HAL
open science

Al-Bīrūnī : les principes des méthodes de détermination de la distance des astres errants à la Terre au crible des données d'observation

Guillaume Loizelet

▶ **To cite this version:**

Guillaume Loizelet. Al-Bīrūnī : les principes des méthodes de détermination de la distance des astres errants à la Terre au crible des données d'observation. Cahiers François Viète, 2019, Journées Jeunes chercheuses et chercheurs SFHST 2017, III (6), pp.7-35. hal-02074596

HAL Id: hal-02074596

https://hal.science/hal-02074596v1

Submitted on 2 Apr 2019

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.

CAHIERS
FRANÇOIS VIÈTE

Série III – N° 6

2019

Varia

Journées Jeunes chercheuses et chercheurs

SFHST 2017

sous la direction de
Jenny Boucard & Thomas Morel

Centre François Viète
Épistémologie, histoire des sciences et des techniques
Université de Nantes - Université de Bretagne Occidentale

Imprimerie Centrale de l'Université de Nantes
Mars 2019

Cahiers François Viète

La revue du *Centre François Viète*
Épistémologie, Histoire des Sciences et des Techniques
EA 1161, Université de Nantes - Université de Bretagne Occidentale
ISSN 1297-9112

cahiers-francois-viete@univ-nantes.fr
www.cfv.univ-nantes.fr

Depuis 1999, les *Cahiers François Viète* publient des articles originaux, en français ou en anglais, d'épistémologie et d'histoire des sciences et des techniques. Les *Cahiers François Viète* se sont dotés d'un comité de lecture international depuis 2016.

Rédaction

Rédactrice en chef – Jenny Boucard
Secrétaire de rédaction – Sylvie Guionnet
Comité de rédaction – Delphine Acolat, Hugues Chabot, Colette Le Lay, Cristiana Oghina-Pavie, François Pepin, Olivier Perru, David Plouviez, Pierre Savaton, Valérie Schafer, Josep Simon, Alexis Vrignon

Comité scientifique

Yaovi Akakpo, David Baker, Grégory Chambon, Ronei Clecio Mocellin, Jean-Claude Dupont, Luiz Henrique Dutra, Hervé Ferrière, James D. Fleming, Catherine Goldstein, Alexandre Guilbaud, Pierre Lamard, Frédéric Le Blay, Baptiste Mélès, Rogério Monteiro de Siqueira, Philippe Nabonnand, Karen Parshall, Viviane Quirke, Pedro Raposo, Anne Rasmussen, Sabine Rommevaux-Tani, Aurélien Ruellet, Martina Schiavon, Pierre Teissier, Brigitte Van Tiggelen

UNIVERSITÉ DE NANTES

ISBN 978- 2-86939-249-4

SOMMAIRE

Avant-propos — Michel Cotte

- GUILLAUME LOIZELET 7
  Al-Bīrūnī : les principes des méthodes de détermination de la distance des astres errants à la Terre au crible des données d'observation

- ADELINE SANCHEZ 37
  Les traductions françaises du Lilium medicinae *de Bernard de Gordon : intérêts d'une approche littéraire et linguistique pour l'histoire de la transmission des savoirs médicaux*

- HÉLÈNE LEUWERS 55
  L'examen de capacité des chirurgiens et des barbiers de Paris : savoir-faire et qualification en justice (XIVe - milieu du XVIe siècle)

- CYRIL LACHEZE 77
  Pour une analyse systémique de la technique : exemple de la production de terre cuite architecturale

- MARION WECKERLE 109
  Facture instrumentale et gestes : éléments pour la restitution historiquement informée du jeu de la clarinette en musique ancienne

- LENY PATINAUX 133
  Enjeux épistémiques et politiques des recherches sur l'évacuation géologique des déchets nucléaires. Étude d'une controverse sur l'implantation d'un laboratoire souterrain dans la Vienne (1994-1998)

Cahiers François Viète, série III, 6, 2019, p. 7-35

Al-Bīrūnī : les principes des méthodes de détermination de la distance des astres errants à la Terre au crible des données d'observation

Guillaume Loizelet*

Résumé

Dans le chapitre X.6 de son traité majeur d'astronomie, Al-Qānūn al-Mas'ūdī, *Al-Bīrūnī discute plusieurs méthodes, basées sur des paradigmes distincts, traitant de la détermination de la distance des astres errants à la Terre. On étudiera ses arguments en prêtant une attention particulière aux nuances de statut qu'il leur accorde en fonction de leur proximité vis-à-vis de données d'observation.*

Mots-clés : Al-Bīrūnī, astronomie, Ptolémée, cosmographie, Arabe, Inde, observation, distance.

Abstract

In Chapter X.6 of Al-Bīrūnī's astronomical opus magnum Al-Qānūn al-Mas'ūdī , *Al-Bīrūnī investigates on several methods, based on different paradigms, concerning the determination of distances between Earth and the wandering stars. In this article I will especially focus on Al-Bīrūnī's evaluation of arguments strenght regarding wether they are observationnally based or not.*

Keywords: Al-Bīrūnī, astronomy, Ptolemy, cosmography, Arabic, India, observation, distance.

* Laboratoire « Sciences, Philosophie, Histoire » (SPHERE, UMR 7219), Institut de Mathématiques de Toulouse.

Il s'agit ici d'étudier par le détail la première partie de la première section du sixième chapitre du livre X du traité intitulé *Al-Qānūn al-Masʿūdī* dédié en 1030 par Abū al-Rayḥān Muḥammad ibn Aḥmad al-Bīrūnī au sultan ghaznavide Mas`ūd ibn Maḥmūd ibn Sabuktajīn (Boilot, 1955, p. 210).

Cette partie revêt en effet un intérêt particulier car Al-Bīrūnī commence par y évaluer trois méthodes permettant de déterminer l'ordre des cinq planètes avant d'examiner et de critiquer deux méthodes concernant la détermination de leurs distances à la Terre en exposant clairement et en critiquant les principes qui les sous-tendent.

Dans son panorama général de l'astronomie arabe, Régis Morelon (1997, p. 1-20) a indiqué qu'une meilleure compréhension de l'astronomie arabe pourrait découler de l'étude de l'intrication entre trois champs scientifiques : l'observation, la théorie mathématique et la théorie physique[1]. La matière du texte d'Al-Bīrūnī permet alors d'examiner les rapports entre observation et théorie en s'interrogeant d'une part sur les relations entre recherche d'observations plus précises et investigations théoriques, et d'autre part sur différentes nuances dans le statut accordé aux preuves selon leur degré de proximité avec des observations fiables.

À cette fin, trois aspects du texte d'Al-Bīrūnī seront questionnés quant au rôle et au statut qu'il attribue à l'observation. Le premier concerne la possibilité d'une base observationnelle à l'arrangement des planètes et plus particulièrement aux positions relatives de Mercure et de Vénus ; le second concerne l'utilisation de la confrontation d'une théorie à des données d'observation bien établies et à la solidité des observations sur lesquelles elle prétend reposer ; le troisième enfin prend appui sur la question de l'accord entre un résultat théorique de détermination de la distance du Soleil à la Terre et une mesure plus directement liée à l'observation des phénomènes.

[1] Pour une définition des deux derniers champs, voir encore son panorama général (Morelon, 1997, p. 1-20).

Éléments de contexte

- *Abū al-Rayḥan al-Bīrūnī*

Abū al-Rayḥan Muḥammad ibn Aḥmad al-Bīrūnī (973-cerca 1050)[2] est né aux abords de la ville de Kath[3], alors capitale du royaume du Khwarezm (le site se trouve dans l'Ouzbékistan actuel), sur les rives du fleuve Amu-Daryâ, l'Oxus des Grecs, non loin de son embouchure dans la mer d'Aral.

Il a été initié à la recherche en mathématique et en astronomie[4] par Abū Naṣr ibn `Irāq[5], qui avait quant à lui étudié sous l'égide d'Abū al-Wafā´ al-Būzjānī[6], tous deux étant des acteurs majeurs des développements de l'astronomie mathématique, dont par exemple le dépassement du recours systématique au théorème de Ménélaüs sphérique tel que pratiqué par Ptolémée dans l'*Almageste*[7].

Mais les activités astronomiques d'Al-Bīrūnī n'ont pas été uniquement de nature théorique, il a également été un observateur de premier ordre. Une de ses plus célèbres observations est l'observation simultanée d'une éclipse de Lune en 997, lui étant à Kath et Abū al-Wafā´ étant à Bagdad, et ce afin de déterminer avec précision la différence de longitude entre les deux villes (Yano, 2007). De façon plus générale, la vérification par l'observation des paramètres astronomiques le conduit fréquemment à ajuster ces paramètres en amont de la mise en œuvre de calculs. Cette démarche est en particulier explicite dans le chapître X.6 du *Qānūn al-*

---

[2] Dans un texte intitulé *De l'Oxus à l'exil*, en introduction de sa traduction d'extraits choisis du *Livre de l'Inde* (Al-Bīrūnī, *Le livre de l'Inde*, p. 11-33), Vincent-Mansour Monteil fournit des références et des informations précises quant aux détails de la biographie d'Abū Rayḥan al-Bīrūnī.

[3] Le nom Bīrūnī dérive du persan *birun*, littéralement *extérieur*. Il serait donc né dans les faubourgs de Kath, aujourd'hui disparue.

[4] Al-Bīrūnī est un savant polyvalent, son œuvre ne se limite pas aux sciences liées à l'astronomie. Voir (Khan, 1982, p. 58-59) pour une liste ordonnée des sujets abordés dans ses travaux.

[5] Voir par exemple l'entrée Manṣūr ibn `Alī ibn `Irāq du *Dictionnary of Scientific Biography* rédigée par Julio Samso (1981).

[6] Voir par exemple l'entrée Abū al-Wafā´ al-Būzjānī du *Dictionnary of Scientific Biography* rédigée par Adolf Youschkevitch (1970).

[7] Pour une discussion sur la querelle de priorité qui a opposé ces deux auteurs et sur le rôle d'Al-Bīrūnī, voir par exemple le commentaire du livre II de l'*Almageste d'Abū al-Wafā´* rédigé par Ali Moussa (2005, p. 76-83).

Mas'ūdī (Al-Bīrūnī, *Al-Qānūn al-Mas`ūdī* (ed. 1956), p. 1305-1307) lorsque l'auteur commence par donner les valeurs des plus petite et plus grande distances de la Lune à la Terre telles qu'obtenues à partir des paramètres du livre V de l'*Almageste* (respectivement 33^{rt}; 33 et 64^{rt}; 10) puis ensuite telles que dérivées de paramètres précédemment ajustés[8] par l'observation (respectivement 32^{rt}; 36 et 64^{rt}; 16)[9].

- *Al-Qānūn al-Mas'ūdī*

Ce traité en onze livres du savant khwarezmien constitue un monument de la littérature astronomique. À titre d'exemples, Ibn al-Qifṭī tient ce texte pour comparable à l'*Almageste* de Ptolémée et ce près de deux siècles après sa rédaction (al-Qifṭī, *Ta´rikh al-ḥukamā´*, p. 97) ; et plus encore son contemporain Yāqūt va jusqu'à émettre l'opinion que ce traité remplacera avantageusement tous les traités qui le précèdent dans le domaine de l'astronomie (Yāqūt, *Irshād al-arīb īla ma`rifat al-adīb*, p. 308)[10].

La réputation de cet ouvrage dans l'orient musulman lui a valu d'être régulièrement copié depuis sa rédaction comme en atteste le nombre de manuscrits encore disponibles à ce jour[11]. Cependant il n'a pas connu de traduction latine et ne semble pas avoir été une source directe pour les astronomes occidentaux, tant arabes que latins, et ce n'est qu'au cours du dernier tiers du XIXe siècle qu'il a commencé à devenir une source pour l'étude de l'histoire de l'astronomie[12].

L'édition du texte complet n'a eu lieu qu'en 1956 sous l'impulsion du ministère de l'éducation indien, et ce après une longue attente et plusieurs tentatives avortées (Al-Bīrūnī, *Al-Qānūn al-Mas`ūdī* (ed. 1956), p. 7-13). Le texte, les tables et les figures de l'édition de 1956 ont été

[8] Chapitre VII.10 du *Qānūn al-Mas'ūdī*.

[9] L'unité utilisée est le rayon terrestre, ici noté ^{rt}. La modification des paramètres du modèle de la Lune a été commentée par Willy Hartner (1954, p. 264).

[10] Jacques-Dominique Boilot (1955, p. 210) fournit une interprétation similaire de ce passage : « Yāqūt estime que le *Canon mas`ūdien* aura effacé la trace de tout livre antérieur d'astronomie ».

[11] (Rozenfeld & Ihsanoğlu, 2003, p. 147) donne une liste de douze manuscrits, (Sezgin, 1978, p. 164-165) en donne quinze.

[12] Pour un passage en revue détaillé de la prise de conscience de l'importance du *Qānūn al-Mas`ūdī*, voir le texte introductif à son édition rédigé par Nizamū´d-Dīn (Al-Bīrūnī, *Al-Qānūn al-Mas`ūdī* (ed. 1956), p. 7-13).

établis sur la base d'un travail préparatoire réalisé par Max Krause (1909-1944) à partir des deux manuscrits complets conservés à Istamboul[13], puis comparé par l'éditeur en chef Nizamū´d-Dīn avec le manuscrit incomplet d'Oxford, celui de Paris et celui du Caire.

Le résultat fournit un support de travail permettant de consulter aisément le texte, avec mention de quelques variantes, mais l'étude détaillée montre que cette édition ne permet pas de se dispenser d'un retour régulier aux sources manuscrites qui présentent de nombreux points de divergence entre lesquels il n'est souvent pas aisé d'arbitrer comme le remarquent d'ailleurs les éditeurs eux-mêmes : « Les variations numériques à l'intérieur des tables ont été un sujet difficile »[14] (Al-Bīrūnī, *Al-Qānūn al-Mas`ūdī* (ed. 1956), p. 18).

Une édition alternative du *Qānūn al-Mas`ūdī*, bénéficiant d'une typographie plus moderne, a été établie par `Abl al-Karīm Jindī en 2002 en comparant l'édition de 1956 et le manuscrit du Caire (Al-Bīrūnī, *Al-Qānūn al-Mas`ūdī* (ed. 2002), p. 36). Malheureusement cette édition ne contient pas d'apparat critique, ce qui impose un recours constant aux sources manuscrites pour qui souhaite exploiter ce traité[15].

Un autre frein à la diffusion du contenu scientifique du traité d'Al-Bīrūnī est sans doute l'absence de traduction de l'ensemble de cette œuvre dans une autre langue que l'arabe[16].

Il est cependant à noter qu'il existe une traduction en anglais du sommaire détaillé du *Qānūn al-Mas`ūdī* rédigée par Edward Kennedy (1974) dont la lecture suffit à appréhender la pertinence de la comparaison

---

[13] Nizamū´d-Dīn indique que Krause a comparé certaines de ses notes avec les manuscrits de Tubbingen et du British Museum (Al-Bīrūnī, *Al-Qānūn al-Mas`ūdī* (ed. 1956), p. 13-22).

[14] Texte original en anglais : « the variations of figures in the tables has been a very difficult feature ».

[15] La comparaison avec l'édition de 1956 montre des choix d'édition différents de la part de Jindī. C'est l'absence de mention de ces choix qui est à regretter.

[16] Pour une liste non exhaustive des traductions partielles de livres, chapitres ou passages du *Qānūn al-Mas`ūdī*, on se référera à (Kennedy, 1970), (Boilot, 1955) et (Rozenfeld & Ihsanoğlu, 2003) ainsi qu'au site de Jan P. Hogendijk (2016). La seule traduction publiée du texte intégral a été rédigée en russe (Al-Bīrūnī, *Kanon Mas`uda*) à partir de l'édition de 1956. On peut également noter la récente publication d'une traduction en anglais du livre VIII (Al-Bīrūnī, *Treatise on Eclipses*).

faite par les bibliographes du XIIIe siècle entre ce traité et l'*Almageste* de Ptolémée.

Dans le cours de cet article, les citations en arabe du *Qānūn al-Mas`ūdī* seront faites à partir d'une relecture des manuscrits dont je dispose actuellement[17] ainsi que des deux éditions arabes disponibles (Al-Bīrūnī, *Al-Qānūn al-Mas`ūdī* (ed. 1956)) et (Al-Bīrūnī, *Al-Qānūn al-Mas`ūdī* (ed. 2002)), et les traductions françaises seront de mon fait.

- *Le thème de la distance des astres errants à la Terre*

Le livre X est dédié à l'étude des planètes, c'est-à-dire aux cinq astres errants[18] qui ne sont pas des luminaires[19]. Le chapitre 6 de ce livre, en deux sections, est dévolu pour la première section au problème de la distance des planètes à la Terre et pour la seconde à celui du diamètre de leurs globes respectifs (Kennedy, 1974).

Le thème de la distance des planètes est récurrent parmi les textes de cosmographie[20] arabes. On en trouve trace dès le VIIIe siècle dans les travaux de Ya`qūb ibn Ṭāriq, reposant certainement sur des sources indiennes, mentionnés par Al-Bīrūnī dans son *Traité sur l'Inde* (Al-Bīrūnī, *India*), puis au IXe siècle dans le *Compendium d'astronomie*[21] d'Al-Farghānī (Al-Farghānī, *Cevami ilm en-nucūm ve usūl…*) et dans *L'Almageste simplifié* de Thābit ibn Qurra (Thābit, *Œuvres d'astronomie*, p. 1-17). Ce dernier texte contient des données reprises du *Livre des hypothèses*[22] de

[17] Il s'agit des manuscrits de Paris BNF Arabe 6840 (BNF), de Londres BL Or.1997 (BL), de Tubbingen B Ms. quart.1613 (B1613) et de Berlin B Ms. oct. 275 (B275).

[18] Dans l'ordre alphabétique : Mars, Mercure, Jupiter, Saturne et Vénus.

[19] Le Soleil est l'objet d'étude du livre VI et la Lune celui du livre VII.

[20] C'est le choix de traduction proposé par Morelon (1997, p. 1) qui rend par « cosmographie » l'expression arabe *`ilm al-hay´a*, littéralement *science de la configuration*, utilisée (souvent rétrospectivement) par les copistes et les bibliographes pour désigner certains textes astronomiques. Pour une discussion détaillée de cette délicate question, voir par exemple la préface de George Saliba (1994) ou celle de Sally Ragep (2016).

[21] Le titre de ce traité varie considérablement d'un manuscrit à l'autre, c'est donc un titre permettant de se référer à l'abondante littérature concernant ce texte et sa postérité dans l'occident latin qui est ici donné.

[22] La transmission de ce traité de Ptolémée est un sujet difficile, tant en ce qui concerne sa réception par les auteurs arabes, certainement dans le courant du

Ptolémée. De nombreux auteurs des xe et xie siècles[23] ont de même incorporé un chapitre sur ce thème dans leurs traités ou produit une épître indépendante sur le sujet[24].

L'arrangement des astres errants. Une base observationnelle ?

Le plan suivi par Al-Bīrūnī pour l'étude de la distance des planètes est conforme à celui qu'il suit dans la plupart des chapitres du *Qānūn* : il commence par passer en revue les méthodes utilisées par ses prédécesseurs et ses contemporains ainsi que les principes sous-jacents à ces méthodes, puis il en évalue la pertinence, le domaine de validité et la cohérence ; ensuite il explicite ses choix et indique les résultats de ses travaux ; et finalement les situe par rapport aux travaux des autres savants qu'il a précédemment commentés.

Al-Bīrūnī commence son texte par l'exposé de trois méthodes utilisables pour déterminer l'ordre des planètes :

> Pour savoir lequel de deux objets donnés est le plus éloigné, on peut soit exploiter l'occultation du plus lointain par le plus proche, soit élire le plus proche de par une ligne de parallaxe plus large que celle du plus éloigné[25], soit encore, sous condition d'égalité des deux mouvements en distance[26], grâce à la lenteur[27] du plus éloigné.[28]

---

ixe siècle, que sa réception dans l'occident latin. Voir (Morelon, 1993, p. 8) pour une présentation de la redécouverte d'une partie du texte qui accompagne l'édition arabe de la première partie du traité ainsi qu'une traduction en français et (Goldstein, 1967) pour un accès au texte arabe de la seconde partie du traité non encore pleinement éditée à ce jour.

[23] Pour se limiter aux auteurs antérieurs à Al-Bīrūnī .

[24] Le travail de référence dans ce domaine reste la thèse de Noël Swerdlow (1968). Il est à noter qu'il y a eu depuis plusieurs nouveautés dans ce domaine, en particulier les travaux de Jan P. Hogendijk (2014a,b).

[25] Al-Bīrūnī reprend cette alternative dans le *Traité sur l'Inde*, ajoutant seulement que les occultations sont très rares (Al-Bīrūnī, *India*, p. 69).

[26] Il faut comprendre ici « égalité en distance [dans un temps fixé] ». Il s'agit donc d'une égalité de vitesse linéaire.

[27] Il s'agit ici de la vitesse angulaire.

[28] Ce passage correspond aux lignes 1 à 3 du folio 182v du manuscrit de la BNF. Le texte arabe tel qu'établi à partir de la comparaison des manuscrits et des éditions à ma disposition est placé à la suite de la traduction.

أن الطريق إلى معرفة [29] أبعد الشيئين الموضوعين[30] يكون بستر أقربهما أبعدهما أو باحتظاء أقربهما من اختلاف المنظر بخط أوفر من خط أبعدهما منه أو ببطء أبعدهما إذا تساوت[31] حركتاهما[32] بالمسافة[33]

Al-Bīrūnī fait de la résolution du problème de l'ordre des planètes un objectif en soi. Ce problème s'est en effet révélé difficile à décider et ce dès l'antiquité[34].

Dans l'introduction du livre IX de l'*Almageste*, Ptolémée indique que bien que cette question ait progressé, elle reste encore un objet de débat :

> ils [les géomètres] conviennent qu'elles [les sphères des astres errants] [...] sont plus voisines de la Terre que celle des étoiles, et plus éloignées que celle de la lune ; et que trois d'entr'elles, celle de Saturne qui est la plus grande, celle de Jupiter qui est la seconde, comme plus proche de la Terre, et celle de Mars qui est encore au-dessous de celle-ci, sont plus éloignées que les autres, de la Terre et de celle du Soleil, suivant les anciens géomètres. Au contraire, celles de Vénus et de Mercure, quoique placées par les anciens au-dessous de celle du Soleil, ont été reculées au-delà par quelques-uns de leurs successeurs. (Ptolémée, *Almageste*, T. 2, p. 115)[35]

C'est d'ailleurs l'argumentaire que Ptolémée avance dans le *Livre des Hypothèses* et qu'Al-Bīrūnī adopte dans son traité, comme le montre la juxtaposition des deux textes.

---

[29] معرفة ne figure pas dans B275.

[30] Répétition de عين dans BNF ainsi que dans 2002, occurence simple dans les autres textes.

[31] C'est le choix de l'édition de 1956, on trouve تساويت dans les autres textes.

[32] حركاتهما dans BL.

[33] بالمسافة pour BNF et B1613 ainsi que pour 1956 et 2002, mais بالمساحة « en aire » pour BL et B275. Une autre lecture possible pourrait être بالمساعة qui se traduirait par « en temps ».

[34] Voir par exemple l'introduction de (Swerdlow, 1968) pour une revue détaillée de l'histoire de ce problème.

[35] Le texte faisant référence est actuellement la traduction anglaise de Gerald Toomer (Ptolémée, *Almageste*, p. 419). On renvoie ici encore à (Swerdlow, 1968) pour le détail de l'histoire de cette question.

Livre des Hypothèses[36] :

Pour ce qui est du fait que la sphère de la Lune est la plus proche de la Terre, que la sphère de Mercure est plus proche de la Terre que celle de Vénus, que la sphère de Vénus est plus proche de la Terre que celle de Mars, la sphère de Mars plus que celle de Jupiter, celle de Jupiter plus que celle de Saturne, et celle de Saturne plus que celle des étoiles fixes, tout cela est clair et nous a été montré par ce que nous observons : le fait que les astres dont les sphères sont plus proches de la Terre masquent les astres dont les sphères sont plus éloignées de la Terre, lorsqu'ils se trouvent sur une ligne droite issue de l'œil.

Pour ce qui est des faits suivants : les sphères des cinq astres errants sont-elles plus hautes que la sphère du Soleil de la même façon qu'elles sont plus hautes que la sphère de la Lune ; sont-elles plus basses qu'elle, certaines sont-elles plus hautes et certaines plus basses, il ne nous est pas possible de dire à ce propos quelque chose de certain. (Morelon, 1993, p. 62)

Al-Qānūn al-Mas`ūdī[37] :

En ce qui concerne les planètes, nous avons tiré de l'occultation des plus éloignées par les plus proches que la Lune est la plus basse de toutes car elle les éclipsait lors du passage sur elles et que l'on n'a vu aucune d'entre elles passant sous elle ; et il en a aussi résulté que Mercure est plus haute qu'elle et plus basse que toutes les autres, que Vénus est plus haute que la Lune et Mercure et plus basse que les [trois] planètes supérieures ; puis que Mars est la plus basse des trois [autres] et Saturne la plus haute tandis que Jupiter est entre les deux ; et que les étoiles fixes sont au-dessus de l'ensemble : on a donc connu de cela leur arrangement sans la valeur des distances. Il est possible que le Soleil soit sous l'ensemble des planètes, exceptée la Lune qui est inférieure, comme il est possible que quelques planètes, mais pas toutes, s'intercalent entre les deux.

وأما الكواكب فقد توصّلنا من ستر أقربها أبعدها إلى تسافل القمر عن[38] جميعها إذ كان يكسفها عند المرور عليها ولم يرشيء منها مرّ[39] تحته وحصل منه أيضاً علو عطارد إيّاه مع تسافله عن سائره وعلو الزهرة القمر وعطارد إيّاه[40] مع سفولها عن العلوية ثم المريخ أسفل

[36] Traduction française de Morelon à partir de son édition du texte arabe.

[37] Ce passage correspond aux lignes 4 à 7 du folio 182v du manuscrit de la BNF. Le texte arabe tel qu'établi à partir de la comparaison des manuscrits et des éditions à ma disposition est placé sous la traduction.

[38] **في** pour BL et B275, mais **عن** pour BNF, B1613 ainsi que pour 1956 et 2002.

[39] **مرّ** dans B1613, BNF et 1956, mais **من** dans B275 et **مر** dans 2002 et BL.

[40] On trouve **إياه وإياه** dans BNF, BL et B275. Le mot est absent dans 1956.

الثلاثة وزحل أعلاها والمشتري[41] فيما[42] بينهما والكواكب الثابتة فوق الجملة فعرف[43] من ذلك ترتيبها دون مقدار الابعاد وجاز أن تكون الشمس تحت جميع الكواكب لا يسفل عنها غير القمر كما جاز أن يتخلّلهما[44] بعض الكواكب دون الكل

On retrouve dans les deux textes l'emploi de l'observation d'occultations d'une planète par une autre pour justifier de leurs positions relatives par rapport à la Terre ainsi que le constat de l'impossibilité d'exploiter ces phénomènes pour déterminer leur position par rapport au Soleil qui reste donc un enjeu de la recherche en ce domaine.

Il est remarquable que bien qu'ils fassent reposer l'ordre des planètes sur des données d'observation, ni Ptolémée ni Al-Bīrūnī ne précisent les dates et les lieux de ces observations contrairement à ce qu'ils ont tous deux coutume de faire, par exemple en ce qui concerne les observations utilisées pour déterminer les paramètres de leur théorie planétaire[45].

La possibilité même de l'observation d'occultations d'une planète par une autre avant l'emploi de télescope pose question[46] et, dans l'état actuel de nos connaissances, aucune observation d'un tel phénomène n'a été consignée par les auteurs de textes grecs ou arabes. Cependant une étude approfondie des registres chinois[47] indique que des occultations entre planètes ont pu être observées à l'œil nu.

La possibilité de l'observation d'occultations entre planètes, physiologique et effective, conduit à revaloriser les mentions non datées de ces phénomènes que l'on trouve chez plusieurs auteurs grecs. Un des passages

---

[41] و est manquant dans 2002.

[42] فما dans BNF, فيما dans BL et B1613 ainsi que dans 1956 et 2002. Lecture difficile dans B275.

[43] و عرف pour B275, mais فعرف pour BNF, BL et B1613 ainsi que pour 1956 et 2002.

[44] يخللهما dans BNF, mais يتخللهما dans B1613, BL et B275 ainsi que dans 1956 et 2002.

[45] Voir (Pedersen, 1974, p. 408-422) pour une liste des quatre-vingt-quatorze observations mentionnées dans l'*Almageste*.

[46] L'aspect physiologique de ce problème a récemment été étudié par Howard Hughes (2018, p. 293-303).

[47] On renvoie ici à un article d'astronomie dans lequel les auteurs produisent les données des registres chinois et analysent la nature des différents types de phénomènes consignés (Hilton, Seidelmann & Liu, 1988).

les moins équivoques[48] sur ce sujet se trouve dans un texte attribué à Théon de Smyrne :

> Mercure et Vénus cachent les astres qui sont au-dessus d'eux, quand ils sont pareillement placés en ligne droite entre eux et nous ; ils paraissent même s'éclipser mutuellement, suivant que l'une des deux planètes est plus élevée que l'autre, à raison des grandeurs, de l'obliquité et de la position de leurs cercles. Le fait n'est pas d'une observation facile, parce que les deux planètes tournent autour du Soleil et que Mercure en particulier, qui n'est qu'un petit astre, voisin du Soleil, et vivement illuminé par lui, est rarement apparent. Mars éclipse quelquefois les deux planètes qui lui sont supérieures, et Jupiter peut éclipser Saturne. Chaque planète éclipse d'ailleurs les étoiles au-dessous desquelles elle passe dans sa course. (Théon, *Exposition des connaissances mathématiques…*, p. 313)

Ce passage est d'autant plus troublant que l'utilisation de programmes de calculs des occultations respectives de Mercure et Vénus montre qu'il y a certes eu des occultations de Mercure par Vénus en 282 avant J.-C., 392 après J.-C. et 757 après J.-C.[49] mais également des occultations de Vénus par Mercure en 329 avant J.-C. et en 796 après J.-C. (Javaux, 2007)[50].

On peut donc légitimement douter ici de la réalité du fondement observationnel de l'établissement de l'ordre des planètes tant par Ptolémée que par Al-Bīrūnī, particulièrement en ce qui concerne Mercure et Vénus. On ne peut ici éviter de considérer, avec Théon de Smyrne, le fait que l'existence simultanée d'observations d'une occultation de Vénus par Mercure (avérée selon Ptolémée et Al-Bīrūnī) et de Mercure par Vénus

---

[48] Il faut en effet être prudent car la conjonction entre deux astres doit souvent être entendue comme une simple conjonction en longitude dont ne résulterait bien évidemment aucune information quant à la plus grande proximité de la Terre d'un des deux astres.

[49] En se limitant aux occultations ayant eu lieu dans l'intervalle de temps délimité par la première observation mentionnée dans l'Almageste datée du 19 mars 721 avant J.-C. (Pedersen, 1974, p. 408) et la date de fin de rédaction du *Qānūn al-Mas`ūdī* en 1030.

[50] Les résultats obtenus par ces simulations dépendent de la méthode numérique implémentée. Cependant s'il peut y avoir quelques discordances de dates, la nature et le nombre des occultations restent comparables.

(deux fois plus probable)[51] constitue un argument décisif contre le principe des sphères emboîtées.

La place de l'observation dans la réfutation d'une méthode indienne

Al-Bīrūnī s'intéresse ensuite à la détermination des distances des planètes en considérant d'abord une théorie indienne, tirée d'un traité de Pauliśa[52], basée sur l'hypothèse d'une égalité des « mouvements en distance » des planètes dont découle une relation de proportionnalité entre la vitesse angulaire observable et la distance des planètes, et ensuite la théorie des sphères emboîtées déployée par Ptolémée dans le *Livre des Hypothèses* permettant de déduire la distance des planètes de proche en proche en exploitant les modèles liés au mouvement de chacune d'entre elles.

Le principe de la théorie indienne dont Al-Bīrūnī fournit les données et les résultats est exposé comme suit dans le *Pauliśasiddhānta* :

> au-dessus de la Lune orbitent de plus en plus haut Mercure, Vénus, le Soleil, Mars, Jupiter et Saturne, et au-dessus de cela il y a les étoiles fixes. Toutes les planètes (de Mercure à Saturne) se déplacent dans leur propre orbite individuelle à vitesse constante. Tout comme les rayons de la roue du moulin à huile[53] sont denses près du centre et comme l'espace entre chacun augmente lorsqu'on approche du pourtour, la longueur du parcours correspondant à un *rāśi*[54] augmente lorsque les orbites sont de plus en plus hautes. (Varāhamihira, *Pañcasiddhāntikā*, p. 259)[55]

---

[51] Le nombre d'occultations de Mercure par Vénus est deux fois celui des occultations de Vénus par Mercure d'après les résultats de (Javaux, 2007).

[52] Il s'agit certainement du *Pauliśasiddhānta*, rédigé vers 400 après J.-C. et révisé au VIe siècle (Pingree, 1969). Ce traité ne nous est connu que par un résumé contenu dans le *Pancasiddhantika* (Varāhamihira, *Pañcasiddhāntikā*).

[53] La figure 1 permet une visualisation de cette analogie.

[54] Ce terme désigne généralement un signe, c'est à dire un angle de trente degrés sur l'écliptique, à comprendre ici comme une unité d'angle fixée.

[55] « Beyond the moon are orbiting higher and higher, Mercury, Venus, the Sun, Mars, Jupiter and Saturn, and beyond that there are fixed stars. All the planets (from Mercury to Saturn) move in their own individual orbit at a constant speed. Just as the spokes of the oil-press wheel are thick, (close to one another), near the navel, and the space between one another increases as the rim is approached,

Figure 1 – Ancienne roue de pressoir du nord de l'Inde
(Crédit photo : Fédération des moulins de France)

Pour exploiter cette proportionnalité entre distance à la Terre et distance angulaire observée, il suffit d'une part de disposer du nombre de tours effectués par chaque astre errant en un temps fixé T et d'autre part d'être en possession d'une donnée numérique induisant la connaissance de la distance à la Terre d'un des astres errants.

Al-Bīrūnī donne pour T la valeur 157 791 780 jours et comme donnée clé il indique que la distance parcourue par la Lune correspondant à un angle d'une minute est de 15 *yojanas*. Il précise qu'une *yojana* correspond à huit *milles* arabes[56], ce qui conduit à une distance parcourue de 7 200 milles par degré. Ce qui permet de calculer la distance parcourue par la Lune durant la période T, savoir 18 712 080 864 000 *yojanas*[57], puis d'en déduire le rayon de la sphère de la Lune[58].

---

so the linear extension of the *rāśi* increases as the orbits are situated higher and higher. »

[56] Ceci est loin d'être un fait établi, voir (Pingree, 1969, p. 229) par exemple.

[57] Ce résultat est mentionné par Al-Bīrūnī dans son *Traité sur l'Inde* comme correspondant à la distance parcourue par la Lune durant un *caturyuga* selon Pauliśa (Al-Bīrūnī, *India*, ii, p. 72), un *caturyuga* correspond au temps séparant deux conjonctions totales des planètes (Al-Bīrūnī, *India*, i, p. 325).

[58] L'approximation de π explicitement mentionnée est $\frac{3927}{1250}$ (sauf pour (Al-Bīrūnī, *Al-Qānūn al-Mas`ūdī* (ed. 2002)) qui donne $\frac{4927}{1250}$) et Al-Bīrūnī ajoute que « cette proportion n'est pas loin de celle utilisée par Archimède ».

Il suffirait ensuite d'utiliser la relation de proportionnalité à partir des nombres de tours effectués par chaque planète durant la période T, nombres qu'Al-Bīrūnī cite : « Les tours de Saturne y sont de 146 564, ceux de Jupiter de 364 220, ceux de Mars de 2 296 824, ceux de Vénus de 7 022 388, ceux de Mercure de 17 937 000. »[59]

Cependant, et ce point est d'importance, Al-Bīrūnī ne va pas aller au bout de la démarche au motif que les données fournies par les Indiens ne peuvent être reliées de façon satisfaisante, selon son interprétation, avec des observations. Voici ses arguments :

> Si j'avais adhéré à cette méthode de preuve, j'aurais fait de mon mieux pour énoncer ses propositions et ses résultats, sauf qu'elle repose sur un principe fragile en ce que les [nombres de] tours des centres des épicycles[60] des [planètes] supérieures suivent de près ce qu'ils [les Indiens] ont indiqué alors que les [nombres de] tours des deux [planètes] inférieures le contredisent car ils sont égaux aux [nombres de] tours du Soleil, et cette égalité implique que les deux centres d'épicycle tournent avec le Soleil sur un unique parcours. Et ce qui est supposé pour les deux en [nombre de] tours, c'est plutôt la somme des [nombres de] tours propres [i.e. sur leur épicycle] et des [nombres de] tours du Soleil. Et dès que je permets le travail par cela, cela me contraint à dire que les [nombres de] tours des [planètes] supérieures sont la somme des [nombres de] tours propres et des [nombres de] tours des centres des épicycles.
>
> Quant au fait qu'une partie [i.e. un trois-cent-soixantième] de la trajectoire de la Lune vaut sept-mille-deux-cents milles, même si c'était la réalité, il n'y a rien qui nous dise comment ils y sont arrivés.

---

[59] Ce passage correspond aux lignes 15 et 16 du folio 182v du manuscrit de la BNF. Voici le texte arabe tel qu'établi à partir de la comparaison des manuscrits et des éditions à ma disposition :

وأدوار زحل فيها عنده : ١٤٦٥٦٤ وأدوار المشتري : ٣٦٤٢٢٠ و أدوار المريخ : ٢٢٩٦٨٢٤ و أدوار الزهرة ٧٠٣٣٣٨٨ [1] وأدوار عطارد : [2] ١٧٩٣٧٠٠٠

1. On lit 7 033 388 pour Vénus dans 2002 et B1613 et 1956, mais 7 022 388 dans BNF et BL et B275. La comparaison avec (Al-Bīrūnī, *India*, ii, p. 18) permet de trancher.

2. On lit 17 947 000 pour Mercure dans 2002, mais 17 937 000 dans BNF et BL et B1613 et B275 et 1956. La comparaison avec (Al-Bīrūnī, *India*, ii, p. 17) permet de trancher.

[60] Al-Bīrūnī utilise ici les termes classiques de l'astronomie ptoléméenne arabe tels que forgés depuis l'adaptation des textes grecs (Rashed, 2017, p. 610-613).

Cela suffit à nous instruire quant à [la validité de] leur méthode, et nous épuiserons le sujet ailleurs que dans ce livre si le succès rejoint la volonté.[61]

ولو أقترن بهذه الطريقة حجة لبالغت في إيراد قضاياها و نتائجها [62] إلا أنها واهية الأصل وذلك أن أدوار مراكز التداوير [63] في العلوية وإن اطردت على ما ذكروا فإن أدوار السفليين [64] تخلف فيه من أجل أنها مساوية لأدوار الشمس فيلزم [65] من تساويها دوران مركزي تدويريهما مع الشمس في مدار واحد والذي فرض لهما [66] من الأدوار إنما هو مجموع أدوار الخاصة إلى أدوار الشمس ومتى أجيز العمل بها وجبت [67] منه في العلوية جمع [68] أدوار خواصها إلى أدوار مراكز تداويرها ثم استعمالها بعد ذلك وأيضاً فإن ما تسلمه من كون الجزء الواحد في مدار القمر [69] سبعة ألف ومائتي [70] ميل وإن كان إلى الوجود راجعاً فلم يشفع [71] به خبر عن كيفية الوصول إليه وإخبار من [72] تولاه ويكفي ما أشرنا إليه من طريقهم وسنستوفيه في غير هذا الكتاب إن اقترن التوفيق بالعزيمة

Dans ce passage, Al-Bīrūnī a recours à deux arguments impliquant de façons différentes des données observationnelles.

---

[61] Ce passage correspond aux lignes 18 à 23 du folio 182v du manuscrit de la BNF. Le texte arabe tel qu'établi à partir de la comparaison des manuscrits et des éditions à ma disposition est placé à la suite de la traduction.

[62] نتائجها pour BNF, BL et B1613 ainsi que 1956 et 2002, mais ثائجها pour B275.

[63] التدوير dans B1613 ainsi que 1956 et 2002, mais التداوير dans BNF, BL et B275.

[64] السفلبين pour 2002, mais السفليين pour BNF, BL, B1613 et B275 ainsi que 1956.

[65] فيلزم pour BNF et B1613 ainsi que pour 1956 et 2002, mais ويلزم pour BL et B275.

[66] بهما dans B1613 ainsi que 1956 et 2002„ mais لهما dans BNF, BL et B275.

[67] وجبت dans B275 ainsi que 1956 et 2002, mais وجب pour B1613. Lecture difficile pour BNF et BL.

[68] جميع dans B1613 et B275 ainsi que 1956 et 2002, mais حمع dans BNF et BL.

[69] المدار للقمر dans B1613 ainsi que 1956 et 2002, mais مدار القمر pour BNF, BL et B275.

[70] ومائتي dans B1613 et BL ainsi que 1956 et 2002, mais وماتى pour BNF et B275.

[71] يشفع pour BNF, BL et B1613 ainsi que pour 1956 et 2002, mais يفع pour B275.

[72] من dans B1613 ainsi que 1956 et 2002, mais عمن pour BNF et BL et B275.

Le premier argument repose sur l'observation non contestée que les deux planètes inférieures, Mercure et Vénus, ont la même vitesse moyenne de déplacement en longitude que le Soleil. Or comme les valeurs fournies par les Indiens sont différentes pour Mercure et Vénus, il s'ensuit qu'elles ne peuvent correspondre à leurs mouvements moyens, mais qu'elles sont le résultat d'une addition dont seul un des deux termes est proportionnel à la distance de la planète à la Terre, l'autre étant un paramètre, caractéristique de la rotation de la planète sur son épicycle, indépendant de cette distance. C'est alors la structure même du raisonnement par proportionnalité qui s'effondre.

Le second argument porte sur l'absence d'information quant aux observations qui ont conduit à la détermination de la donnée clé permettant d'initialiser les calculs, savoir les 7200 milles parcourus par la Lune en un degré d'arc. La connaissance de cette donnée est essentielle à la mise en œuvre de la méthode, et pour Al-Bīrūnī cette mise sous silence est rédhibitoire.

La raison pour laquelle Al-Bīrūnī n'indique pas les distances des planètes obtenues selon cette méthode[73] est donc claire : ce ne sont pas les résultats qui sont critiquables mais les fondations mêmes de la méthode.

L'hypothèse de l'égalité « des mouvements en distance » éliminée, Al-Bīrūnī expédie la méthode reposant sur les différences de parallaxes par une remarque sybilline, ici aussi de nature observationnelle : « Quant à la méthode qui repose sur l'utilisation de la parallaxe, elle n'aboutit pas en raison de l'absence totale de détection sur les planètes. »[74]

---

[73] On lit dans (Al-Bīrūnī, *India*, p. 71-73) qu'il a effectué ces calculs. Il est possible qu'il les ait effectués après la fin de la rédaction du *Qānūn al-Mas`ūdī*.

[74] Ce passage correspond à la ligne 24 du folio 182v du manuscrit de la BNF. Voici le texte arabe tel qu'établi à partir de la comparaison des manuscrits et des éditions à ma disposition :

وأما الطريق إلى ذلك من جهة اختلاف المنظر فبابه في الكواكب بعدم العثور عليه منسد

Un exemple d'accord entre théorie et observation. Quelles conclusions ?

- *La méthode de Ptolémée*

Al-Bīrūnī détaille ensuite la méthode « des Grecs », et ce bien que le seul auteur cité est ici Ptolémée. Al-Bīrūnī mentionne dans ce passage l'*Almageste* et quelques lignes plus loin le *Livre des Hypothèses* qu'il désigne sous le titre *Kitāb al-manshūrāt*. Comme l'a remarqué Hartner[75] le titre arabe renvoie à la notion de morceau de bois scié[76]. Il s'agit en effet dans le livre II du *Livre des Hypothèses* de proposer un modèle physique d'ajustement des sphères célestes, en permettant de ne prendre que des portions de ces sphères[77]. Bien que le terme *manshūrāt* n'apparaisse que dans le livre II, et ce sans doute uniquement pour rendre la notion de volume des sections de sphères, il est assez remarquable qu'un morceau de bois scié puisse également servir d'illustration au principe des sphères emboîtées comme le laisse à penser la figure 2.

Al-Bīrūnī explicite le paradigme de la cosmologie ptoléméenne :

> Quant aux Grecs, ils ont posé que l'éther ne contient pas de lieu dépourvu d'action. Ce qui a rendu nécessaire que les sphères propres à chaque planète se touchent, c'est-à-dire que la limite supérieure de la sphère dont la planète a besoin pour ses mouvements est adjacente à la limite inférieure de la sphère de la planète qui est au-dessus d'elle. Contrairement à l'opinion des Indiens, les sphères sont interdépendantes et mutuellement connectées l'une à l'autre, s'agrippant à leur voisine jusqu'à tourner de concert avec le mouvement premier, et d'une sphère à la suivante elles [les planètes] se meuvent alors de la façon requise.[78]

[75] Les remarques avisées d'Hartner ont conduit à la redécouverte d'un passage manquant du *Livre des Hypothèses* par Goldstein (Goldstein, 1967, p. 3), passage permettant d'attribuer à Ptolémée le principe des sphères emboîtées.

[76] « The present account [*Kitāb al-manshūrāt*] might just as well carry the title *prismata*, if we remember that the learned streometric term « prism » was originally borrowed from the vocabulary of the carpenter, where it meant either the sawn piece of timber, the wooden board, or else the sawdust » (Hartner, 1954, p. 254).

[77] Pour une description de ces dispositifs et des illustrations des différents modèles planétaires, l'article de référence est (Murschel, 1995).

[78] Ce passage correspond aux lignes 24 à 27 du folio 182v du manuscrit de la BNF. Le texte arabe tel qu'établi à partir de la comparaison des manuscrits et des éditions à ma disposition est placé après la traduction.

Figure 2 – Manshūrāt, la cosmologie du Livre des Hypothèses
(Crédit photo : Henri D. Grissino-Mayer, Department of Geography, The University of Tennessee)

وأما اليونانيون فإنهم وضعوا في الأثير أن ليس فيه مكان عطل عن الفعل فوجب منه تماس الأكر المخصوصة بالكواكب أعني أن نهاية الكرة التي يحتاج الكوكب[79] في حركاته إليها العليا ملاصقة نهاية كرة الكوكب الذي فوقه السفلي على خلاف ما يأدّي [80] إليه رأي الهند من تباين الأكر المحوج فيما بينها إلى مواسك [81] من المجاور [82] يصل بعضها ببعض حتى تدور بالحركة الأولى معاً ثم تدرجوا من ذلك إلى تقريب المطلوب

Dans l'*Almageste*, Ptolémée a établi, en exploitant les nombreuses données d'observation à sa disposition, des modèles géométriques du déplacement en longitude des sept astres errants. Pour chaque modèle, le rayon de l'excentrique est posé égal à soixante parties et sert donc d'étalon de longueur pour toutes les autres longueurs étudiées dans ce modèle (Pedersen, 1974).

Pour un astre errant donné, le modèle permet alors de déterminer, en fonction de cette longueur étalon qui lui est propre, les plus petite et

[79] le passage **أعني أن نهاية الكرة التي يحتاج الكوكب** est manquant dans BL et B275.

[80] **تأدى** dans BNF et B1613 ainsi que dans 1956 et 2002, mais **يأدى** dans B275, et pas de points diacritiques dans BL.

[81] **مواسك** dans BNF et B1613 ainsi que dans 1956 et 2002, mais **بواسط** dans BL (une note dans 1956 indique **لواسط** pour BL) et **مواسط** dans B275.

[82] **المجاوز** dans 1956 et 2002, mais **المجاور** dans BNF, BL et B1613 et pas de points diacritiques dans B275.

plus grande distances de l'astre à la Terre, que l'on notera ici $Astre^{rel}_{min}$ et $Astre^{rel}_{Max}$, l'exposant ^{rel} indiquant que ces distances sont relatives, c'est-à-dire internes au modèle de cet astre.

Les sphères respectives des astres errants[83] étant contigües, il suffit donc de connaître une distance minimale ou maximale absolue exprimée selon une unité de mesure extrinsèque aux modèles géométriques[84], d'un des astres errants pour obtenir de proche en proche, ce qui présuppose d'en connaître au prélable l'ordre, les distances de tous les autres astres errants.

Pour bien cerner cette méthode et les enjeux de la fin du texte d'Al-Bīrūnī, en voici une lecture mathématisée :
Soient Ak, pour un indice k entier variant de 1 à 7, les sept astres errants pris dans l'ordre croissant de leur éloignement par rapport à la Terre.
Le fait qu'il n'y ait pas d'espace vide entre deux sphères successives impose alors la chaîne d'inégalité suivante :

$$A1^{abs}_{min} < A1^{abs}_{Max} = A2^{abs}_{min} < A2^{abs}_{Max} = ...A6^{abs}_{Max} = A7^{abs}_{min} < A7^{abs}_{Max}$$

De plus pour chaque astre, il découle de la connaissance de son modèle géométrique que les rapports $\frac{Ak^{rel}_{min}}{Ak^{rel}_{Max}}$ sont connus, et par conséquent que les rapports $\frac{Ak^{abs}_{min}}{Ak^{abs}_{Max}}$ sont également connus.

Le fait est que dans le livre V de l'*Almageste* (Ptolémée, *Almageste*, p. 247-251), Ptolémée a obtenu, à partir de données d'observation, que dans le modèle de la Lune une certaine distance AB était telle que $AB^{rel} = 40\ ;25^{p}$ et $AB^{abs} = 39^{rt}\ ;45$[85], ce qui fournit le coefficient de proportionnalité entre les distances intrinsèques au modèle de la Lune et

[83] Nous verrons plus loin qu'Al-Bīrūnī envisage l'éventualité que le cas de la Lune soit un cas particulier.

[84] Il est remarquable que l'unité la plus fréquemment utilisée pas les astronomes, y compris Al-Bīrūnī dans ce type de question n'est autre que le rayon terrestre, que l'on abrègera en ^{rt}, choix que l'on peut rapprocher de la volonté des universalistes de la fin du XVIIIe siècle d'adopter comme mesure universelle le dix-millionième du quart de méridien terrestre, sobrement dénommée *mètre*.

[85] On écrit ^{p} pour parties, la longueur étalon du modèle étant posée égale à 60^{p}. La notation des nombres est ici sexagésimale.

les distances absolues correspondantes[86] et permet en particulier d'obtenir $Lune^{abs}_{min}$ et $Lune^{abs}_{Max}$ exprimées en rayons terrestres (Ptolémée, *Almageste*, p. 259). À partir de ces données, la détermination de la distance de l'ensemble des astres errants est aisée du moment que l'on admet l'ordre de leur éloignement vis-à-vis de la Terre.

- *Un critère de falsifiabilité sujet à caution*

Il faut ici noter que Ptolémée a également déterminé une distance pour le Soleil[87] en s'appuyant uniquement sur des données d'observation liées à la Lune et au Soleil, ce qui fournit un jalon entre la Lune et les étoiles fixes.

L'accord, exact ou approximatif, ou le désaccord entre les valeurs de $Soleil^{abs}_{min}$ obtenues par ces deux méthodes indépendantes sera *de facto* en lien avec l'évaluation de la solidité des hypothèses à partir desquelles les calculs ont pu être menés.

Il est donc particulièrement intéressant d'analyser par le détail l'interprétation que fait Al-Bīrūnī lorsqu'après avoir déterminé $Mercure^{abs}_{min}$, $Mercure^{abs}_{Max}$, $Venus^{abs}_{min}$ et $Venus^{abs}_{Max}$, il se retrouve confronter au jalon Soleil[88] :

> Et si on pose cela, alors Mars aura une distance minimale que l'espace, nécessaire de par l'écart entre les deux luminaires, ne peut contenir ; à cause de cela, on lui attribue seulement les deux sphères de ces deux planètes [Mercure et Vénus]. Ce point de vue est renforcé par le fait que la distance maximale de Vénus est proche de la distance minimale du Soleil. On laisse l'affaire comme cela, en particulier parce qu'elle est prise par approximation : c'est en raison que la distance de l'astre est celle du centre de son corps, et non pas celle de la limite de sa sphère. Car la sphéricité du corps de l'astre rend nécessaire un espace en sus de la distance maximale et en deçà de la distance minimale, de la grandeur

[86] Dans la seconde partie de cette première section, lors du calcul effectif des distances, Al-Bīrūnī citera explicitement ces deux données numériques tirées de l'*Almageste*.

[87] Dans l'*Almageste*, il ne précise pas s'il s'agit de la distance minimale, maximale ou moyenne (Ptolémée, *Almageste*, p. 257), mais les valeurs de $Soleil^{abs}_{min}$ et $Soleil^{abs}_{Max}$ fournies dans le *Livre des Hypothèses* semblent montrer qu'il s'agit de la valeur moyenne (Morelon, 1993, p. 66).

[88] Il ne founira les valeurs numériques que dans la seconde partie de la première section.

de son rayon, et elle rend nécessaire un excédent grâce auquel la sphère contenante rejoint les orbes qu'elle contient. De même, tant qu'on prend ces distances [sans excédent], on n'échappe pas aux défauts de la négligence. Ainsi, concernant la distance maximale de Vénus et la distance minimale du Soleil, ce que nous avons mentionné devient tolérable.[89]

فلو جعل ذلك للمريخ بعداً أقرب لم تسعه المسافة التي لزمت من فضل ما بين بعدي النيرين ولذلك خصه [90]بكرتي هذين الكوكبين فقط وقوي هذا الرأي كون أبعد بعد الزهرة مقارب المقدار لأقرب أبعاد الشمس فترك الأمر على حاله وخاصة إذ هو مأخوذ بالتقريب من أجل أن بعد الكوكب يكون لمركز جرمه وليس هو على نهاية الكرة لأن استدارة جرم الكوكب محوج إلى مسافة فوق [91] البعد الأبعد و [92] دون البعد الأقرب بمقدار نصف قطره ثم إلى فضلة تلتئم بها الكرة الحاوية ما [93] في ضمنها من الأفلاك و كذلك ما أخذ تلك الأبعاد لم تخلص عن شوائب التساهل ولهذا وقعت المسامحة فيما ذكرنا من بعد الزهرة الأبعد وبعد الشمس الأقرب

Il faut avant tout remarquer que, dans ce passage, Al-Bīrūnī ne remet pas fondamentalement en question la valeur de $Soleil^{abs}_{min}$ obtenue par Ptolémée en ne recourant qu'aux paramètres liés à la Lune et au Soleil.

Il prend en effet appui sur la longueur de l'intervalle $[Lune^{abs}_{Max}; Soleil^{abs}_{min}]$ pour rejeter la possibilité que Mars succède directement à Vénus dans l'ordre d'éloignement des astres errants par rapport à la Terre au prétexte que les sphères de deux astres ne peuvent se chevaucher alors que, sous l'hypothèse $Venus^{abs}_{Max} = Mars^{abs}_{min}$, mener les calculs à partir du rapport $\frac{Mars^{rel}_{min}}{Mars^{rel}_{Max}}$ donnerait une valeur de $Mars^{abs}_{Max}$ supérieure à $Soleil^{abs}_{min}$, ce qui impliquerait bien un chevauchement des sphères de Mars et du Soleil.

Si la méthode de calcul des distances de proche en proche est valide, la seule possibilité restante est que le Soleil suive Vénus dans l'ordre

[89] Ce passage correspond aux lignes 32 à 37 du folio 182v du manuscrit de la BNF. Le texte arabe tel qu'établi à partir de la comparaison des manuscrits et des éditions à ma disposition est indiqué après la traduction.

[90] خصه dans B1613 ainsi que dans 1956 et 2002, mais حضت dans BNF, ou encore حصرت dans BL et B275.

[91] فوق dans B1613 ainsi que dans 1956 et 2002, absent dans BNF, BL et B275.

[92] و dans BNF, B1613 et B275 ainsi que dans 1956 et 2002, mot absent dans BL.

[93] ما dans BL, B1613 et B275 ainsi que dans 1956 et 2002, mais مما dans BNF.

d'éloignement des astres. Or les calculs menés par Al-Bīrūnī, ainsi que ceux menés par Ptolémée dans le *Livre des Hypothèses*, montrent un assez bon accord entre la valeur de $Venus^{abs}_{Max}$ calculée de proche en proche et la valeur de $Soleil^{abs}_{min}$ obtenue par l'autre méthode[94], ce qui constitue un argument en faveur de la solidité des principes ptoléméens.

Il faut ensuite noter que l'argument utilisé par Al-Bīrūnī pour justifier du fait que $Venus^{abs}_{Max}$ et $Soleil^{abs}_{min}$ sont proches mais inégales diffère de celui utilisé par Ptolémée dans le *Livre des Hypothèses* :

> Dans la mesure où il arrive globalement que chaque fois que l'on augmente la distance de la Lune on doit diminuer celle du Soleil et réciproquement, alors si nous augmentons même faiblement la distance de la Lune mentionnée, la distance du Soleil, celle qui est proche de la plus grande distance de Vénus, diminue, et la rejoint. (Morelon, 1993, p. 66)

Cet argument de Ptolémée a été lu par Al-Bīrūnī, qui cite explicitement dans cette section le *Livre des Hypothèses*, mais ce dernier n'en fait pas ici mention. Or il se trouve que cet argument est un argument fort : Swerdlow (1968, p. 63-68) a montré par le détail que la méthode utilisée par Ptolémée est extrêmement sensible aux variations des données d'observation recueillies, et que des variations inférieures au seuil de précision des observations à l'œil impliquaient des variations considérables de la distance $Soleil^{abs}_{min}$ calculée[95]. Ce point semble en fait avoir été médité par Al-Bīrūnī qui a conscience que la détermination de sa distance à la Terre est hors d'atteinte : « Quant au [à la distance du] Soleil, elle est comme une chimère et les instruments n'en appréhendent pas de mesure » (Al-Bīrūnī, *Al-Qānūn al-Mas`ūdī* (ed. 1956), p. 857)[96], et ce d'autant plus qu'il reste des traces de ses recherches sur ce sujet comme en témoigne le dernier texte sur les tangentes édités par Kennedy (Al-Bīrūnī, *Exhaustive Treatise on Shadows*).

---

[94] Al-Bīrūnī obtient $Venus^{abs}_{Max} = 1134^{rt}$ et Ptolémée $Venus^{abs}_{Max} = 1079^{rt}$, alors que la valeur attendue de $Soleil^{abs}_{min}$ est 1160^{rt}.

[95] La valeur *choisie* par Ptolémée, et reprise ici par Al-Bīrūnī, est en fait une des plus petites possibles alors que les plus grandes s'envolent vers l'infini.

[96] L'édition de 1956 donne le texte arabe suivant :

وأما للشمس فهو كالموهوم لا يضبط الالات مقداره

Il apparait donc clairement qu'Al-Bīrūnī considère que la distance $Soleil^{abs}_{min}$ déterminée par voie directe par Ptolémée ressortit davantage d'un choix de paramètres heureusement ajustés qu'à l'exploitation directe de données d'observation[97], et par conséquent ne considère pas pleinement l'accord des valeurs obtenues pour $Soleil^{abs}_{min}$ par deux méthodes indépendantes comme une preuve de nature observationnelle du cadre théorique ptoléméen.

Al-Bīrūnī préfère alors un autre type d'argument, de nature physique, reposant sur le fait que les modèles géométriques des astres décrits par Ptolémée décrivent non pas leur mouvement en longitude mais celui de leur centre, et que pour être exacts les calculs doivent prendre en considération la corporéité des astres à chaque passage d'un astre $A1$ à un astre $A2$ en subsituant à la formule $A1^{abs}_{Max} = A2^{abs}_{min}$ la formule $A1^{abs}_{Max} + R_{A1} = A2^{abs}_{min} - R_{A2}$, ce qui a l'avantage de faire le lien entre les deux sections du sixième chapitre du livre X du *Qānūn al-Mas`ūdī*[98], mais a l'inconvénient logique d'utiliser la connaissance de la taille des corps des astres[99] que l'on ne peut calculer qu'à partir de la connaissance de leur diamètre apparent à une distance connue. Il est assez remarquable qu'Al-Bīrūnī ne prenne pas la peine d'indiquer que la circularité de son raisonnement est sans influence étant donné qu'une légère approximation de la distance n'a pas d'impact sur le diamètre obtenu.

- *La prudence d'Al-Bīrūnī*

Il résulte de l'étude du paragraphe précédent que la théorie des Grecs ne rencontre pas d'objection majeure de nature observationnelle et ne peut donc pas être rejetée. Cependant ce n'est pas là le point final de cette partie de la première section du texte d'Al-Bīrūnī. L'auteur conclut en effet cette partie, dont la motivation est de nature spéculative, en considérant un modèle alternatif quant à l'ordre des astres qu'il n'a pas, à ce stade, rejeté et qu'il considère même comme non rejetable en l'état :

---

[97] Les méthodes de recueil de données d'observation et les méthodes d'exploitation de ces données sont toujours au cœur des préoccupations des astrophysiciens, voir par exemple (Sauvé, 2017) pour un travail récent sur ce sujet.

[98] On notera qu'Al-Bīrūnī ne donne pas les résultats que l'on obtiendrait en procédant de la sorte.

[99] C'est l'objet d'étude de la seconde section.

> Si on considère l'éventualité que l'intervalle entre les deux luminaires soit vide de planètes, cela donnerait la plus grande distance du Soleil pour plus petite distance de Mercure, et au-dessus d'elle, Vénus, puis Mars, puis Jupiter, puis Saturne, puis les fixes, sauf que le premier classement convient mieux à la sagesse divine et est le meilleur dans les voies naturelles.[100]

> فإن أجاز مجيز خلو المسافة التي بين [101] النيرين عن كوكب فيها صار أبعد بعد الشمس لعطارد قرباً أقرب وعليه [102] الزهرة ثم المريخ ثم المشتري ثم زحل ثم الثوابت إلا أن الوضع الأول أليق بالحكمة الإلهية وأحسن في المجاري الطبيعية

Cette phrase de conclusion de la partie dédiée à la critique des fondements théoriques des méthodes de détermination de la distance des astres errants à la Terre souligne que la question de la position relative des planètes Vénus et Mercure par rapport au Soleil ne peut, en l'état, pas être considérée comme entièrement tranchée de façon rationnelle. Cela peut signifier qu'Al-Bīrūnī ne considère pas absurde l'existence d'un espace vide entre la sphère de la Lune et la sphère du Soleil, c'est-à-dire dans la partie supralunaire du Cosmos[103]. Mais plus probablement cela montre le manque total de crédibilité qu'il accorde à la mesure de la distance du Soleil à la Terre par la méthode n'utilisant que des observations liées à la Lune et au Soleil, et par là l'impossibilité d'arrêter un avis définitif sur la question à l'instar du rejet qu'il a précédemment prononcé eu égard à la doctrine indienne.

Conclusion

Chacune des trois parties de cet article a permis de cerner un aspect de la perception du statut de l'observation chez Al-Bīrūnī.

En premier lieu, l'appui pris sur des données d'observation, les occultations de planètes entre elles, pour asseoir l'arrangement des pla-

[100] Ce passage correspond aux lignes 2 à 3 du folio 183r du manuscrit de la BNF. Le texte arabe tel qu'établi à partir de la comparaison des manuscrits et des éditions à ma disposition est indiqué après la traduction.

[101] بين dans 2002 et BNF et B1613 et BL et 1956, mais من dans B275.

[102] علته dans 2002 et BL et B1613 et B275 et 1956, mais عليه dans BNF.

[103] La possibilité de l'existence de vide n'est pas une idée nouvelle chez Al-Bīrūnī, il l'avait évoquée quelques trente ans plus tôt dans sa correspondance avec Avicenne (Berjak & Iqbal, 2004, p. 181).

nètes, indique que les arguments de type observationnel ont pour lui un poids suffisamment élevé pour être tenté d'en produire même en l'absence flagrante de données précises.

Ensuite les arguments employés contre la méthode indienne reposant sur l'égalité des vitesses linéaires des planètes et de la Lune montrent clairement qu'une théorie doit à tout le moins être en cohérence avec les observations, mais également que les observations sur lesquelles elle se fonde doivent être documentées et critiquables.

Enfin la troisième partie a mis en avant plusieurs subtilités du statut conféré à l'observation par Al-Bīrūnī. Tout d'abord il apparaît qu'il ne lui semble pas indispensable d'incorporer de façon systématique les modifications de paramètres qu'il a déduites de ses propres observations, montrant peut-être ainsi que le lien entre la quête de raffinement observationnel de paramètres astronomiques et la volonté d'amélioration de la théorie mathématique n'est pas aussi direct qu'il pourrait sembler à un scientifique contemporain. Ensuite il est tout à fait remarquable que tant Al-Bīrūnī que Ptolémée ne se sont pas laissés abuser par l'improbable coïncidence de l'accord sur la distance du Soleil à la Terre provenant de deux cheminements indépendants. Dans le cas d'Al-Bīrūnī, certains passages d'autres de ses textes, mentionnés plus haut, laissent d'ailleurs transparaître un doute quant à la validité des valeurs dérivées de l'observation pour le calcul de la distance du Soleil. Il semble donc qu'une prédiction théorique, même validée par une observation, n'a de poids que si cette observation est tenue pour sûre, et que cette prédiction permet tout au plus de ne pas invalider cette théorie[104]

L'étude de cette infime partie du *Qānūn al-Mas`ūdī* permet de mieux cerner le positionnement d'Al-Bīrūnī vis-à-vis des liens entre observation et théorie. Des données d'observation exploitables, c'est-à-dire d'une part réalisées à partir d'un instrument fiable et en contrôlant la

[104] Ce point de vue s'accorde pleinement avec celui exprimé par Hartner (1977, p. 1) : « In particular, throughout the ages down to the time of Galileo and after, empirical arguments are ipso facto invalid as soon as they conflict with the revealed truth ; and the term truth in the strict sense is applicable only to the realm of religion, while theories - and with them necessarily also the underlying facts, which depend on our failing senses - have only a higher or lesser degree of probability. In this context let us note that probabilis originally means « that which can be proved (quod probari potest) » and that the awareness of this original meaning has been alive until fairly recent times. »

marge d'erreur inhérente à cet instrument et d'autre part n'ayant pas subi d'amplification de la zone d'incertitude durant la chaîne de calculs, peuvent falsifier une méthode voire les principes qui la fondent. Cependant les données d'observation sont rarement irréprochables et l'exemple de la prudence avec laquelle Al-Bīrūnī se refuse à tirer des conclusions à partir d'une donnée peu fiable laisse à penser qu'une lecture attentive du choix des données qu'il utilise pour construire ses raisonnements et ses démonstrations pourrait permettre d'estimer convenablement le degré de confiance qu'il accorde à celles-ci et par là mieux appréhender l'état de consolidation des connaissances de son époque telles qu'il les passe en revue.

Références

Sources primaires

Al-Bīrūnī, *India*, Carl E. Sachau (éd.), 2 tomes, Londres, Trübner, 1910. Traduction en anglais par Carl E. Sachau.

Al-Bīrūnī, *Al-Qānūn al-Mas`ūdī*, Nizamū´d-Dīn (éd.), 3 tomes, Hyderabad, Osmania Oriental Publications Bureau, 1956.

Al-Bīrūnī, *Exhaustive Treatise on Shadows*, Edward Stewart Kennedy (éd.), 2 tomes, Alep, Institut d'histoire des sciences arabes de l'université d'Alep, 1976. Traduction en anglais par Edward Stewart Kennedy.

Al-Bīrūnī, *Kanon Mas`uda*, 2 tomes, Tachkent, Akademiia Nauk Uzbekskoj SSR, 1976. Traduction en russe par A. Achemadov et Boris Rozenfeld.

Al-Bīrūnī, *Le livre de l'Inde*, vol. VI, Arles, Actes Sud, 1996. Extraits choisis.

Al-Bīrūnī, *Al-Qānūn al-Mas`ūdī*, `Abd al-Karīm Sāmī Jindī (éd.), 3 tomes, Dār al-kutub al-`ilmīyah, 2002.

Al-Bīrūnī, *Al-Bīrūnī's Treatise on Eclipses. A Translation and Commentary of Treatise VIII of Al-Qānūn al-Mas`ūdī*, Kuala Lumpur, Casis-Hakim Universiti Teknologi Malaysia, 2014. Traduction en anglais par Zakaria Norzalida.

Al-Farghānī, *Cevami ilm en-nucūm ve usūl el-harekāt es-samāviyye*, Yavuz Unat (éd.), Ankara, Kültür ve Turizm Bakanliği, 2012. Traduction en turc par Yavuz Unat et Ömer Türker.

PTOLÉMÉE Claude, *Almageste*, Nicolas HALMA (éd.), 2 tomes, Paris, Henri Grand, 1813. Traduction en français par Nicolas Halma. Diffusé par A. Blanchard, 1988.

PTOLÉMÉE Claude, *Almageste*, Londres, Duckworth, 1984. Traduction en anglais par Gerald J. Toomer.

AL-QIFṬĪ Ibn, *Ta´rikh al-ḥukamā´*, Julius LIPPERT (éd.), Leipzig, Weicher, 1903.

THĀBIT, *Œuvres d'astronomie : Thābit ibn Qurra*, Régis MORELON (éd.), Paris, Les Belles Lettres, 1987. Traduction en français par Régis Morelon.

THÉON de Smyrne, *Exposition des connaissances mathématiques utiles pour la lecture de Platon*, Paris, Librairie Hachette, 1892. Traduction en français par J. Dupuis.

VARĀHAMIHIRA, *Pañcasiddhāntikā*, K.V. SARMA (éd.), Madras, Fondation Adyar, 1993. Traduction en anglais par K. V. Sarma.

YĀQŪT al-ḥamaūī al-rūmī, *Irshād al-arīb īla ma`rifat al-adīb*, David Samuel MARGOLIOUTH (éd.), 6 tomes, Leyde, Brill, 1913.

Sources secondaires

BERJAK Rafik & IQBAL Muzzafar (2004), « Ibn Sīnā - Al-Bīrūnī correspondence (4) », *Islam and Science*, vol. 2, n° 2, p. 181–187.

BOILOT Jacques-Dominique (1955), « L'œuvre d'Al-Beruni : essai bibliographique », *Mélanges de l'Institut dominicain d'études orientales du Caire*, p. 161–256.

GOLDSTEIN Bernard R. (1967), « The Arabic Version of Ptolemy's Planetary Hypotheses », *Transactions of the American Philosophical Society*, vol. 57, n° 4, p. 9–12.

HARTNER Willy (1954), « Mediaeval Views on Cosmic Dimensions and Ptlolemy's kitāb al-manshūrāt », *Mélanges Alexandre Koyré*, vol. 1, p. 254–282.

HARTNER Willy (1977), « The Role of Observations in Ancient Medieval Astronomy », *Journal for the History of Astronomy*, vol. 8, n° 1, p. 1–11.

HILTON James L., SEIDELMANN P. K. & LIU Ciyuan (1988), « Analysis of Ancient Chinese Records of Occultations between Planets and Stars », *The Astronomical Journal*, vol. 96, n° 4, p. 1482–1493.

Hogendijk Jan P. (2014a), « Al-Qabīsī's Treatise on the Distances and Sizes of the Celestial Bodies: Edition and Translation », *Zeitschrift für Geschichte der arabisch-islamischen Wissenschaften*, vol. 21, p. 169–233.

Hogendijk Jan P. (2014b), « Al-Sāghānī's Treatise on the Distances, Volumes and Surface Areas of the Planets and Fixed Stars », *Zeitschrift für Geschichte der arabisch-islamischen Wissenschaften*, vol. 21, p. 1–29.

Hogendijk Jan P. (2016), *Abu Rayhan Muhammad ibn Ahmad al-Biruni*, http://www.jphogendijk.nl/biruni.html#Masudic.

Javaux Gilbert (2007), *Occultations mutuelles de planètes de -3000 à +3000*, Calculs effecués à partir de la théorie planétaire VSOP 87 de P. Bretagnon et G. Francou du Bureau des Longitudes, http://pgj.pagesperso-orange.fr/calendrier/occulmutuel.txt.

Kennedy Edward Stewart (1970), « Al-Bīrūnī », dans Charles Coulston Gillespie (éd.), *Dictionnary of Scientific Biography*, vol. 2, New York, Scribner, p. 147–158.

Kennedy Edward Stewart (1974), « Al-Bīrūnī´s Masudic Canon », *Al-Abhath*, vol. 24, p. 59–81.

Khan Ahmad Saeed (1982), *A Bibliography of the Works of Abū ´l-Rāihān al-Bīrūnī*, vol. VI, New Delhi, Indian National Science Academy.

Morelon Régis (1993), « La version arabe du *Livre des Hypothèses* de Ptolémée, première partie », *Mélanges de l'Institut dominicain d'études orientales du Caire*, n° 21, p. 7–85.

Morelon Régis (1997), « Panorama général de l'astronomie arabe », dans Roshdi Rashed (éd.), *Histoire des sciences arabes*, Paris, Seuil, p. 1–20.

Moussa Ali Ibrahim (2005), *L'*Almageste *d'Abū al-Wafā´*, Thèse de doctorat, Université Paris-Diderot, Paris 7.

Murschel Andrea (1995), « The Structure and Function of Ptolemy's Physical Hypotheses of Planetary Motion », *Journal for the History of Astronomy*, vol. xxvi, p. 33–61.

Pedersen Olaf (1974), *A Survey of the Almagest*, Odense, Odense University Press.

Pingree David (1969), « The Later Pauliśasiddhānta », *Centaurus*, vol. XIV, p. 172–241.

Ragep Sally P. (2016), *Jaghmīnī´s mulakhkhas: an Islamic introduction to Ptolemaic astronomy*, Cham, Springer.

Rashed Roshdi (éd.), *Lexique historique de la langue scientifique arabe*, Hildesheim, Georg Olms Verlag.

ROZENFELD Boris & IHSANOĞLU (2003), *Mathematicians, Astronomers and Other Scholars of Islamic Civilization*, Istambul, Research Center for Islamic History.

SALIBA George (1994), *A History of Arabic Astronomy: Planetary Theories During the Golden Age of Islam*, Londres, New York University Press.

SAMSÓ Julio (1981), « Manṣūr ibn `Alī ibn `irāq, Abū Naṣr », dans Charles Coulston GILLISPIE (éd.), *Dictionnary of Scientific Biography*, vol. 9, New York, Scribner, p. 83–85.

SAUVÉ Alexandre (2017), *Caractérisation des effets systématiques de l'instrument Planck-HFI, propagation et impact sur les données scientifiques*, Thèse de doctorat, Université Toulouse 3 Paul Sabatier, http://thesesups.ups-tlse.fr/3549/1/2016TOU30362.pdf.

SEZGIN Fuat (1978), *Geschichte des Arabischen Schrifttums*, vol. VI, Leyde, Brill.

SWERDLOW Noël M. (1968), *Ptolemy's Theory of the Distances and Sizes of the Planets. A Study of the Scientific Foundations of Medieval Cosmology*, Thèse de doctorat, Université de Yale (États-Unis).

WLODARCZYK Jaroslaw, KREMER Richard L. & HUGHES Howard C. (2018), « Edward Gresham, Copernician Cosmology, and Planetary Occultations in Pre-Telescopic Astronomy », *Journal for the History of Astronomy*, vol. 49, n° 3, p. 269–305.

YANO Michio (2007), « Bīrūnī », dans Thomas HOCKEY (éd.), *The Biographical Encyclopedia of Astronomers*, vol. 1, New york, Springer, p. 131–133.

YOUSCHKEVITCH Adolph-Andrei Pavlovich (1970), « Abū ʹl-wafāʹ al-Būzjānī », dans Charles Coulston GILLISPIE (éd.), *Dictionnary of Scientific Biography*, vol. 1, New York, Scribner, p. 39–43.