Les premiers siècles de la gnomonique arabo-musulmane (IX[e] – début XI[e] siècle)

par Éric Mercier

J'examine ici les écrits sur les cadrans solaires de six auteurs importants du IX[e] au début du XI[e] siècle, période qui correspond à l'apparition de la gnomonique dans le monde arabo-musulman. Il s'agit d'ouvrages assez différents à la fois dans leur forme et dans les buts poursuivis par leurs auteurs, et certains sont très novateurs sur le plan scientifique. Il apparaît que, contrairement aux astrolabes, les cadrans solaires s'inscrivent dans une tradition autonome par rapport à la science gréco-romaine, mais sans que la prévalence du couple gnomon / heures temporaires soit remise en cause. Par ailleurs, et de façon surprenante, les applications religieuses de la gnomonique (heures de prières, qibla) restent secondaires dans ces écrits.

1 La genèse de la Science arabo-musulmane

Dans la seconde moitié du VIII[e] siècle, soit environ 150 ans après la mort du Prophète, un évènement majeur de l'histoire de l'humanité a eu lieu : le Calife de Bagdad, al-Mansur, descendant du Prophète et commandeur des croyants, s'est intéressé à la Science. Il lance, à cette occasion, le processus qui aboutira à la civilisation scientifique actuelle. La manifestation la plus spectaculaire de cet intérêt est l'initiation d'un mouvement de traduction systématique des écrits scientifiques anciens (grecs, perses, syriaques, indiens. . .), les sauvant ainsi de l'oubli. Ce mouvement sera amplifié par ses descendants et notamment par son petit-fils, al-Mamun qui fondera en 829 l'Observatoire de Bagdad et en 832 la *Maison de la Sagesse (Dâr al-Hikma).* Cette institution correspond à une vaste entreprise, dotée de moyens financiers très importants, qui visait à amplifier le mouvement de traduction et à accueillir, et faciliter le travail, des savants capables d'apporter une contribution importante à la connaissance scientifique (Djebbar 2001). Parmi ces savants de toutes disciplines et de toutes religions, qui ont été intégrés dans cette institution, on peut citer : al-Khwarizmi, al-Jahiz, al-Kindi, al-Hajjaj ibn Yusuf ibn Matar et Thābit ibn Qurra. La richesse de la vie intellectuelle à Bagdad, et dans l'empire, à cette époque va de pair avec l'adoption, en 833, du Mutazilisme, doctrine d'une école de théologie musulmane apparue au VIIIe siècle qui s'opposait radicalement aux tendances de l'islam qui sont aujourd'hui dominantes. Le Mutazilisme est un courant rationaliste de l'Islam, il réfute l'aspect incréée du Coran, rejette tout dogmatisme religieux et donne une place prépondérante à la recherche scientifique et la philosophie. Cette école juridique a été, dès sa fondation, combattue par les Oulémas (juristes et théologiens qui représentent, *de facto*, l'orthodoxie musulmane).

En 848, un des successeurs l'al-Mamun, le calife al-Mutawakkil, a officiellement abandonné cette doctrine et s'est désintéressé de la Science : les Oulémas ont alors définitivement gagné le combat idéologique et la lutte de pouvoir. La Science n'aura plus jamais le rôle central dans la civilisation arabo-islamique... Les Oulémas vont à partir de cette époque prononcer l'interdiction définitive de discuter le Coran, et s'opposer, souvent efficacement, à l'utilisation des méthodes scientifiques, y compris dans le domaine religieux (calcul des heures de prière, ou de la direction de la Qibla par exemple [1]), et plus tard, vont réussir à interdire l'imprimerie [2] et faire oublier certaines disciplines scientifiques [3]. Cela ne veut pas dire que la science va complètement disparaître de l'empire, des foyers importants vont réapparaître au fil des siècles. Mais ce sera souvent sous la protection d'un mécène éclairé et toujours de façon temporaire. Ainsi, dans le domaine de l'astronomie, l'observatoire d'Ispahan, construit à la demande de Malik Shah (XIe siècle) ne fonctionnera que pendant 18 ans, celui de Maragha (XIIIe) où s'illustra al-Tusi, une cinquantaine d'année, celui d'Ulugh Beg (XVe) : 20 ans avant d'être détruit par des intégristes... etc. (voir Sayili, 1988).

2 Originalité de la gnomonique arabo-musulmane

Dans cet article, je me propose d'exposer les étapes de l'édification de la Gnomonique, en tant que discipline scientifique, pendant l'activité de la Maison de la Sagesse et la période qui a suivi (IX, X et début du XIe siècles). Je n'envisagerai uniquement, dans cet article, que la théorie et la pratique de la fabrication des cadrans solaires [4]. Ces instruments relèvent

1. Voir quelques exemples dans Mercier (2014).

2. Les arabes connaissaient la technique de l'imprimerie à caractères mobiles qui était utilisée en Chine, pays avec lequel ils étaient en contact, au moins depuis le XIe siècle. Mais, sur les terres de l'Islam elle fut frappée d'interdit pour des raisons religieuses. Les premiers livres imprimés en Arabe (dont un Coran) le furent en Europe à la fin du XVe / début du XVIe siècle, à l'usage des « orientalistes » occidentaux de l'époque (Balagna 1984). La première imprimerie « officielle » en pays musulman ne date que de 1795 à Istanbul.

3. Comme l'Hydraulique souterraine-Hydrogéologie (el Faiz 2005) qui ne sera refondée, *ex nihilo*, en Europe qu'au milieu du XIXe siècle (!) par Henry Darcy.

4. En ce qui concerne les astrolabes, la question de la transmission du monde grec au monde musulman est assez simple. On connaît peu de choses des astrolabes byzantins : le traité de jean Philopon d'Alexandrie (c. 520–530), celui de Sebokht (ant. à 660) et un astrolabe tardif, celui de Brescia (1062 J.C.), mais qui ne semble pas avoir été (rétro-)influencé par la Science arabe de son époque). Néanmoins, il semble que la transmission du savoir s'est faite intégralement et très précocement. Dans le détail, Neugebauer (1949) a montré que le traité antique de Théon d'Alexandrie (c. 375) a été préservé dans celui de Sebokht (ant. à 600) et que al-Yaqubi (c. 875), historien et géographe arabe, le connaissait dans le détail (il en a publié le sommaire). Le traité de Philipon serait également dépendant de celui de Théon qui aurait donc été accessible aux savants byzantins et arabes, au moins jusqu'au IXe siècle. Le rôle de d'artisans chrétiens, ou non-musulman de manière générale, vivant dans les régions nouvellement occupées par les arabes semble déterminant dans la transmission du savoir sur l'astrolabe (King 2014, p. 411). Et ce n'est que vers 762–777 J.C., que Ibrahim ibn al-Nadirn al-Nardin al Fazari peut se vanter, dans l'introduction de son traité sur l'astrolabe, d'être le premier musulman à fabriquer un astrolabe (in Hernandez-Peres 2018), mais il ne fut pas le premier à le faire dans le monde arabe. Le résultat de cette transmission sans à-coups, est que, dès le début, les traités arabes sur l'astrolabe seront scientifiquement très corrects, à la différence des premiers traités européens quelques siècles plus tard. Au total, on connaît,

d'une tradition originale sensiblement différente de la tradition antique gréco-romaine. En effet, et contrairement à ce qui se passait dans le monde gréco-romain, les arabes ne vont pas développer une gnomonique qui exploite des formes creuses (Scaphées ou cadrans coniques) [5] mais vont privilégier les cadrans plats (horizontaux ou verticaux) alors que ceux-ci étaient minoritaires dans l'antiquité gréco-romaine [6]. En fait, et au moins au début, une partie de l'influence scientifique provient de l'astronomie indienne. Par contre, comme dans la tradition gréco-romaine, ce sont toujours les heures temporaires (inégales) qui vont être utilisées [7].

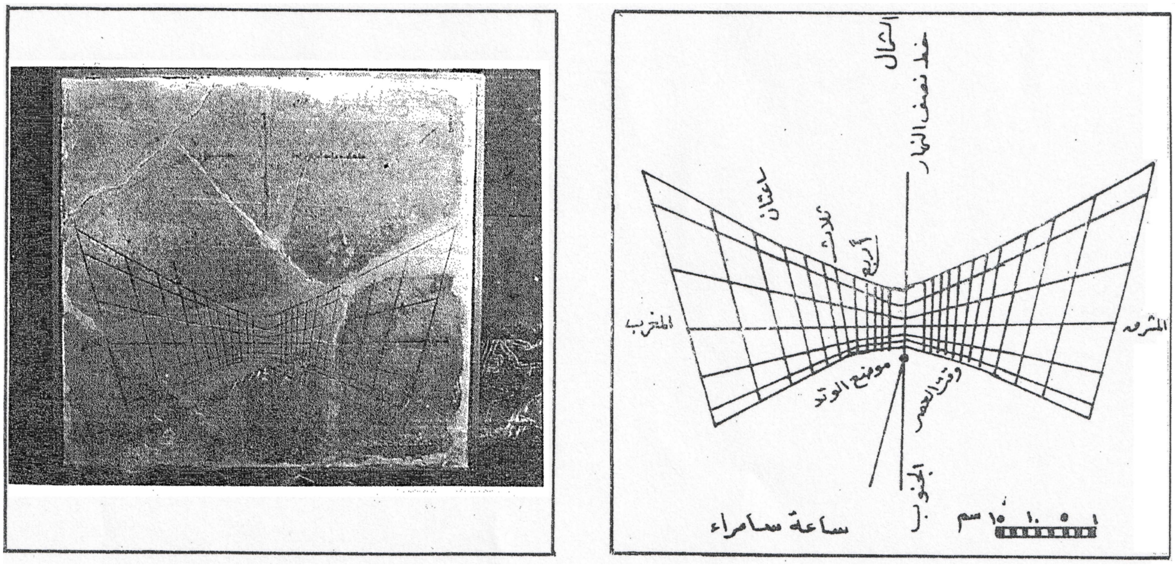


Figure 1 – Le cadran de Samarra d'après Hammudi (1987) (n° 11275 du Musée National Iraquien). Ce cadran, apparemment inédit à ce jour dans une langue à alphabet latin [8], est le plus ancien cadran solaire arabe connu, il s'agit d'un cadran horizontal en heure temporaire qui a été réalisé par Ali ibn Isa au milieu du 3e siècle de l'Hégire (soit vers 865 J.C.).

Enfin on soulignera qu'un seul cadran arabe antérieur à l'an 1000 est actuellement connu au Proche-Orient (fig. 1) ; il provient de Samarra en Irak [9]. Je n'utiliserai donc dans cette revue, que des sources écrites, c'est-à-dire des manuscrits qui nous sont parvenus et qui ont été étudiés par les savants modernes.

directement ou indirectement, plus d'une dizaine de traités arabes sur l'astrolabe antérieurs à l'an mil (King 2014, v. 2, p. 457).

5. Rohr (1986, p. 17), se référant à al-Battani (858 ?–929), affirme que les arabes utilisaient « encore couramment », à l'époque de celui-ci, des scaphées. Je n'ai pas retrouvé le texte gnomonique qui confirme cette affirmation.

6. D'après les statistiques établies par Bonin (2015) les cadrans plans ne représentent qu'un peu plus de 10% de tous les cadrans gréco-romains connus.

7. Les heures égales, bien que connues et utilisées en astronomie par la Science grecque et, dès le début, par la Science Arabe, ne concerneront les cadrans solaires qu'avec l'invention du style polaire, semble-t-il par Ibn Ash Shatir à Damas, vers 1371.

8. Je remercie très sincèrement Fathi Jarray, de l'Université de Tunis, qui m'a très aimablement signalé cet instrument exceptionnel.

9. Un autre cadran, daté des environs de l'an 1000 et signé Ahmad ibn al-Saffar, a été découvert en Andalousie (Cordou) (King 1978), mais il est probable que cet instrument, très approximatif, comme tous ceux d'Andalousie, ne relève pas de la Science en train de renaître à Bagdad, mais plutôt de connaissances romaines en grande partie altérées.

3 Les manuscrits

Les manuscrits anciens que l'on peut étudier pour comprendre la Science des IX-XI^{e} siècles ne datent quasiment jamais de cette époque. Il s'agit de manuscrits postérieurs qui constituent eux-mêmes les versions finales de longues chaînes de copies et de re-copies manuscrites successives. Ces documents tardifs ont très généralement accumulé des erreurs, des approximations, des ajouts et des oublis, voire des ré-interprétations, qui en altèrent l'authenticité. Depuis le XIX^{e} siècle, les historiens des Sciences ont essayé de reconstituer le message original se sont engagés dans une démarche d'*édition* des manuscrits. Il s'agit de réunir le maximum de versions différentes d'un même manuscrit, et ensuite, par une étude comparative, d'essayer de reconstituer l'état initial. Il s'agit donc d'un travail toujours provisoire et en partie subjectif, même si la plupart des choix reposent sur des critères objectifs et raisonnables. On peut néanmoins admettre que plus une œuvre est connue par un nombre important de manuscrits et plus la date de ces manuscrits est proche de celle de l'œuvre originale, plus on a de chance d'avoir une reconstitution fidèle. À cette *édition* d'un manuscrit, les auteurs modernes joignent généralement une traduction dans une langue contemporaine et un commentaire détaillé.

King (2014) reconnaît deux types de traités de gnomoniques. Les premiers sont des ouvrages théoriques écrits par, et pour les savants. Les seconds sont des manuels pratiques à destination des artisans et qui contiennent essentiellement des tableaux de chiffres donnant les coordonnées polaires des *nœuds* du cadran selon sa latitude (*cf. infra*). Paradoxalement, ce sont ces traités pratiques qui sont les plus difficiles à étudier car les tables sont souvent entachées d'erreur de copie [10], par ailleurs le mode de calcul de ces tableaux, parfois manifestement très approximatif, n'est jamais indiqué. À côté de ces manuels pratiques, on connaît donc des traités théoriques. Le principal obstacle à leur étude est la rareté des schémas/figures et l'absence de tout formalisme mathématique [11], ainsi, par exemple, quand al-Biruni (973–c. 1050), veut nous expliquer comment calculer la hauteur du Soleil quand on connaît les longueurs du gnomon et de l'ombre, c'est-à-dire la formule basique :

$$h = \arctan\left(\frac{a}{\ell}\right) \tag{1}$$

avec h = hauteur du Soleil, a = longueur du gnomon et ℓ = longueur de l'ombre.

Il nous dit uniquement (sans n'indiquer aucune formule) :

> Si on nous donne l'ombre à un certain moment, et que nous voulons trouver l'altitude du soleil pour ce moment, nous multiplions l'ombre par son égal et le gnomon par son égal et nous prenons ((la racine carrée de)) [12] la somme, et ce sera la cosécante. Puis on divise par elle le produit du gnomon par le sinus total, et il en sort le sinus de l'altitude. Nous trouvons son arc correspondant dans la table des sinus et il en ressort l'altitude du soleil au moment de cette ombre. Ainsi nous opérons pour le sinus de n'importe quel arc nommé s'il est donné. (d'après Kennedy, 1976, vol. 1, p. 90)

10. Il est assez fréquent que les scribes/libraires, recopiant des tableaux colonne par colonne, aient oublié un chiffre, ce qui d'une part, nous prive de cette information, mais d'autre part, décale tous les chiffres restant de la colonne, rendant le tableau particulièrement obscur.

11. Il semblerait que le formalisme arithmétique n'apparaisse qu'à la fin du XV^{e} siècle, avec l'œuvre d'al-Qalasadi (Abdeljaoud, 2005), qui semble d'ailleurs avoir inspiré des auteurs européens comme Adam Ries (1492–1559).

12. Les doubles parenthèses indiquent une partie absente du manuscrit (oubli d'un copiste) et ajoutée par Kennedy dans son « édition » de l'ouvrage.

… et chacun est bien conscient qu'il existe des formules plus complexes en gnomonique !

Cet exemple illustre également, à cette époque relativement tardive, de la non-utilisation de la tangente [13] et de la cotangente, ainsi que l'usage persistant de la sécante.

Dans les lignes qui suivent nous allons étudier les contributions des principaux auteurs qui nous ont laissé des œuvres de gnomonique (fig. 2).

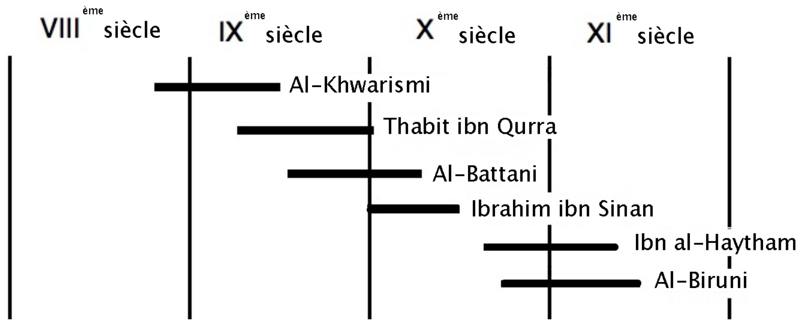


Figure 2 – Positions relatives de la période de vie des différents auteurs étudiés ici.

4 al-Khwarizmi (c. 780–850)

Les plus anciens manuscrits gnomoniques en arabe disponibles ont été écrit par al-Khwarizmi. Il s'agit d'un savant très important, lié à la « Maison de la Sagesse », qui a été actif en mathématiques, astronomie et géographie [14]. Il est considéré par les historiens des Sciences comme le fondateur de l'algèbre (Abdeljaoud, 2005 ; Brentjes, in Hockey 2007, p. 632) [15]. Sous son nom latinisé d'*Algoritmi* (dont on tirera « algorithme »), il aura une influence considérable chez des auteurs européens : Gerbert d'Aurillac (c. 950–1003), Adelard de Bath (c. 1152), Leonardo Fibonacci (1175–1250) etc. Son plus grand titre de gloire correspond probablement à l'introduction dans le monde méditerranéen, des chiffres indiens [16] et des méthodes de calcul qui en découlent. Cette partie de son activité témoigne d'une certaine familiarité avec la Science indienne, particularité que nous retrouverons dans ses travaux en gnomonique.

On possède une bonne idée des titres des ouvrages de al-Khwarizmi grâce au catalogue de Ibn al-Nadim [17]. Or il se trouve que beaucoup de ces titres se retrouvent sur des textes

13. Cette fonction est pourtant longuement analysée dans l'ouvrage d'al-Biruni dont est tiré cette citation (!). Tangente et cotangente étaient déjà utilisées (inventées ?) par Habash en 830 et repris par al-Buzjani (connu également sous le nom de al-Wafa) (c. 940–c. 997). Inversement, al-Battani, presqu'un siècle après ces auteurs, ne les utilisera pas.

14. Pour l'anecdote, notons que al-Khwarizmi n'était probablement pas musulman mais zoroastrien : disciple d'une religion monothéiste de l'Iran ancien (en donc païen au sens de l'orthodoxie musulmane). Ce détail constitue un bel exemple de tolérance de l'état Mutazilisme.

15. Inversement, Charrette & Schmidl (2004) remettent en cause la position d'icône (*sic*) de la science islamique qu'occupe al-Khwarizmi.

16. Ce que nous connaissons maintenant comme étant les « chiffres arabes ». Al-Khwarizmi utilisait le système décimal pour les entiers, et un système sexagésimal (= base 60) pour les valeurs inférieures à 1 (technique que nous avons conservé notamment pour les durées et les angles : minutes, secondes…). L'introduction de fractions décimales (chiffres après la virgule) est due à al-Kashi (XV^{e} siècle).

17. Ibn al-Nadim : libraire et calligraphe de profession vivant à Bagdad qui a réalisé un inventaire de tous les livres publiés en arabe avant son époque (vers 988) : le *Kitab-al-Fihrist*.

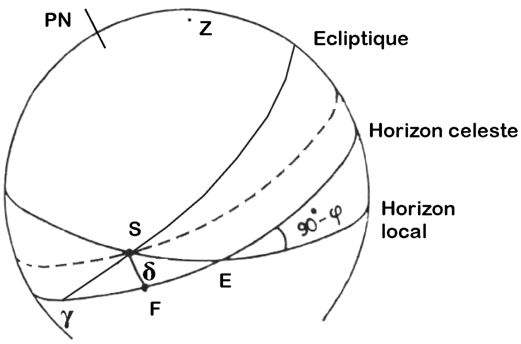
anonymes conservés dans deux recueils [18] de manuscrits copiés respectivement au XIVe siècle, et au XIIIe siècle, et conservés à Berlin (Staatsbibliothek, Landberg 56) et Istanbul (Aya Sofya, 4830) [19]. L'attribution des textes anonymes à al-Khwarizmi est discuté complètement dans Charrette & Schmidl (2004) ; dans certains cas le doute subsiste, mais il semble établi que ceux qui ne sont pas des oeuvres de al-Khwarizmi lui-même, sont attribuables à des auteurs de son cercle rapproché, en tout cas de contemporains vivants à Bagdad ; King (1983) cite notamment Habash [20].

En fonction de ce qui a été dit plus haut sur les conditions d'une bonne « édition » des manuscrits scientifiques arabes, on conçoit qu'une certaine incertitude demeure dans la reconstitution des écrits de al-Khwarizmi [21].

Pour fonder une gnomonique basée sur les heures temporaires, il faut s'intéresser à l'azimut du lever du Soleil [22]. C'est l'objet de quatre textes conservés et étudié par Ahmedov et *al* (1987) (nommés #1, #2, #3 et #32 dans leur article [23]).

Le premier traité se réfère expressément à Ptolémée (*Almageste*, traduit pour la première fois en arabe vers 827). Il s'agit de calculer la position du lever du Soleil au Solstice d'été. Le principe du calcul revient à des changements de coordonnées : coordonnées écliptiques / coordonnées horaires (fig. 3), et revient à résoudre des problèmes de longueur des côtés de triangles sphériques. Ce calcul peut être également fait à d'autres dates qu'au solstice (= autres déclinaisons) et c'est l'objet de la fin des textes #2 et #3.

Figure 3 – (Inspiré et complété d'après *Ahmdov et al*, 1987) le trait pointillé indique la course du Soleil le jour où la déclinaison est égale à δ (delta), l'Est [24] est à l'intersection de l'horizon local et de l'horizon céleste.



Ce qui est remarquable dans le texte #1, c'est que al-Khwarizmi utilise indifféremment la trigonométrie planaire et sphérique, confusion fautive qui n'existe pas dans les textes #2 et #3. Ces textes expliquent, selon des principes du même ordre que précédemment, comment

18. Ces recueils contiennent en plus des textes anonymes, des textes effectivement signées par al-Khwarizmi, et des textes signés de al-Farghani qui est un autre savant de la « Maison de la sagesse » (sur l'astrolabe / manusc. Berlin).

19. Il existe un autre lieu de conservation d'œuvres de al-Khwarizmi, il s'agit de la bibliothèque de *Al-Biruni Institute* de Tashkent, (n° 177/3), ces manuscrits n'ont hélas été édité qu'en russe, voir la page web suivante inventoriant, entre autres, ces travaux : http ://www.jphogendijk.nl/khwarizmi.html#Zij

20. Habash al-Hasib (770–870 ?) qui est notamment connu pour avoir réalisé une série de tables pour les cadrans solaires selon les formules indiennes, King (2014, v. 1, p. 84).

21. Certains des textes conservés de (ou attribués à) al-Khwarizmi concernent l'astrolabe, le quadrant de sinus, le quadrant horaire, le calcul de la *Qibla*, la visibilité du croissant lunaire. . . pour les raisons indiquées en introduction, je n'en parlerai pas ici.

22. Le coucher étant considéré comme symétrique au lever par rapport au méridien.

23. En fait les auteurs parlent de « chapitre », ce qui est abusif, l'ensemble des textes ne constituant pas un ouvrage unique (discussion dans Charrette & Schmidl (2004)).

24. Il y a, selon moi, une incohérence dans le texte Ahmedov et al (1987) à cet endroit, ces auteurs affirment que E est le point de lever du Soleil, cela résulte sans doute d'une confusion dans la traduction entre l'Est = Levant (*Machreq*) et « lever du Soleil ».

calculer l'azimut du Soleil (n'importe quel jour, en fait à chaque changement de signe, et à n'importe quelle heure). Pour cela l'auteur est obligé de définir, et d'utiliser, les heures égales qui ne constituent donc ici, et encore pendant quelques siècles, qu'une étape du calcul.

Le texte #32, *Second traité sur l'azimut du lever du Soleil* constitue en la présentation d'une construction géométrique plane équivalente au calcul en trigonométrie sphérique ; il s'agit donc, en quelque sorte, d'une correction théorique et amélioration opérationnelle des textes précédents. Associée au texte #2, il existe une table (qualifié de « curieuse » par plusieurs auteurs), dite *table des sinus horaires* qui donne la hauteur du Soleil à n'importe quelle heure temporaire quand on connaît la hauteur à midi. Nulle part n'apparaît la méthode scientifique qui a permis le calcul de cette table, mais Hogendijk (1991) qui l'a étudié en détail, a pu établir qu'elle résultait de l'utilisation, non de calculs de type de ceux qui viennent d'être exposés, mais de l'utilisation de vielles formules approximatives d'origines indiennes. King (2014, v. 2, p. 111–198), auquel le lecteur pourra se référer pour les détails, a montré que ces formules, sans doute introduites dans la Science arabe justement par al-Khwarizmi, vont avoir une énorme popularité, y compris en Europe, notamment pour la réalisation des « tables » qui constituent l'ossature des traités pratiques de gnomonique, au moins jusqu'au XIVesiècle. À titre d'illustration de l'approximation qui est introduite dans la détermination des paramètres solaires par ces formules, j'ai réalisé une figure comparant la position du Soleil à Bagdad, aux solstices et à équinoxes (fig. 4) à chaque heure temporaire.

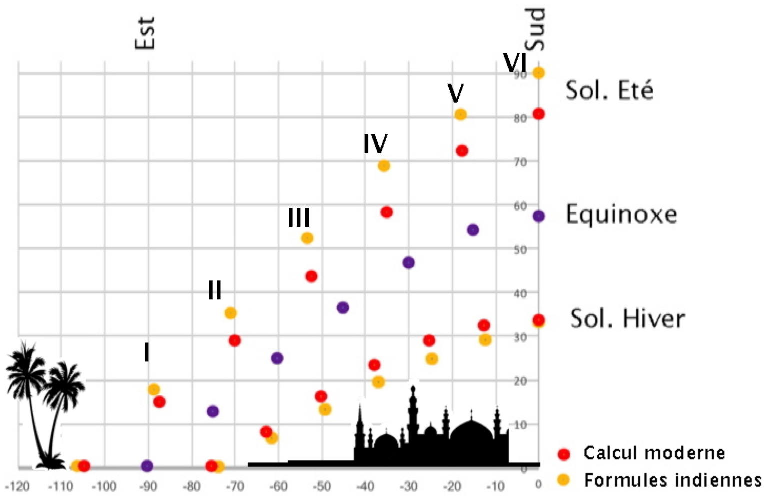


Figure 4 – Position du Soleil à Bagdad, au lever de Soleil et à chaque heure temporaire (I à VI), aux Solstices et à l'Équinoxe selon le calcul moderne (Savoie 2014) et les formules indiennes (King 1983, 2014). On constate une parfaite équivalence aux équinoxes, mais une dérive plus ou moins importante ailleurs.

al-Khwarizmi a justement préparé des tables pour réaliser des cadrans solaires horizontaux. Elles ont été étudiées par King (1983). Elles correspondent à des tableaux, valables pour plusieurs latitudes, de la longueur de l'ombre et de son azimut à différentes dates (de changement de signe) et à chaque heure temporaire ; ce qui est nécessaire et suffisant pour tracer les *nœuds*[25] d'un cadran solaire (fig. 5 page suivante). Al-Khwarizmi ne précise pas sa méthode de calcul, mais d'après King (1983), elles ont été établies également en utilisant les formules indiennes. Alors que al-Khwarizmi est parfaitement capable de mener un calcul scientifique complet inspiré de l'*Almageste*, comme ces nombreux successeurs (voir King 2014), il utilise une formule approchée pour ses traités pratiques de gnomonique[26].

25. Nœud = (ici) intersection entre les arcs de déclinaison et les lignes horaires.
26. Le cadran de Samarra, illustré à la figure 1, ne semble pas avoir été tracé à l'aide de tables tirées de la formule indienne, mais plutôt en utilisant des formules exactes (il est postérieur à la mort de al-Khwarizmi). Cette remarque ne concerne en fait que la partie « matin » du cadran, la partie « après-midi » présente des

Figure 5 – Exemple de table gnomonique de al-Khwarizmi, donnant pour Bagdad (latitude 33°), la position des *nœuds* d'un cadran solaire horizontal à chaque heure temporaire (manuscrit d'Istanbul, King 1983).

Parmi les latitudes traitées par al-Khwarizmi, signalons une table pour l'équateur, le cadran horizontal est alors un cadran polaire, les lignes horaires sont parallèles et ne sont définis que par la longueur de l'ombre aux équinoxes. Enfin signalons un texte de al-Khwarizmi, étudié par Charrette & Schmidl (2004) (texte #11 de ces auteurs) qui correspond à une sorte de cadran de Berger, en heures temporaires, mais dont le support est conique (mukhula) (fig. 6 page ci-contre) ce qui facilite la lecture à proximité de midi sous les basses latitudes ; il est hélas difficile d'établir si ce sont des formules exactes ou des formules indiennes qui sont utilisés ici car les tables permettant de tracer les lignes horaires ne semblent pas compatibles avec le texte (elles évoquent plutôt un cadran de Berger s.s. c'est-à-dire cylindrique (?)).

Al-Khwarizmi a également écrit un texte sur la détermination, par les ombres, du moment des prières de l'Islam, ce qui évidemment est loin d'être anecdotique et correspond très probablement à la finalité des recherches en gnomonique, au moins pour certains auteurs et/ou mécènes [27]. Plutôt que d'intégrer des *courbes d'annonce* de prière sur les cadrans, ce qui sera fait plus tard, al-Khwarizmi propose de réaliser un petit instrument circulaire, avec un gnomon central et muni d'un compas permettant de mesurer précisément la longueur de l'ombre et de la comparer avec des tables *ad hoc* pour une latitude donnée selon la période de l'année (*cf.* fig. 7 page 98). Les auteurs qui ont étudié ce texte et ces tables (King 1983. p. 7, Charrette & Schmidl 2004, texte #3) avouent leurs difficultés à comprendre totalement la structure de ces tables… Il ne semble pas que des erreurs de recopiage puissent, à elles seules, expliquer les divergences entre les tables et ce que l'on croit savoir de la tradition ancienne du *mikat*. En fait, et cela ressort clairement de la synthèse de King (2014, v. 1, p. 201–213) [28]

erreurs qui vont aux delà des problèmes de précision de la formule utilisée. Cette non-symétrie du tracé en fait le principal problème de ce cadran.

27. Rappelons que Al-Khwarizmi n'était pas musulman, mais qu'il dépendait du Calife.

28. Dans l'« Encyclopaedia of Islam — II », volume 7 (1993), à l'entrée *Mikat*, le même auteur considère que les définitions de heures de prière étaient fixée dès le VIII^e siècle, tout en soulignant que al-Khwarizmi, au

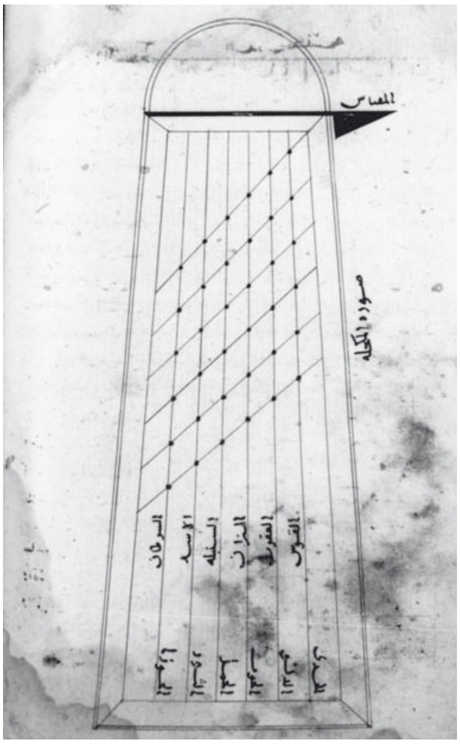


Figure 6 – Le cadran conique du manuscrit d'Istanbul (d'après King 2014, II, p. 141).

sur les heures de prière, les premières définitions scientifiques semblent plus tardives et ne dater que de la période de al-Biruni (973–c. 1050) (Kennedy, 1976). Ces définitions sont, sous certains aspects, différentes de celles admises par les musulmans de ce début du XXIe siècle.

5 Thabit ibn Qurra (826-901)

Comme al-Khwarizmi, Thabit ibn Qurra n'était pas musulman (il était adepte de la secte des Sabiens) et était lié à la « Maison de la sagesse », mais contrairement au premier, c'est dans la traduction du Grec et du Syriaque qu'il a particulièrement œuvré. On lui doit notamment la première traduction des *Coniques* d'Appolonius et la révision de la traduction réalisée par Ishaq ibn Hunayn de l'Almageste de Ptolémée (Djebbar 2001). Mais si Thabit ibn Qurra est actuellement célèbre, c'est parce que la tradition lui attribue la paternité du texte arabe, actuellement perdu, mais traduit en latin par Gérard de Crémone (Italie XIIe siècle) et qui est connu sous le nom de *De motu octave spere*[29]. Cet ouvrage présente une théorie erronée mais qui a été très populaire et qui a handicapé l'astronomie pendant une demi-millénaire : la trépidation des équinoxes. Pour le reste, l'œuvre astronomique de

début du IXe siècle donc, « jouait (*sic*) encore avec différentes définitions du *Zuhr* » (prière de la mi-journée) « de façon à l'associer à la sixième et à la septième heure temporaire. Il s'agit d'une piste intéressante qui ne semble pas avoir été développé, ni par King, ni par aucun autre auteur.

29. Régis Morélon, grand spécialiste de l'œuvre astronomique de Thabit ibn Qurra affirme que « De motu octave spere » n'est pas de cet auteur (voir aussi les réserves d'un autre grand spécialiste de Thabit ibn Qurra : Carmody, 1955 et surtout 1960 p. 84,). Cette réfutation ne semble pas avoir convaincu les historiens des sciences, ainsi par exemple dans sa monumentale *Histoire et pratique de l'Astronomie ancienne* Evans (2016) mentionne l'opinion de Morélon, mais continue à attribuer à Thabit ibn Qurra la théorie de la trépidation. On notera que l'incertitude sur la paternité de ce concept faisait débat également dans l'Islam médiéval et par exemple al-Marrakushi (XIIIe siècle) l'attribuait à Azarkiel / al-Zarqali (Andalousie 1029–1087) (in : Sédillot 1834, p. 161).

Figure 7 – Extrait d'une table donnant l'heure des prières en fonction du signe du zodiaque (pour Bagdad) (manuscrit de Berlin). Les six « cases » en position centrale correspondent aux coordonnées polaires des nœuds du début de chaque signe (soit, par symétrie les 12 signes).

Thabit ibn Qurra, tout en étant inspirée par l'Almageste, s'en éloigne en étant souvent très critique. Par exemple, Thabit ibn Qurra avait déjà considéré comme erronée la valeur de la précession des équinoxes de Ptolémée. D'une manière générale il apparaît comme le fondateur de l'*astronomie mathématique arabe* (Palmeri in Hockey 2007, p. 1129–1130).

Sur le plan de la gnomonique, on ne connaît de cet auteur que des textes très théoriques, ils ont été édités et étudiés par Morélon (1987) (traités #8 et #9 de cet auteur).

Le texte #8 *Description des figures que forme l'extrémité de l'ombre d'un gnomon par son passage sur un plan horizontal, pour tous les jours (de l'année) et en tout lieu (de la Terre)* n'est connu que par un seul manuscrit (Escurial 960). Le principe de base est de considérer que le Soleil décrit chaque jour dans le ciel, un cercle différent et dont une partie est masquée en dessous de l'horizon. Les rayons qui éclairent la pointe du gnomon forment donc un cône, tout comme l'ombre engendré par cette pointe (fig. 8 page ci-contre). La course de l'ombre de la pointe du gnomon sur un plan horizontal (le cadran) correspond à l'intersection de ce plan et du second cône. Or Appolonius (vers 240 av. J.C.) a montré que ces intersections avaient des formes particulières qui correspondent, généralement, à des hyperboles. Dans ce texte aucune application pratique n'est proposée ; les seuls paramètres utilisés sont la latitude du lieu et la déclinaison du jour, et la seule constante mentionnée est l'obliquité de l'écliptique, mais sa valeur n'est pas indiquée (Morélon 1987, p. CXXIII). Soulignons enfin que Thäbit ibn Qurra mentionne que les lignes horaires ne sont pas droites (Morélon 1987, p. 134), mais il ne dit pas comment il s'en est rendu compte.

Le texte #9 est conçu comme la suite du précédent dont les résultats sont supposés connus. Il s'agit ici de dessiner, un cadran solaire dans toutes positions envisageables. Pour cela, Thabit ibn Qurra défini d'abord trois cadrans fondamentaux (fig. 9 page suivante) et après avoir considéré qu'ils étaient les équivalents de cadrans horizontaux situés ailleurs sur Terre, il calcule les coordonnées polaires et les coordonnées rectangulaires de l'ombre. Puis il envisage

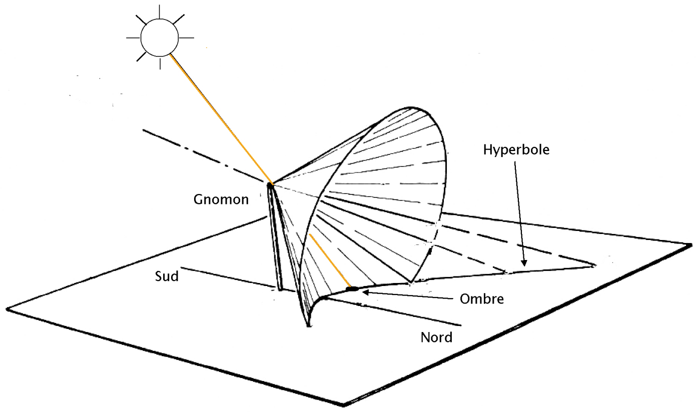


Figure 8 – L'Intersection, avec un plan horizontal, du cône d'ombre provoqué par la pointe de gnomon suite à la rotation apparente du Soleil dans le Ciel, est une hyperbole.

des cadrans ayant d'autres positions qu'il définit par leur orientation et leur ligne de plus grande pente. Puis il montre comment, en utilisant au choix, les coordonnées polaires ou les coordonnées rectangulaires, on peut passer des cadrans de base aux cadrans inclinés. Notons que cette théorie est utilisable aussi bien pour les heures temporaires que pour les heures égales.

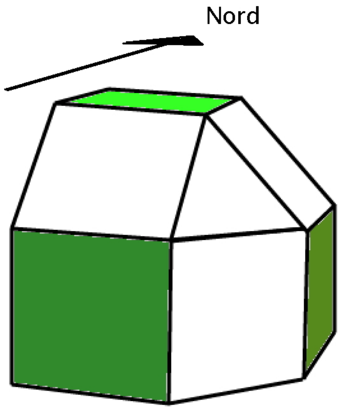


Figure 9 – Les trois cadrans fondamentaux de Thabit ibn Qurra (en vert) et les cadrans qui en découlent (en blanc).

Pour finir, Morélon signale une annexe (appendice) qui correspond à un calcul effectif de deux cadrans perpendiculaires entre eux pour la ville de Samarra. Mais la méthode de projection utilisée, est totalement différente de celle du texte #9.

6 al- Battani (858–929)

Al-Battani est né 10 ans après l'abandon du Mutazilisme, et il est resté toute sa vie dans sa région natale, au Nord de la Syrie actuelle. Il était lui-même musulman, mais ces ancêtres étaient Sabiens (comme Thabit ibn Qurra qui était originaire de la même région) (van Dalen in Hockey 2007). C'est avant tout un observateur, et on compare souvent la qualité de ces mesures à celle de Tycho Brahé, qui œuvra 700 ans plus tard. Al-Battani est l'auteur d'un *Zij* (ouvrage d'astronomie) qui a eu une influence considérable en Europe, il fut traduit deux fois en latin au XII^{e} siècle, une fois au XIII^{e} et réimprimé jusqu'au XVII^{e} siècle (1645 à Bologne). On note aussi des traductions en hébreux (XII et XIV^{e} siècle). Il est largement utilisé par tous les auteurs européens du Moyen-âge et de la Renaissance (Copernic le cite 23 fois dans *De revolutionibus. . .*). Notons également qu'il s'agit d'un des rares astronomes médiévaux à ne pas avoir admis la théorie de la trépidation. Son *Zij* a été traduit une nouvelle fois au début XXe siècle par Nallino (1899–1907), mais encore une fois en latin (!), il n'existe donc aucune version dans une langue occidentale moderne, si bien qu'al-Battani est un peu négligé actuellement par les historiens des sciences. Heureusement, nous disposons d'une analyse par Delambre (1819, p. 10–62) qui a travaillé sur l'édition de 1645 de la traduction de Platon de Rivoli (XIIe). Le caractère imparfait de cette traduction et le style condescendant de Delambre quand il parle de ses prédécesseurs altèrent probablement l'information, mais nous supposerons que l'essentiel y est.

En suivant Delambre (1819) le long des 52 pages qu'il consacre au *Zij* de al-Battani (*Albategnius* selon l'habitude occidentale ancienne) on a le sentiment que ce dernier ne s'éloigne jamais beaucoup de l'Almageste tout en multipliant les approches mathématiques renouvelées [30] et les corrections de constantes (inclinaison de l'écliptique, apogée et excentricité solaires…) ; Hartner (1970) le soupçonne d'ailleurs d'avoir voulu écrire une *nouvelle Almageste*. Mais quand nous arrivons au chapitre consacré à la gnomonique (n° 56), le style du propos change brutalement et on découvre un manuel pratique de réalisation d'un cadran solaire horizontal (fig. 10 page ci-contre). L'auteur nous indique comment choisir le meilleur rapport longueur / largeur de la table, et le lieu optimal d'implantation du gnomon. Pour le tracé des lignes horaires (heures temporaires) et des arcs principaux, on en reste à la méthode déjà évoquée par al-Khwarizmi, c'est-à-dire localiser les *nœuds* du cadran grâce aux coordonnées polaires fournies dans une table (Delambre 1819, p. 56). Notons que plus loin Delambre (1819, p. 60), analyse des tables données en annexe du Zij pour les latitudes de 36° et 38°, il considère que ces tables sont « suffisamment correctes (*sic*) », mais, et il insiste bien, al-Battani ne nous indique pas la méthode de calcul qu'il a utilisé [31], travers extrêmement fréquent des ouvrages pratiques de gnomonique arabe. Al-Battani propose ensuite (Delambre 1819, p. 57) différentes méthodes pour orienter correctement le cadran, mais sans reprendre la méthode des cercles indiens qu'il avait pourtant décrit dans un chapitre d'astronomie solaire (Delambre 1819, p. 18). Pour finir al-Battani nous indique comment matérialiser, sur le cadran, la *Qibla*, c'est-à-dire la direction de la Mecque pour le lieu d'implantation du cadran. Delambre a manifestement du mal à suivre les calculs de l'auteur et impute la difficulté du texte au traducteur du XIIe siècle. Toujours est-il que c'est la première fois que nous voyons l'intégration d'un élément religieux sur la table même du cadran.

7 Ibrahim ibn Sinan (908–946)

Ibn Sinan est originaire de Bagdad et qui semble y avoir passé sa vie ; c'est le petit-fils de Thabit ibn Qurra mais il s'agit surtout d'un grand mathématicien (Van Brummelen, in Hockey 2007) qui est également connu pour ses travaux en astronomie. Ceux-ci incluent des révisions des théories de Ptolémée sur le mouvement des planètes. Selon Morélon (1987), c'est lui le véritable auteur de la théorie de la trépidation des équinoxes, mais les preuves manquent. Ces travaux en gnomonique sont contenus dans un ouvrages intitulé : *Sur les instruments des ombres* [32]. Ce livre a été écrit très jeune, vers 16 ou 17 ans, et il lui a donné sa forme définitive vers 25 ans (Rashed & Bellosta, 2000, p. 293). C'est un ouvrage qui était à l'origine composé de 3 livres, mais seul le premier et une partie du second nous est parvenu. L'ambition de ce

30. Notamment en abandonnant la *corde* utilisée par Ptolémée pour le *sinus*.
31. Il est néanmoins assuré qu'il ne s'agit pas des formules indiennes.
32. Édité, traduit et commenté par Rashed & Bellosta, (2000), p. 291–434.

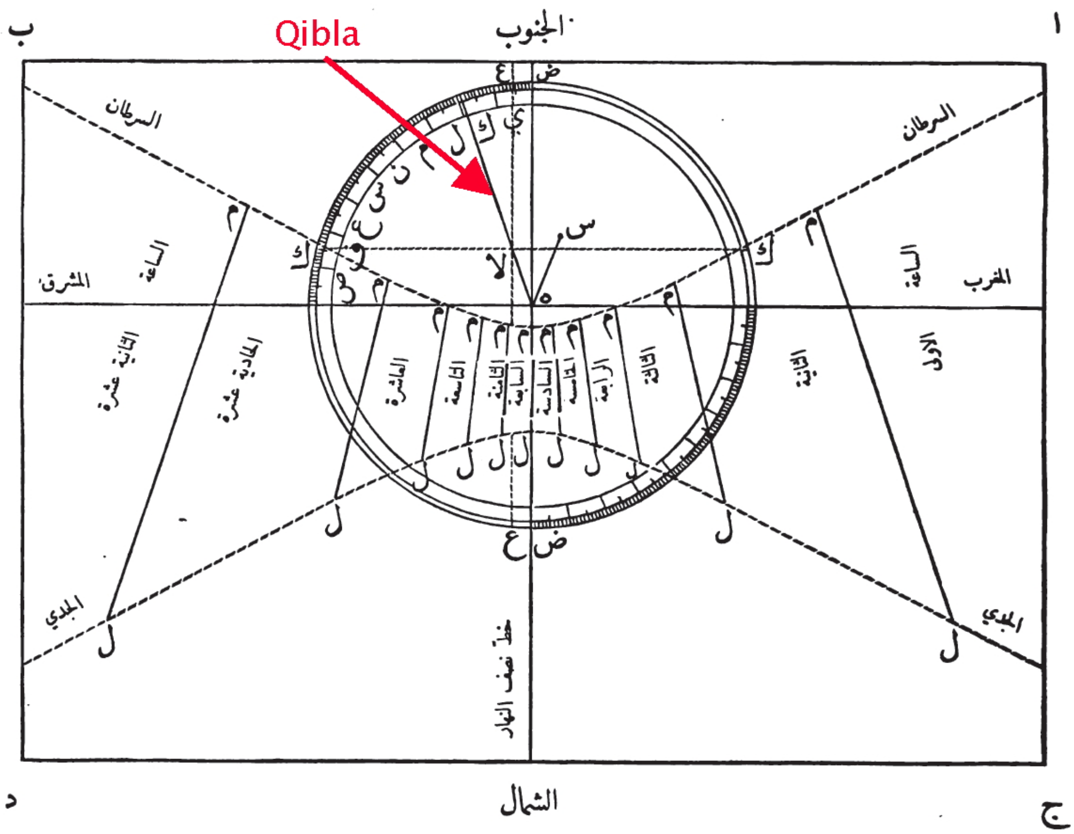


Figure 10 – Le cadran solaire de al-Battani. Illustration de Nallino (1899) d'après une figure originale (?). On remarque le cercle gradué centré sur la position du gnomon qui permet un report facile des nœuds en coordonnées polaires, et l'indication de la *Qibla* (Q) calculée ici pour la région natale de al-Battani.

travail est énorme, l'auteur prétend, selon ces propres termes [33], établir une théorie unitaire des cadrans solaires plans, c'est-à-dire une théorie indépendante de la position du cadran dans le référentiel local (plan horizontal et méridien...). Voilà comment est construite son approche : tout d'abord, constatant que le rayon terrestre est négligeable devant l'éloignement du Soleil, il considère que son cadran est situé au centre de la Terre, laquelle est considérée comme totalement transparente. Il est donc amené à définir l'orientation de son cadran en fonction de repères célestes. Connaissant la course du soleil autour de ce cadran (géocentrisme oblige), il établit, grâce à la théorie des coniques et à la trigonométrie sphérique, le dessin des arcs de déclinaison et des lignes horaires dans tous les cas de figures. À cette occasion, il démontre, pour la première fois dans l'histoire de la gnomonique, que les lignes horaires des cadrans en heures temporaires ne sont pas des droites [34] (voir à ce sujet Collin 2014). Pour finir, il constate que n'importe quel cadran dans n'importe quelle position et n'importe quelle orientation, mais positionné sur la surface de la Terre, est équivalent à un des cadrans

33. On dit que les anciens, et leurs successeurs jusqu'à présent, construisaient pour tout plan un cadran particulier, dont ils déterminaient les lignes selon une voie propre à celui-ci. J'ai cherché et fixé solidement une voie universelle pour tout plan, par une unique démonstration que j'ai établie : cité par (Rashed & Bellosta, 2000, p. 293).

34. Même si, sur un cadran horizontal situé dans le bassin méditerranéen, l'approximation linéaire est très correcte. Rappelons que Thabit ibn Qurra avait déjà mentionné ce caractère non-linéaire, sans le démontrer, ni même s'y arrêter particulièrement.

dont il vient d'établir le tracé. L'objectif initial est parfaitement rempli, Ibn-Sinan est donc capable de dessiner n'importe quel cadran, situé n'importe où sur la Terre avec une théorie mathématique unique. Il s'agit clairement d'une démarche très originale dans l'histoire de la gnomonique, j'y reviendrai en conclusion. La suite du texte, perdue, correspond à l'étude des cadrans non-planaire, selon ibn Sinan lui-même, il s'agit de contributions totalement nouvelles... mais, hélas, nous n'en savons pas plus.

8 Ibn al-Haytham (965–1039)

Ibn al-Haytham (Bassora 965, Le Caire 1039) (Alhacen pour les latins) est considéré comme une figure majeure de l'histoire des sciences (Langermann in Hockey 2007). Sur le plan de l'astronomie, ce qui semble avoir orienter son activité, c'est l'ambition de rendre compatibles les modèles physiques (philosophie naturelle), les modèles mathématiques et l'optique de l'observation ; compatibilité qui, il est vrai, n'est pas le point fort de la science grecque. Cette ambition, qui nécessitait de refonder toute la cosmologie, était hors de sa portée, mais le mouvement était lancé et son influence fut énorme par la suite.

En ce qui concerne la gnomonique, on connaît deux ouvrages tous deux édités et commentés par Rashed (2006) :

— Le premier : *Sur les cadrans solaires horizontaux*, est un manuel de fabrication, mais il ne se limite pas aux explications indispensables au cadranier. En fait, on y trouve toutes les formules nécessaires à l'établissement des tables de coordonnées polaires des nœuds (fig. 1 page 911) qui permettront ensuite de tracer un cadran horizontal quel que soit la latitude, mais ces formules ne sont pas justifiées. Dans cet ouvrage, ibn al-Haytham signale que les lignes horaires ne sont pas droites, mais il concède que, en pratique, c'est inutile de s'en soucier (Rashed 2006, p. 822) et donne une procédure pour tracer ces lignes de façon rectiligne.

— Le second : *Sur les lignes des heures* est d'une toute autre ambition scientifique. Dans l'introduction de son texte il analyse dans le détail les résultats de Ibn Sinan, notamment en ce qui concerne le caractère non linéaire des lignes horaires, et affirme que la démonstration est incomplète. Tout son propre ouvrage aura comme but de reprendre cette démonstration. À ce niveau-là, il s'agit d'un problème purement mathématique qui n'a plus grand-chose à voir avec les problèmes pratiques de gnomonique. Son texte correspond à l'énoncé de six propositions géométriques nouvelles nécessaires à sa démonstration, qui vient ensuite, et qui en comprend cinq. Son travail se termine par une tentative d'évaluation de l'écart entre les lignes horaires réelles et les droites *classiques*. Il conclut que la différence est très faible (insensible), ce qui justifie en quelque sorte l'approximation qu'il accepte dans son premier traité. Rashed (2006) voit dans cette discussion une distinction conceptuelle novatrice entre l'objet mathématique (la ligne déduite du calcul) et l'objet physique (la ligne gravée sur le marbre). Pour ma part, et sous réserve d'une analyse plus fine, j'ai surtout l'impression que ibn al-Haytham ne s'est pas rendu-compte que l'écart entre les deux tracés dépendait de la latitude du lieu, et que ce qu'il conclut est vrai au Caire mais qu'à haute latitude, la différence devient significative (voir Collin 2014 et fig. 12 page 104).

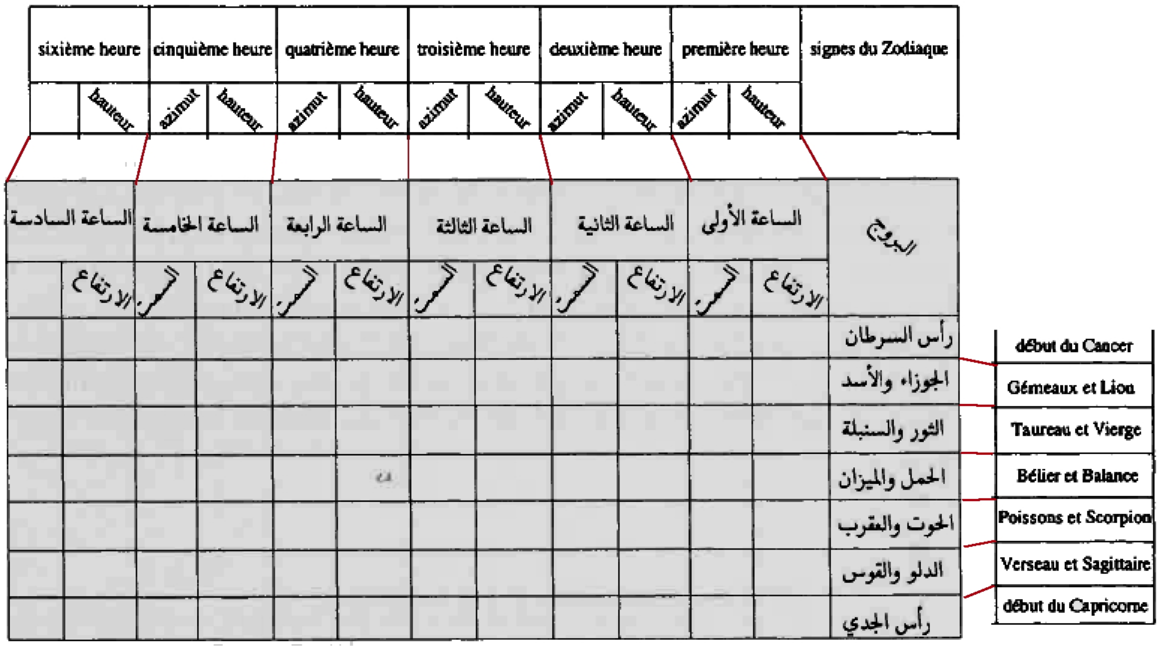


Figure 11 – Le cadre type d'une table gnomonique proposé par ibn al-Haytham. Une fois transformée la hauteur en ombre, on a tous les éléments pour construire le cadran horizontal. On remarque que, selon les habitudes arabes, que l'on retrouvera pendant les siècles suivants, les signes sont caractérisés par leur début contrairement à ce que l'on constate en occident (voir Jarray & Mercier 2015, p. 60).

9 al-Biruni (973–c. 1050)

Al-Biruni (973 Ouzbékistan, 1048 ? Afghanistan), est également un savant majeur qui a écrit au moins 146 ouvrages (22 nous sont parvenus). La moitié de ceux-ci concerne les sciences exactes. En astronomie et comme ses prédécesseurs, il ne s'éloigne pas beaucoup de Ptolémée. Dans la seconde moitié de sa vie, il découvre la science indienne (Kennedy 1970, Yano in Hockey 2007) et traduit des ouvrages scientifiques du sanscrit à l'arabe. Notons également une activité importante en astrologie. D'une manière générale, son œuvre fut très peu diffusée dans l'occident latin.

Dans le domaine de la gnomonique, sa principale œuvre est le *Traité exhaustif sur les ombres*, édité et commenté par Kennedy (1976). Il ne s'agit pas vraiment d'un traité de gnomonique (bien qu'on ne soit jamais bien loin de ce sujet), mais plutôt d'une sorte d'encyclopédie sur le thème de l'ombre (fig. 13 page 105). Il y a beaucoup d'allusion littéraires et poétiques, et la religion y est très présente (y compris par une curieuse mention apocryphe (?) d'un épisode des évangiles ; (Kennedy, 1976, v. 1, p. 44). L'auteur y mentionne al-Khawarizmi (Kennedy, 1976, v. 1, p. 176), Thabit ibn Qurra (Kennedy, 1976, v. 1, p. 47), ibn Sinan (Kennedy, 1976, v. 1, p. 47), et al Battani (Kennedy, 1976, v. 1, p. 139). Dans les chapitres d'introduction, il définit la tangente et la cotangente (Kennedy, 1976, v. 1, pp. 63–64, p. 100) mais ne les utilise pas de façon systématique dans ses développement mathématiques (voir exemple en introduction).

En ce qui concerne la gnomonique, on retiendra surtout le contenu des chapitres suivants :

- l'ombre sur un plan incliné (ch. 15) ;
- l'ombre à midi (ch. 16) ;

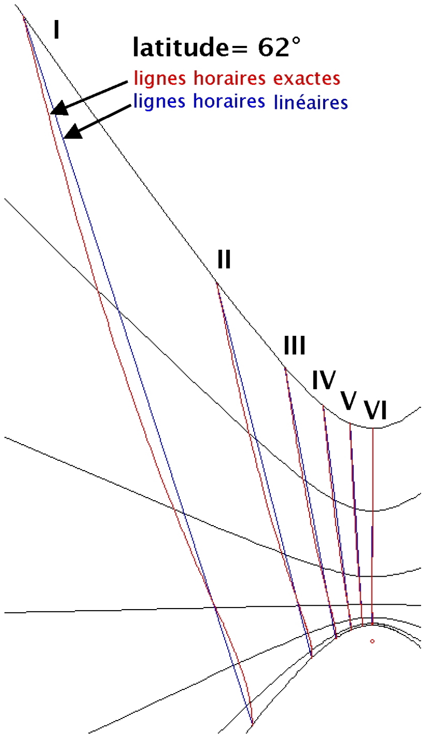


Figure 12 – Un cadran solaire en heures temporaires pour une haute latitude. À la latitude de Bagdad, ou du Caire, les lignes rouges et bleues seraient confondues (voir aussi Collin 2014).

— l'ombre à l'équinoxe (ch. 17) ;
— la détermination du méridien (ch. 18 à 20) ;
— la durée du jour clair et la position du lever du Soleil (ch. 22, voir aussi Lesley 1957) ;
— la détermination de l'heure par l'ombre (ch. 23, voir aussi Davidian 1960) et les azimuts (ch. 24).

Dans ces chapitres et de manière générale, il présente diverses méthodes dont de nombreuses méthodes approximatives d'origine indienne en supplément de la méthode rigoureuse arabe ou grecque. Mais dans son texte, la distinction est difficile à faire et l'ampleur des approximations des méthodes indiennes n'est pas évaluée. Dans au moins un cas il va même jusqu'à se tromper et semble recommander une méthode fausse [35]. Al-Biruni est un scientifique de qualité, capable de démonstrations complexes et rigoureuses (voir son travail sur l'équation solaire, Kennedy 1958), mais la structure qu'il a choisi pour son livre sur les ombres [36], peut clairement être à l'origine de confusion pour le lecteur à la recherche de méthodes numériques simples.

Après ces chapitres purement scientifiques, al-Biruni s'intéresse aux prières (ch. 25) avec longue discussion sur ce que sont les heures « correctes » selon les différents Imams. Puis, il aborde la question de la détermination de ces heures avec des instruments (ch. 26 qui concerne surtout les astrolabes). C'est dans ce chapitre que Biruni exprime une règle pour le calcul de *Zhur*, que l'on retrouvera plus tard à l'autre bout de l'empire (influence ou convergence ?), et qui est connue sous le nom de *Zhur andalou* (Kennedy, 1976, v. 1, p. 235). Biruni nous dit en effet que la prière de midi (*Zhur*) a lieu quand l'ombre a augmenté de trois *digits* par rapport

35. Il critique l'utilisation de ce qui est connu comme les *cercles indiens* pour déterminer le méridien local car, dit-il, vers l'équinoxe la déclinaison change au cours du jour (ce qui est vrai mais négligeable) et il conseille une curieuse construction géométrique avec 3 ombres qui est erronée (Kennedy, v. 2, p. 91).

36. En dépit de son intérêt historique car beaucoup des travaux qu'il détaille sont actuellement perdus.

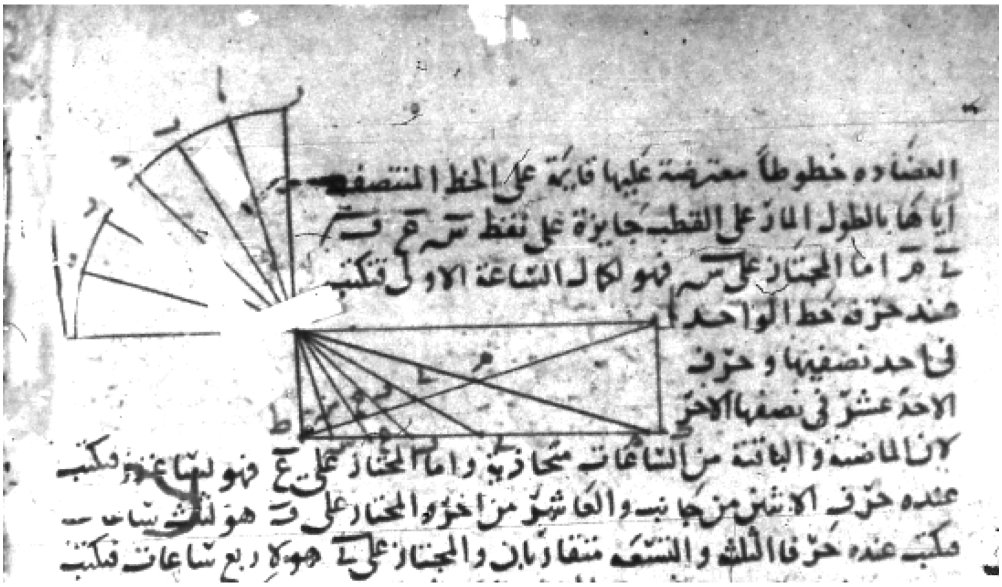


Figure 13 – Une des figures du manuscrit du traité de al-Biruni (Patna (India), Bankipore 2468).

à midi, et quelques lignes plus loin il explique que le *digit* équivaut à la moitié du sixième du gnomon (soit 1/12). *Zhur*, selon cette règle, commence donc quand l'ombre a augmenté de 1/4 de la longueur du gnomon. Curieusement ni dans ses commentaires, ni dans un article traitant spécifiquement des prières selon al-Biruni (Kennedy 1976, v. 2 ; Kennedy & Muruwwa 1975) l'auteur de l'édition ne mentionne l'originalité de cette règle [37]. De même King (par exemple 2014) ne fait jamais le lien entre la règle andalouse de *Zhur*, qu'il mentionne longuement, et ce texte de al-Biruni.

Le traité se termine par quelques descriptions d'instruments gnomoniques dont un cadran portatif qui ressemble à un anneau astronomique (fig 14 page suivante). Enfin, en quelques lignes, l'auteur explique comment utiliser ce qui précède pour dessiner des cadrans plans et fixes ; il conseille notamment de tracer les lignes de prières (Kennedy, 1976, v. 1, p. 243–244), ce qu'aucun des auteurs précédents n'avait envisagé, mais il ne dit pas comment faire !

10 Conclusions

Dans cet article, j'examine les œuvres gnomoniques de six auteurs arabophones du IX^{e} au XI^{e} siècle. Cet échantillon est très partiel, ainsi le plus ancien texte connu de gnomonique arabe est l'œuvre de al-Fazari, mais il est perdu. Dans le « Kitab-al-Fihrist », Ibn al-Nadim énumère les noms de Habash al-Hasib, al-Khwârizrní, ibn Sabbah, al-Farghani, al-Adami, et al-Shatawi comme étant ceux d'auteurs d'ouvrage de gnomonique. Beaucoup de ces écrits sont perdu (Rashed & Bellosta, 2000). Mais, Kennedy (1976) considère que la période qui nous intéresse ici, n'a produit que trois œuvres gnomoniques importantes : les livres de Ibn Sinan, al-Haytham, et al-Biruni qui sont tous les trois examinés ici. On peut donc supposer que les conclusions qui se dégagent de cette étude sont significatives. Ces conclusions sont les suivantes :

37. Il est vrai que le passage est confus, il y est fait allusion à (la prière ?) de l'après-midi qui commence avec une augmentation de 13 digits alors que l'on s'attend à 12.

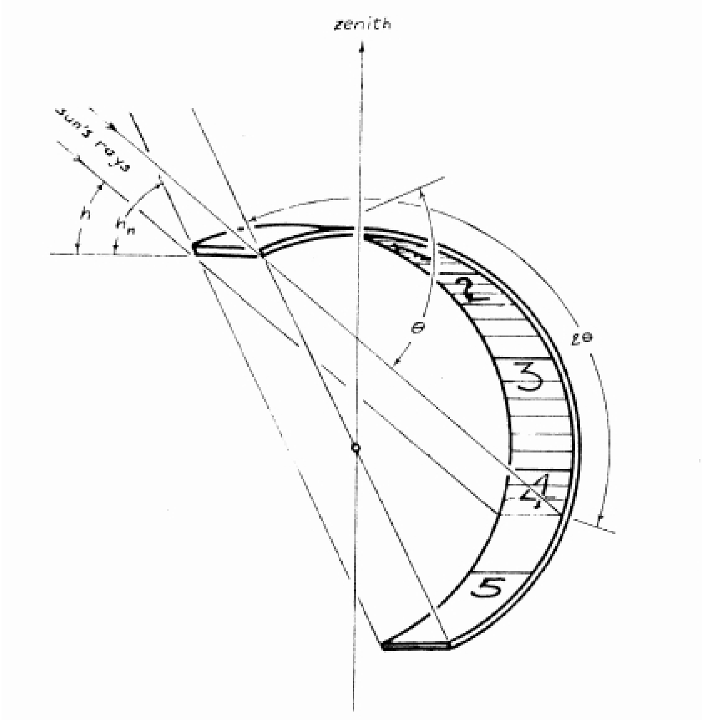


Figure 14 – Reconstitution de l'anneau astronomique de al-Biruni (Kennedy, 1976).

1. Le premier point à souligner est que la tradition arabo-musulmane des cadrans solaires s'éloigne significativement de l'héritage gréco-romain. Il est probable que cela résulte de l'absence de transmission d'un texte fondamental sur les cadrans comme, par exemple, l'*Analemme* de Ptolémée. En effet, rien, dans les premiers siècles de la Science arabe, ne permet de supposer que ce texte ait été connu. En fait, et plus largement comme le souligne Savoie (2014, p.80), aucune référence explicite à cet ouvrage n'a jamais été trouvé dans les manuscrits arabes même plus tardifs ; tout au plus certains développements peuvent présenter des similitudes avec les conceptions de Ptolémée (voir par exemple l'ouvrage d'Ibn al-Raqqam (1250–1315) ; Carandell, 1988, p. 64). Ceci dit, il a existé des traductions arabes de l'Analemme, puisque c'est à partir d'un de ces manuscrits (de mauvaise qualité) que Commandino (Italie, 1509–1575) a tenté, pour la première fois, une reconstitution de l'ouvrage en Latin. En fait, tout se passe comme si les arabes avaient dû refonder une science des cadrans solaires en exploitant, soit la Science Indienne et ses approximations, soit l'Almageste. Pour l'astrolabe par contre, nous l'avons vu, au moins un texte fondamental, celui de Théon d'Alexandrie, a permis la continuité entre les traditions Gréco-Byzantine et le monde arabe.
2. King (2014) considère que les traités gnomoniques arabes sont de deux types : des ouvrages théoriques et des manuels pratiques. Le tableau qui se dégage pour la période étudiée ici est beaucoup plus nuancé : entre les simples tables, plus ou moins exactes et les considérations « hors-sol », au sens propre comme au sens figuré, de Ibn-Sinan, on trouve tous les intermédiaires.

   Ce qui est remarquable, c'est que la tradition des tables calculées avec des formules indiennes perdureront au moins jusqu'au XIVᵉ siècle, alors que la théorie unifiée de Ibn-Sinan n'aura aucune suite. Il est vrai que la gnomonique est avant tout une science appliquée et que les problèmes réels qui se posent sont toujours par rapport à un référentiel local. Mêmes les auteurs les plus récents, comme François Bedos de Celles, Guillaume Bigourdan ou Denis Savoie, présentent toujours des théories différentes selon la position du cadran dans le repère local (cadran horizontal, vertical, déclinant...). Le seul cas où l'utilisation d'une théorie unitaire peut se révélée pertinente est dans le domaine de l'informatique et des logiciels de dessin de cadrans solaires... de là à dire que Ibn-Sinan avait un millénaire d'avance !

3. Il est certain que les nécessités du culte musulman ont pesé d'une manière ou d'une autre, dans le développement de la gnomonique arabe. Mais, nous l'avons vu, l'intégration de repères à signification religieuse dans les cadrans s'est fait relativement tardivement et ne concerne en fait que deux auteurs : al-Battani pour la Qibla, et al-Biruni pour les lignes de prière (et encore, il ne s'agit que d'une déclaration de principe, sans qu'aucune méthode de dessin ne soit proposée).
4. Toute la gnomonique des cadrans solaires de la période envisagée repose sur le couple : gnomon perpendiculaire / heures temporaires. La première occurrence d'un style polaire, et de l'utilisation des heures égales, ne viendra que plus tard avec le cadran de la Grande Mosquée de Damas, réalisé par Ibn Ash Shatir en 1371 (Janin 1972). Cela ne veut pas dire que certains auteurs n'ont pas envisager des gnomons obliques ; un exemple est donné par Thabit ibn Qurra (*cf.* Morélon 1987, p. cxxxiv & p. 158) qui constate que seule la pointe du gnomon à une fonction gnomonique. Il en conclut qu'il n'y a pas d'inconvénient à donner une autre inclinaison au gnomon si la pointe reste au même endroit. Il indique, par ailleurs, les formules trigonométriques élémentaires qui permettent de retrouver les caractéristiques du gnomon perpendiculaire équivalent. Ce serait donc clairement une erreur de confondre ce genre de gnomon oblique avec des styles polaires, comme le fait Berggren (2001).

Références

[1] Abdeljaoud M. (2005) : *Les arithmétiques arabes (9e–15e siècles).* Ibn Zedidoun ed., Tunis, 125 p.

[2] Ahmedov A.A., Ad-Dabbagh J. & Rosenfeld B.A. (1987) : *Istanbul manuscripts of al-Khwarizmi's treatises*, ERDEM, 3–7, pp. 163–186.

[3] Balagna J. (1984) : *L'imprimerie arabe en Occident (XVIe, XVIIe, XVIIIe siècles)*, volume II de la collection Islam & Occident, Paris, Éditions Maisonneuve et Larose, 153 p.

[4] Berggren J.L. (2001) : « Sundials in Medieval Islamic Science and Civilization », *The Compendium*, 8, pp. 8–14.

[5] Bonin J. (2015) : *La Mesure du temps dans l'Antiquité*, Les belles lettres, 448 p.

[6] Carandell J. (1988) : *Risala fi ílm al-zilal de Muhammad ibn al-Raqqam al-Andalusi.* Edicion, traduccion y comentario por Joan Carandell. Barcelona, 323 p.

[7] Charrette F. & Schmidl P.G (2004) : *al-Khwarizmi and Practical Astronomy in Ninth-Century Baghdad.* The Earliest Extant Corpus of Texts in Arabic on the Astrolabe and Other Portable Instruments, SCIAMVS, 5, pp. 101—198.

[8] Collin D. (2014) : « Les lignes horaires temporaires dans les cadrans solaires antiques » in Savoie D. : *Recherches sur les cadrans solaires*, Brepols édt. Chap. III, pp. 53–78.

[9] Davidian M.L. (1960) : « Al-Biruni on the Time of Day from Shadow Lengths », *Journal of the American Oriental Society*, Vol. 80, N° 4, pp. 330–335.

[10] Delambre J.B. (1819) : *Histoire de l'astronomie du Moyen-âge*, Paris, Courcier, 764 p.

[11] Djebbar A. (2001) : *Une histoire de la science arabe*, tome I : *Astronomie, théorique et appliquée*, « Points- Sciences », 386 p.

[12] Carmody F. J. (1955) : « Notes on the Astronomical Works of Thabit b. Qurra », *Isis*, Vol. 46, N° 3, pp. 235–242.

[13] Carmody F. J. (1960) : *The Astronomical Works of Thabit b. Qurra.* Berkeley : University of California Press. 263 p.

[14] El Faïz M. (2005), *Les maîtres de l'eau. Histoire de l'hydraulique arabe*, Actes Sud, Arles, 363 p.

[15] Evans J. (2016) : *Histoire et pratique de l'astronomie ancienne.* Relié sous jaquette et illustré. Traduit de l'anglais par Alain-Philippe Segonds. Belles Lettres, 570 p.

[16] Hartner W. (1970) : *Al-Battani.* In Dictionary of Scientific Biography, edited by Charles Coulston Gillispie. New York : Charles Scribner's Sons. Vol. 1, pp. 507–516.

[17] Hernandez-Peres A. (2018) : *Astrolabios en al-Andalus y los reinos medievales hispanos*, La Ergastula edt. 244 p.

[18] Hogendijk J. P. (1991) : « Al-Khwarizmi's table of the « Sinus of the hours » and the underlying sine table ». *Historia scientiarum*, 42, p. 1–12.

[19] Hockey Th. (2007) : *Biographical Encyclopedia of Astronomers*, Springer Reference. New York : Springer, 1433 p.

[20] Janin L. (1972) : « Le Cadran Solaire de la Mosquée Umayyade à Damas », *Centaurus*, vol. 16, n° 4, pp. 285–298.

[21] Jarray F. & Mercier E. (2015) : « Cadrans de la Grande Mosquée al-Zaytuna », *Cadran Info*, n° 31, pp. 53–68.

[22] Kennedy E. S. & Muruwwa A. (1958) : « al-Biruni on the solar equation », *Journal of Near Eastern Studies*, Vol. 17, N° 2, pp. 112–121.

[23] Kennedy E. S. (1970) : *Al-Bīrūnī.* In Dictionary of Scientific Biography, edited by Charles Coulston Gillispie. Vol. 2, pp. 147–158. New York : Charles Scribner's Sons.

[24] Kennedy E. S. (1975) : *Al-Birüni on the Muslim Times of Prayers.* In Chelkowski, P. (ed.) The Scholar and the Saint New York, pp. 83–94

[25] Kennedy E. S. (1976) : *The Exhaustive Treatise of Shadows*, Volume I : Translation : [1]. 281 Volume II : Commentary : [1]. 222 p. University of Aleppo, Aleppo.

[26] King D. A. (1978) : « Three sundials from Islamic Andalusia », *Journal for the History of Arabic Science*, 2, pp. 358–392.

[27] King D. A. (1983). *Al-Khwārizmī and New Trends in Mathematical Astronomy in the Ninth Century.* Occasional Papers on the Near East 2. New York : New York University, Hagop Kevorkian Center for Near Eastern Studies. 43 p.

[28] King D. A. (2014) : *In synchrony with the heavens*, volume 1 : *The call of the Muezzin* ; Brill edt., 930 p. ; volume 2 : *Instruments of mass calculation*, Brill edt., 1066 p.

[29] Lesley, M. (1957) : « Biruni on rising times and daylight lengths », *Centaurus*, 5 : pp. 121–141.

[30] Mercier E. (2014) : « Cadrans islamiques anciens de Tunisie », *Cadran-info*, n° 29, pp. 53–65.

[31] Morélon R. (1987) : *Œuvres d'astronomie*, édition du texte arabe, traduction française et commentaire, Paris, Les Belles Lettres, 650 p. (CXLV + 321 + 168 + XV), (Collection « Sciences et philosophie arabes — Textes et Études »).

[32] Nallino C.A. (1899, 1903, 1907) : *Albatenii Opus Astronomicum.* 3 vols. Pubblicazioni del Reale Osservatorio di Brera in Milano XL 40, 327 p. + 413 p. + 280 p. (plusieurs rééditions).

[33] Neugebauer O. (1949) : « The Early History of the Astrolabe », *Isis* 40, pp. 240-56, repr. in his Astronomy and History, 1983, New York, pp. 278–94.

[34] Rashed R. & Bellosta H. (2000) : *Ibrahim Ibn Sinan : Logique et géométrie au X^e^ siècle*, 809 p., Brill, Leyden.

[35] Rashed R. (2006) : *Les mathématiques infinitésimales du IX^e^ au XI^e^ siècle.* Volume V : *Ibn al-Haytham, Astronomie, Géométrie sphérique et trigonométrie*, Al-Furqan Islamic Heritage Foundation. London, XIV + 972 + V p.

[36] Savoie D. (2007) : *La gnomonique.* Les Belles Lettres, 521 p.

[37] Sayili A. (1988) : *The observatory in Islam and its place in the general history of the observatory.* Ankara : TTK, 472 p.

[38] Sédillot, J. J. (1834) : *Traité des instruments astronomiques des Arabes.* 2 Vols. Paris.