie de I à VII, une courbe en 8 (ou analemme) donnant 14 h en hiver et 15 h en été ainsi que les courbes de déclinaison des solstices et l'équinoxiale.

Table 1

Dates d'entrée du soleil dans les signes du zodiaque (qui n'ont rien avoir avec les constellations, à part le nom...)

Signes du zodiaque	Date	Évènement
BELIER	20/03	Équinoxe de printemps
TAUREAU	20/04	
GEMEAUX	21/05	
CANCER	21/06	Solstice d'été
LION	23/07	
VIERGE	23/08	
BALANCE	23/09	Équinoxe d'automne
SCORPION	23/10	
SAGITTAIRE	22/11	
CAPRICORNE	21/12	Solstice d'hiver
VERSEAU	20/01	
POISSONS	19/02	



Reportage photo (cf. fig. 10 page ci-contre).

J. AUVRAY - ATELIER ACACIA - PLACE FORTE DE MONT-DAUPHIN 05600
 Tél : 04 92 45 00 46 cadrans05@gmail.com
<http://www.atelieracacia.com>

BON SOLEIL

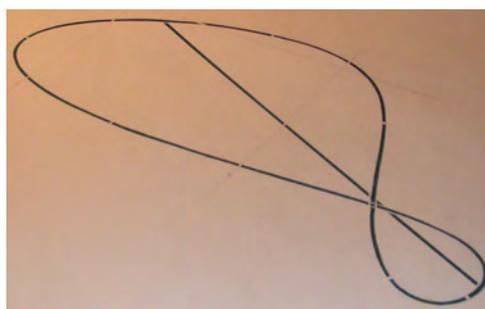




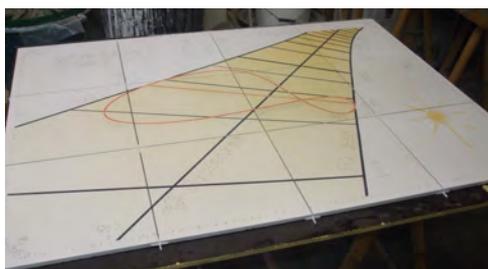
(a) Préparation du support



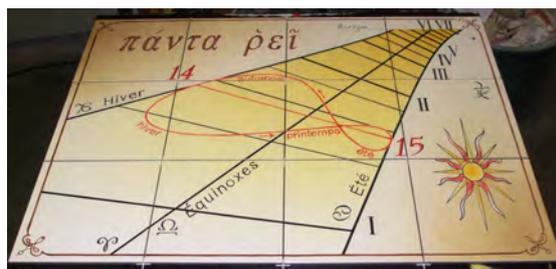
(b) Plan vertical maçonné



(c) Pochoir de l'analemme



(d) Courbes réalisées sur émaille cru



(e) Défourné après cuisson à 960 °C



(f) Pose carreau par carreau



(g) Avec le style

Figure 10 – Reportage photo.

— Cadran de Claude Gahon : la turbine

Voici *Turbine*, tout juste sorti des ateliers solaires, c'est évidemment la forme qui m'a inspiré le nom et pas l'inverse.

Lecture de l'heure alternativement d'une couronne à l'autre. Chaque couronne comporte des fentes, chaque fente produit une raie lumineuse sur la couronne suivante. Chaque couronne comprend également des « plages » horaires.

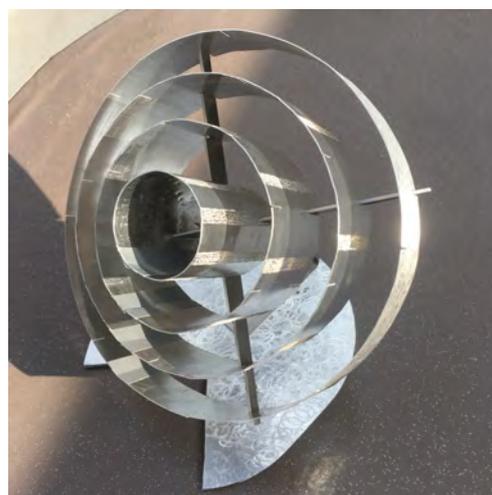
L'heure solaire est donc indiquée par la plage horaire marquée par une raie lumineuse.

D'une couronne à la suivante, les fentes sont décalées de 15° , idem pour les plages horaires. Lecture un peu difficile car l'aluminium est déjà brillant, mais on arrive quand même à repérer le trait de lumière.

Vos remarques et critiques seront toujours les bienvenues.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 11 – Cadran *turbine*.

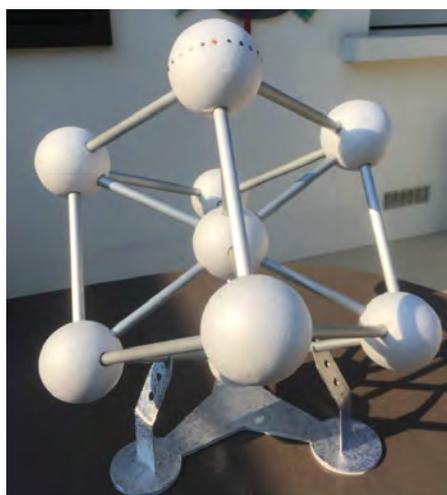
— Cadran de Claude Gahon : Atomium

Petite inspiration qui ne devrait pas vous poser de problème quant à son nom et à son fonctionnement.

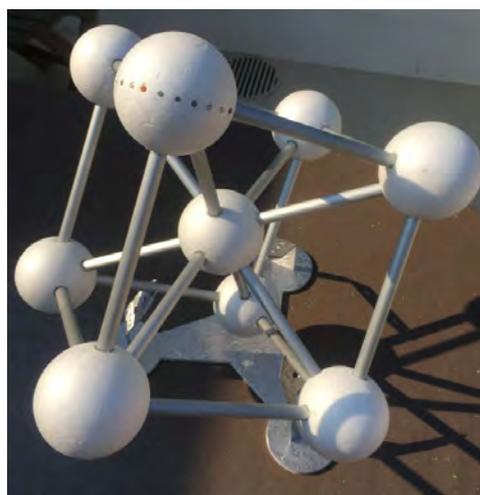
Le plus compliqué de cette création n'est pas dans la gnomonique mais dans la conception et réalisation de la structure.

Je suis assez satisfait du résultat conceptuel, même si la lecture de l'heure reste imprécise pour les raisons bien connues de l'incertitude sur la limite lumière/pénombre/ombre et suivant les matériaux utilisés.

Tubes aluminium diamètre 10 mm, boules polystyrène diamètre 7 cm, plaques d'aluminium d'épaisseur 1.5 mm, constituent l'essentiel.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 12 – Cadran *atomium*.

2 Courriers/courriels gnomoniques

2.1 De Jean Pakhomoff : sous-stytaire et équinoxiale

« Je vous avais mis un lien sur la démonstration que j'avais faite voilà quelques années à propos de la perpendicularité entre sous-stytaire et équinoxiale.

<http://www.pakhomoff.net/STYLESSTEQ.html>

Après réflexion j'en ai trouvé une autre qui complète me semble-t-il la précédente. Je vous la soumetts à tout hasard ».

Soit la sphère céleste de centre O et le cadran solaire $OO'A$ qui lui est attaché sur le mur plan.

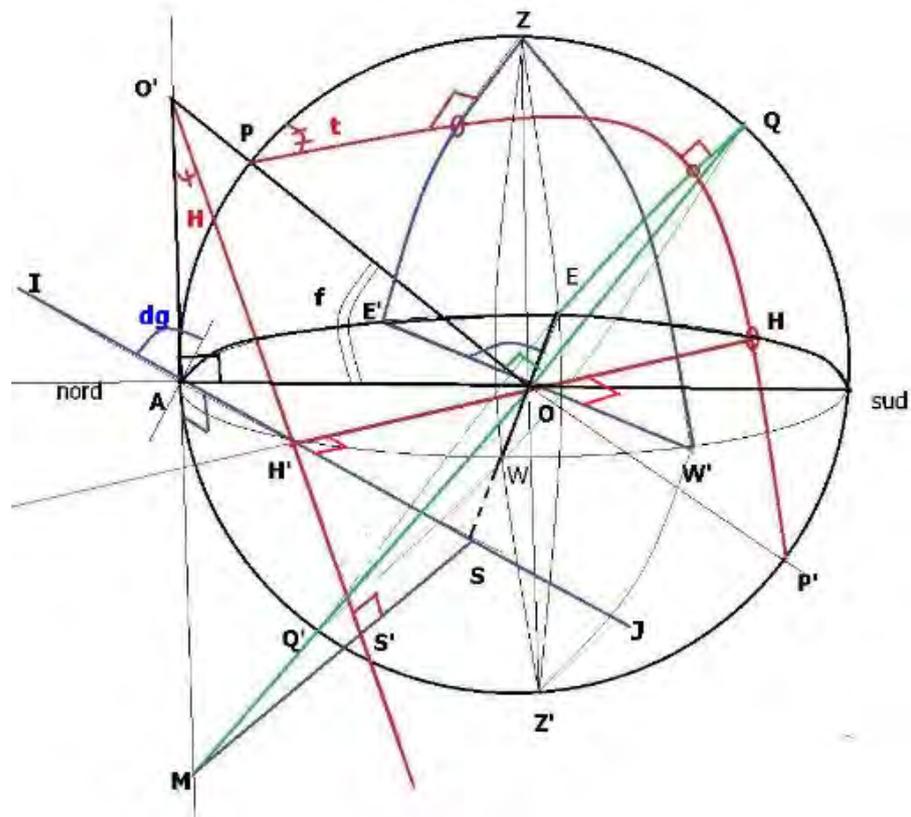


Figure 13 – Sphère céleste.

$O'MIJ$ déclinant de dg vers l'Est à la latitude f .

On se place dans le cas de figure d'un angle horaire de valeur t dans la zone anté méridienne. Ce cercle horaire coupe l'horizon Est en H et le plan du cadran en $O'H'$ donnant l'angle tabulaire H sur le cadran. Ce cercle horaire est par hypothèse perpendiculaire au vertical $E'ZW'$, vertical parallèle au plan du mur de déclinaison dg .

L'axe de l'équateur QQ' coupe le plan du mur en M et le prolongement de l'axe Est-Ouest EW perce celui-ci en S . Les points M et S donnent alors la position de l'équateur sur le plan du cadran. La droite (MS) est appelée droite équinoxiale sur le cadran.

Les cercles horaires ont pour axe les pôles de l'équateur et sont donc tous perpendiculaires à celui-ci. La ligne horaire $O'S'$ contenue dans le plan du cercle horaire PHP' perpendiculaire au vertical $E'ZW'$ et donc au mur porteur du cadran est alors perpendiculaire à la droite

(MS) à la fois contenue dans le plan du mur et dans l'équateur céleste. On appelle sous-stylaire la droite ($O'S'$) perpendiculaire en S' à l'équinoxiale (MS).

2.2 Lune et heures des prières

La passion de notre nouveau collègue Mamadou Cisse a suscité des échanges de courriels pouvant intéresser le lecteur de Cadran Info. Celle-ci concerne le calcul :

- de visibilité de croissant lunaire (les possibilités de visibilité à l'œil nu) ;
- des heures de prières musulmanes.



2.2.1 Croissant lunaire

Ce sujet, à l'écart de notre discipline, n'a jamais été traité dans notre revue. Voici quelques remarques et informations.

De Guillemet Hervé : la visibilité du croissant est un sujet très complexe, car non seulement il dépend du lieu d'observation mais aussi de la méthode d'observation (avec ou sans instrument). En ce qui concerne le calcul, cela dépend des critères utilisés et il n'y a pas consensus sur le sujet.

Au final c'est l'autorité religieuse de laquelle le musulman dépend qui fixe la règle.

Le document de l'Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Éphémérides (IMCCE — Observatoire de Paris) résume bien la situation :

https://www.imcce.fr/newsletter/docs/Ramadan_2018.pdf

ou :

https://www.lescahiersdelislam.fr/La-visibilite-du-croissant-lunaire-et-le-Ramadan_a362.html

Cordialement.

De Denis Savoie : j'ai travaillé dans les années 90 avec M. Ilyas sur la visibilité du croissant lunaire. En particulier deux articles très complets sur le sujet :

— *Visibility of lunar crescent*, fichier 1988QJRAS_29_511SDS ;

— *Lunar crescent visibility criterion and islamic calendar*, fichier : 1994QJRAS_35_425LDS.

Amicalement.

De Baillet Gérard : la théorie de la visibilité du croissant lunaire a été traitée par Thâbit ibn Qurra (826 – 901, calendrier julien). Vous trouverez les détails dans : *Histoire des sciences arabes* (sous la direction de Roshdi Rashed) édition du seuil, page 55 et suivantes.

De Jean-Claude Berçu : il existait un programme spécifique sous DOS du Dr Monzur Ahmed : <http://www.mooncalc.moonsighting.org.uk/> mais hélas à ma connaissance il n'a pas été mis à jour depuis 2001...

Bien cordialement.

J'ai trouvé d'autres documents et un site de calcul en ligne mis à jour récemment AccurateTimes : <http://www.icoproject.org/accut.html?l=en>

N'étant pas un spécialiste de la question, je ne peux pas vous confirmer que tous les documents présentent le même intérêt que celui de Bradley Schaefer qui fait autorité.

- What's the Thinnest Crescent Moon You Can See? (2017);
- First Visibility of the Lunar Crescent (2000);
- Crescent moon visibility (2015);
- Scientific developments in moon sighting (diaporama 1999);
- La visibilité du croissant lunaire et le Ramadan (2015);
- Observation sur la vision de la nouvelle lune par les méthodes des calculs scientifiques et traditionnelles (congrès international 2016);
- Logiciels (2015);
- Documents pour le calcul du mois Ramadan de l'année 2018.

Nota : ces documents ont été enregistrés dans notre bibliothèque MàJ oct 2018 (onglet « outils » de notre site web).

2.2.2 Heures des prières musulmanes

Ce thème a été traité dans notre revue et dans des livres connus de nos adhérents. Certains des logiciels listés dans l'onglet « outils » de notre site, permettent également ce genre de calculs et de tracés.

De Guillemet Hervé : concernant les heures des prières, cela dépend aussi de l'autorité religieuse car il n'y a pas une règle commune et universelle. Le document *Cadrans islamiques anciens de Tunisie* de notre collègue Éric Mercier extrait de Cadran Info N° 29, disponible également sur Internet explique bien la situation :

https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwjYoM7sxpLcAhWGuBQKHezHCbAQFggvMAA&url=http%3A%2F%2Fstudios-nantes.pagesperso-orange.fr%2FGnomonique_files%2FM.E_Cadrans%2520islamiques.pdf&usq=AOvVaw2YcIIBd7S3UFyRNw-egRXA

Le livre de Denis Savoie : *La gnomonique* contient un chapitre sur le sujet. Gianni Ferrari a également publié un livre en italien très complet sur les cadrans anciens de l'Islam et la théorie : *Le meridiane dell'antico Islam*.

Les calculs peuvent être comparés avec les résultats des nombreux logiciels : *Salat Time*, *Athan*, etc... lesquels sont paramétrables (dont certains avec au minimum 8 méthodes de calcul car les critères sont différents).

Cordialement.

De Baillet Gérard : pour les heures de prières musulmanes, les voici ci-dessous en couleur verte sur le tympan d'un astrolabe (projection stéréographique) tracé avec mon logiciel.

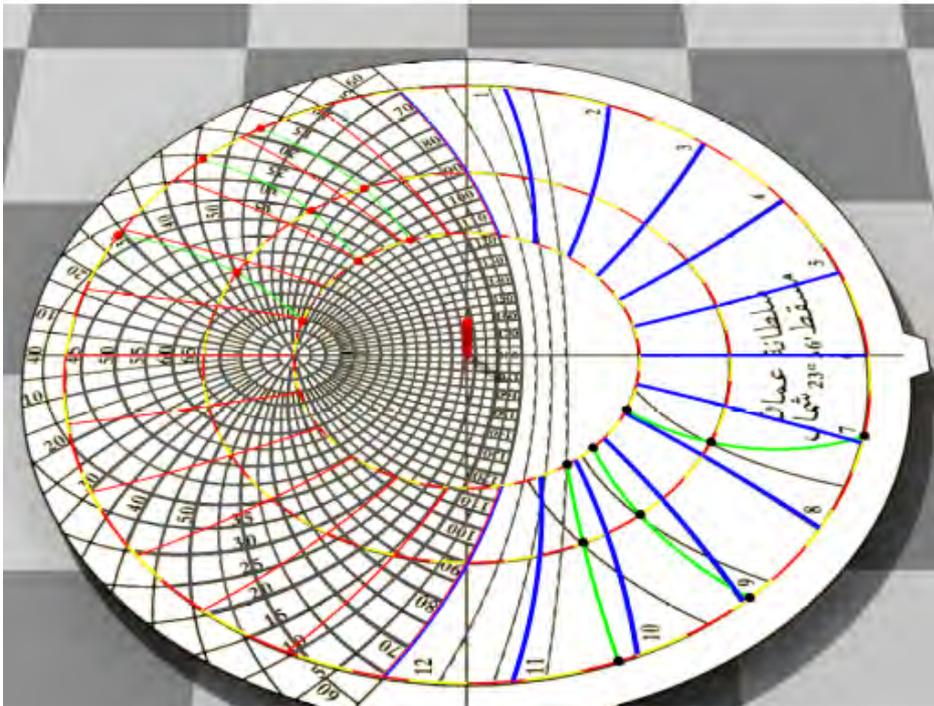


Figure 14 – Heures de prières musulmanes sur le tympan d'un astrolabe.

De Jean Pakhomoff : j'ai été contacté à la fin du mois de mai 2018 par une personne habitant Gennevilliers désirant tracer au sol les courbes de prière du *Zohr* et de l'*Asr*. Ci-après, les résultats que je lui ai adressés.

Vous pouvez également trouver sur mon site, une page concernant cette question ainsi qu'un programme *gwbasic* permettant la construction de ces courbes : (<http://www.pakhomoff.net/page5asr.html>).

Courbes de prière du *Zohr* et de l'*Asr*.

Les calculs sont faits pour l'emplacement de la mairie de Gennevilliers : latitude : 48° 925 322 Nord et longitude : 2°2941 Est.

Le style droit AA' , porte ombre perpendiculaire au plan horizontal, fait 100 cm et tous les résultats en X et Y correspondent à cette dimension.

Vous pouvez vous servir d'une autre échelle qui vous convienne mieux en les multipliant par la valeur de cette échelle. Ainsi le schéma que je vous joins est à l'échelle $1/15$ pour que tout cela entre dans la feuille.

Si vous voulez vous servir d'un mat de 2 mètres de haut par exemple il conviendra de multiplier les valeurs X et Y par 2...

Pour porter ces valeurs il faut mettre l'axe des Y sur la ligne méridienne Nord-Sud en mesurant le mieux possible le nord géographique. La boussole n'est pas conseillée (faites-vous éventuellement aider sur place par un astronome amateur qui sache faire cette mesure). Les valeurs des X sont à porter sur l'axe Est-Ouest, côté Est.

À partir de la méridienne vous pouvez avoir la direction de La Mecque en traçant une droite vers le Sud-Est faisant un angle de $60^{\circ}836$ avec cette méridienne.

Lorsque l'ombre du sommet du style porteur touche la courbe rouge il est l'heure de la fin du *Zohr*, celui-ci commençant après que le soleil a franchi le plan méridien c'est-à-dire juste après midi solaire.

Lorsque l'ombre du sommet du style porteur touche la courbe verte il est l'heure du début de l'*Asr*.

Sous les valeurs d'angles horaires je vous ai écrit les valeurs correspondantes en heure locale solaire vraie.

Pour avoir l'heure civile il conviendra de faire les transformations nécessaires en tenant compte de la longitude du lieu et de l'équation du temps qui change tous les jours...

Addendum. Je me suis aperçu en faisant ce travail que les définitions du *Zohr* étaient variables. Certains parlent de rajouter $\frac{1}{3}$ de la longueur du bâton à son ombre à midi ; d'autres parlent de seulement $\frac{1}{4}$.

J'ai fait les calculs pour le cas du $\frac{1}{3}$. Il faudrait refaire la courbe du *Zohr* pour le cas du $\frac{1}{4}$. Je vous ai mis les heures correspondantes en rouge et on peut voir qu'il y a un peu d'avance dans ce cas.

En doc joint : un schéma des courbes et un tableau des résultats numériques. J'espère que cela vous permettra de mener à bien votre projet.

Cordialement.

Jean Pakhomoff.

Latitude = 48°925'322.

L = 132.6517 cm. AB = AC = 100.0000036578774 cm.

Zohr

- en noir : heures correspondantes à l'ombre du gnomon à midi $+\frac{1}{3}$ du gnomon ;
- en rouge : heures correspondantes à l'ombre du gnomon à midi $+\frac{1}{4}$ du gnomon.

Les tracés joints correspondent au cas du $\frac{1}{3}$ du gnomon.

Première déclinaison choisie : $-23^{\circ}437'05$, hiver.

Cadran horizontal						échelle $\frac{1}{15}$	
A hor	AZ	Ht	X cm	Y(A) cm	HV	X cm	Y cm
17.119	16.321	16.039	97.750	333.837	13.072	6.5	22,2
13 h 8 min 29 s ou 0 h 59 min 53 s							

Déclinaison du soleil $= -20^{\circ}148'47$.

A hor	AZ	Ht	X cm	Y(A) cm	HV	X cm	Y cm
19.665	19.488	18.735	98.361	277.956	15.077	6,5	18,5
13 h 18 min 39 s ou 13 h 8 min 52 s							

Déclinaison du soleil $= -11^{\circ}470'92$.

A hor	AZ	Ht	X cm	Y(A) cm	HV	X cm	Y cm
25.547	27.929	25.534	98.050	184.954	19.816	6,5	12,3
13 h 42 min 1 s ou 13 h 29 min 35 s							

Déclinaison du soleil = 0° , équinoxes.

A hor	AZ	Ht	X cm	Y(A) cm	HV	X cm	Y cm
31.589	39.205	34.034	93.592	114.735	24.871	6,2	7,6
14 h 6 min 21 s ou 13 h 50 min 38 s							

Déclinaison du soleil = 11°470 92.

A hor	AZ	Ht	X cm	Y(A) cm	HV	X cm	Y cm
35.693	50.619	42.290	84.976	69.752	28.438	5,6	4,6
14 h 22 min 46 s ou 14 h 4 min 17 s							

Déclinaison du soleil = 20°148 47.

A hor	AZ	Ht	X cm	Y(A) cm	HV	X cm	Y cm
37.389	59.486	48.570	76.033	44.812	29.948	5	3
14 h 29 min 33 s ou 14 h 9 min 7 s							

Déclinaison du soleil = 23°437 05, été.

A hor	AZ	Ht	X cm	Y(A) cm	HV	X cm	Y cm
37.664	62.956	50.991	72.147	36.830	30.195	4,8	2,4
14 h 30 min 39 s ou 14 h 11 min 7 s							

Asr (suite) :

Déclinaison du soleil = -23°437 05, hiver.

Cadran horizontal						échelle 1/15	
A hor	AZ	Ht	X cm	Y(A) cm	HV	X cm	Y cm
27.575	25.906	13.563	181.103	372.861	21.489	12,1	24,8

Déclinaison du soleil = -20°148 47.

A hor	AZ	Ht	X cm	Y(A) cm	HV	X cm	Y cm
31.440	30.536	15.462	183.674	311.373	24.744	12,2	20,7

Déclinaison du soleil = -11°470 92.

A hor	AZ	Ht	X cm	Y(A) cm	HV	X cm	Y cm
40.373	42.470	19.916	186.359	203.588	32.659	12,4	13,5

Déclinaison du soleil = 0°, équinoxes.

A hor	AZ	Ht	X cm	Y(A) cm	HV	X cm	Y cm
50.020	57.703	24.971	181.510	114.735	41.957	12,1	7,6

Déclinaison du soleil = 11°47'02

A hor	AZ	Ht	X cm	Y(A) cm	HV	X cm	Y cm
57.833	72.431	29.520	168.365	53.307	50.162	11,2	3,5

Déclinaison du soleil = 20°14'47.

A hor	AZ	Ht	X cm	Y(A) cm	HV	X cm	Y cm
62.727	83.303	32.842	153.865	18.067	55.633	10,2	1,2

Déclinaison du soleil = 23°43'05, été.

A hor	AZ	Ht	X cm	Y(A) cm	HV	X cm	Y cm
64.358	87.371	34.105	147.515	6.774	57.513	9,8	0,5

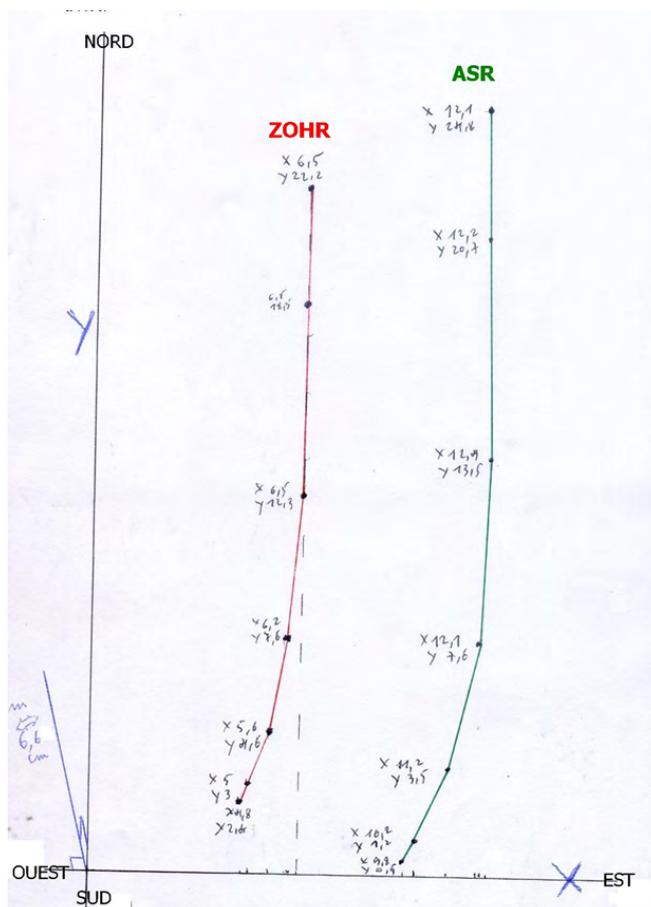


Figure 15

2.3 Correction de la perspective d'une image

La question de la correction de perspective est souvent posée. Afin de faire des relevés à partir de la photographie d'un cadran, il est important que celle-ci soit prise exactement de face. Cela est rarement possible. Dans le meilleur des cas, le photographe se trouve dans le plan perpendiculaire au cadran mais il n'est pas dans l'axe de celui-ci car le cadran est en hauteur.

Deux méthodes ont été proposées en 2014 par Michel Ugon dans le numéro 30 de Cadran Info sous le titre *Correction de la perspective des clichés*, page 101.

Nous avons retrouvé un autre article de cette même année sur le *redressement* de la photo d'un tableau avec le logiciel bien connu « PhotoShop ».

« Il vous est arrivé de photographier un tableau, un panneau, une affiche ou tout simplement un bâtiment dont vous voudriez recadrer et redresser la perspective.

Il est possible de regrouper les deux opérations en une seule. . . Grâce à une petite case à cocher dans les paramètres de l'outil *recadrage* (Photoshop CS5) ou choisir l'outil de *correction de perspective par recadrage* (Photoshop CS6).

Voici par exemple une image (fig. 16) dont nous voulons recadrer et redresser la perspective :



Figure 16

Sur **photoshop CS5** : Sélectionnez l'outil *Recadrage* (fig. 17 page suivante).

Sur **photoshop CS6** : Cliquer sur l'outil de *recadrage*, apparaît un sous menu et sélectionner *outil correction de perspective par recadrage* (fig. 18).

Si vous voulez garder les mêmes proportions que l'image initiale, cliquer sur le bouton *Image 1^{er} Plan* dans les paramètres en haut de la fenêtre (sinon, cliquez sur le bouton *Effacer*). Faire des essais en fonction des images. Pour cet exemple ci, je coche *image 1^{er} plan* sinon l'image n'aura pas les proportions désirées (fig. 19).



Figure 17

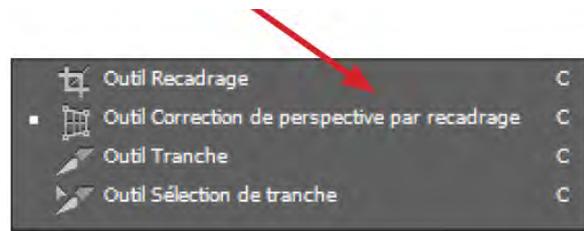


Figure 18



Figure 19



Figure 20



Figure 21

Cliquez sur l'image et tirez pour encadrer grossièrement le sujet (fig. 20) :

Uniquement sur **CS5** : au-dessus de la fenêtre de travail, dans la partie paramètres vient d'apparaître la case à cocher *Perspec.* Cochez-là. Elle va vous permettre de déplacer les poignées indépendamment les unes des autres (fig. 21).

Sur **CS6** : une fois l'outil sélectionné, passer directement à cette étape. Positionnez le curseur sur une poignée. Il se transforme en un curseur triangulaire. Cliquez et déplacez cette poignée pour la rapprocher du coin correspondant. Faites la même chose avec une autre poignée (fig. 22 page suivante). Vérifiez que la ligne entre les deux poignées est bien parallèle au bord du sujet.



Figure 22



Figure 23

Continuez avec les autres poignées jusqu'à encadrer parfaitement le sujet (fig. 23).

Il ne reste plus qu'à appuyer sur la touche *Entrée*, ou double cliquer dans l'image, ou cliquer sur le *V!* de valider dans la barre des paramètres dans l'image pour prendre en compte le redressement/recadrage ».



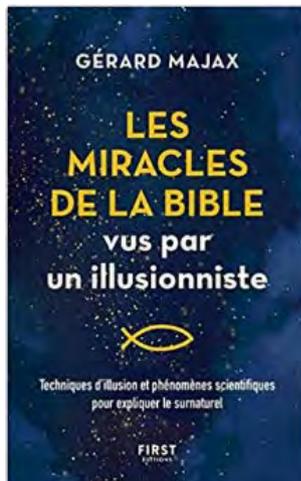
Figure 24

3 Livres

3.1 "Les miracles de la Bible vus par un illusionniste" par Gérard Majax

De ce livre, Joseph Theubet nous présente « La Bible, le Soleil et la Terre ».

Qui ne connaît Gérard Majax, le célèbre magicien, lui qui n'a cessé de démasquer les inspirés du paranormal ¹.



Vient de paraître chez First Editions son nouveau livre susceptible de retenir notre attention : *Les miracles de la Bible vus par un illusionniste* qui traite des *Techniques d'illusions et phénomènes scientifiques pour expliquer le surnaturel*.

Ses explications associées à celles de quelques scientifiques sont rarement convaincantes mais pas moins intéressantes.

Comment expliquer l'arrêt de la marche de la Lune et du Soleil demandé à Dieu par Josué (Josué, X. 12-14)? Une réfraction exceptionnelle selon Spinoza? Une éclipse de Soleil selon Sidersky (1933)? Difficilement crédible lorsque que le verset 14 précise que : *Le soleil se tint immobile au milieu du ciel et près d'un jour entier retarda son coucher!* En 1943, l'astronome J. Bosler propose la chute d'une pluie de météorites qui aurait prolongé la durée du jour! (p. 143-6).

L'imagination au pouvoir, comme on disait en mai 68! Plus mystérieux encore les versets des Rois, XX. 10-11. Ezéchias dit :

C'est peu de chose pour l'ombre de gagner dix degrés. Non! Que plutôt l'ombre recule de 10°! ... Yahvé fit reculer l'ombre sur les degrés que le soleil avait descendus sur les marches de la chambre haute d'Achaz — dix degrés en arrière.

Voici l'explication proposée par G. Majax :

Il est impossible que le Soleil ait rétrogradé dans sa course ni que la Terre ait tourné en sens inverse, ce qui expliquerait pourtant le recul de l'ombre sur un cadran solaire. Depuis Spinoza, on explique le prodige décrit dans la Bible par un parhélie, un phénomène optique qualifié parfois de « faux soleil » issu du halo solaire et qui consiste en l'apparition de deux répliques du Soleil placées horizontalement autour de l'original. Ainsi, lors de la scène biblique, l'astre apparent semblait occuper dans le ciel une place autre que celle qu'il occupait en réalité, modifiant les ombres du cadran.

Un colonel suisse au secours de la Bible ². Il manque deux ou trois tours dans le sac de G. Majax qui ignore notamment un remarquable article de Camille Flammarion paru dans *L'Astronomie* de septembre 1885 : *Le cadran solaire à rétrogradation de l'observatoire de Juvisy et le miracle d'Isaïe*. En voici un extrait :

... le 11 août 1885, nous fîmes, à Lausanne même, en compagnie du savant et sympathique colonel Guillemin, l'essai d'un cadran solaire à rétrogradation, et quelques mois après nous écrivions les lignes suivantes dans notre ouvrage, *Les Etoiles* (p. 760), au chapitre des *Annales de l'Astronomie* :

An 709 avant Jésus-Christ. — Les cadrans solaires étaient en usage, et depuis longtemps sans doute, sous le règne d'Ezéchias. Quinze ans avant la mort de ce roi de Juda, la Bible rapporte que le prophète Isaïe fit rétrograder l'ombre de dix degrés sur le cadran solaire d'Achaz. C'est là une opération que l'on a taxée jusqu'à ce jour de miraculeuse, mais qui peut se faire sans miracle, si l'on donne au cadran une inclinaison calculée

1. Gérard Majax, *Le grand bluff. Les escrocs de la parapsychologie*. F. Nathan, 1978

2. Les trois articles de *L'Astronomie* cités ci-dessous sont à retrouver dans les *Annexes* de la version numérique de Cadran Info. Ils figurent également dans notre bibliothèque (se reporter au tableau « BiblioMembresmai 2018 », onglet *outils* de notre site.

suivant la latitude du lieu. Nous avons nous-mêmes renouvelé le miracle d'Isaïe, l'été dernier à Lausanne. Nous ferons connaître la manière de renouveler ce fameux miracle d'Isaïe, dans l'un des premiers numéros de notre Revue astronomique.

Le style de C. Flammarion. En résumé, Camille Flammarion utilise un cadran horizontal muni d'une aiguille verticale de 20 cm qui est fixé côté sud par une charnière. Au solstice d'été à midi, il fait basculer le cadran jusqu'à l'inclinaison calculée ainsi : il déduit de la latitude de Juvisy, $48^{\circ} 42'$, la déclinaison du Soleil, $23^{\circ} 5'$, ainsi que $3^{\circ} 5'$ (!), soit $28^{\circ} 22'$. Il élève donc ce cadran autour de sa charnière selon un angle de $28^{\circ} 5'$. Après ce réglage, l'ombre du style rétrogradera dès 2 h 34 min.

Après la publication de cet article, deux lecteurs réagirent dans cette même revue de 1885 où texte biblique et science s'affrontent : à lire absolument !

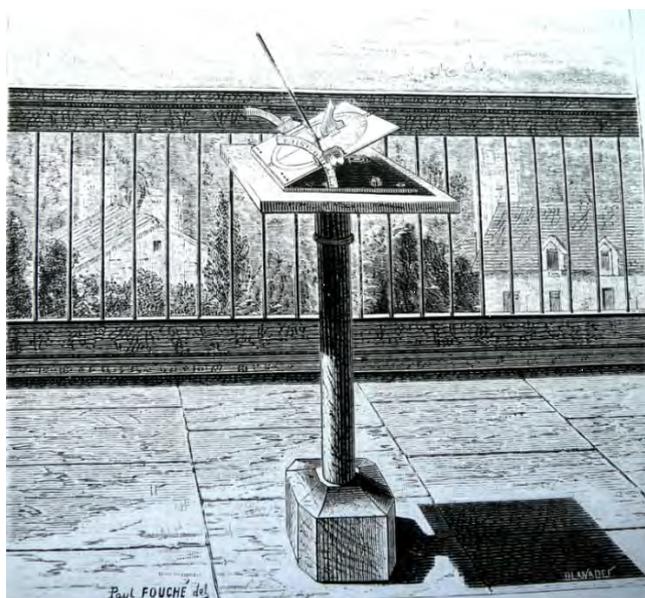


Figure 25 – Cadran à rétrogradation de C. Flammarion.

Le miracle d'Achaz n'a pas laissé indifférent R.J. Rohr qui, dans son traité de gnomonique³ se livre à une étude gnomonico-historique remarquable dont voici un extrait :

15. Le lecteur voudra bien nous pardonner cette digression un peu longue au sujet du cadran d'Achaz, mais il notera aussi qu'aucun autre cadran n'avait trouvé jusque-là dans les textes anciens un tel écho, et que nul autre, ajoutons-le, ne devait donner naissance par la suite à une littérature aussi abondante et aussi complexe. On trouve mention de ce cadran déjà chez Flavius Joseph, historien juif du 1^{er} s. après J.-C. (*Antiquités Juives*, X, 2, 1) ; par la suite, pour ne mentionner que les auteurs les plus célèbres, le cadran d'Achaz a été discuté par Pedro Nuñez (1564) ; Spinoza (XVII^e s.) ; C. Flammarion (1885) ; Claudio Pasini (1920) et Borchardt (1920), qui présente une solution voisine de la nôtre. Dans l'ignorance où l'on se trouve sur la nature de ce cadran, certains auteurs ont essayé d'imaginer un cadran dont la façon de fonctionner pourrait expliquer une rétrogradation naturelle de l'ombre. Ainsi on trouve au musée de la *Philosophical Society de Philadelphie*, pour ne citer qu'un exemple, un cadran du XVI^e s. ayant la forme d'une coupe munie d'un gnomon, qui est l'œuvre du

3. R.J. Rohr, *Les Cadrans Solaires*. Éd. Oberlin, Strasbourg, 1986, pp. 14 (13)-16.

célèbre artisan C. Schissler d'Augsbourg. En versant de l'eau dans la coupe, on faisait redescendre l'ombre du gnomon par l'effet de la réfraction des rayons lumineux.

En fait, le problème posé par le mouvement rétrograde de l'ombre sur le cadran d'Achaz n'a jamais été résolu, et pour cause, puisque la Bible le présente comme un miracle. L'effort de tant de chercheurs a néanmoins eu pour effet d'éclaircir le sens du texte hébreu de la première citations de notre livre des Rois, ou revient trois fois le même mot *ma'aloth*, qui peut signifier à la fois ligne, degré ou marche d'escalier. En traduisant ce terme en latin, Saint Jérôme, le traducteur de la vulgate, eut la malencontreuse idée d'employer chaque fois un mot différent avec pour résultat que l'interprétation de son texte a donné naissance au cours des siècles aux hypothèses les plus variées.

Dans une *autre bible*, celle de la gnomonique cette fois-ci, Denis Savoie développe une annexe magistrale sur la *Rétrogradation de l'ombre*⁴. Il fait remarquer qu'elle ne se produit que dans les régions intertropicales, là où

... la variation en azimut du soleil à certaines dates présente une *anomalie*, le Soleil passant deux fois par le même azimut, soit avant le passage au méridien, soit après.

À partir de ces données, le phénomène se constate sur des cadrans à style droit horizontaux et plus difficilement sur les verticaux. D. Savoie réexamine également la démonstration de Flammarion pour en conclure qu'avec cette méthode,

... il devient possible de construire un cadran simple (vertical ou incliné) pouvant présenter une ombre rétrogradante à la latitude de 32°, soit Jérusalem.

Et la boucle est bouclée...

Dans la version numérique, vous trouverez en annexe :

- Fichier : *Fammarion.pdf*
- Fichier : *Delmotte.pdf*
- Fichier : *Lecteurs.pdf*

3.2 "Les phénomènes solaires artificiels" par Thierry van de Leur



Paul Gagnaire nous signale ce livre.

Sous ce titre : *Les phénomènes solaires artificiels*, édition Lulu, l'auteur Thierry Van de Leur, présente en 418 pages des *éclaircissements* particuliers.

De nombreux saints ou sculptures sont ainsi inondés par les rayons solaires à certaines époques de l'année.

Des monuments anciens ou récents offrent par leur orientation particulière des phénomènes lumineux intéressants.

175 lieux *sacrés* pouvant être des grottes, des dolmens, des temples, des pyramides, des châteaux, des cathédrales, des églises, des chapelles ou autres édifices jouant de la lumière solaire sont analysés.

4. Denis Savoie, *La Gnomonique*. Éd. Les Belles Lettres, 2001, pp. 401-10.

4 Gnomonique du monde

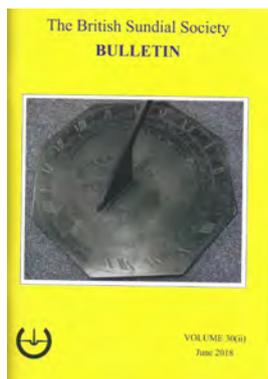
Sommaires des dernières revues ou bulletins :



La BUSCA de PAPER N° 89, printemps 2018 (sur papier et CD) de la **SOCIETAT CATALANA DE GNOMONICA, SCG**
 Reflexions, per *Tura Soler*, p. 3 Editorial, p 3. 2026/2028 : Una oportunitat única per deixar-se eclipsar, per *M. Soltanolkotabi*, p. 4. Un curios rellotge de sol a la Carrotxa ?, per *F. Clarà*, p. 9. Museu dispers del rellotge (vii), per *E. Farré*, p. 10. Presa de possessió de Juan Vicente Pérez Ortiz, p. 12. Determinació analítica del "terminator", per *R. Soler i Gayà*, p. 13. Dos espectaculars rellotges de sol a Osca, per *L. Feria*, p. 15. De turisme per Roma, per *E. Farré*, p. 18. Col·laboracions : una guia, p. 22. Els rellotges de sol del Real Colegio Seminario del Corpus Christi, per *P. Novella*, p. 23. Fons documental de la SCG, p. 25. Taller de bricolatge (10). Rellotge polar digital, per *F. Clarà*, p. 26. Del eos humà coma primer gnomon solar, per *R. Calvino*, p. 28. Racó literari, p. 30. Filatelia, de la col·lecció Francesc Rocha, Eivissa, p. 31.

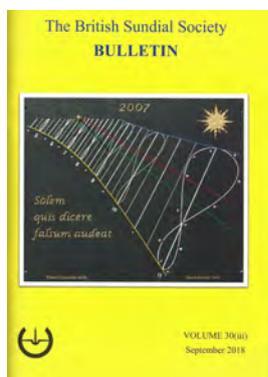
Portada : Eclipsi de sol total de l'11 de juliol 2010, sobre la platja d'Anakena, Rapa Nui (Illa de Pasqua).

Imatge © Stéphane Guisard, "Los cielos de América", <http://sguisard.astrosurf.com>.



BULLETIN, Volume 30, N° 2, juin. 2018 (sur papier) de **THE BRITISH SUNDIAL SOCIETY, BSS**

1. Editorial. 2. A Singular Cross Dial in Moorfields – *Graham Stapleton*. 6. In the Footsteps of Thomas Ross. Part 23 : West Fife Sundials – *Dennis Cowan*. 9. Reader's Letter – *John Lester*. 10. Some Early French Dials – *Mike Cowham*. 12. Postcard Potpourri 43 : Basilica de Guadalupe, Mexico City – *Peter Ransom*. 13. Newly Reported Dials 2017 – *John Foad*. 17. A Sundial Commission with a Circular Enoch Calendar – *Alastair Hunter*. 20. Livery Schools Link Showcase Event 2018 – *Joanna Migdal*. 22. Sundial at Hotel Casino Ridola, Matera, South Eastern Italy – *Martin Jenkins*. 24. "The Very Last Scratchings of an Old Bird" – *Tony Moss*. 28. Miniature Sundials for Some Wonderful People – *Valery Dmitriev*. 30. A Sundial that Unites : Teddy Park Sundial. Jerusalem, Israel – *Lupe Feria*. 33. The BSS Gavel. 34. North American Sundial Conference, St Louis, August 2017 – *Geoff Parsons*. 37. BSS Photographic Competition 2017-18 – *David Hawker*. 41. BSS Annual Conference : Norwich, 20-22 April 2018. 47. Anthony J. Turner Wins The 2018 Paul Bunge Prize – *JD*. 48. Minutes of the 29th BSS Annual General Meeting, Norwich, 21 April 2018 48. A Dial Displaced by a Bridge : Dial Square, Norwich – *David Payne*.



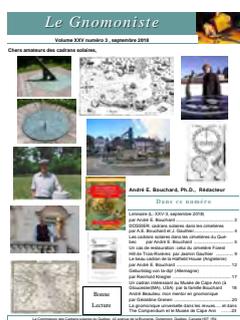
BULLETIN, Volume 30, N° 3, sept. 2018 (sur papier) de **THE BRITISH SUNDIAL SOCIETY, BSS**

1. Editorial 2. On the Origins and Meaning of a Sundial Centre Panel – *Anthony Turner*. 6. Sundials at the Chelsea Flower Show – *Douglas Bateman*. 8. A Couple of Cumbrian Dials. Part 1 : The Ambleside Dial – *Sue Mansion*. 12. Butterfield Dial Gnomons – *Mike Cowham*. 16. In the Footsteps of Thomas Ross. Part 24 : The Carberry House Sundials – *Dennis Cowan*. 19. A Couple of Cumbrian Dials. Part 2 : The Penrith Dial – *Sue Mansion and John Davis*. 22. The British Sundial Society's Library – *John Wilson*. 24. The Mystery of the Lumbutts Sundial – *Robert Sylvester*. 26. Holiday Sundial : Ahakista, West Cork, Ireland – *Peter Meadows*. 27. Ian Wootton (obituary – *Douglas Bateman*. 28. John Wright of London and Bristol : The beginning of the scientific instrument trade in Bristol – *John Davis*. 32. The "Ugly, Decapitated, Terra Cotta Sundial" of Ruskin Park – *CNN*. 33. Sundial at the Friends' Meeting House, Brant Broughton, North

Kesteven – *John Wilson*. 34. The ‘Ingenious Beilbys’ and a Dial Made in Bristol – *Kevin Fuller*. 36. Postcard Potpourri 44 : Fritwell Manor – *Peter Ransom*.



LE GNOMONISTE, Vol. XXV, N° 2, juin. 2018 de la **COMMISSION DES CADRANS SOLAIRES DU QUÉBEC (CCSQ)** à télécharger sur le site : cadrans-solaires.scg.ulaval.ca/ Liminaire (XXV-2, juin 2018) par *André E. Bouchard*, p. 2. Le patrimoine culturel immatériel et la CCSQ (1) par *Huguette Laperrière*, p. 4. Le patrimoine culturel immatériel et la CCSQ (2) par *André E. Bouchard*, p. 6. Les lignes imaginaires et réelles par *Jasmin Gauthier*, p. 10. Les horloges astronomiques par *André E. Bouchard*, p. 12. Les écrits en gnomonique par les amis de la *CCSQ*, p. 16.



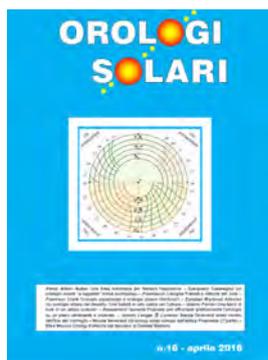
LE GNOMONISTE, Vol. XXV, N° 3, sept. 2018 de la **COMMISSION DES CADRANS SOLAIRES DU QUÉBEC (CCSQ)** à télécharger sur le site : cadrans-solaires.scg.ulaval.ca/ Liminaire (L : XXV-3, septembre 2018) par *André E. Bouchard*, p. 2. DOSSIER : cadrans solaires dans les cimetières par *A. E. Bouchard* et *J. Gauthier*, p. 4. Les cadrans solaires dans les cimetières du Québec par *André E. Bouchard*, p. 5. Un cas de restauration : celui du cimetière Forest Hill de Trois-Rivières par *Jasmin Gauthier*, p. 9. Le beau cadran de la Hatfield House (Angleterre) par *André E. Bouchard*, p. 12. Geburtstag von ta-dip! (Allemagne) par *Reinhold Kriegler*, p. 17. Un cadran intéressant au Musée de Cape Ann (à Gloucester (MA), USA) par la famille Bouchard, p. 18. André Beaulieu : mon mentor en gnomonique par *Géraldine Grenen*, p. 20. La gnomonique universelle dans les revues . . . et dans The Compendium et le Musée de Cape Ann, p. 23.



THE COMPENDIUM, Vol. 25, N° 2, juin 2018 (sur papier et CD) de la **NORTH SUNDIAL SOCIETY (NASS)** Sundials for Starters – A Preveza Sundial Mystery, *Nikolopoulos & Kellogg*, p. 1. Edward S. Ritchie’s Azimuth Circle, *Erwin Wechsler*, p. 8. Digital Bonus, p. 12. The Aquincum Fragment, *Paolo Alberi-Auber*, p. 13. Using Equinox Lines To Design Sundials, *Arthur L. Kaufman*, p. 25. Dial Without A Stile, *Maurice Kieffer*, p. 35. The Tove’s Nest, p. 39. Sundial At Sunset – New York World’s Fair, back cover.

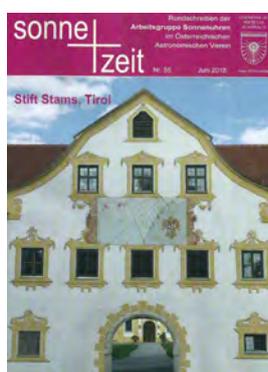


THE COMPENDIUM, Vol. 25, N° 3, sept. 2018 (sur papier et CD) de la **NORTH SUNDIAL SOCIETY (NASS)** Sundials for Starters — STEM And Sundials, *Robert L. Kellogg*, p. 1. Method Of Describing Sundials By Isosceles Triangle, *Frans van Schooten*, p. 3. A Mostly Visual Dérivation Of George Serle’s Dialing Scales, *Bill Gottesman*, p. 7. Sightings... A Painted-Wall Sundial In Perryville, Missouri, *Don Snyder*, p. 10. Basic Astronomy For Gnomonists — Part 1, *Kevin Karney*, p. 11. The Dent Diploidscope And The Iconantidiptic Meridian, *Erwin Wechsler*, p. 23. An Original Monumental Sundial, *Gianpiero Casalegno* p. 28. Reflecting Sundials, *Denis Savoie*, p. 31. The Old Sundial (poem), *Francis M. Dean* (1876), p. 38. The Tove’s Nest, p. 39. Digital Bonus, p. 40.



OROLOGI SOLARI N° 16, avril 2018, de la CGI – **Coordinamento Gnomonico Italiano** à télécharger sur le site : www.orelogisolari.eu

p. 6 : Una linea meridiana per liberare Napoleone : *Albèri Auber Paolo*. p. 16 : Un orologio solare "a cappello" ormai scomparso : *Casalegno Gianpiero*. p. 20 : Transiti e Altezze del Sole : *Caviglia Francesco*. p. 28 : Orologio equatoriale o orologio polare cilindrico ? : *Clarà Francesc*. p. 31 : Un orologio solare nel deserto. Una balata in una casba nel Sahara : *Martinez Almirón Esteban*. p. 43 : Una lama di luce in un antico oratorio : *Ferrari Gianni*. p. 51 : Proposte per affrontare graficamente l'orologio su un piano declinante e inclinato : *Gumella Alessandro*. p. 52 : Strumenti solari nordici dell'ra dei Vichinghi : *Langer Johnni e Sterza Lorenzo*. p. 66 : Gli orologi solari romani dell'antica Praeneste (2^e parte) : *Severino Nicola*. p. 79 : Orologi d'altezza dal taccuino di Daniele Barbaro : *Stocco Elsa*.
RUBRICHE : p. 88. Itinerari gnomonici : *Bosca Giovanni*. p. 100. Rassegna riviste di gnomonica. p. 111. Notizie gnomoniche. p. 115. Gnomonica nel Web. p. 116. Pubblicazioni. p. 117. Lettere alla redazione — Errata Corrige. p. 118. Quiz : *Nicelli Alberto*.



SONNE + ZEIT n° 55, juin 2018 (sur papier) **du Groupe de travail pour les cadrans solaires de l'OSTERREICHISCHE ASTRONOMICAL SOCIETY**

Ein Besuch in Annenwalde, *Walter Hofmann*, Wien : p. 4. Korrekturen an Sonnenuhren bei horizontnaher Sonne, *Kurt Descovich*, Wien : p. 6. Zum Nachdenken, Wien : p. 11. Die Meridianlinie in Châtillon-sur-Seine, *Jérôme Bonnin*, Guise (Frankreich) : p. 12. Wandvermessung, *Kurl Dúscovich*, Wien : p. 13. Tony Moss 80, *Wetter Hofmann*, Wien : p. 16. Ein Lebensabschnitt für Sonnenuhren, *Norbert Hom*, Hemmingstedt (Deutschland) : p. 18. Stift Stams und seine Sonnenuhren, *Armin Denoth*, Universität, Innsbruck : p. 20. Zum Nachdenken — die Lösung der letzten Aufgabe : p.24.

Message de Frans Maes : *De Zonnewijzerkring* et d'Éric Daled : *Zonnewijzerkring Vlaanderen* :

Chers amis gnomonistes,

Petit message pour vous faire savoir que le cercle d'étude des cadrans solaires de Flandre belge *Zonnewijzerkring Vlaanderen* a cessé la publication de son bulletin d'information *Zonnetijdingen* étant donné que le nombre d'articles présentés diminuait de plus en plus.

Afin de trouver une solution acceptable, l'association belge a contacté l'association néerlandaise qui publie son propre « Bulletin » depuis 40 ans déjà. Les deux associations ont alors décidé de joindre leurs efforts dans un nouveau bulletin d'information : « ZON & TIJD (Soleil & Temps).

Il va de soi que le fait que le néerlandais soit la langue commune des deux associations facilita ce choix, mais vous pourrez trouver un petit résumé en anglais.

De leur côté, nos amis autrichiens remarqueront certainement la similitude avec le titre de leur bulletin d'information « Sonne + Zeit ». Nous espérons qu'ils accepteront cela comme un compliment.

Salutations cordiales.



Bulletin 2018.1, n° 125, avril 2018 (sur papier) de la **Nederlandse Zonnewijzerkring** et de la **Zonnewijzerkring Vlaanderen**

Colofon, *Redactie*, p. 2. Bijeenkomsten Nederland, *Redactie*, p. 2. Voorwoord, *Hans Stikkelbroeck*, p.4. Uit het archief : Oprichting Zonnewijzerkring 11 maart 1978, *Redactie*, p.4. Kringleven 51° N, *Éric Daled*, p. 5. Van het NL-Bestuur, *Frans Maes*, p. 5. Foto-zonnewijzer, *Jacob Borsje*, p. 6. Een bolzonnewijzer uit de hobbywerkplaats, *Gerard Becker*, p. 10. Chocola ?, *Frans Maes*, p. 11. Een rondleiding langs de nieuwe NL-website, *Frans Maes*, p. 12. Birkenau, het zonnewijzerdorp, *Frans Maes*, p. 15. De invloed van de atmosferische refractie op de zonnewijzer, *Jos Pauwels*, p. 16. De analematische mozaïek-zonnewijzer van Ronse, *Éric Daled*, p. 21. Twee verticale zonnewijzers in Westerbork, *Hans Stikkelbroeck*, p. 23. Opmeting van een gevel en ontwerp van een verticale zonnewijzer, *Patric Oyen*, p. 26. Uitslag van de woordpuzzel, *Willy Leenders*, p. 28. De nieuwe puzzel : Wat doet de refractie wél?, *Frans Maes*, p. 28. Verslag van de bijeenkomst op 20 januari 2018, *Frans Maes*, p. 29. Verslag van de bijeenkomst op 24 maart 2018, *Frans Maes*, p. 31. Jaarverslag 2017 van De Zonnewijzerkring, *Frans Maes*, p. 33. Financieel verslag Zonnewijzerkring 2017-2018, *Peter de Groot*, p. 34. Contents of this issue, *Redactie*, p. 37. Over ons, *Redactie*, p. 39.



Bulletin 2018.2, n° 126, août 2018 (sur papier) de la **Nederlandse Zonnewijzerkring** et de la **Zonnewijzerkring Vlaanderen**

Colofon, p. 2. Bijeenkomsten, p. 2. Voorwoord, *Hans Stikkelbroeck*, p. 3. Van het Bestuur, *Frans Maes*, p. 4. Interessante excursie naar de collectie-Max Elskamp in Luik, *Janneke Groeneweg*, p. 5. Door het leven met een zonnewijzer op je been, *Willy Leenders*, p. 10. Zonnewijzer op een doorboorde pilaar, *Frans Maes*, p. 11. De zonnewijzers in het Deutsches Museum in München, *Lidy Bolsman*, p. 12. Een zonnewijzer zonder poolstijl, maar met honderd spijkers, *Maurice Kieffer* (vert. Willy Ory), p. 14. De Goudse oostwijzer : zonnewijzer of stroopwafel?, *Frans Maes*, p. 18. De Vlaamse kapucijnen als zonnewijzerontwerpers en-makers (3), *Éric Daled*, p. 20. Zonnewijzers in Nederland, *Frans Maes*, p. 23. Zonnewijzers in Vlaanderen, *Patric Oyen*, p. 29. Puzzel : Zon op en onder, *Frans Maes*, p. 31. Contents of this issue, *Redactie*, p. 33. Over ons, p. 35.

↪ 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 le poids.)

Réalisation : **Dominique Collin** (mise en forme & traitement L^AT_EX) et **Philippe Sauvageot**.

Informations arrêtées en octobre 2018.

CADRAN-INFO

publié par la Commission des Cadres Solaires (CCS) de la Société Astronomique de France (SAF) est une revue spécialisée dans l'étude et la présentation des instruments de mesure du temps tel que : les cadrans solaires, les astrolabes et nocturlabes.

CADRAN-INFO regroupe la majorité des présentations faites lors des deux réunions annuelles de la CCS ainsi que des articles reçus en cours d'année. La revue est adressée gracieusement aux associations gnomoniques avec lesquelles nous sommes en relation en Allemagne, Angleterre, Autriche, Belgique, Canada, Espagne, Hollande, Italie, Japon, USA, Suisse.

CADRAN-INFO est devenu au cours des années UNE référence en matière d'études, de techniques, de méthodes, pour certaines totalement inédites. La liste des articles publiés depuis l'origine est fournie sur demande.

CADRAN-INFO paraît en mai et en octobre sous forme : papier (N&B ou en couleurs), numérique avec annexes en bonus (CD ou téléchargement).

Pour toute commande, abonnement... si vous êtes membre de la CCS contacter Ph. Sauvageot sinon adressez-vous au secrétariat de la SAF :

secretariat@saf-astronomie.fr

Ph. Sauvageot

Président de la commission des cadrans solaires

- ◆ 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 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 après publication.
- ◆ Les articles⁵ sont à envoyer à Ph. Sauvageot par mail ou sur CD-Rom/DVD PC (sous format : .doc, .docx, .odt, Excel *ET* sous PDF), éventuellement sur papier.

5. Police : « **Times New Roman** », taille : 12, interligne : simple, marges : 2,5 cm avec en-tête et pied de page. Pour les formules ne pas utiliser « symbole » mais insertion « caractères spéciaux » sous Times New Roman.

- Abd-al-Rahman al-Sufi, 82
 Amridil (Maroc), 33
 Analemme (courbe en huit), 197
 Andalo di Negro, 71
 Angelicus, 179
 Apian, Petrus, 12
 Arnault, H., 54
 Ascension droite, 74
 Astrolabe, 67–85
 médiévaux européens, 81
 maghrébo-andalous, 78, 80
 mulsumans orientaux, 81
 Azille (monastère), 86
- Baron de Zach, 94
 Borchardt, 215
 Borelli, A., 82
 Bosler, J., 214
 Boussonville, Manfred, 193
 Bradley, James, 95, 106
 Brentjës, Sonja, 82
- Cadran solaire
 Église de Landévant (Morbihan), 140
 al Quantara (musée de Berlin), 149
 al Quantara (musée de Berlin), 147
 Annecy (du frère Arsène, 1874), 194
 Cadran horizontal à référence (C.H.A.R.), 151–174
 Cadran incliné déclinant, 151–174
 Cadran lunaire, 178–180
 Cadran vertical déclinant, 151–174
 Cadrans de C. Gahon, 202, 203
 Château Thurant (Alken, Allemagne, 1725), 194
 Chapelle Saint-Samson, 140
 d’Achaz, 216
 de B. Scott, 111
 Église de Saint-Point-Lac (Doubs), 196
- Hôtel de *Marciana Marina* (île d’Elbe), 138
 islamique marocain, 33
 Le Turquet, 11
 Méridienne, 92
 Maison Napoléon (île d’Elbe), 135
 Monastère d’Azille, 86
 Multiple en étoile (Alken, Allemagne, 1725), 194
 Pantocosme, 47–66
 Pont-l’Abbé, 140
 Saint-Crépin (atelier Acacia), 196
- Calendrier
 civil, 70
 grégorien, 69
 julien, 69
 zodiacal, 70
 Cassini, Jacques, 105
 Cassini, Jean-Dominique, 93
 Clavius, Christophe, 100
 Conservatoire des Arts et Métiers, 111
 Courbes de prière
 Asr, 207, 208
 Zohr, 207, 208
 Cues, Nicolas de, 11
- D’Alembert, Jean Le Rond, 93
 Danti, Egnazio, 13
 Dekker, Elly, 67, 81
 Delambre, Joseph Jean-Baptiste, 109
 Drecker, Joseph, 56
 Duvaucel, 105
- Elbe, île d’, 134, 136
 Elskamp, Max, 70
 Équinoxe de printemps, 67, 68
 Eratosthène, 109
 Euler, Léonard, 94, 98, 108
 Ezéchias, 214
- Ferrari, Gianni, 45
 Flammarion, Camille, 214
 Flamsteed, 93, 98
 Flavius, Joseph, 215
 Francon de Pologne, 11
- Fusoris, Jean, 54
 Günther, Robert T., 67
 Galandius, François, 48
 Gassendi, 98
 Gaubil, 109
 Gibbs, Sharon, 72
 Globe céleste, 82
 Godefroy, Frédéric, 14
 Grandjean de Fouchy, 105
 Grimaldi, 94
 Guerbabi, Ali, 45
- Halley, Edmond, 98
 Hérodote, 93
 Hollander, Raymond D’, 76
 Honorin, Victoire, 181
- Isaïe, 214
- Jour
 astronomique, 69
 civil, 69
 Juvisy, 215
- kasbah (d’*Amridil*, Maroc), 33
 Kepler, Johann, 68
 Kovalesky, Jean, 192
 Kovalevsky, Jean, 192
 Kunitzsch, Paul, 76
- La Condamine, 105
 La Hire, 93, 107
 Lagrange, Joseph Louis, 95, 108
 Lalande, Jérôme de, 98, 106, 108, 112
 Langlois, Claude, 99
 Languet de Gergy, Jean-Baptiste, 100
 Laplace, Pierre Simon, 95, 109
 Le Gentil, 105
 Le Monnier, Pierre Charles, 92–110
 Longitude
 du périhélie, 67, 68
 écliptique, 74
 Louville, Jacques-Eugène d’Allonville de, dit *le Chevalier de*, 92, 107
- Majax, Gérard, 214

- Malcotius, [54](#)
 Maurolycus, [60](#)
 Médiation, [75](#)
 Méridienne
 de Cassini, [109](#)
 de S^t-Sulpice, [109](#)
 de San Petronio (Bologne), [94](#),
 [105](#), [108](#)
 de Santa Maria del Fiore (Flo-
 rence), [100](#)
 Michel, Henri, [54](#), [67](#)
 Morgard, Noël-Léon, [47](#)
 Morisson, James E., [54](#)
 Musée
 Ägyptisches Museum de Berlin,
 [145](#)
 Musée
 Adler Planetarium & Astronomy
 Museum (Chicago), [72](#), [80](#)
 Museum of History of Science
 (Oxford), [79](#)
 Time Museum (Rockford, USA),
 [51](#), [72](#)
 Newton, Isaac, [68](#)
 Nuñez, Pedro, [215](#)
 Oued Elhejjaj, [33](#)
 Oughtred, William, [111](#), [112](#)
 Ozanam, Jacques, [112](#)
 Pasini, Claudio, [215](#)
 Picard, Jean, [98](#), [107](#)
 Pingree, D., [72](#)
 Pologne, Francon de, [11](#)
 Poulle, Emmanuel, [11](#), [67](#)
 Précession, [74](#), [82](#)
 Ptolémée, [109](#)
 Ptolémée, [82](#)
 Pythéas, [93](#), [109](#)
 Qāsim ‘Alī Qā’inī, [79](#)
 Rectangulus (instrument), [12](#)
 Régiomontanus, [12](#)
 Regulus, [74](#)
 Riccioli, G.-B., [94](#)
 Richer, [98](#)
 Rohr, R. R. J., [215](#)
 Saint-Sulpice, [92](#)
 Schöner, Johann, [67](#)
 Schissler, C., [216](#)
 Schjellerup, H. F. C. F., [82](#)
 Scott, Bernard, [111](#)
 Servandoni, G. N., [99](#)
 Solla Price, Derek J., [78](#)
 Spica, [74](#)
 Spinoza, [215](#)
 Stautz, B., [76](#)
 Stoeffler, Johann, [70](#)
 Strabon, [93](#)
 Sully, Henri, [97](#)
 Système
 géocentrique, [68](#)
 héliocentrique, [68](#)
 Thābit ibn Qurra, [205](#)
 Torode, R. K. E., [67](#)
 Torquetum, [11](#)
 Tuillier, [105](#)
 Turner, A. J., [51](#), [72](#)
 Turner, Gérard l’E., [67](#)
 Tycho Brahe, [98](#)
 Ulugh Begg, [82](#)
 Ulugh Begh, [109](#)
 Vauzelard, [112](#)
 Verdun, Bernard de, [11](#)
 Volvelle, [65](#)
 Wallingford, Richard de, [11](#)
 Wallot, J. W., [105](#), [107](#)
 Webster, Roderick & Marjorie, [72](#)
 Ximenes, L., [108](#)

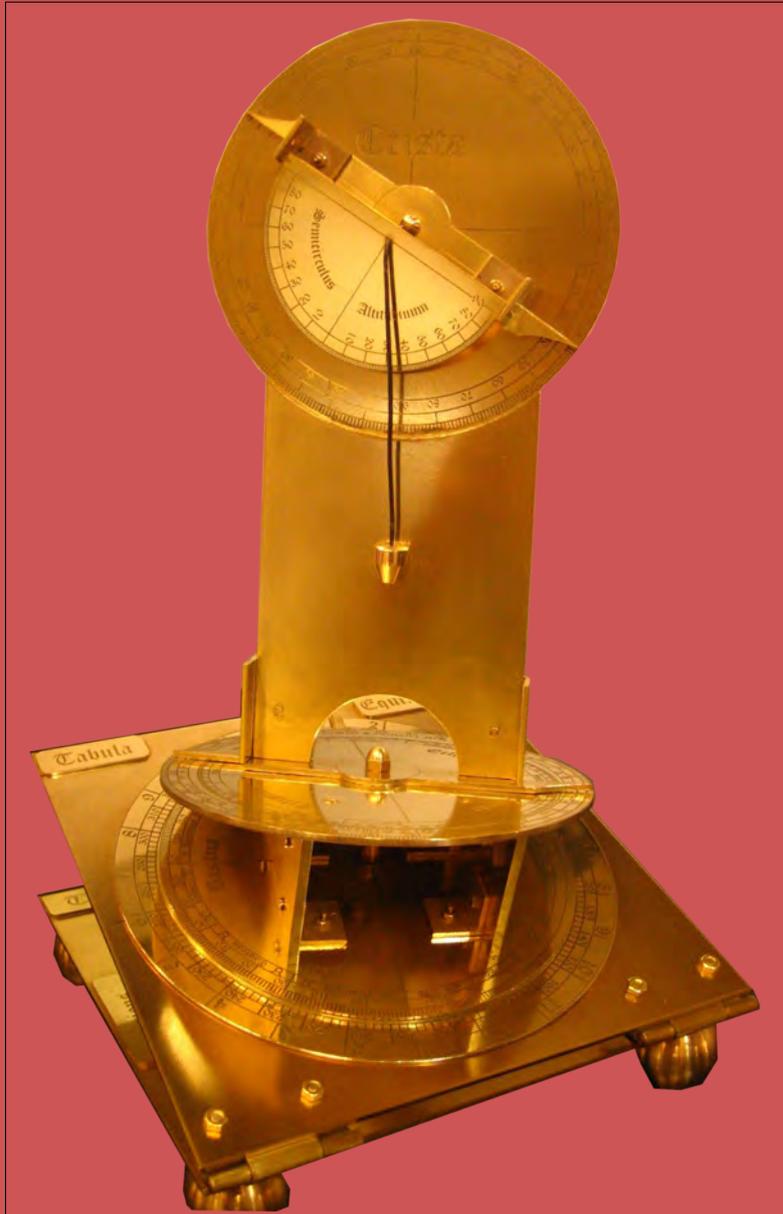


Photo : B. Alix

Le Torquetum (reconstitution)