



HAL
open science

Un astrolabe-quadrant “ français ” d’Ahmed Ziya

Denis Savoie

► **To cite this version:**

Denis Savoie. Un astrolabe-quadrant “ français ” d’Ahmed Ziya. Cadran Info, 2022, pp.76-97. hal-03955203

HAL Id: hal-03955203

<https://hal.science/hal-03955203>

Submitted on 3 Feb 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L’archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d’enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Un astrolabe-quadrant « français » d'Ahmed Ziya

par Denis Savoie¹

MOTS CLEFS

Astrolabe-quadrant ;
abaque ; heure turque ;
prières ottomanes.

RÉSUMÉ

En 1923, Camille Flammarion reçut comme présent de l'astronome turc Ahmed Ziya, un astrolabe-quadrant calculé pour l'Observatoire de Juvisy. Cet instrument rare, de facture ottomane, présente des courbes complexes liées à la détermination des heures de prières. L'étude suivante analyse dans le détail cet astrolabe-quadrant inédit.

©2021 CC/SAFS. Publié par la CCS. Cet article est publié sous licence CC BY-NC-ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

En septembre 1988, la Cité des Sciences et de l'Industrie² a acheté auprès d'un marchand parisien réputé d'instruments scientifiques, un astrolabe-quadrant de 22 cm de rayon et épais de 2 cm, qui fut offert en 1923 à Camille Flammarion (1842-1925) par l'astronome turc Ahmed Zia, plus connu sous le nom de Ahmed Ziya Akbulut (1869-1938) qui travailla à l'observatoire de Kandilli près d'Istanbul. Ahmed Ziya fut non seulement le dernier *mwwaqit*³ de l'empire ottoman mais il fut aussi peintre et calligraphe, ce qui explique la finesse et la beauté avec laquelle il a peint à l'encre le présent astrolabe-quadrant sur un bois laqué en l'ornant d'un décor floral (fig. 1 page suivante). L'instrument est daté et signé de 1923, avec à côté une indication où on semble lire « *nomb 47* » signifiant peut-être que c'est le quarante-septième instrument construit par Ahmed Ziya.

Celui-ci entra à la Société Astronomique de France en 1922 et réalisa l'année suivante un instrument, uniquement en français et calculé pour l'Observatoire de Juvisy, comme témoignage d'admiration pour Camille Flammarion, accompagné d'une dédicace⁴ (fig. 2 page 78). Cet

1. Universcience et Observatoire de Paris.

2. L'instrument est resté stocké dans les réserves de l'établissement pendant 33 ans. Il n'a jamais été étudié et ne semble pas connu dans le fond Flammarion. L'instrument a été acheté à la librairie Alain Brieux.

3. Astronome chargé des heures de prières dans une mosquée.

4. Cf. *infra* sur la détermination de la latitude de tracé de l'instrument. Voir *L'Astronomie*, Bulletin de la Société Astronomique de France, 1922, p. 512. Ahmed Zia envoya à Camille Flammarion l'année de son adhésion deux ouvrages en turc ainsi qu'une communication sur la lumière zodiacale, la revue *L'Astronomie* le qualifiant de

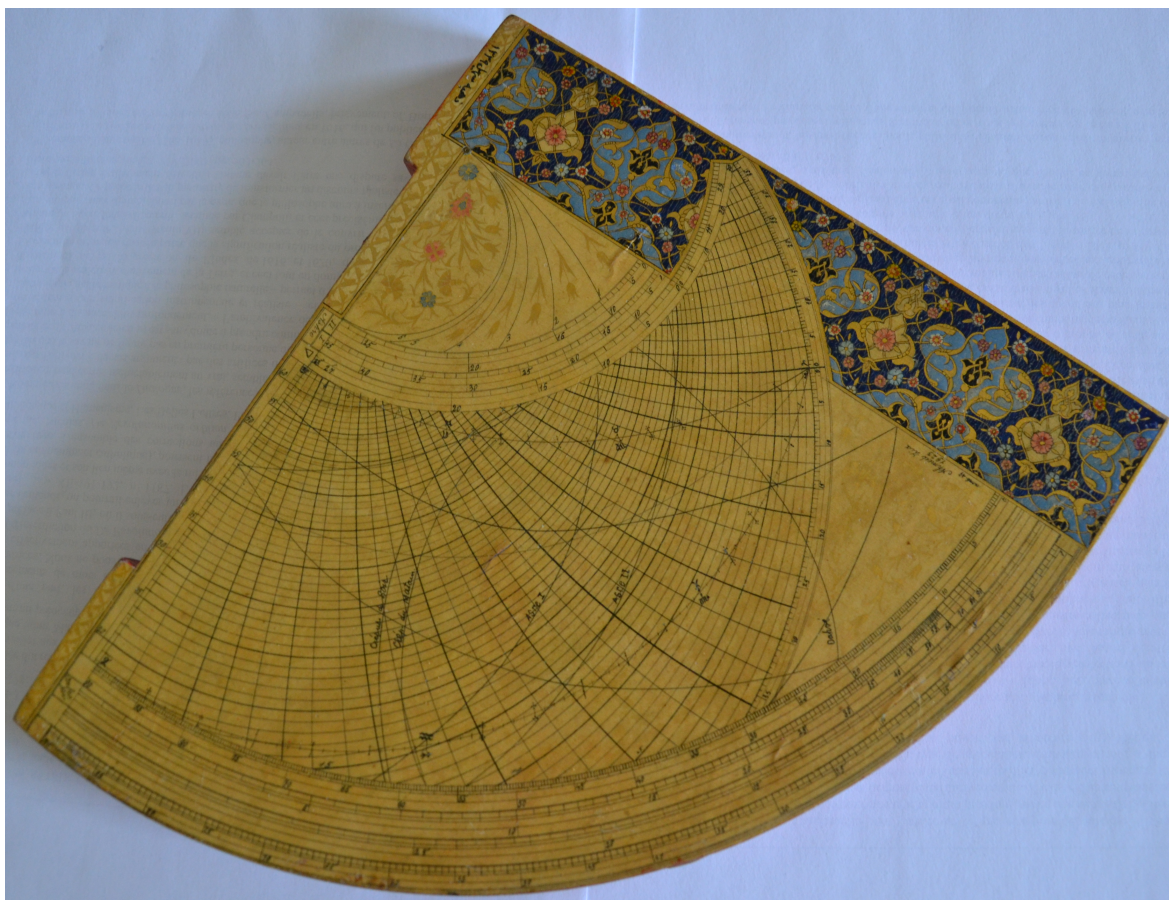


FIGURE 1 – L’astrolabe-quadrant d’Ahmed Ziya offert à Camille Flammarion en 1923 et calculé pour l’Observatoire de Juvisy.

astronome turc était un spécialiste des astrolabes-quadrants : il leur avait consacré un ouvrage en 1921, suivi en 1929 d’un ouvrage sur les cadrans solaires⁵.

Si l’astrolabe-quadrant latin est un instrument très rare dans les collections muséales, la production ottomane depuis le XVII^e siècle est par contre beaucoup plus importante⁶. En fait, on ne dispose pas d’inventaire véritable et on a sans doute sous estimé la production ottomane

« Professeur à l’École des Beaux-Arts de Stamboul ». Flammarion avait 81 ans lorsqu’il reçu en cadeau l’astrolabe-quadrant. L’année 1923 correspond à la proclamation de la république en Turquie, le sultanat ayant été aboli un an plus tôt.

5. Il est l’auteur de l’ouvrage *Günes Saatleri* [cadrans solaires] écrit en 1929 (réédité en 2010) et du cadran solaire de l’actuel musée des calligraphies à Istanbul : voir Kemal Özdemir, *Ottoman Clocks and Watches*, Istanbul, 1993, p. 56. Ahmed Ziya est aussi l’auteur, sous le nom de Ahmed Ziya bin Riza, en 1921, de *Rubu Tahtasi, Kullanım Kilavuzu*, ouvrage consacré à l’astrolabe-quadrant (réédité en 2010). Ces deux rééditions, en turc, sont accompagnées de commentaires et d’exemples modernes de MM. Atilla Bir, Mustafa Kaçar, Sinasi Acar, ainsi que d’une biographie illustrée de l’auteur. Mais on ne trouvera pas dans l’ouvrage consacré à l’astrolabe-quadrant de données relatives aux courbes de prières autres que les classiques.

6. Sreeramula Rajeswara Sarma, *A Descriptive Catalogue of Indian Astronomical Instruments*, 3^e édition, Düsseldorf, 2021, p. 4141-4142.

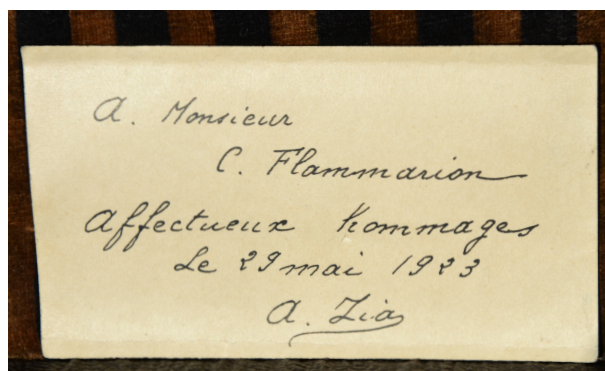


FIGURE 2 – Photo de la dédicace.

au tournant des XIX^e et XX^e siècles^{7,8}, d'autant que l'astrolabe-quadrant est plus simple à fabriquer et moins onéreux qu'un astrolabe planisphérique. L'instrument réalisé par Ahmed Zia n'est pas fait pour l'observation mais pour le calcul, avec une fonction religieuse en lien avec des spécificités ottomanes comme en témoignent les nombreuses courbes de prières des deux faces qui rappellent aussi l'usage d'un double système de décompte des heures en Turquie jusque dans les années 1920. Son usage suppose de très bonnes connaissances en astronomie mais aussi une familiarité avec la science du *Miqat* que peu de personnes possédaient.

1 Face astrolabe

Rappelons très brièvement que l'on fait remonter l'astrolabe-quadrant à l'astronome et mathématicien judéo-provençal Profatius (1236-1304) qui a réduit à un quart de cercle l'astrolabe planisphérique classique (araignée, tympan) par un double rabattement. L'instrument ne comporte plus de partie mobile et s'utilise avec un fil lesté muni d'une perle coulissante⁹.

Celui construit par Ahmed Zia est de facture ottomane¹⁰ même si ses indications sont en français : l'astrolabe-quadrant proprement dit occupe un large espace sous un quadrant horaire

7. Voir Feza Günergün, Gaye Danisan, Atilla Polat, « Measuring Altitudes with an Alla Franca Instrument », p. 55-79 dans *Scientific Instruments between East and West*, Brill, 2019. Gaye Danisan, « A Sixteenth-Century Ottoman Compendium of Astronomical Instruments », p. 1-15.

8. Francis Maddison, « Observatoires portatifs : les instruments arabes à usage pratique », *Histoire des sciences arabes*, vol. 1, dir. Roshdi Rashed, 1997, p. 167-170. En France, aux alentours d'une dizaine d'exemplaires sont conservés dans des musées (musée des antiquités de Rouen (latin), musée Saint-Jean à Angers (latin), BNF (marocain), IMA (quatre instruments marocains), musée National de la Marine (deux instruments dont un perse)).

9. Les deux ouvrages suivants restent des classiques incontournables, bien que le second soit largement plus complet que le premier : Henri Michel, *Traité de l'astrolabe*, Paris, 1947, p. 123-128; Raymond D'Hollander, *L'Astrolabe, Histoire, théorie, pratique*, éd. Institut Océanographique, 1999, p. 215-233. On consultera également avec profit la mise au point historique de Emmanuel Poule, « Le Quadrant nouveau médiéval, I », *Journal des Savants*, 1964, n° 2, p. 148-167.

10. Sur les astrolabes-quadrants ottomans, voir René R. J. Rohr, Louis Janin, « Deux astrolabes-quadrants turcs », *Centaurus*, vol. 19, n° 2, 1975, p. 108-124. Les données techniques de cet excellent article reposent en grande partie sur Joseph Würschmidt : « Die Schriften Gedosi über die Höhenparallelen und über die Sinustafel », *Sitzungsberichte der Physikalisch-Medizinischen Sozietät zu Erlangen*, vol. 60, 1928, p. 127-154. Gedosi (al-Gedusi) était un astronome ottoman constructeur d'astrolabes-quadrants dans la seconde moitié du XIX^e siècle, qui a écrit un traité en 1893/1894 traduit par Joseph Würschmidt et dont il donne des exemples d'utilisation. Du même auteur : « Ein türkisch-arabisches Quadrant-Astrolab », *Archiv für die Geschichte der Naturwissenschaften und der Technik*, Leipzig, 1918, p. 167-181. On consultera également David King, « Astronomie et société musulmane : qibla, gnomonique, miqat », *Histoire des sciences arabes*, vol. 1, dir. Roshdi Rashed, éd. Seuil, Paris, 1997, p. 173-215.

à heure inégales. Un décor floral orne la partie latérale et on lit en arabe à son extrémité « A été doré par Souhayl 1339 », ce qui nous place en 1920-1921. Comme l'instrument est aussi signé « Ahmed Zia 1923 », on peut penser qu'il a été tracé un peu avant qu'il soit doré par Souhayl, puis peint par Ahmed Zia en 1923.

1.1 Le quadrant horaire

Le quadrant horaire qui occupe la partie supérieure de l'instrument, appelé *quadrans vetus* (quadrant ancien) est une adaptation du diagramme des heures inégales, abaque fréquent au dos des astrolabes planisphériques (fig. 3). Bien que seulement rigoureusement exact aux équinoxes¹¹, ce quadrant horaire nécessite d'être réglé chaque jour à la hauteur méridienne du Soleil (que l'on affiche avec le fil sur le grand limbe de l'astrolabe-quadrant) avec une perle coulissante que l'on place à l'intersection du fil et de la ligne inégale 6 (midi solaire). On vise

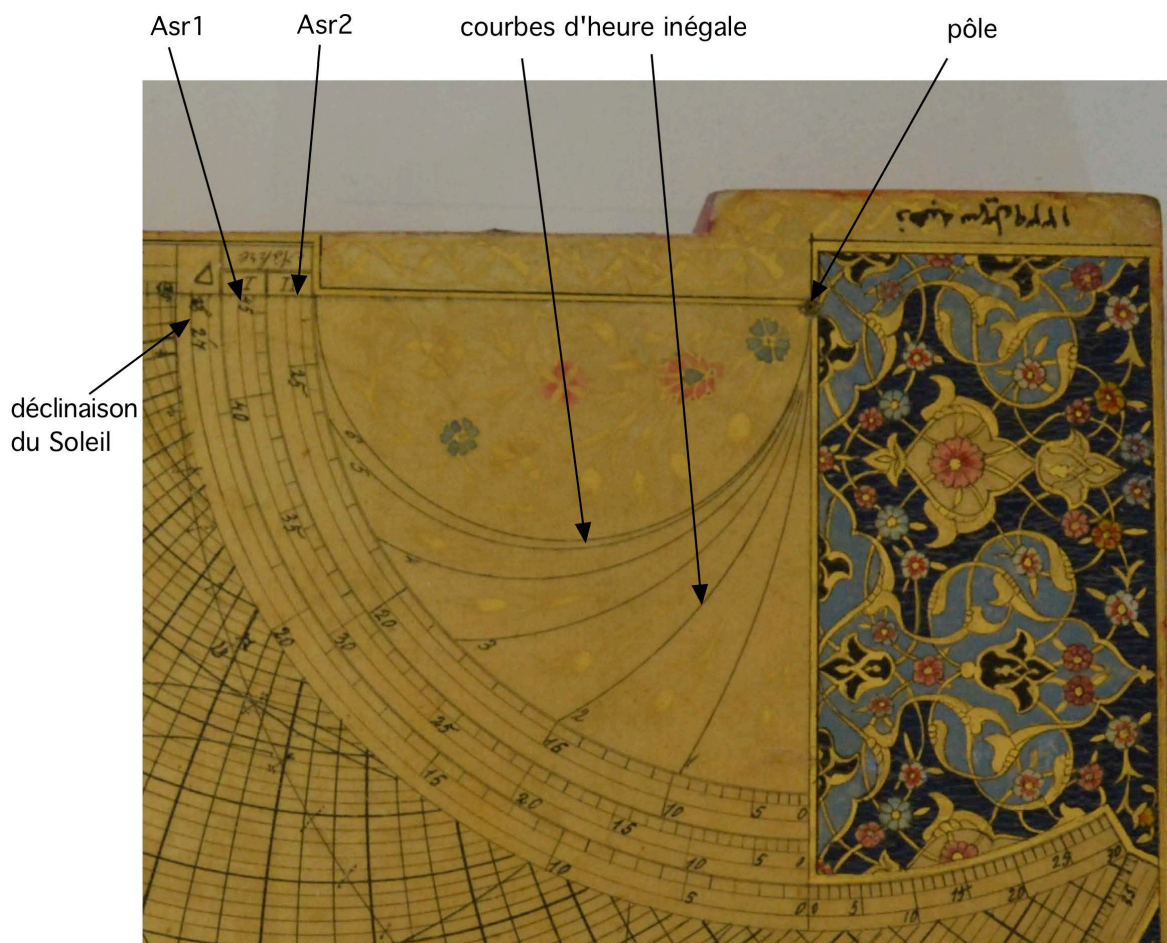


FIGURE 3 – Détail du quadrant horaire : utilisé avec un fil lesté, il indique l'heure inégale, la hauteur du Soleil lors des prières *Asr* ainsi que la déclinaison du Soleil en fonction de la date. Le point d'implantation du fil coïncide avec le pôle de l'instrument.

ensuite le Soleil (si les pinnules existent, ce qui n'est pas le cas ici) ; la perle du quadrant indique

11. Sur le tracé et le calcul d'erreur de quadrant, voir Denis Savoie, « Quadrans vetus : cadran portable médiéval », *Cadran Info*, n° 30, octobre 2014, p. 93-96.

alors l'heure inégale, quelle que soit la latitude. Les six parties d'arc de cercles sont numérotées de 1 à 6 ; cette survivance de l'heure inégale au début XX^e siècle en Turquie est peu documentée et semble résulter de l'usage ancien remontant aux premières horloges à échappement qui, comme au Japon, indiquaient les heures inégales¹².

Sous le tracé on trouve trois limbes notés « *Ashre II et I* » et le symbole Δ avec l'indication 23° 27' qui correspond à l'obliquité adoptée. Les deux limbes *Ashre II* (gradués de 0° à 26;5) et *Ashre I* (gradués de 0° à 45°) donnent la hauteur du Soleil respectivement lors du deuxième et du premier *Asr* lorsqu'on affiche avec le fil la hauteur méridienne sur le grand limbe¹³ : par exemple au solstice d'été, on a $h_m = 64;7$: d'où $h_{\text{Ashre II}} \approx 22^\circ$ et $h_{\text{Ashre I}} \approx 34^\circ$. Le calcul de ces deux limbes est simple puisqu'il s'agit en quelque sorte d'un convertisseur-rapporteur entre hauteur méridienne et hauteur à *Asr* que l'on obtient par :

$$\tan h' = \frac{\tan h_m}{1 + \tan h_m} \quad \text{pour Asre I}$$

et

$$\tan h' = \frac{1}{2 + \cot h_m} \quad \text{pour Asre II}$$

Quant au limbe noté Δ , il indique la déclinaison du Soleil lorsqu'on affiche avec le fil la longitude écliptique sur un des deux arcs de cercle munis des symboles zodiacaux. Cette échelle, graduée tous les 5° de 0° à 23° 27', transforme donc une longitude écliptique en déclinaison par l'application de la formule $\sin \delta = \sin 23^\circ 27' \sin \lambda$. L'échelle se prolonge sur la droite de l'instrument, graduée de 0° à 30°.

1.2 L'astrolabe-quadrant

L'astrolabe-quadrant comporte le réseau classique des astrolabes (fig. 4 page ci-contre) : équateur, tropiques du Cancer et du Capricorne, écliptique divisée en deux arcs de cercle dont l'origine, le point vernal, est placé sur l'horizon au point cardinal Est-Ouest, également origine des azimuts. Les longitudes écliptiques se comptent de 0° à 90° depuis le point vernal vers l'intersection du tropique du Cancer avec le méridien ; de 90° à 180° de ce dernier point vers le point vernal. Pour les longitudes de 180° à 270°, on compte depuis le point vernal vers le tropique du Capricorne jusqu'à l'intersection avec le méridien ; puis de là jusqu'au point vernal pour les longitudes de 270° à 360°. L'écliptique est divisée en décades avec des symboles zodiacaux tous les 30°.

Précisons que l'instrument s'utilise avec un fil lesté et une perle coulissante : le fil est fixé à l'angle supérieur droit sur le méridien où sont fixées deux cales en relief. On tend le fil et on place la perle sur l'écliptique à la date considérée (donnée ici en fonction de la longitude) ; la perle décrit donc sur l'astrolabe-quadrant un arc de cercle et on lit sur le limbe l'angle en

12. Voir Klaus Kreiser, « Les tours d'horloge ottomanes : inventaire préliminaire et remarques générales », *Les Ottomans et le temps*, Brill, Leiden-Boston, 2012, p. 61-74. Voir les deux articles suivants, parus dans *Science between Europe and Asia, Historical studies on the transmission, adoption and adaptation of knowledge*, Boston Studies in the Philosophy of Science, vol. 275, Springer, 2011 : Atilla Bir, Sinasi Acar, Mustafa Kacar, "The Clockmaker Family Meyer and Their Watch Keeping the alla turca Time", p. 125-136. Takehiko Hashimoto, "The Adoption and Adaptation of Mechanical Clocks in Japan", p. 137-149.

13. La prière de l'après-midi est *Asr* : elle commence lorsque l'ombre d'un gnomon de hauteur a est égale à la longueur de son ombre méridienne augmentée de sa propre longueur, donc lorsque le Soleil atteint au-dessus de l'horizon la hauteur h donnée par : $\tan h = \frac{1}{1 + \tan(\varphi - \delta)}$ où φ est la latitude du lieu et δ la déclinaison du Soleil. Le deuxième *Asr* correspond à l'accroissement de l'ombre égal au double de la hauteur du gnomon, soit $\tan h = \frac{1}{2 + \tan(\varphi - \delta)}$

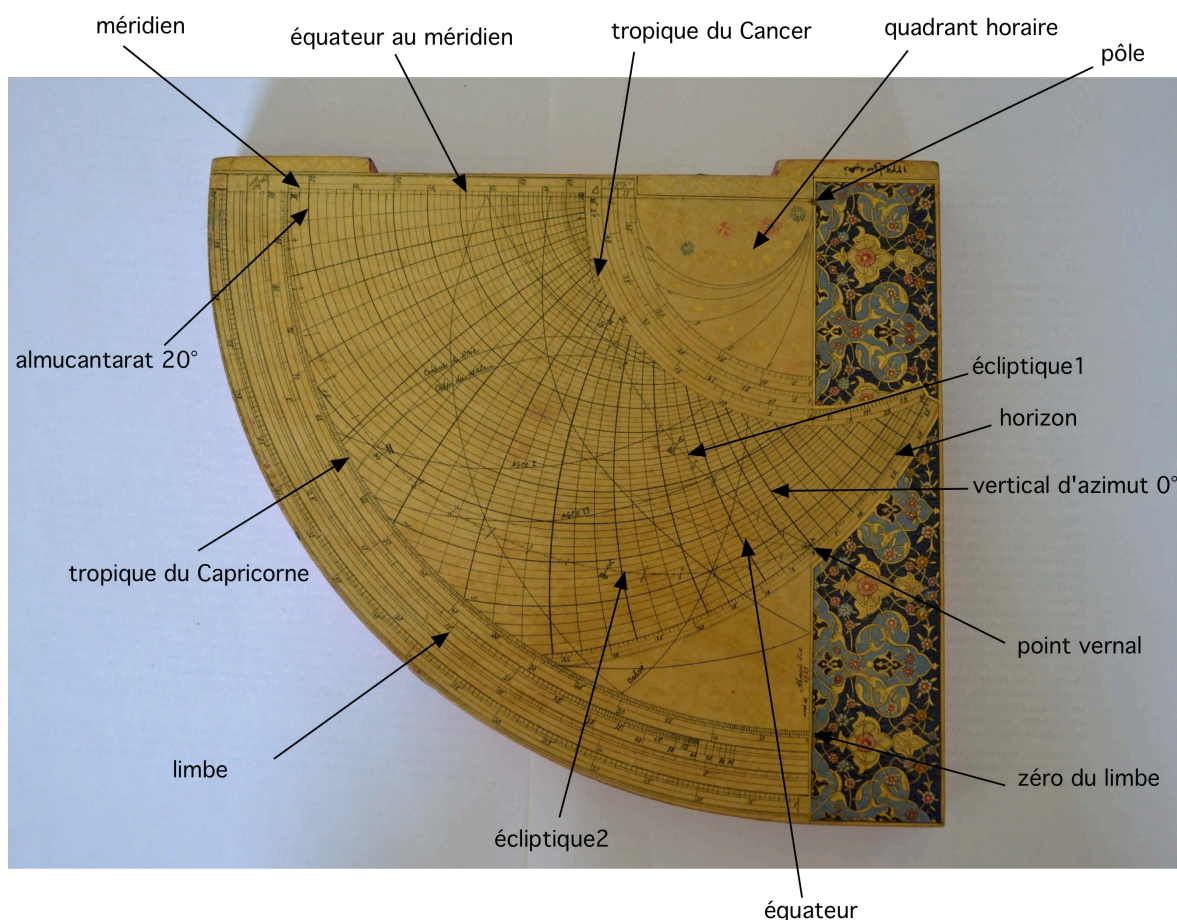


FIGURE 4 – On a indiqué ici les éléments astronomiques traditionnels de l’astrolabe-quadrant. Le rabattement sur un secteur de 90° comprend les courbes qui s’utilisent toutes avec un fil muni d’une perle, dont le réglage se fait sur les deux branches de l’écliptique en fonction de la date.

degrés relatif à une prière ou une coordonnée du Soleil, par l’intersection du fil et d’une courbe. Rappelons que toutes les courbes de l’astrolabe-quadrant sont des portions de cercle.

Le méridien est gradué de 20° à 60° tous les 1° avec une subdivision tous les 5°. La hauteur de l’équateur céleste sur le méridien est de $\approx 41^{\circ},3$, d’où une latitude de $48^{\circ},7$ soit $48^{\circ} 42'$ ($\varphi = 90^{\circ} - h$) : c’est très sensiblement la latitude de l’Observatoire de Camille Flammarion à Juvisy (latitude $48^{\circ} 41' 37''$) pour lequel cet astrolabe-quadrant a été calculé. On vérifie sur le méridien que le point le plus bas (solstice d’hiver, intersection avec le tropique du Capricorne) à cette latitude correspond à une hauteur de $\approx 17^{\circ},8$ et le point le plus haut (solstice d’été, intersection avec le tropique du Cancer) à une hauteur de $64^{\circ},7$, l’obliquité étant de $23^{\circ} 27'$ comme cela est indiqué dans une des échelles du quadrant horaire.

Les almucantarats sont tracés tous les 1° avec un renforcement des cercles tous les 5° ; les verticaux d’azimut sont tracés tous les 3°, avec un renforcement des courbes tous les 9°. Les azimuts sont comptés depuis le point cardinal Est-Ouest sur l’horizon (amplitude *ortive* depuis le point Est, amplitude *occise* depuis le point Ouest), lequel se prolonge vers le bord du quadrant jusqu’à l’intersection du tropique du Cancer avec la graduation $\approx 37^{\circ}$, laquelle correspond à l’azimut A du lever-coucher du Soleil au solstice d’été, obtenu par $\sin A = \frac{\sin 23^{\circ} 27'}{\cos 48^{\circ} 42'}$.

L'intersection de l'horizon avec le tropique du Capricorne se fait aussi pour une valeur proche de 37° (lever-coucher au solstice d'hiver).

Sept courbes de prière sont indiquées en français : « crépus du soir », « crep. du matin » [sic], « *Asre I* », « *Asre II* », « *Dahvé* » (fig. 5). Précisons que depuis des siècles, les Turcs

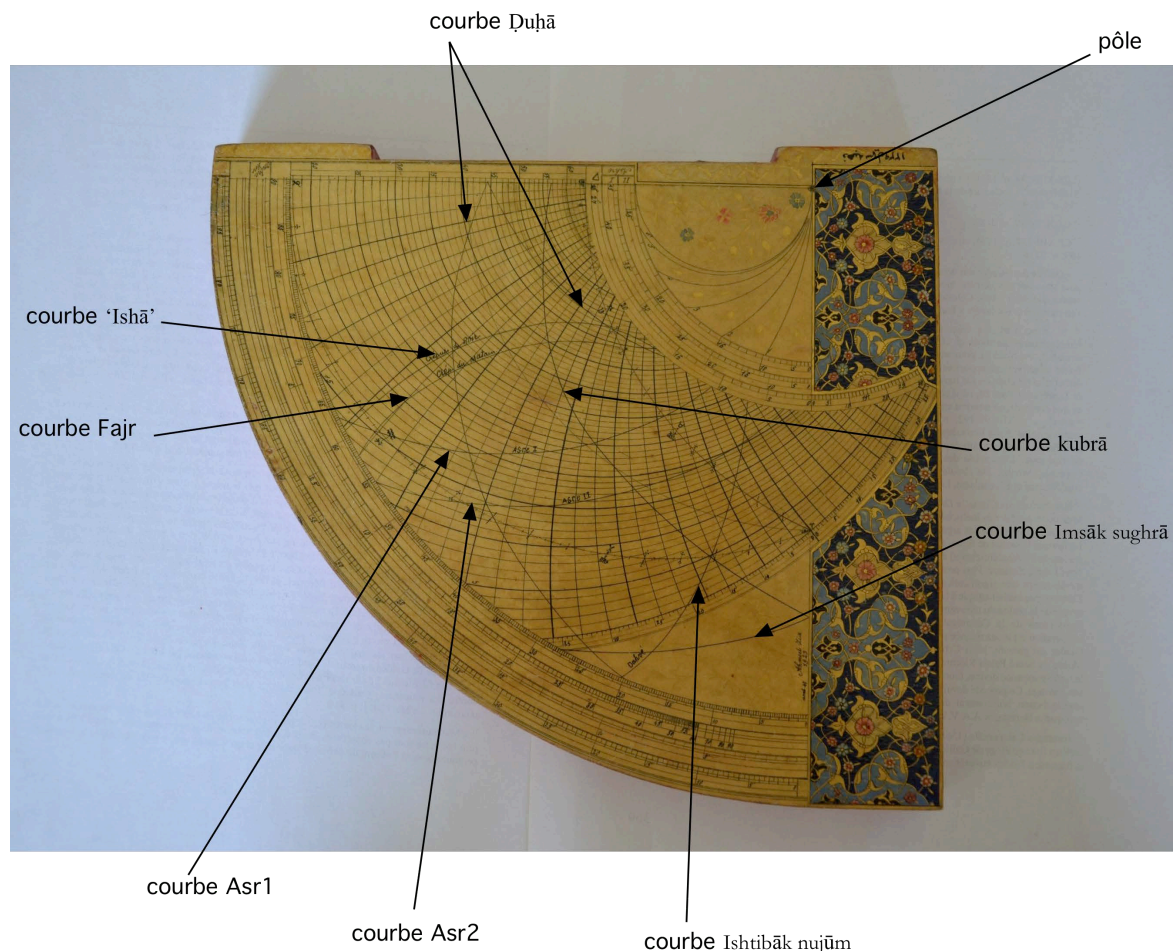


FIGURE 5 – On a indiqué ici les sept prières dont l'heure peut être déterminée en fonction de la date. La position des courbes, dont certaines possèdent un point de rebroussement, est due en partie au système de décompte des heures en Turquie depuis le coucher du Soleil.

comptent les heures depuis le coucher du Soleil où il est alors 12 h, un peu comme dans le système des heures italiques : le jour est compté en deux fois 12 heures, avec l'ajout d'un mot pour distinguer si cela se rapporte à la nuit ou au jour. Depuis le XIX^e siècle, ils utilisent parallèlement le système de décompte des heures « à la française », sous-entendu depuis midi¹⁴, compté de 0 h à 24 h. Ce n'est que le 25 décembre 1925 lors des réformes khémalistes, que la Turquie abrogea son ancien système compliqué de décompte des heures et adopta le système de décompte des heures depuis minuit comptées de 0 h à 24 h.

14. Voir François Georgeon, « Temps de la réforme, réforme du temps. Les avatars de l'heure et du calendrier à la fin de l'empire ottoman », *Les Ottomans et le temps*, op. cit., p. 241-279. Cette coexistence des heures « à la Turquie » et « à la Franque » dans la vie civile était connue pour être la cause de nombreux problèmes : voir le texte du poète Ahmet Hasım, « Le temps musulman », *Les Ottomans et le temps*, op. cit., p. 371-373. Rappelons également que c'est en 1917 que la Turquie a adopté le calendrier grégorien.

On passe de l'heure classique F (« à la française », qui est ici du temps solaire vrai lu sur l'astrolabe-quadrant compté de 0 h à 24 h) à l'heure turque T (en temps solaire vrai, compté en deux fois 12 h) en faisant (fig. 6 page suivante) :

- avant le coucher du Soleil (dans la journée) : $T = F - H_0/15$ où H_0 est l'arc semi-diurne (cf. *infra*). Exemples : supposons que l'on soit à Istanbul ($\varphi = 41^\circ$) au solstice d'hiver ($\delta = -23^\circ,433$). Le Soleil se couche à 16 h 31 m ($H_0 = 4$ h 31 m) en heure française : à cet instant, il est en heure turque 12 h. Lorsqu'il est midi heure française, il est 7 h 29 m heure turque (de jour). Et lorsque le Soleil se lève, il est 7 h 29 m heure française et 2 h 58 m heure turque (de nuit). On peut avoir une heure turque de nuit avec le Soleil levé (cf. *infra* au solstice d'été).

Si H_T est l'angle horaire (en degrés) correspondant à l'heure turque et H l'angle horaire astronomique, on a donc : $H_T = 180^\circ + H - H_0$.

- après le coucher du Soleil (la nuit) : $T = F - H_0/15 \pm 12$ h. On prend -12 h si l'heure française est comprise entre l'heure du coucher et minuit. On prend $+12$ h si l'heure française tombe après minuit. Exemples : à Istanbul au solstice d'été ($\delta = +23^\circ,433$), le coucher du Soleil a lieu à 19 h 29 m ($H_0 = 7$ h 29 m) : à cet instant, il est 12 heures turques. À 23 h heure française, il est donc en heure turque 3 h 31 m. À 2 h du matin heure française, il est 6 h 31 m heure turque. Au lever du Soleil, qui a lieu à 4 h 31 m heure française, il est en heure turque 9 h 02 m. A 7 h 29 m heure française, il est 0 h heure turque soit 12 h.

L'astrolabe-quadrant d'Ahmed Ziya appartient en partie au système ottoman ancien de décompte des heures depuis le coucher du Soleil, notamment en ce qui concerne les heures de certaines prières¹⁵ comme celles des crépuscules du soir (*'Ishā'*, *Ishtibāk nujūm*) et du matin (*Fajr*), de la prière surérogatoire du matin (*Duḥā*), ce qui explique leur position sur l'instrument. Rappelons que les angles lus sur l'instrument, une fois divisés par 15, sont exprimés en temps solaire vrai. À cela s'ajoute des prières particulières dont le décryptage est difficile en l'absence de définitions consensuelles, où la hauteur du Soleil au-dessus ou au-dessous de l'horizon dépend des régions et des traditions, voire du calculateur. Pour s'en convaincre, il suffit de comparer deux astrolabes-quadrants établis pour la latitude d'Istanbul : celui de la collection Khalili (fig. 7 page 85), magnifique instrument du XIX^e siècle qui donne un bon aperçu du niveau de complexité atteint (daté 1256 H = 1840-1841)¹⁶. L'autre est un des rares astrolabe-quadrant ottoman décrit¹⁷, tracé en 1912. Si l'on examine par exemple la courbe *Ishtibāk nujūm* (cf. *infra*) qui coupe l'horizon (en rouge sur l'astrolabe-quadrant de Khalili, n° 8 sur l'astrolabe de 1912), on constate que les deux intersections avec les tropiques du Cancer et du Capricorne ne tombent pas au même endroit. Sur l'astrolabe-quadrant de Khalili, les courbes de la prière *Asr* sont données en heure astronomique alors que sur l'autre astrolabe-quadrant elles sont aussi données en heure turque.

Il y a donc de nombreux usages et conventions selon les constructeurs¹⁸ au point que la surcharge en courbes peut jeter la confusion sur un instrument où le rabattement des courbes classiques compresse déjà le tracé sur un secteur angulaire de 90°.

15. Voir Frédéric Hitzel, « De la clepsydre à l'horloge. L'art de mesurer le temps dans l'empire ottoman », *Les Ottomans et le temps, op. cit.*, p. 13-37.

16. Francis Maddison & E. Savage-Smith, *Science, Tools & Magic, The Nasser D. Khalili Collection of Islamic Art*, volume XII, Part One, London 1997, p. 266-268, où l'on trouve une description sommaire de l'instrument.

17. La photo de l'instrument est donnée dans René R. J. Rohr, Louis Janin, « Deux astrolabes-quadrants turcs », *op. cit.*, entre les pages 116-117, et dans René R. J. Rohr, *Les cadrans solaires*, 1986, p. 178.

18. On peut aussi comparer l'astrolabe-quadrant d'Ahmed Ziya à celui de l'Observatoire de Kandilli, qui date de 1866, situé au musée Rahmi M. Koç Müzesi à Istanbul.

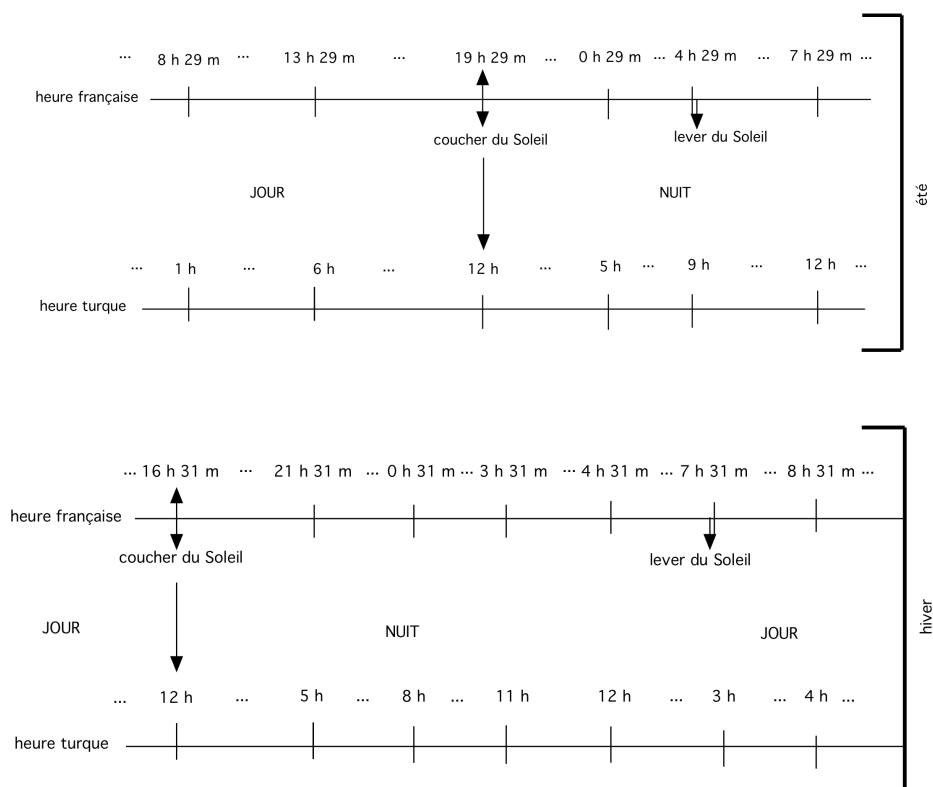


FIGURE 6 – Schéma montrant le principe de décompte des heures en Turquie avant 1925. Au coucher du Soleil (temps solaire vrai), à Istanbul au solstice d’été, on règle sa montre sur 12 h : il est 12 h en système turc et 19 h 29 m en système « français », sous-entendu dans le système où l’heure est comptée depuis minuit de 0 h à 24 h. Le jour turc est divisé en deux fois 12 heures et les astrolabes-quadrants ottomans intègrent ce système de décompte des heures de prière.

1.3 Calcul des courbes et usage

Pour vérifier la cohérence du tracé, il est nécessaire de pouvoir calculer les points des différentes courbes puis de confronter le résultat aux mesures faites sur l’instrument. Précisons que pour être utilisés avec le fil tendu, les angles mesurés ont pour origine le point 0° du limbe le long du décor floral, lequel est à 90° du méridien. On fait passer un système d’axes orthogonaux par le pôle P (fig. 8 page 86), point d’attache du fil, le méridien de l’astrolabe-quadrant dirigé vers le Sud représentant l’axe des ordonnées, avec perpendiculairement vers l’Ouest l’axe des x (qui seront donc toujours négatifs). Dans ce système, on calcule successivement, R étant le rayon de l’équateur, les coordonnées rectangulaires x et y des courbes : H ou λ (angle horaire et longitude écliptique) sont les deux seules variables.

- Équateur :

$$\begin{cases} x = R \sin H & 270^\circ < H < 360^\circ \\ y = R \cos H \end{cases}$$

- Tropique du Cancer :

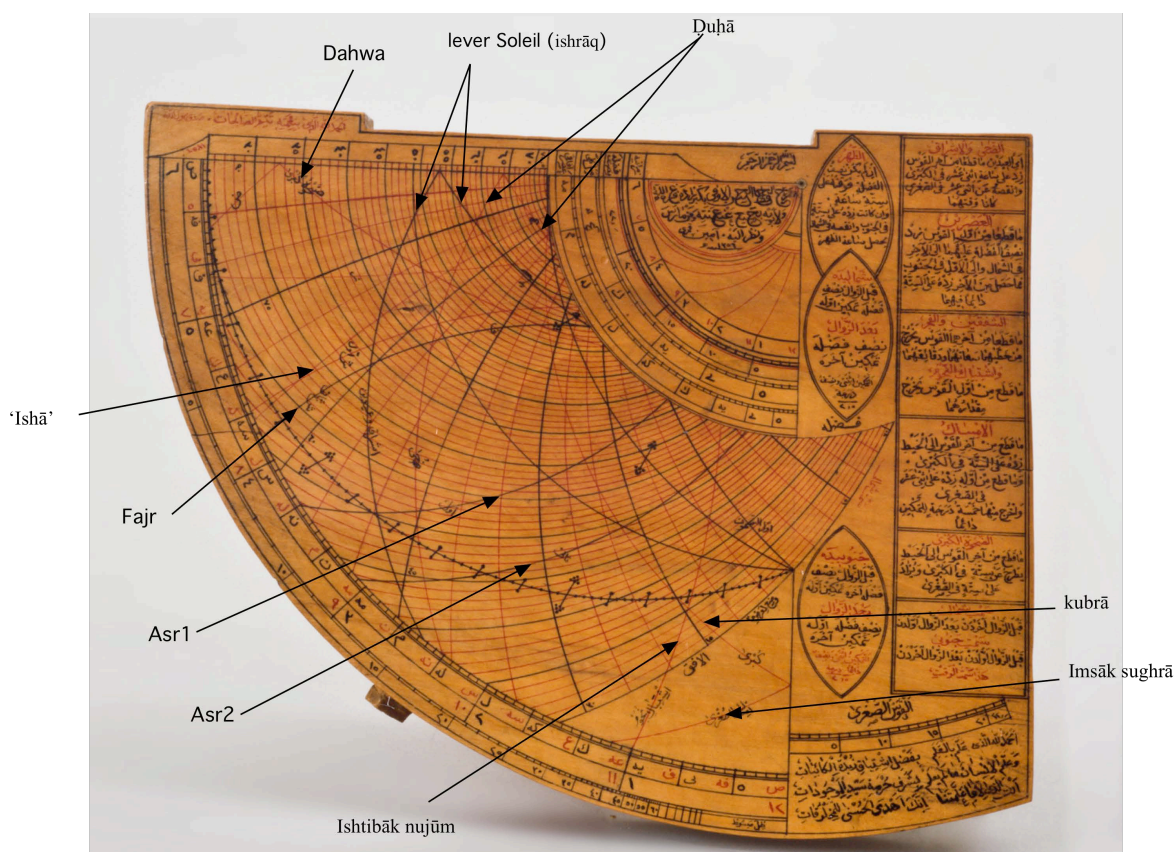


FIGURE 7 – Astrolabe-quadrant ottoman de la collection Khalili daté 1840-1841, tracé pour Istanbul. Ce magnifique instrument comporte de très nombreuses prières dont certaines sont dites surérogatoires.

$$R' = R \tan \left(\frac{90^\circ - \varepsilon}{2} \right)$$

$$\begin{cases} x = R' \sin H & 270^\circ < H < 360^\circ \\ y = R' \cos H \end{cases}$$

prolongation du tropique du Cancer jusqu'à l'horizon :

$$\sin \delta = \sin \varepsilon \sin \lambda \quad 0^\circ < \lambda < 90^\circ$$

$$R' = R \tan \left(\frac{90^\circ - \varepsilon}{2} \right)$$

$$\cos H_0 = -\tan \varphi \tan \delta \quad H_0 \text{ arc semi-diurne.}$$

$$\begin{cases} x = -R' \sin H_0 \\ y = R' \cos H_0 \end{cases}$$

- Tropique du Capricorne :

$$R' = R \tan \left(\frac{90^\circ + \varepsilon}{2} \right)$$

$$\begin{cases} x = R' \sin H & 270^\circ < H < 360^\circ \\ y = R' \cos H \end{cases}$$

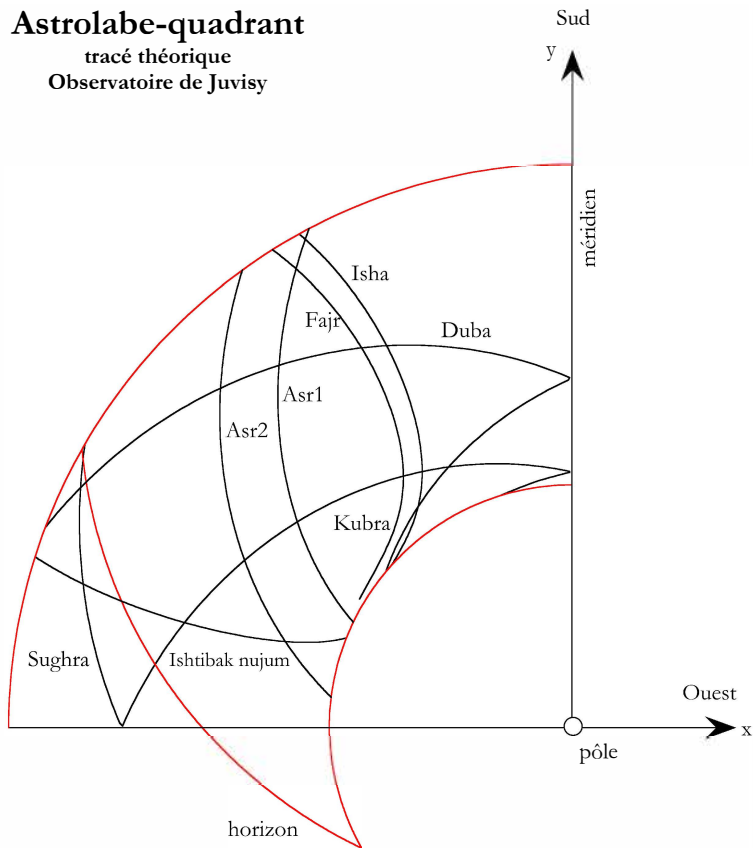


FIGURE 8 – Orientation du système d’axes pour le calcul des courbes.

- L’écliptique est divisée en deux parties :

- Écliptique 1 :

$$\sin \delta = \sin \varepsilon \sin \lambda \quad 0^\circ < \lambda < 90^\circ$$

$$\tan \alpha = \cos \varepsilon \tan \lambda$$

l’ascension droite α doit être dans le même quadrant que λ :

$$\begin{cases} x = R \sin \alpha \tan \left(\frac{90^\circ - \delta}{2} \right) \\ y = -R \cos \alpha \tan \left(\frac{90^\circ - \delta}{2} \right) \end{cases}$$

- Écliptique 2 :

$$\sin \delta = \sin \varepsilon \sin \lambda \quad 270^\circ < \lambda < 360^\circ$$

$$\tan \alpha = \cos \varepsilon \tan \lambda$$

l’ascension droite α doit être dans le même quadrant que λ :

$$\begin{cases} x = -R \sin \alpha \tan \left(\frac{90^\circ - \delta}{2} \right) \\ y = -R \cos \alpha \tan \left(\frac{90^\circ - \delta}{2} \right) \end{cases}$$

- Vertical d'azimut A :

Soit A l'azimut de l'astre compté depuis le Sud affecté du signe $-$ (on compte l'azimut vers l'Est).

$$\sin \delta = \sin \varepsilon \sin \lambda \quad 90^\circ < \lambda < 270^\circ$$

$$R' = R \tan \left(\frac{90^\circ - \delta}{2} \right)$$

$$\tan M = \sin \varphi \tan A$$

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

$$\sin H_1 = \frac{\cos \varphi \tan \delta}{n}$$

$$H = M - H_1$$

$$\begin{cases} x = R' \sin H \\ y = R' \cos H \end{cases}$$

Il faut limiter les verticaux d'azimut à l'horizon.

- Almucantarats :

Soit h la hauteur du Soleil au-dessus de l'horizon.

$$\begin{cases} x = -R \frac{\cos h}{\sin \varphi + \sin h} \cos \lambda \\ y = R \frac{\cos h}{\sin \varphi + \sin h} \sin \lambda + R \frac{\cos \varphi}{\sin \varphi + \sin h} \end{cases} \quad -90^\circ < \lambda < 90^\circ$$

Il faut limiter les cercles à la zone comprise entre les deux tropiques : il faut que $\sqrt{x^2 + y^2} > R_{\text{Cancer}}$ et que $\sqrt{x^2 + y^2} < R_{\text{Capricorne}}$.

- Horizon Est-Ouest :

$$\sin \delta = \sin \varepsilon \sin \lambda \quad 90^\circ < \lambda < 270^\circ$$

$$R' = R \tan \left(\frac{90^\circ - \delta}{2} \right)$$

$$\cos H_0 = -\tan \varphi \tan \delta$$

$$\begin{cases} x = -R' \sin H_0 \\ y = R' \cos H_0 \end{cases}$$

- Prières de *Asr* :

• *Asr* 1 :

$$\sin \delta = \sin \varepsilon \sin \lambda \quad 90^\circ < \lambda < 270^\circ$$

$$R' = R \tan \left(\frac{90^\circ - \delta}{2} \right)$$

$$\tan h' = \frac{1}{1 + \tan(\varphi - \delta)}$$

$$\cos H = \frac{\sin h' - \sin \varphi \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta}$$

$$\begin{cases} x = -R' \sin H \\ y = R' \cos H \end{cases}$$

• *Asr 2* :

idem *Asr 1* avec comme différence le calcul de la hauteur du Soleil :

$$\tan h' = \frac{1}{2 + \tan(\varphi - \delta)}$$

On vérifie sur l'instrument que les courbes *Asr 2* et *Asr 1* sont conformes au calcul : la première, par exemple, débute sur le tropique du Cancer lorsque l'azimut *occasse* du Soleil est de 12° et que sa hauteur est de 22° ; *Asr 2* finit sur le tropique du Capricorne à l'azimut *occasse* 57° et à la hauteur 11°. L'angle horaire utilisé est ici l'angle horaire astronomique¹⁹ de sorte que pour obtenir l'heure, on mesure avec le fil sur le limbe, depuis l'origine 0°, l'angle H ; l'heure astronomique de la prière s'obtient par 18 h – H/15. Pour l'obtenir en heure turque, il suffit de soustraire (H₀/15) à l'heure astronomique ; on obtient H₀ (arc semi-diurne) en ajoutant 6 h au demi-excédent, qui se lit sur le limbe (*cf. infra*).

- Crépuscules du soir ('*Ishā'*) et du matin (*Fajr*) :

$$\sin \delta = \sin \varepsilon \sin \lambda \quad 90^\circ < \lambda < 270^\circ$$

$$R' = R \tan \left(\frac{90^\circ - \delta}{2} \right)$$

$$\cos H_0 = -\tan \varphi \tan \delta$$

$$\cos H' = \frac{\sin h_0 - \sin \varphi \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta}$$

avec $h_0 = -17^\circ$ pour le crépuscule du soir et -19° pour le crépuscule du matin, h_0 étant la hauteur du Soleil sous l'horizon.

$$H = H' - H_0$$

$$\begin{cases} x = -R' \sin H \\ y = R' \cos H \end{cases}$$

L'heure astronomique des crépuscules s'obtient par 12 h + H'/15 pour le crépuscule du soir ('*Ishā'*), et 12 h – H'/15 pour l'aube (*Fajr*).

Pour obtenir en heure turque l'heure de *Fajr*, il faut calculer l'heure de lever du Soleil (en heure turque) qui est égale à 12 h – 2H₀/15. Puis on mesure sur le limbe l'angle H de *Fajr* entre l'origine du limbe et le fil : l'heure de la prière s'obtient par (heure de lever turque – 6 h – H/15).

Pour obtenir, en heure turque, l'instant de '*Ishā'*', on mesure sur le limbe l'angle H de '*Ishā'*' entre l'origine et le fil : l'heure de la prière s'obtient par 6 h – H/15.

L'heure de coucher du Soleil en heure astronomique est égale à 12 h + H₀/15 : c'est la prière *Magrib*, qui tombe donc toujours à 12 h turque.

On notera qu'à la latitude de l'Observatoire de Juvisy, le crépuscule astronomique ($h_0 = -18^\circ$) n'existe pas au voisinage du solstice d'été puisque le Soleil n'atteint pas h_0 ; il faut pour cela que la déclinaison soit inférieure²⁰ à 23° 18'.

L'examen de l'instrument montre que la courbe « crépuscule du soir », qui est la prière '*Ishā'*', correspond au mieux avec le tracé pour une valeur $h_0 = -17^\circ$. La courbe « crépuscule du matin », qui est la prière *Fajr*, correspond au mieux avec $h_0 = -19^\circ$ pour son intersection avec le tropique du Capricorne ainsi que pour sa partie finale en été (quasiment sous la longitude écliptique 50°) qui ne commence que lorsque la déclinaison du Soleil est inférieure à 22° 18'.

19. Certains astrolabes-quadrants ottomans comportent des courbes d'*Asr* qui permettent la lecture directe de la prière en heure turque.

20. Si on trace un astrolabe-quadrant pour une latitude située au-delà de 48° 34' (limite de la nuit totale en été), il faut que $\delta = 72^\circ - \varphi$ pour atteindre la valeur 18° sous l'horizon. Donc on commence à faire varier la longitude λ du Soleil à une valeur supérieure à 90° en faisant $(90^\circ + \lambda) : \cos \lambda = \frac{\sin \delta}{\sin 23^\circ 26'}$. Par exemple pour Juvisy, on a $\delta = 23^\circ 18'$: on commence à faire varier λ à partir de 96°. Pour une valeur sous l'horizon de -19° , on a $\delta = 71^\circ - \varphi$.

En fait cette courbe aurait pu être prolongée un peu au-delà de l'écliptique. Dans les dessins d'astrolabe-quadrant d'Ahmed Ziya qui illustrent ses ouvrages, les deux courbes de crépuscules s'arrêtent sur le tropique du Cancer puisque ses instruments étaient surtout tracés pour les latitudes de la Turquie où le problème de nuit totale ne se pose pas.

- Courbes spéciales²¹

- Prière *Ishtibāk nujūm* (qui signifie « imbrication des étoiles » ou encore « croisement d'astres »), surérogatoire, qui a lieu entre le coucher du Soleil et le début de 'Ishā' :

$$\sin \delta = \sin \varepsilon \sin \lambda \quad 90^\circ < \lambda < 270^\circ$$

$$R' = R \tan \left(\frac{90^\circ - \delta}{2} \right)$$

$$\cos H_0 = -\tan \varphi \tan \delta$$

$$\cos H' = \frac{\sin h_0 - \sin \varphi \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta}$$

$$\text{avec } h_0 = -10^\circ$$

$$H = H' - H_0 + 90^\circ$$

$$\begin{cases} x = -R' \sin H \\ y = -R' \cos H \end{cases}$$

L'angle horaire H est ici exprimé en système turc +6 h ; l'heure astronomique s'obtient par 12 h + H/15. La courbe de cette prière, qui est une courbe de crépuscule du soir analogue avec celle de 'Ishā' par exemple, occupe une position particulière sur l'instrument par l'ajout de 90° à l'angle horaire²² ; peut-être est-ce pour des raisons de place sur l'instrument afin de ne pas surcharger la partie comprenant les courbes 'Ishā' et *Fajr*. L'examen de l'instrument montre que c'est la valeur $h_0 = -10^\circ$ du Soleil sous l'horizon qui correspond le mieux avec le tracé, même si elle ne répond pas complètement à ce qu'on mesure sur l'instrument. Cette valeur, comprise entre celle du crépuscule civil (-6°) et du crépuscule nautique (-12°), semble correspondre à la période où l'on commence à voir apparaître les astres de première grandeur.

Pour utiliser cette courbe, après le réglage de la perle, on mesure sur le limbe l'angle H entre l'origine du limbe et le fil. L'heure turque de *Ishtibāk nujūm* est alors égale à 12 h + H/15° ; cette heure tombe toujours entre 1 h et 1 h 30 m turque (après le coucher du Soleil) à la latitude de Juvisy.

- Prière *Duḥa* :

C'est une prière non obligatoire qui doit se faire dans l'intervalle qui s'étend entre « un peu après le lever du jour » et « un peu » avant le *Zuhr*²³. Le « un peu » est d'environ 20 minutes, soit 5°.

21. Sur les définitions des prières non obligatoires ottomanes, voir David A. King, *In Synchrony with the Heavens, Studies in Astronomical Timekeeping and Instrumentation in Medieval Islamic Civilization*, vol. 1, The Call of the Muezzin, Brill, Leiden-Boston, 2004, p. 437-456 ; ainsi que « Astronomical Timekeeping in Ottoman Turkey », *International Symposium On the Observatories in Islam 19-23 September 1977*, ed. M. Dozer, p. 245-272. On consultera également Jean-Baptiste Navoni, « Rouz-namé, ou Calendrier perpétuel des Turcs, avec des remarques et des exemples sur la manière de compter les lunaisons, et avec des tables pour trouver la correspondance des dates entre l'ère turque et l'ère vulgaire », *Mines de l'Orient*, t. 4, Vienne, 1814, p. 38-67, spécialement p. 58.

22. Sur l'astrolabe-quadrant de la collection de l'Observatoire de Kandilli à Istanbul, la courbe est placée à la suite de 'Ishā' et de *Fajr* : son angle horaire est alors $H = H' - H_0$.

23. On peut trouver cette prière mentionnée sous le nom arabe *Duḥa* ou *Dahwa*, sous le nom en ancien turc de *zahue* et le nom en turc moderne *kusluk*. Joseph Würschmidt, « Ein türkisch-arabisches Quadrant-Astrolab », *op. cit.*, p. 169, écrit que *dahwe* = Vormittag, c'est-à-dire la prière du matin.

$$\begin{aligned} \sin \delta &= \sin \varepsilon \sin \lambda \quad 90^\circ < \lambda < 270^\circ \\ R' &= R \tan \left(\frac{90^\circ - \delta}{2} \right) \\ \cos H_0 &= -\tan \varphi \tan \delta \\ \cos H' &= \frac{\sin h_0 - \sin \varphi \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta} \\ \text{avec } h_0 &= +5^\circ \\ H &= 180^\circ - H_0 - H' \end{aligned}$$

$$\begin{cases} x = \pm R' \sin H & \text{si } H < 0^\circ, \text{ alors } x = +R' \sin H. \text{ Il existe un point de} \\ y = R' \cos H & \text{rebroussement sur le méridien.} \end{cases}$$

Notons que si l'on fait $h_0 = 0^\circ$, on obtient la courbe des levers du Soleil qui a la même forme (*Ishrāq* = lever) et qui figure sur certains astrolabes-quadrants. L'heure astronomique s'obtient par $12 \text{ h} - H'/15$. L'angle horaire H est ici exprimé en système turc et c'est ce qui explique le rebroussement de la courbe sur le méridien.

On mesure sur le limbe l'angle H entre l'origine et le fil : entre le tropique du Capricorne et le méridien, donc sur le grand arc de *Duḥa*, l'heure de la prière est égale à $6 \text{ h} - H/15$; entre le méridien et le tropique du Cancer, l'heure de la prière est égale à $6 \text{ h} + H/15$.

Sur l'instrument d'Ahmed Ziya, le mot « *Dahvé* » est placé sur la courbe *Ishtibāk nujūm*, ce qui prête à confusion.

· Prières pendant le mois de *Ramadan* :

Deux prières, non obligatoires, existent pendant le mois de *Ramadan*, appelées *Kubrā* (grande) et *Imsāk sughrā* (*Imsāk* = début du jeûne, et *Sughrā* = petite), heures du matin où commence le jeûne.

$$\begin{aligned} \sin \delta &= \sin \varepsilon \sin \lambda \quad 90^\circ < \lambda < 270^\circ \\ R' &= R \tan \left(\frac{90^\circ - \delta}{2} \right) \\ \cos H_0 &= -\tan \varphi \tan \delta \\ \cos H' &= \frac{\sin h_0 - \sin \varphi \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta} \\ \text{avec } h_0 &= -19^\circ \text{ ou } -18^\circ \text{ ou } -17^\circ. \\ H &= H_0 + H' - 360^\circ \end{aligned}$$

$$\begin{cases} x = R' \cos H \\ y = \pm R' \sin H & \text{si } H > -180^\circ, \text{ alors } y = -R' \sin H. \text{ Il existe un point} \\ & \text{de rebroussement sur l'axe des } x. \end{cases}$$

La ressemblance avec la prière *Fajr* est ici évidente puisque l'on cherche l'angle horaire astronomique du Soleil lorsqu'il est situé à 19° sous l'horizon. L'heure astronomique s'obtient par $12 \text{ h} - H'/15$. On mesure sur le limbe l'angle H entre l'origine du limbe et le fil ; pour obtenir l'instant en heure turque de cette prière, sur la partie de la grande branche, on soustrait ($H/15$) à 12 h . Sur la petite branche, l'heure turque est égale directement à ($H/15$).

Sur l'instrument d'Ahmed Ziya, la courbe présente des anomalies difficiles à expliquer, notamment dans la partie proche du méridien. L'impossibilité au Soleil d'atteindre certaines hauteurs sous l'horizon au voisinage du solstice d'été explique peut-être la forme de la courbe tracée. On peut prendre pour la latitude de Juvisy une hauteur de -17° au lieu de -19° ; on a alors un deuxième point de rebroussement situé sur le méridien.

· Autres courbes :

Sur certains astrolabes-quadrants, on peut voir une courbe intitulée “*Qibla*” : elle indique à quelle heure le Soleil atteint l’azimut et la hauteur donnant la direction de la *Qibla*. Son tracé dépend, en plus de la latitude, de la longitude du lieu par rapport à La Mecque. Ayant déterminé l’azimut de la *Qibla* pour le lieu considéré²⁴, on trace l’arc de cercle de la même façon qu’un vertical d’azimut.

Il existe également la prière *Ḍaḥwa kubrā* qui tombe à mi-chemin entre *Fajr* et le coucher du Soleil, prononcée pendant le mois de *Ramadan* :

$$\sin \delta = \sin \varepsilon \sin \lambda \quad 90^\circ < \lambda < 270^\circ$$

$$R' = R \tan \left(\frac{90^\circ - \delta}{2} \right)$$

$$\cos H_0 = -\tan \varphi \tan \delta$$

$$\cos H' = \frac{\sin h_0 - \sin \varphi \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta}$$

avec $h_0 = -19^\circ$ ou -20° .

$$H = \frac{H_0 + H'}{2}$$

$$\begin{cases} x = \pm R' \cos H & \text{si } H > 90^\circ, \text{ alors } x = R' \cos H. \text{ Il existe un point de} \\ & \text{rebroussement sur l'axe des } y. \\ y = R' \sin H \end{cases}$$

L’heure astronomique s’obtient par $12 \text{ h} + H_0/15 - H/15$. On mesure sur le limbe l’angle H entre l’origine et le fil ; pour obtenir l’instant en heure turque de cette prière, sur la partie de la grande branche, on lit directement $H/15$. Sur la petite branche, l’heure est égale à $12 \text{ h} - H/15$.

1.4 Le limbe

Le limbe de la partie astrolabe est divisé en quatre échelles (fig. 9 page suivante) : une première échelle est graduée tous les 1° de 0° à 90° , chaque degré étant divisé en $15'$, avec des sous-divisions pour les multiples de 5° et pour les 10° . C’est sur cette échelle qu’on lit les angles avec le fil et elle sert aussi de variable pour les échelles placées en-dessous.

Une seconde échelle, notée « Ombre Hor. », abréviation de *Ombre Horaire*, est la traditionnelle échelle gnomonique des tangentes exprimée en système duodécimal ; c’est une sorte de carré des ombre. Elle est graduée de 1 en 1, de 0 à 90, sachant qu’elle obéit à l’équation $x = 12/\tan h$ où h est l’angle lu sur le limbe tangent du dessus. On vérifie par exemple la graduation 10 du limbe « Ombre Hor. » correspond à $50^\circ 19'$ du limbe supérieur. L’origine coïncide avec la graduation $11^\circ 3'$ (du limbe supérieur) ; le constructeur a prolongé l’échelle jusqu’à 90, soit $7^\circ 6'$. Ce limbe donne donc la longueur d’une ombre pour un gnomon mesurant 12 : par exemple si la hauteur du Soleil est de 35° , la longueur de l’ombre vaut 17,1. L’utilisation de ces limbes repose bien entendu sur le fil tendu.

La troisième échelle semble graduée de 0° à $\approx 31^\circ$. En l’absence totale d’indication, on peut imaginer qu’elle indique le demi-excédent, c’est-à-dire la quantité en degrés dont l’arc semi-diurne excède 90° . Plusieurs mesures indiquent que l’auteur aurait pris au moins en compte le demi-diamètre du Soleil ($0^\circ 16'$) dans le calcul de l’arc semi-diurne, le demi-excédent H'_0 se

24. Voir Denis Savoie, *La Gnomonique*, Les Belles Lettres, Paris, 2007, p. 313-315. Pour l’Observatoire de Juvisy, l’azimut de la *Qibla* est de $-60^\circ 59' 54'' \approx -61^\circ$.

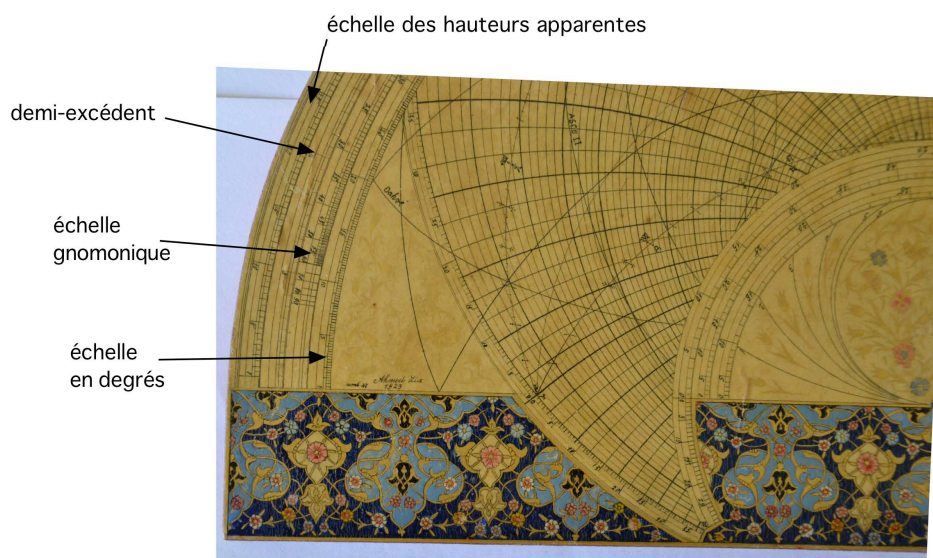


FIGURE 9 – Détail de l’astrolabe-quadrant : à gauche de la signature Ahmed Zia se trouvent les 4 échelles du limbe. On voit nettement que le zéro de l’échelle la plus extérieure ne coïncide pas avec le zéro de l’échelle intérieure, en raison de la prise en compte dans la hauteur du Soleil de son demi-diamètre et de la réfraction à l’horizon. Entre les deux se trouvent l’échelle de l’excédent de l’arc semi-diurne et l’échelle gnomonique des ombres. À droite du nom Ahmed Zia débute le point de rebroussement de la prière *Ḍaḥwa kubrā et suḡhra*; puis sur l’horizon arqué, on voit le vertical d’azimut 0° (point Est-Ouest) qui tombe sur l’horizon au point vernal avec le symbole du signe du Bélier.

calculant alors par :

$$\sin H'_0 = \left| \frac{\sin h_0 - \sin \varphi \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta} \right|$$

où $h_0 = -0^\circ 16'$. La prise en compte du demi-diamètre du Soleil engendre un écart de 2 min au maximum avec un arc semi-diurne géométrique (centre du Soleil). Mais il est difficile de dire, en raison de lecture fine du limbe, si l’auteur n’a pas non plus pris en compte la réfraction à l’horizon, ce qui porterait $h_0 = -0^\circ 53'$ (*cf. infra*). L’écart avec un arc semi-diurne géométrique atteint alors presque 7 minutes.

Dans ce cas, on affiche avec le fil sur le limbe le plus supérieur la longitude du Soleil et on lit le demi-excédent dont la valeur maximale est de 30,5 pour une longitude $\lambda = 90^\circ$ qui correspond à $\delta = 23^\circ 45'$. Le demi-excédent est évidemment nul aux équinoxes et son signe suit celui de la déclinaison. Cette quantité sert, on l’a vu, non seulement dans les conversions des heures de prières en heure turque mais aussi dans le calcul des heures de lever et de coucher du Soleil.

La dernière échelle du limbe est graduée de 0° à 90° mais avec un décalage dans l’origine que l’on retrouve au dos de l’instrument (*cf. infra*) : ce décalage est l’intégration, dans le limbe donnant la hauteur du Soleil, de son demi-diamètre et de la réfraction maximale à l’horizon. En affichant avec le fil tendu la hauteur apparente du Soleil sur ce limbe le plus externe, on en déduit la hauteur vraie sur le limbe le plus interne.

2 Face trigonométrique

L'astrolabe-quadrant comporte à son dos un traditionnel quadrant des sinus qui permet de lire les valeurs du sinus et du cosinus d'un angle et de résoudre des équations trigonométriques : c'est un abaque qui fonctionne avec un limbe et un fil tendu muni ou non d'une perle coulissante (fig. 10). Les deux cales étant placés verticalement afin que l'origine O où est placée le fil soit en



FIGURE 10 – Quadrant des sinus situé au dos de la partie astrolabe.

haut à droite et le décor fleural horizontal ; on remarque que les valeurs vont de 0 à 100 (avec

un pas de 1) alors que traditionnellement, elles vont de 0 à 60 (division sexagésimale). On peut y voir, peut-être, un clin d'oeil au système décimal instauré par la France au XIX^e siècle.

Cinq courbes figurent sur l'abaque, désignées en français : Arc de déclinaison, *Asre I*, *Asre II*, Sinus I, Sinus II. Il y a deux limbes, gradués de 15' en 15', avec un décalage et une inversion de l'origine des angles, noté « A. H. Appar. » et « A. H. Vraie » sur lequel on reviendra.

Pour calculer le sinus ou le cosinus d'un angle, on tend le fil, fixé sur l'origine, d'un angle α compté depuis la verticale dans le sens horaire sur le limbe interne ; à l'intersection entre le fil et le limbe, on mène une verticale et on lit en abscisse la valeur du sinus de l'angle multiplié par 100 ; en menant une horizontale, on lit en ordonnée le cosinus de l'angle multiplié par 100. Par exemple si $\alpha = 50^\circ$, on lit 76,6 en abscisse ($\sin 50^\circ = 0,766$) et en ordonnée 64,3 ($\cos 50^\circ = 0,6428$). Remarquons que l'angle indiqué sur le limbe peut-être une hauteur, une longitude, une latitude, etc.

Les deux demi-cercles notés *Sinus I* et *Sinus II* sont une alternative à la méthode précédente avec l'utilisation d'une perle coulissante : ayant tendu le fil d'un angle α sur le limbe, on fait coulisser la perle sur le fil à l'intersection avec le demi-cercle puis on reporte sur l'axe choisi la distance origine-perle où on lit la valeur recherchée (*Sinus I* pour le sinus, *Sinus II* pour le cosinus).

La courbe « Arc de déclinaison » permet de calculer la déclinaison δ du Soleil en fonction de la longitude écliptique λ en résolvant l'équation classique $\sin \delta = \sin \varepsilon \sin \lambda$ où ε est l'obliquité de l'écliptique qui vaut ici 23;5. On tend le fil sur le limbe d'une valeur égale à la longitude ; depuis l'intersection entre le fil et le cercle « Arc de déclinaison », on abaisse une verticale et on lit sur le limbe la valeur de la déclinaison. Par exemple si $\lambda = 70^\circ$, la verticale issue de l'intersection avec le cercle de déclinaison tombe sur la graduation $\delta \approx 22^\circ$ du limbe. Si $\lambda > 90^\circ$, on compte les angles à rebours depuis le point 90° du limbe. De même si $\lambda > 180^\circ$, on repart du point origine 0° des angles du limbe en se rappelant que la déclinaison est alors négative.

Plus généralement, on peut résoudre une équation du type $(\sin a = \sin b \sin c)$ en utilisant dans le cas idéal un fil muni de deux perles coulissantes : on reporte sur le limbe les deux angles b et c . Puis on cale chaque perle sur l'axe des abscisses correspondant au rayon du sinus de chaque angle en traçant deux arcs de cercle : ces deux arcs interceptent les angles du limbe en deux points et la verticale passant par ces deux points où sont les perles donne sur le limbe l'angle recherché a . Par exemple sur un quadrant des sinus de rayon 10 cm, si $b = 70^\circ$ et $c = 40^\circ$, on a un premier arc de cercle de rayon 9,4 cm et un deuxième arc de rayon 6,4 cm : la verticale passant par les deux intersections tombe sur le limbe sur la graduation $\approx 37^\circ$. L'instrument permet également de résoudre une équation du type $\cos a = \cos b \cos c + \sin b \sin c \cos A$.

Les deux courbes *Asre I* et *Asre II* donnent la hauteur du Soleil à l'instant de la prière *Asr* en fonction de la hauteur méridienne h_m du Soleil ($h_m = 90^\circ - \varphi + \delta$) que l'on indique sur le limbe²⁵. Imaginons que l'on soit à l'équinoxe de printemps ($\delta = 0^\circ$) à 48° de latitude ; on a $h_m = 42^\circ$. On tend le fil depuis le point O en indiquant sur le limbe la valeur 42° : à l'intersection du fil et de la courbe *Asre I*, on abaisse une verticale qui indique sur le limbe $h' = 25;4$. Avec la courbe de *Asre II*, le limbe indique $h' = 17;8$. Connaissant la hauteur du Soleil à l'instant de la prière, il faut se livrer à d'autres calculs avec l'abaque pour déterminer à quelle heure se produit l'événement en résolvant l'équation :

$$\cos H = \frac{\sin h' - \sin \varphi \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta}$$

25. Sur les deux prières de *Asr*, voir Denis Savoie, *Recherches sur les cadrans solaires*, Brepols, 2014, p. 96-98. Sur l'astrolabe-quadrant d'Ahmed Ziya, on notera deux petites anomalies concernant les courbes *Asre II* et *Asre I* : *Asre II* aboutit sur l'axe des sinus ($h_m = 90^\circ$) à la valeur 46 au lieu de 44,7 ; la courbe *Asre I* est arrêtée à la graduation 69 au lieu de 70,7 sur ce même axe des sinus.

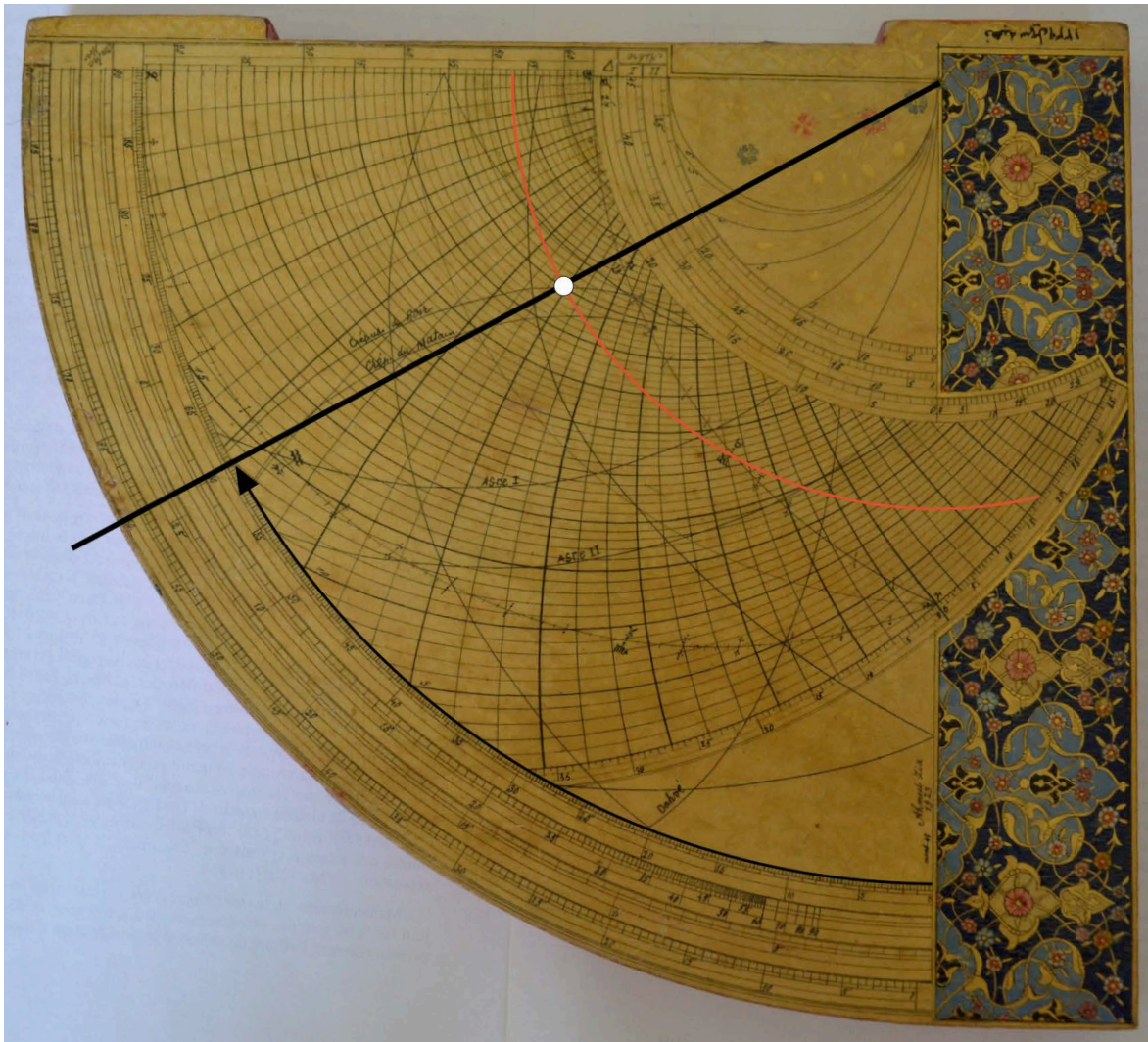


FIGURE 11 – Exemple d’utilisation de la partie astrolabe : on a réglé la perle coulissante sur la marque $\lambda = 30^\circ$ de longitude sur l’écliptique ($\delta = 11,48$) qui décrit le cercle rouge sur l’astrolabe. On vérifie qu’à midi solaire (au méridien), la hauteur de la perle est de $\approx 52,8$ et que l’azimut au coucher $\approx 17,6$. On a placé la perle à l’intersection du fil et de la courbe “crépuscule du soir” (*‘Ishā’*) : on lit sur le limbe qu’à cette date, l’angle vaut $\approx 60,3$, soit 4 h 01 m. La prière a lieu à 6 h – 4 h 01 m = 1 h 59 m en heure turque, soit 20 h 52 m en heure astronomique.

où H est l’angle horaire du Soleil. Avec les paramètres de l’exemple précédent, on a $H = 50,13$ pour le premier *Asr* (soit 15 h 21 m en temps solaire) et $H = 62,8$ pour le deuxième *Asr* (soit 16 h 11 m en temps solaire).

Mais on peut aussi utiliser la face astrolabe de l’instrument qui permet une solution rapide du problème.

Pour tracer ces deux courbes d’*Asr* depuis le point O , les x étant dirigés vers la gauche et les y vers le bas, les coordonnées rectangulaires de ces deux courbes se calculent par :

$$\begin{cases} x = r \sin h' \\ y = r \sin h' \cot h_m \end{cases}$$

où h' est la hauteur du Soleil à l'instant de Asr et r le rayon de l'échelle du quadrant. On a :

$$\begin{cases} \tan h' = \frac{\tan h_m}{1 + \tan h_m} & \text{pour } Asre I \\ \tan h' = \frac{1}{2 + \cot h_m} & \text{pour } Asre II \end{cases}$$

L'astrolabe-quadrant d'Ahmed Ziya comporte deux limbes dont les extrémités ne coïncident pas : le limbe « interne », classique, est gradué de 0° à 90° , de $15'$ en $15'$ avec des chiffres tous les 5° . Le limbe « externe » par contre, a son origine (0°) presque à la fin du limbe interne, avec un décalage nettement visible que l'on peut estimer à presque 1° . Puis l'écart diminue rapidement pour tomber à $\approx 15'$ (dès l'indication 15°) et reste constant jusqu'à la fin du limbe. Les deux indications « A. H. Appar. » et « A. H. Vraie » sont peut-être les abréviations de « astre hauteur apparente » et « astre hauteur vraie ». Dans ce cas, le limbe intégrerait la correction de réfraction et de demi-diamètre du Soleil. On passe en effet de la hauteur apparente h_{ap} d'un bord du Soleil (mesurée) à la hauteur vraie h_v par :

$$h_v = h_{ap} - R \pm d$$

où R est la valeur de la réfraction et d le demi-diamètre du Soleil ($16'$). On néglige ici la parallaxe du Soleil ($\approx 9''$). En se référant à l'édition de 2010 de l'ouvrage d'Ahmed Ziya où une table de réfraction est donnée, on constate que celle-ci correspond à celle publiée en 1915 dans la *Connaissance des Temps*²⁶ qui fait suite aux travaux de Rodolphe Radau (1835-1911). Dans le cas où l'astre est dans l'horizon, la réfraction prend la valeur maximale de $36' 36''$ de sorte que la correction totale vaut $\approx 53'$, valeur très proche du décalage observé sur le limbe. Pour expliquer l'inversion — curieuse — des deux échelles, on peut imaginer que l'utilisateur tend le fil en indiquant sur le limbe interne la distance zénithale apparente z_{ap} du Soleil (complément à 90° de la hauteur apparente) et lit directement sur le limbe externe la hauteur vraie. On aurait alors :

$$h_v = 90^\circ - z_{ap} - R - d \quad (\text{pour le bord supérieur})$$

en se rappelant que la réfraction rapproche l'astre du zénith. Donc si on mesure une distance zénithale de 90° , on a $h_v = -R - d \approx -53'$: c'est la quantité qui correspond sensiblement à l'écart entre les deux limbes. Si la distance zénithale vaut 70° , la réfraction n'est plus que de l'ordre de $2'$ (quantité imperceptible sur l'instrument), de sorte que sur le limbe le décalage lisible est voisin de $15'$ qui correspond au demi-diamètre du Soleil. La formule se réduit alors à :

$$h_v = 90^\circ - z_{ap} - d$$

Par exemple si $z_{ap} = 50^\circ$, on a $h_v = 39^\circ 45'$, ce qui correspond bien à ce qui est lu sur le limbe.

On mesure, par la description qui vient d'en être donnée, combien cet astrolabe-quadrant offert à Camille Flammarion ouvre de possibilités de calculs différents sur une surface aussi petite, mais aussi de maîtrise que son usage quotidien nécessite. En plus d'être un excellent instrument d'initiation à la cosmographie, l'astrolabe-quadrant fut en usage dans de nombreuses mosquées ottomanes jusqu'au début du XX^e siècle, témoin d'une division du temps qui fut abrogée il y a presque tout juste un siècle.

26. *Connaissance des Temps pour l'an 1915*, Paris, 1913, p. 652-657.

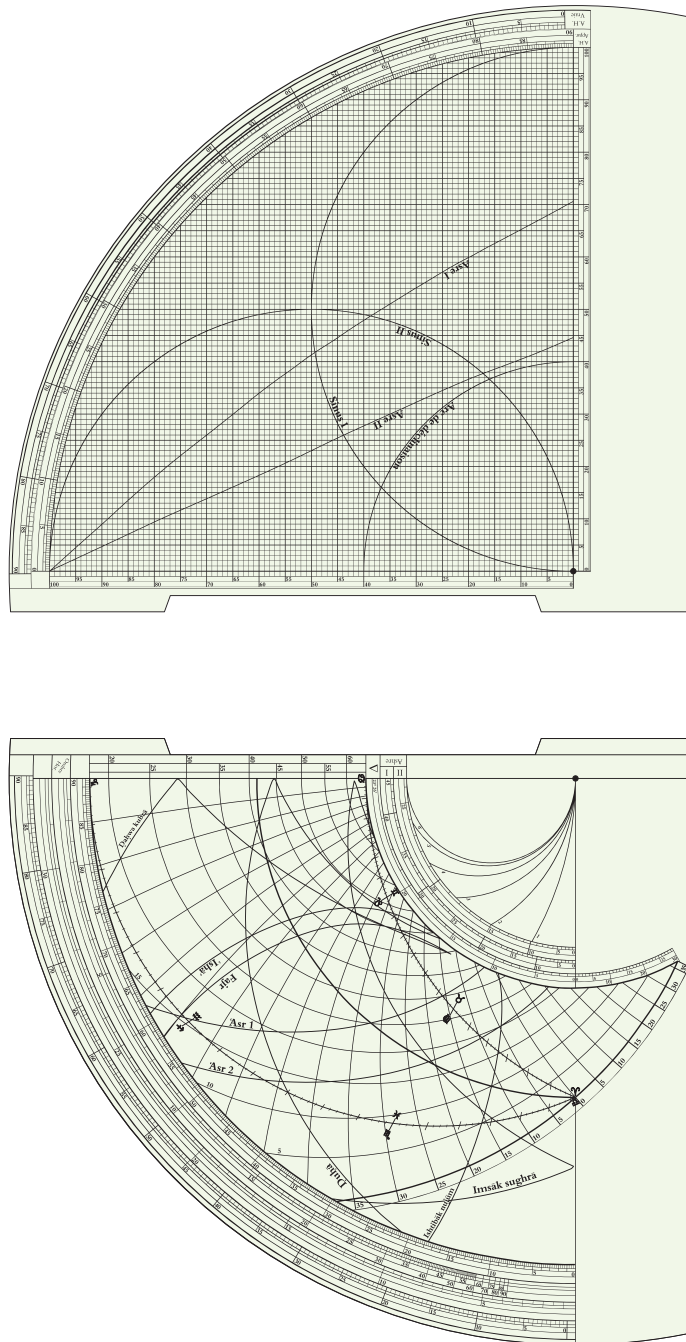


FIGURE 12 – Épure d'un astrolabe-quadrant ottoman calculé pour l'Observatoire de Juvisy et réalisé par Brigitte Alix.

Je remercie Faiza Bancel, professeure de langue arabe et docteur en histoire des sciences, Fathi Jarray, épigraphiste à l'université de Tunis, pour leur aide précieuse dans les traductions arabes de astrolabe-quadrant de la collection Khalili. Ainsi que Gaye Danisan, historienne des sciences à l'université d'Istanbul, pour ses informations indispensables sur Ahmed Ziya. Enfin je remercie Brigitte Alix pour son remarquable tracé de l'épure d'un astrolabe-quadrant ottoman et pour avoir expérimenté et testé les formules du présent article.

