Arabic Sciences and Philosophy, 30 (2020) : 27-137
doi:10.1017/S0957423919000110

IBN AL-HAYTHAM ET LE MOUVEMENT D'ENROULEMENT

ROSHDI RASHED
Laboratoire SPHERE, CNRS – université Paris-Diderot
Email : rashed@paris7.jussieu.fr

ERWAN PENCHÈVRE
CAPHÉS, CNRS – École normale supérieure, Paris
Email : erwan.penchevre@ens.fr

Abstract. In the *Almagest*, Ptolemy proposed the concept of winding motion, especially to explain planetary latitudes. Ibn al-Haytham (beginning 11th c.) wrote a treatise entitled *Fī ḥarakat al-iltifāf*, "Concerning the winding motion". An anonymous scholar wrote a refutation of this treatise. Both texts have been lost; but the answer of Ibn al-Haytham has survived: *Fī ḥall šukūk ḥarakat al-iltifāf*, "The resolution of doubts concerning the winding motion". There he reminds us of his model and gives us a more detailed explanation. We give here a critical edition, translation and commentary of this answer, as well as an edition and translation of some related excerpts from Ptolemy's *Planetary Hypotheses* and Quṭb al-Dīn al-Shīrāzī's *Nihāyat al-idrāk* (13th c.).

Résumé. Dans l'*Almageste*, Ptolémée a proposé le concept du mouvement d'enroulement pour expliquer notamment les latitudes planétaires. Ibn al-Haytham (début XIe s.) a rédigé un traité intitulé *Fī ḥarakat al-iltifāf*, « Sur le mouvement d'enroulement ». Un anonyme a écrit une critique de ce traité. Les deux mémoires sont perdus ; mais heureusement a survécu la réponse d'Ibn al-Haytham, intitulée *Fī ḥall šukūk ḥarakat al-iltifāf*, « La résolution des doutes sur le mouvement d'enroulement ». Il y rappelle le modèle élaboré et en détaille encore l'explication. Nous donnons ici édition critique, traduction et commentaire de cette réponse, ainsi qu'une édition et traduction de passages apparentés des *Hypothèses planétaires* de Ptolémée et de la *Nihāyat al-idrāk* de Quṭb al-Dīn al-Shīrāzī (XIIIe s.).

On a montré ailleurs qu'Ibn al-Haytham (mort après 1040 au Caire) a composé en astronomie deux fois plus d'écrits qu'en optique, à laquelle son nom est à jamais associé. Ses travaux en astronomie couvrent tous les domaines de recherche en son temps [1]. Ils se partagent en plusieurs groupes dont chacun comprend plusieurs traités. Parmi ces groupes on en souligne ici deux. Le premier comprend trois livres consacrés à la critique de l'*Almageste* de Ptolémée : les « Doutes sur Ptolémée », la « Correction de l'*Almageste* », et la « Résolution des doutes relatifs à l'*Almageste* » [2]. Dans ces livres, il discute du modèle de Ptolémée. Dans le second groupe Ibn al-Haytham examine l'un ou l'autre des mouvements célestes tels que le mouvement de la Lune, le mouvement de l'enroulement – *Fī ḥarakat al-iltifāf* – où il soulève plusieurs doutes à l'étude dans l'*Almageste* de ce mouvement, pour écrire ensuite la « Résolution des doutes relatifs au mouvement de l'enroulement » [3].

Ces travaux montrent à eux seuls qu'Ibn al-Haytham n'était pas satisfait de la configuration de l'univers, c'est-à-dire du modèle, de Ptolémée. Mais cet éminent mathématicien et physicien a sans aucun doute compris que, sans une cinématique céleste où l'on combine mathématique et physique, il n'était pas possible de proposer un autre modèle sous les hypothèses de l'*Almageste* – même rectifié. Ainsi a-t-il proposé, non pas un nouveau modèle, mais une nouvelle astronomie, dans sa somme « La configuration des mouvements de chacun des sept astres errants [4] ».

Les livres critiques d'Ibn al-Haytham, ainsi que ses recherches sur des mouvements célestes particuliers et sur la question des hauteurs des astres errants [5], sont importants pour comprendre non seulement

1 Voir R. Rashed, *Les Mathématiques infinitésimales du IXe au XIe siècle* (Londres : Al-Furqān Islamic Heritage Foundation, 1996-2006), vol. V ; *idem*, « The Celestial Kinematics of Ibn al-Haytham », *Arabic Sciences and Philosophy*, 17 (2007), p. 7-55, repris dans *Classical Mathematics from al-Khwārizmī to Descartes* (Londres : Routledge, 2017), p. 637-680 ; C. Houzel « The new astronomy of Ibn al-Haytham », *Arabic Sciences and Philosophy*, 19 (2009), p. 1-41.

2 Rashed, *Les Mathématiques infinitésimales*, vol. V, p. 2.

3 *Ibid.*

4 *Ibid.*, vol. V, p. 263-615.

5 Ainsi dans son traité « Sur la diversité qui se manifeste pour les hauteurs des astres errants », *ibid.*, vol. V, p. 633-679.

cette nouvelle astronomie, mais aussi, comme chacun sait, les travaux de l'école de Marāgha, c'est-à-dire d'al-Ṭūsī et ses collaborateurs, de même que la contribution du damascain Ibn al-Šāṭir.

Dans cette étude nous considérons un seul écrit parmi ceux consacrés par Ibn al-Haytham à la critique de Ptolémée. Il s'agit de son écrit « Sur le mouvement de l'enroulement ». Malheureusement le texte d'Ibn al-Haytham n'existe plus ; en revanche, il nous est parvenu sa « Résolution des doutes sur le mouvement d'enroulement ». Cet écrit est une réponse d'Ibn al-Haytham aux objections qui lui ont été adressées par un certain savant contemporain qui n'est pas nommé et qu'Ibn al-Haytham désigne en ces termes respectueux : « Monseigneur le Šayḫ ». Ce texte nous est parvenu en trois manuscrits : Berlin oct. 2790/11 f. 118r-127r, Saint-Pétersbourg B 1030 f. 1v-20v, et Istanbul Suleymaniyye Atif 1714, f. 139v-148v. Ce dernier manuscrit a été transcrit à partir de celui de Berlin, et de lui seul, avec des fautes de transcription. Notre édition critique est donc faite à partir des deux premiers manuscrits [6]. Les manuscrits de Berlin et de Saint-Pétersbourg sont identifiés respectivement par les lettres arabes *bāʾ* et *lām* dans l'apparat critique. Ce texte d'Ibn al-Haytham s'organise en une introduction (p. 76, l. 7 – p. 78, l. 14), huit sections correspondant chacune, plus ou moins, à une réponse à une objection du Šayḫ, puis une conclusion (p. 114, l. 30 – p. 118, l. 21).

Dans l'introduction, Ibn al-Haytham classe sous trois catégories les difficultés rencontrées par le Šayḫ lors de sa lecture du traité d'Ibn al-Haytham sur ce mouvement. Bien que le texte ne soit pas dénué d'un certain ton polémique, le Šayḫ, nous le verrons, n'était sûrement pas un néophyte ; il n'est guère surprenant qu'Ibn al-Haytham lui ait consacré une réponse aussi longue et circonstanciée. Cette réflexion initiale sur la cause des erreurs qu'Ibn al-Haytham attribue à son contemporain est aussi d'un grand intérêt épistémologique.

[6] Abdelhamid I. Sabra a publié une édition critique du texte arabe avec une brève introduction anglaise, sans traduction, dans A. I. Sabra, « Ibn al-Haytham's treatise : Solution of difficulties concerning the movement of *iltifāf* », *Journal for the history of arabic science*, 1979, 3(2), p. 388-422.

La première catégorie relève du rapport à l'autorité : le Šayḫ prendrait à la lettre les paroles de Ptolémée, sans chercher à les « interpréter » ni à les « expliquer ». Nous verrons qu'Ibn al-Haytham ne prétend pas avoir découvert ni inventé ce qu'il nomme « mouvement d'enroulement » : il affirme seulement expliquer un mouvement utilisé par Ptolémée dans l'*Almageste*, dont la description présente dans l'*Almageste* était, au mieux, insuffisante à ses yeux. De plus, Ibn al-Haytham dénonce quelques erreurs commises par Ptolémée en astronomie et en optique, aussi bien dans l'*Almageste* que dans ses *Hypothèses planétaires*.

La deuxième catégorie de difficultés concerne la notion même de vérité physique et le rôle de l'imagination (*taḫayyul*) dans la méthode scientifique. L'argument est subtil, car le texte d'Ibn al-Haytham relève de deux disciplines distinctes : il y est à la fois question de modèles cosmologiques (« configurations », *hayʾāt*) et de l'analyse mathématique de ces modèles selon le canon de la rigueur géométrique. Nous verrons à plusieurs reprises Ibn al-Haytham reprocher au Šayḫ de formuler des hypothèses *géométriquement* impossibles (*muḥāl*) : par exemple, l'hypothèse qu'une certaine droite soumise à certaines transformations reste dans un certain plan ; mais Ibn al-Haytham juge aussi légitime qu'entre deux modèles géométriquement équivalents, les mathématiciens (*aṣḥāb al-taʿālīm*) décident d'en rejeter un pour son impossibilité physique [7].

Ibn al-Haytham fait de nombreuses allusions, au fil de ses réponses, à ces deux premières catégories de difficultés. La troisième catégorie comprend la confusion entre simplicité au sens ordinaire d'un énoncé et simplicité physique du mouvement. Ibn al-Haytham fait bien sûr allusion à la formule célèbre de Ptolémée :

> Il ne faut donc pas juger de la simplicité des choses célestes, par les choses familières qui nous paraissent simples ; puisque celles-ci ne sont pas également simples pour tous les hommes [8].

---

[7] Ce sera l'objet de la huitième réponse d'Ibn al-Haytham ; voir en particulier p. 112, l. 25-29.

[8] *Composition mathématique de Claude Ptolémée*, éd. et trad. Abbé Halma (Paris :

Ibn al-Haytham, nous le verrons, obéit à l'impératif fondamental de construire des modèles par composition (*tarkīb*) de mouvements élémentaires « simples et continus » (*basīṭ* et *muttaṣil*)[9] ; en revanche, il n'impose pas à ces mouvements l'uniformité en vitesse angulaire dans ce texte, contrairement à ce que l'on trouvera chez ses successeurs Naṣīr al-Dīn al-Ṭūsī et Ibn al-Šāṭir. Enfin, cette activité de modélisation s'adosse chez lui à une analyse géométrique du mouvement qui s'accompagne de démonstrations qu'il voulait rigoureuses.

1. TRANSFORMATIONS AFFINES, ET CONNUS

Les objections du Šayḫ au texte d'Ibn al-Haytham ne sont pas rapportées intégralement par Ibn al-Haytham, et le contenu de leur source originale, le traité perdu d'Ibn al-Haytham, est encore plus difficile à appréhender. Pour ne pas nous perdre dans des conjectures à l'issue incertaine, nous avons approché les œuvres accessibles d'Ibn al-Haytham dont la thématique recoupe celle du traité perdu. Une partie du traité sur *La Configuration des mouvements*[10] nous permet de mieux cerner l'objet étudié par Ibn al-Haytham dans ses recherches sur les mouvements planétaires.

Dans ce traité, Ibn al-Haytham entreprend l'étude mathématique des trajectoires des astres dans un référentiel attaché à l'observateur. Traditionnellement, le référentiel priviligié pour les théories planétaires était un référentiel sidéral (chez Ptolémée) ou bien tropique[11]. Ibn al-Haytham choisit un système de coordonnées sphériques équatoriales « locales », c'est-à-dire dans un référentiel attaché à l'observateur : *déclinaison* et *temps requis*[12]. Le pôle Nord est supposé immo-

1816), t. 2, p. 375.

9 Voir par exemple p. 104, l. 19-21. Nous verrons plus loin ce que cela signifie.

10 Cf. *op. cit.* dans la note 4 p. 28, *supra*.

11 Tropique, peut-être depuis les Banū Mūsā qui « repoussent l'écliptique au-delà de la sphère des fixes » comme l'explique R. Morelon dans son commentaire du *Livre sur l'année solaire*, dans *Thābit ibn Qurra, Œuvres*, p. LXVI.

12 À un instant donné, le *temps requis* (*al-zamān al-muḥaṣṣal*, cf. R. Rashed, *Ma-*

bile par rapport à l'observateur. En fait, Ibn al-Haytham ne précise pas l'origine de la coordonnée *temps requis* car il ne considère jamais que des *accroissements* en temps requis. Cela permet au savant d'imaginer des figures qui devaient ressembler à la fig. 1, où DB désigne un accroissement en déclinaison et AD un accroissement en temps requis le long d'un segment AB de la trajectoire d'un astre.

À cause du fait que le mouvement diurne domine très nettement (même pour la Lune) les mouvements propres des astres par rapport à l'écliptique, pour l'observateur, la trajectoire apparente d'un astre progresse toujours d'est en ouest, c'est-à-dire qu'elle est paramétrisable selon le temps requis. L'étude des trajectoires revient donc à étudier des taux d'accroissements finis DB/AD.

L'objet d'étude est donc une ligne qui n'est pas une ligne simple. C'est la trace du mouvement d'un point matériel dans un certain référentiel dont le substrat figuré est ici une sphère, immobile par rapport à l'observateur, et géocentrique. L'analyse du mouvement est menée, comme on va le voir, au moyen de *transformations affines* : des rotations spatiales. Elle consiste en l'étude de relations quantitatives entre différents points de cette ligne, et un premier résultat de cette analyse s'exprime dans le langage des *connus* [13]. L'exemple fondamental en est l'énoncé suivant :

> Si chacun des sept astres errants se meut à un moment connu pendant un intervalle de temps connu, alors l'arc qui est son temps requis sera connu et l'arc qui est l'inclinaison de son mouvement sera connu [14].

thématiques infinitésimales, vol. V, p. 25, 187 et 413) est mesuré comme une *ascension dans la sphère droite* ; mais, à la différence du temps requis, l'ascension droite repère la position des astres dans un référentiel *en mouvement* par rapport à l'observateur (le mouvement diurne). Remarquons que ces coordonnées d'Ibn al-Haytham (déclinaison, temps requis) sont précisément les coordonnées équatoriales locales (latitude, longitude) utilisées pour repérer les lieux à la surface de la Terre.

13 Cf. le *Traité des connus* et *L'Analyse et la synthèse* dans Rashed, *Mathématiques infinitésimales*, vol. IV, p. 177-583.

14 Voir *Configuration des mouvements*, p. 434. On a traduit là par *inclinaison* le mot *mayl* désignant ce qu'on appelle aujourd'hui une *déclinaison*.

Ibn al-Haytham démontre cet énoncé de manière très détaillée pour la Lune, dans la proposition 20 de la *Configuration des mouvements*. Nous allons résumer cette démonstration pour mieux illustrer ce qui précède.

On a deux référentiels solides pour repérer les positions des astres sur la sphère céleste : celui de l'observateur en coordonnées équatoriales locales, et le référentiel de l'écliptique. Dans le référentiel de l'écliptique, on peut repérer les points de la sphère céleste en longitude écliptique et latitude écliptique. On peut aussi les repérer par leur distance au pôle Nord et leur « point de passage » sur le cercle de l'écliptique : Ibn al-Haytham connaissait bien sûr les formules de changements de coordonnées pour en déduire longitude écliptique et latitude écliptique, et inversement. Soit A la position de la Lune sur la sphère céleste à un instant donné t (voir fig. 1). Ibn al-Haytham suppose qu'on peut obtenir sa position B à l'instant $t + \Delta t$ en appliquant à A trois rotations spatiales :

– une rotation R_{AK} autour du pôle Nord, due au mouvement diurne, mouvement uniforme dans le référentiel de l'observateur. Cette rotation transforme A en K, et elle transforme l'écliptique (cercle passant par E) en le cercle HNI.

– une rotation R_{KG} autour du pôle de l'écliptique, due au mouvement des nœuds, mouvement uniforme par rapport au référentiel de l'écliptique. Cette rotation transforme K en G, mais elle entraîne aussi tout l'orbe solide, dit *incliné*[15], qui porte la Lune.

– une rotation R_{GB} autour du pôle de l'orbe incliné, due au mouvement de l'« argument de latitude moyen » $\overline{\lambda} + \lambda_{\Omega}$ de la Lune auquel

[15] Ibn al-Haytham dit de l'orbe incliné : « Cet orbe est l'un des grands cercles qui se trouvent dans la sphère dont le centre est le centre de l'univers. » On pourrait donc douter qu'il s'agisse d'un solide, mais nous emploierons ce terme, ici, dans le sens où l'on parle de trièdre solide, ou de point matériel, en mécanique moderne, pour désigner des abstractions mathématiques qui ne sont pas nécessairement des attributs d'une substance. C'est qu'Ibn al-Haytham utilise ce cercle matériel mathématique – peu importe sa figure – comme un référentiel solide en mouvement par rapport auquel la Lune a un mouvement de rotation non uniforme mais dans un plan fixé et autour d'un pôle fixé.

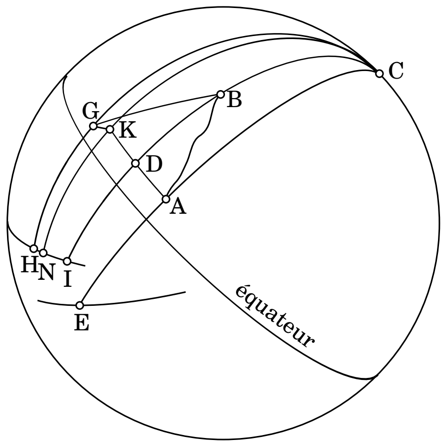

FIG. 1. Une trajectoire dans une référentiel attaché à l'observateur : la *Configuration des mouvements*, prop. 20.

s'ajoutent des corrections dues à la présence d'un épicycle, d'un excentrique et du point de prosneuse dans le troisième modèle de la Lune de l'*Almageste*. Quel que soit celui des orbes précédents pris pour référentiel, cette rotation n'est donc pas uniforme [16]. Cette rotation transforme G en B.

Ibn al-Haytham se propose donc de démontrer que si t et $t+\Delta t$ sont *connus*, alors B est *connu* dans le référentiel local.

Démonstration. Si t est connu, alors A est connu par rapport à l'écliptique, *i. e.* sa distance au pôle CA et son point de passage sur l'écliptique E sont connus. De même pour $t+\Delta t$ et le point B, sa distance au pôle CB et son point de passage I sont connus. La variable temps mesure précisément le mouvement diurne, *i. e.* AK est proportionnel à Δt, donc AK est connu. Mais K est l'image de A par la rotation R_{AK} qui entraîne aussi tout l'orbe de l'écliptique, donc la po-

[16] Ibn al-Haytham l'énonce clairement dans la *Configuration des mouvements*, p. 390, sans toutefois préciser la nature des corrections mentionnées ci-dessus.

sition de K par rapport à l'écliptique HNI est égale à celle de A par rapport à l'écliptique[17] : CK = CA, et le point de passage N de K est connu, puisque E est connu, par rapport à l'écliptique. L'arc d'écliptique NI est donc connu, il a donc une coascension droite KD connue. Donc AD = AK – KD est connu ; et DB = DC – CB = AC – CB est connu. *q. e. d.*

Si les relations entre les points d'une trajectoire sont entièrement déterminées par des composées de rotations spatiales d'axes et d'angles donnés, on voit donc que l'analyse du mouvement est presque immédiate ; aussi ne s'étonnera-t-on pas qu'Ibn al-Haytham ait cherché à interpréter le modèle de l'*Almageste* pour les latitudes en termes de rotations spatiales.

2. PREMIÈRE OBJECTION : POSITION DU CERCLE DE L'ÉPICYCLE QUAND SON CENTRE EST AUX NŒUDS

La première objection du Šayẖ tient à l'ambivalence du discours même de Ptolémée dans l'*Almageste* en XIII.1 et XIII.2. Le Šayẖ avait d'ailleurs cité Ptolémée, mais Ibn al-Haytham ne reproduit pas cette citation dans ses réponses. En revanche, on détiendrait ici notre premier fragment du traité perdu d'Ibn al-Haytham, cité par le Šayẖ, et rapporté dans la réponse d'Ibn al-Haytham :

> Si le diamètre de l'épicycle qui passe par l'apogée et par le périgée se trouve dans le plan de l'orbe excentrique pour les trois planètes, alors tout le plan de l'épicyle se trouve dans le plan de l'orbe excentrique[18].

Pourtant Ibn al-Haytham semble immédiatement nier avoir fait une telle affirmation : il s'agit donc certainement d'une extrapolation du Šayẖ. Quant à Ptolémée, voici ce qu'il dit dans le chapitre XIII.1 de

---

[17] Le raisonnement original d'Ibn al-Haytham est ici moins direct : pour montrer que N est connu, il repart du fait que la position de B est connue par rapport à l'écliptique, et que les arcs GB et KG sont connus. Alors I connu ⇒ H connu ⇒ N connu.

[18] Voir *infra* p. 78, l. 17-19.

https://doi.org/10.1017/S0957423919000110 Published online by Cambridge University Press

l'*Almageste* :

> D'après les observations particulières de chaque planète, quand le nombre de la longitude corrigée et celui de l'anomalie corrigée sont également éloignés l'un et l'autre, d'environ un quart de cercle, l'un de la limite boréale ou méridionale de l'excentrique, l'autre, de l'apogée de la planète, les astres paraissent dans le plan de l'écliptique [19].

Puis dans le deuxième chapitre du même livre :

> Mais ces petits cercles […] tournent d'un mouvement uniforme […]. Depuis l'une des intersections des plans par les épicycles, ils portent la planète vers les ourses, par exemple ; ils entraînent avec eux les plans des épicycles vers la limite boréale, dans le premier quart de leur révolution ; dans le second quart, ils les ramènent vers le plan de l'excentrique. Dans le troisième quart il les entraînent vers la limite australe ; enfin, dans le dernier quart, ils les ramènent au plan d'où il sont partis [20].

En partant du nœud ascendant, à la fin du second quadrant, *i. e.* au nœud descendant, le plan de l'épicycle serait donc confondu avec le plan de l'excentrique. Or la citation de XIII.1 semble contredire cela ! Le Šayẖ pouvait donc facilement s'appuyer sur XIII.1 pour objecter à l'affirmation qu'il attribuait à Ibn al-Haytham. La réponse d'Ibn al-Haytham est à peu près la suivante.

Ptolémée, dans l'*Almageste*, n'offre pas de modèle définitif d'emblée. Les modèles sont en fait des « hypothèses » (*furūḍ*) sans cesse soumises à révision après confrontation avec les données de l'observation. Que l'on pense, par exemple, aux trois modèles de la Lune présentés dans l'*Almageste*. Ptolémée, au dire d'Ibn al-Haytham, aurait proposé un modèle pour le mouvement d'enroulement. Pour ce faire, il serait parti des modèles hypothétiques formulés dans les livres X, XI, XII pour les mouvements en longitude des planètes, puis il les aurait adaptés. Comme le dit Ibn al-Haytham, Ptolémée procède par « l'approximation » (*al-taqrīb*) plutôt que par « l'exactitude » (*al-taḥqīq*). La citation du XIII.1 décrit une donnée de l'observation (au dire de Ptolémée lui-même), tandis que la citation du XIII.2 s'inscrit dans

[19] Ptolémée, *Composition mathématique*, p. 368.
[20] Ptolémée, *Composition mathématique*, p. 372.

https://doi.org/10.1017/S0957423919000110 Published online by Cambridge University Press

cette activité de construction de modèles géométriques, où l'on adapte graduellement les hypothèses de modèles antérieurs. Comme Ibn al-Haytham s'est seulement proposé d'interpréter les paroles de Ptolémée, il serait donc, comme Ptolémée, parti de l'hypothèse que le plan de l'épicycle est confondu avec le plan incliné de l'excentrique (comme dans X, XI, XII), pour ensuite décrire un dispositif faisant varier la position relative de ces deux plans. D'ailleurs, un autre passage de XIII.2 laisse planer l'ambiguïté quant à leur position relative à la fin du second quadrant :

> Les diamètres qui coupent à angles droits les diamètres apogées, et périgées, s'il s'agit des trois planètes que nous avons nommées les premières, demeurent constamment parallèles au plan de l'écliptique, *où la variation est du moins insensible* [...][21]

Qu'en conclure ? On voit que le Šayḫ n'est pas un néophyte : il était conscient d'une des principales difficultés du treizième livre de l'*Almageste*. Même si la citation du Šayḫ, qu'Ibn al-Haytham semble renier, n'est qu'une extrapolation, il faut peut-être la prendre au sérieux et penser qu'au moins en première interprétation, le modèle donné par Ibn al-Haytham dans son traité perdu produisait l'effet décrié ; sur ce point, Ibn al-Haytham n'avait peut-être pas non plus donné une explication suffisamment détaillée de son modèle. En fait, nous verrons que cette première objection est sans doute la plus importante des huit objections auxquelles répond Ibn al-Haytham.

En tout cas, une question s'impose : qu'a pu faire Ibn al-Haytham dans ce traité sur le mouvement d'enroulement ? On voit qu'il ne réclame pas non plus crédit pour l'invention ou la découverte du mouvement d'enroulement, puisqu'il prétend seulement avoir voulu « montrer comment Ptolémée a ordonné le mouvement d'enroulement ».

D'ailleurs les successeurs d'Ibn al-Haytham qui connaissaient son traité perdu semblent confirmer la justesse de notre conclusion : le modèle que Naṣīr al-Dīn al-Ṭūsī attribue à Ibn al-Haytham a pour effet, on le verra, que le diamètre transverse est à peu près dans le

[21] Ptolémée, *Composition mathématique*, p. 372 ; nous soulignons la fin de la citation.

https://doi.org/10.1017/S0957423919000110 Published online by Cambridge University Press

plan de l'excentrique quand le centre de l'épicycle est aux nœuds, et non pas dans le plan de l'écliptique[22]. S'appuyerait-on sur Ptolémée en disant que ce diamètre présente une inclinaison qui « est du moins insensible » par rapport au plan de l'écliptique ? Ibn al-Šāṭir affirmera que cette inclinaison n'est pas négligeable ; elle contredit les données de l'observation, ainsi que le modèle numérique des chapitres XIII.3 à XIII.6 de l'*Almageste*. Nous détaillerons tout cela plus loin.

Il est temps d'expliquer le modèle qu'al-Ṭūsī a trouvé dans le traité perdu d'Ibn al-Haytham.

3. LE MODÈLE D'IBN AL-HAYTHAM SELON NAṢĪR AL-DĪN AL-ṬŪSĪ

Al-Ṭūsī expose d'abord le modèle d'Ibn al-Haytham dans un chapitre d'un appendice à un traité écrit en persan en 1235[23]. Nous traduisons ci-dessous l'exposé qu'il en donne ultérieurement dans son *Mémoire sur l'astronomie*[24] :

> Ibn al-Haytham a composé un traité dans lequel il mentionne les corps qui produisent ces mouvements. Dans chaque épicycle, il ajoute deux sphères pour l'inclinaison, et dans les planètes inférieures, deux autres

---

22 Nous appellerons désormais « diamètre transverse » le diamètre perpendiculaire au diamètre de l'apogée.

23 C'est d'ailleurs dans ce même appendice qu'il décrit pour la première fois le « couple de Ṭūsī ». Le chapitre de l'appendice concernant le modèle d'Ibn al-Haytham a été édité et traduit en anglais par F. Jamil Ragep dans « Ibn al-Haytham and Eudoxus : The revival of homocentric modeling in Islam », *in* C. Burnett, J. Hogendijk, K. Plofker et M. Yano (éd.), *Studies in the history of the exact sciences in honour of David Pingree* (Leyde : Brill, 2004), p. 786-809.

24 F. J. Ragep, *Naṣīr al-Dīn al-Ṭūṣī's Memoir on astronomy* (N. Y. : Springer-Verlag, 1993), II.11 [16], p. 214-217. Cet exposé en arabe est légèrement différent de celui donné en persan, notamment quant à l'ordre dans lequel les orbes sphériques sont emboîtés les uns dans les autres, cf. Ragep, « Ibn al-Haytham and Eudoxus », note 16 p. 804. L'ordre d'emboîtement, s'il a une importance cosmologique et physique, n'en a pas sur le plan mathématique quand on conçoit l'orbe comme un substrat géométrique au concept de référentiel, comme nous le faisons dans notre commentaire.

sphères pour l'obliquité [25]. Il a décidé de supposer une sphère qui contient l'épicycle et qui a deux pôles dont la distance aux deux extrémités du diamètre passant par l'apogée et le périgée, de part et d'autre, est de la grandeur de l'inclinaison maximale de ce diamètre, pour cette planète, par rapport au plan où, quand il s'y trouve, son inclinaison s'annule. Il suppose que <cette sphère> a un mouvement comme celui que le petit cercle mentionné [26] appartenant à cette planète est supposé avoir, afin que se meuvent, par son mouvement, les deux extrémités du diamètre mentionné le long d'un circuit précisément égal à ce petit cercle, d'un mouvement uniforme par rapport à un point distinct de son centre, comme on l'a supposé pour le petit cercle ; mais son mouvement entraîne nécessairement le mouvement de toutes les parties de l'épicycle jusqu'au diamètre moyen. Celui-ci va quitter sa position, son extrémité matutinale devenir vespérale, et inversement ; de même pour les autres parties de l'épicycle. C'est pourquoi il faut supposer une autre sphère, entre cette sphère et la sphère de l'épicycle, dont les deux pôles soient les deux extrémités du diamètre mentionné, c'est-à-dire les deux points de l'apogée et du périgée. Son mouvement est supposé précisément égal au mouvement mentionné pour la première sphère, mais en sens contraire, afin de ramener à leur position requise toutes les parties de l'épicycle qui allaient quitter leur position. Il ne reste dans <l'épicycle> aucune trace du mouvement de la première sphère, sauf ce qui est nécessaire à cause du mouvement du diamètre mentionné et de ce qui lui est contigü dans le plan de la ceinture de l'épicycle. On suppose pour chacune des <planètes> inférieures deux autres sphères pour l'obliquité, selon la même description, afin que l'une des deux donne l'obliquité au diamètre moyen de l'épicycle et que l'autre préserve la position du reste de l'épicycle, de sorte que l'apogée ne devienne pas périgée, ni le périgée apogée. L'épicycle de chacune des trois <planètes> supérieures englobera donc trois sphères, et l'épicycle de chacune des deux <planètes> inférieures, cinq sphères ; et ce que Ptolémée a indiqué est accompli en établissant des moteurs solides. Ibn al-Haytham a mentionné qu'on pouvait <aussi> accomplir ceci en supposant des prismes à la place des sphères, mais selon les fondements de cette

[25] Nous suivons ici Halma qui utilise les deux termes *inclinaison* et *obliquité* pour traduire ce qu'al-Ṭūsī désigne respectivement par *mayl* et *inḥirāf*, et les historiens anglophones par *deviation* et *slant*.

[26] Le petit cercle est celui décrit dans *Almageste* XIII.2 comme le rappelle al-Ṭūsī avant cet extrait.

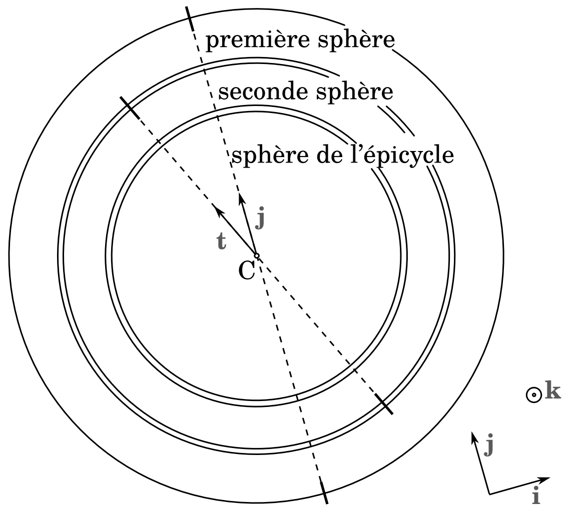

Fig. 2. Les trois sphères matérielles utilisés par Ibn al-Haytham selon al-Ṭūsī.

science il n'est pas correct d'établir autre chose qu'une sphère [27].

Étant donnée l'une des trois planètes supérieures, on prendra pour référentiel un plan confondu avec le plan de l'orbe excentrique et au sein duquel la direction de l'apogée $\mathbf{j}$ et le centre de l'épicycle C sont fixes d'après les hypothèses suivies dans les modèles planétaires des livres X, XI et XII de l'*Almageste*. On choisit une base orthonormée directe $(\mathbf{i},\mathbf{j},\mathbf{k})$ avec $\mathbf{i}$ aussi dans le plan de l'excentrique, et un repère cartésien associé, d'origine C. Dans ses réponses aux objections, Ibn al-Haytham semble parler de l'*orbe de l'épicycle* comme s'il s'agissait d'un cercle matériel centré en C le long duquel se déplace la planète. L'extrémité du « diamètre de l'apogée » est alors conçue comme un point matériel parmi les points de ce cercle, et Ibn al-Haytham sou-

27 Ragep, *Al-Ṭūsī's Memoir on astronomy*, p. 214-217. Nous traduisons ici et ailleurs le mot *manšūra* (pluriel *manšūrāt*, *manāšīr*) par « prisme ».

haite faire décrire à ce point un petit cercle perpendiculaire à la droite (C,$\mathbf{j}$). Mais comme Ibn al-Haytham a d'autre part introduit plusieurs sphères matérielles centrées en C animées de mouvements distincts, et qu'il n'y a pas trace, dans les réponses aux objections, de noms servant à désigner ces différentes sphères, nous suivrons al-Ṭūsī et nous parlerons d'une *première sphère* et d'une *seconde sphère* centrées en C, contenant toutes deux la *sphère de l'épicycle* de même centre, portant à son tour le globe planétaire (voir fig. 2). Ces trois sphères sont emboîtées dans une cavité sphérique immobile au sein de l'orbe excentrique. Peu importent les rayons de ces sphères. Si l'on suit cette dénomination, le cercle matériel qu'Ibn al-Haytham appelle parfois *orbe de l'épicycle* est donc fixe par rapport à la seconde sphère, et non par rapport à la sphère de l'épicycle ; pour ne pas le confondre avec la sphère de l'épicycle, nous le nommerons *cercle de l'épicycle*, et nous supposerons que c'est un cercle de rayon 1 le long duquel est mu le centre du globe planétaire.

D'après les hypothèses du modèle géométrique esquissé par Ptolémée dans l'*Almageste*, chap. XIII.2, on choisit un instant initial où le plan de l'épicycle est contenu dans le plan (C,$\mathbf{i}$,$\mathbf{j}$). Les extrémités du « diamètre de l'apogée » sont alors conçues comme des points matériels de la seconde sphère ; ce diamètre contient les pôles en lesquels la seconde sphère s'articule à la première, et ils sont donc fixes aussi par rapport à la première sphère. Notons $\mathbf{t}$ la direction du diamètre de l'apogée à l'instant initial. L'angle ($\mathbf{t}$,$\mathbf{j}$) est égal à l'inclinaison maximale ε souhaitée[28]. On a donc :

$$\mathbf{t} = \begin{pmatrix} -\sin\varepsilon \\ \cos\varepsilon \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Pendant une durée Δt, cette direction, ainsi que tous les points de la première sphère et des deux sphères qu'elle contient, subissent une

[28] L'inclinaison du plan de l'épicycle par rapport au plan de l'excentrique est de l'ordre de quelques degrés dans les modèles de Ptolémée : elle atteint $4°30'$ au plus, pour Saturne. On prendra $\varepsilon = 5°$ ou $10°$ dans les applications numériques.

rotation $\mathrm{R}_{\mathrm{C},\mathbf{j},\dot{\overline{\kappa}}\Delta t}$, car la première sphère est animée d'un mouvement de rotation uniforme [29] par rapport à l'orbe excentrique, de vitesse angulaire égale à la vitesse moyenne du centre de l'épicycle le long de l'excentrique ($\dot{\overline{\kappa}}$). Une seconde rotation vise à compenser l'effet de la première sur les autres parties du cercle de l'épicycle, sans déplacer le diamètre de l'apogée. On obtient donc les positions successives du cercle de l'épicycle en appliquant au cercle de centre C et de rayon 1 dans le plan $(\mathrm{C},\mathbf{i},\mathbf{j})$ la composée de rotations suivantes :

$$\mathrm{R}_{\mathrm{C},\mathbf{j},\dot{\overline{\kappa}}\Delta t} \circ \mathrm{R}_{\mathrm{C},\mathbf{t},-\dot{\overline{\kappa}}\Delta t}.$$

On va représenter les trajectoires périodiques des trois points suivants :

– un point du diamètre de l'apogée $(-\sin\varepsilon, \cos\varepsilon, 0)$;

– un point du diamètre transverse, perpendiculaire au diamètre de l'apogée, $(\cos\varepsilon, \sin\varepsilon, 0)$;

– un point sur l'axe de la sphère de l'épicycle $(0,0,1)$.

Comme ces trajectoires sont contenues dans la sphère de centre C et de rayon 1 et qu'elles sont proches des points $(0,1,0)$, $(1,0,0)$, $(0,0,1)$, respectivement, on les représentera en les projetant orthogonalement sur les plans tangents à la sphère, $y = 1$, $x = 1$, $z = 1$, respectivement (voir fig. 3).

Notons $\theta = \dot{\overline{\kappa}}\Delta t$. Comme les axes des deux rotations passent par l'origine C, on peut travailler avec des rotations vectorielles. Écrivons leurs matrices dans la base $(\mathbf{i},\mathbf{j},\mathbf{k})$:

$$\mathrm{R}_{\mathbf{t},-\theta} = \begin{pmatrix} \sin^2\varepsilon + \cos^2\varepsilon\cos\theta & -(1-\cos\theta)\cos\varepsilon\sin\varepsilon & -\cos\varepsilon\sin\theta \\ -(1-\cos\theta)\sin\varepsilon\cos\varepsilon & \cos^2\varepsilon + \sin^2\varepsilon\cos\theta & -\sin\varepsilon\sin\theta \\ \cos\varepsilon\sin\theta & \sin\varepsilon\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix},$$

$$\mathrm{R}_{\mathbf{j},\theta} = \begin{pmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{pmatrix}.$$

[29] On liquidera cette hypothèse d'uniformité ensuite ; on l'adopte provisoirement pour simplifier la notation.

Dans toute cette section, nous identifierons les rotations vectorielles à leurs matrices dans la base $(\mathbf{i},\mathbf{j},\mathbf{k})$.

La trajectoire du point $(-\sin\varepsilon, \cos\varepsilon, 0)$ est alors décrite par l'extrémité du vecteur suivant quand le paramètre θ varie :

$$\mathrm{R}_{\mathbf{j},\theta} \circ \mathrm{R}_{\mathbf{t},-\theta} \begin{pmatrix} -\sin\varepsilon \\ \cos\varepsilon \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sin\varepsilon\cos\theta \\ \cos\varepsilon \\ \sin\varepsilon\sin\theta \end{pmatrix}.$$

Il s'agit, comme on le souhaitait, d'un « petit cercle » parallèle au plan $y = 1$ (voir fig. 3, en bas à gauche).

La trajectoire du point $(\cos\varepsilon, \sin\varepsilon, 0)$ est décrite par l'extrémité du vecteur suivant :

$$\mathrm{R}_{\mathbf{j},\theta} \circ \mathrm{R}_{\mathbf{t},-\theta} \begin{pmatrix} \cos\varepsilon \\ \sin\varepsilon \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1-(1-\cos\varepsilon)\cos^2\theta \\ \sin\varepsilon\cos\theta \\ (1-\cos\varepsilon)\sin\theta\cos\theta \end{pmatrix}.$$

C'est donc la courbe dont les équations paramétriques sont :

$$\begin{cases} x = 1-(1-\cos\varepsilon)\cos^2\theta \\ y = \sin\varepsilon\cos\theta \\ z = (1-\cos\varepsilon)\sin\theta\cos\theta \end{cases}$$

En posant $y = Y\sin\varepsilon$, et $z = (1-\cos\varepsilon)Z$, on obtient :

$$\begin{cases} x = 1-(1-\cos\varepsilon)Y^2 \\ Y = \cos\theta \\ Z = \sin\theta\cos\theta \end{cases}$$

Et on vérifie aisément que les équations implicites de la courbe sont :

$$\begin{cases} x = 1-(1-\cos\varepsilon)Y^2 \\ Z^2 = Y^2 - Y^4 \end{cases}$$

C'est donc une quartique avec deux plans de symétrie et un point double ; il s'agit d'une lemniscate (voir fig. 3, en bas à droite).

https://doi.org/10.1017/S0957423919000110 Published online by Cambridge University Press

Enfin, pour calculer la trajectoire du point $(0,0,1)$, on peut utiliser le fait que

$$\begin{pmatrix}0\\0\\1\end{pmatrix} = \mathrm{R}_{\mathbf{t},-\frac{\pi}{2}} \begin{pmatrix}\cos\varepsilon\\ \sin\varepsilon\\ 0\end{pmatrix}.$$

Alors

$$\begin{aligned}\mathrm{R}_{\mathbf{j},\theta}\circ\mathrm{R}_{\mathbf{t},-\theta}\begin{pmatrix}0\\0\\1\end{pmatrix} &= \mathrm{R}_{\mathbf{j},\theta}\circ\mathrm{R}_{\mathbf{t},-(\theta+\frac{\pi}{2})}\begin{pmatrix}\cos\varepsilon\\ \sin\varepsilon\\ 0\end{pmatrix}\\ &= \mathrm{R}_{\mathbf{j},-\frac{\pi}{2}}\circ\mathrm{R}_{\mathbf{j},\theta+\frac{\pi}{2}}\circ\mathrm{R}_{\mathbf{t},-(\theta+\frac{\pi}{2})}\begin{pmatrix}\cos\varepsilon\\ \sin\varepsilon\\ 0.\end{pmatrix}\end{aligned}$$

On s'est ainsi ramené au calcul précédent. En posant $x = X(1-\cos\varepsilon)$, et $y = Y\sin\varepsilon$, on obtient les équations paramétriques :

$$\begin{cases} X = -\sin\theta\cos\theta\\ Y = \cos\theta\\ z = 1-(1-\cos\varepsilon)Y^2\end{cases}$$

d'où les équations implicites :

$$\begin{cases} X^2 = Y^2 - Y^4\\ z = 1-(1-\cos\varepsilon)Y^2\end{cases}$$

Il s'agit à nouveau d'une lemniscate (voir fig. 3, en haut).

Étudions à présent la trajectoire d'un point matériel quelconque du cercle de l'épicycle. Un tel point peut s'écrire sous la forme :

$$(u\cos\varepsilon - v\sin\varepsilon, u\sin\varepsilon + v\cos\varepsilon, 0), \text{ avec } u^2+v^2 = 1.$$

$$\mathrm{R}_{\mathbf{j},\theta}\circ\mathrm{R}_{\mathbf{t},-\theta}\begin{pmatrix}u\cos\varepsilon - v\sin\varepsilon\\ u\sin\varepsilon + v\cos\varepsilon\\ 0\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}u - u(1-\cos\varepsilon)\cos^2\theta - v\sin\varepsilon\cos\theta\\ u\sin\varepsilon\cos\theta + v\cos\varepsilon\\ u(1-\cos\varepsilon)\sin\theta\cos\theta + v\sin\varepsilon\sin\theta\end{pmatrix}.$$

https://doi.org/10.1017/S0957423919000110 Published online by Cambridge University Press

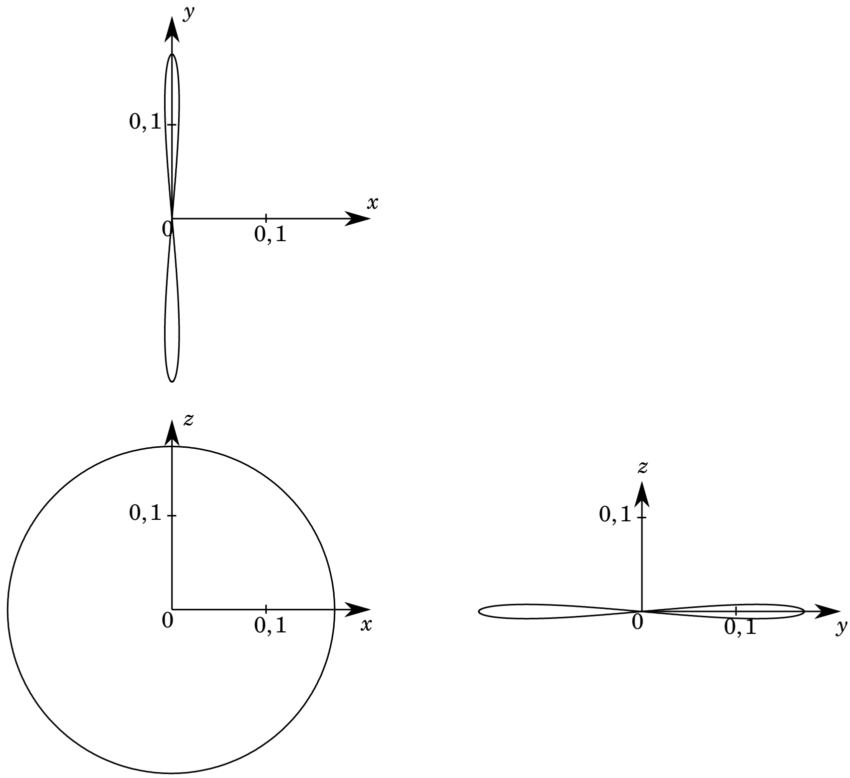

Fig. 3. Les trajectoires de trois points matériels par rapport à l'orbe excentrique, projetées sur des plans tangents à la sphère de centre C et de rayon 1, pour $\varepsilon = 10°$.

https://doi.org/10.1017/S0957423919000110 Published online by Cambridge University Press

Projetons la trajectoire orthogonalement sur un plan parallèle à $x = 0$. On obtient les équations paramétriques suivantes :

$$\begin{cases} y = u\sin\varepsilon\cos\theta + v\cos\varepsilon \\ z = (u(1-\cos\varepsilon)\cos\theta + v\sin\varepsilon)\sin\theta \end{cases}$$

d'où, en posant $Yu\sin\varepsilon = y - v\cos\varepsilon$ (ce n'est plus la même variable Y que précédemment) :

$$\begin{cases} Y = \cos\theta \\ z^2 = (Yu(1-\cos\varepsilon) + v\sin\varepsilon)^2(1-Y^2) \end{cases}$$

Sauf pour $u = 0$, on obtient donc toujours une quartique, symétrique par rapport à $z = 0$, et dont la partie réelle est comprise entre $Y = -1$ et $Y = 1$. Si $\left|\dfrac{v\sin\varepsilon}{u(1-\cos\varepsilon)}\right| < 1$, cette courbe possède un point singulier,

$$(z, Y) = \left(0, -\frac{v\sin\varepsilon}{u(1-\cos\varepsilon)}\right),$$

et elle présente deux lobes qui se rencontrent en ce point. Sinon, la courbe est de forme ovoïde. Pour $0 < \varepsilon < \pi/2$, on a :

$$\left|\frac{v\sin\varepsilon}{u(1-\cos\varepsilon)}\right| < 1 \iff \left|\frac{u}{v}\right| > \frac{\sin\varepsilon}{1-\cos\varepsilon} = \frac{\cos(\varepsilon/2)}{\sin(\varepsilon/2)} \iff |v| < \sin(\varepsilon/2).$$

Si ε est de l'ordre de quelques degrés, alors la trajectoire ne présente deux lobes que pour les points très proches des extrémités du diamètre transverse (voir la fig. 4 où toutes les trajectoires représentées sont ovoïdes, sauf la lemniscate, à peine visible, parcourue par une extrémité du diamètre transverse).

Il n'est pas certain qu'Ibn al-Haytham se soit intéressé aux trajectoires des points matériels du cercle de l'épicycle par rapport au référentiel solide de l'orbe excentrique. En revanche, il s'est intéressé à la trajectoire du centre du globe planétaire, porté par la sphère de l'épicycle, par rapport au référentiel de l'orbe excentrique. Il dit que ce mouvement produit « une ligne qu'on imagine s'enrouler sur le

https://doi.org/10.1017/S0957423919000110 Published online by Cambridge University Press

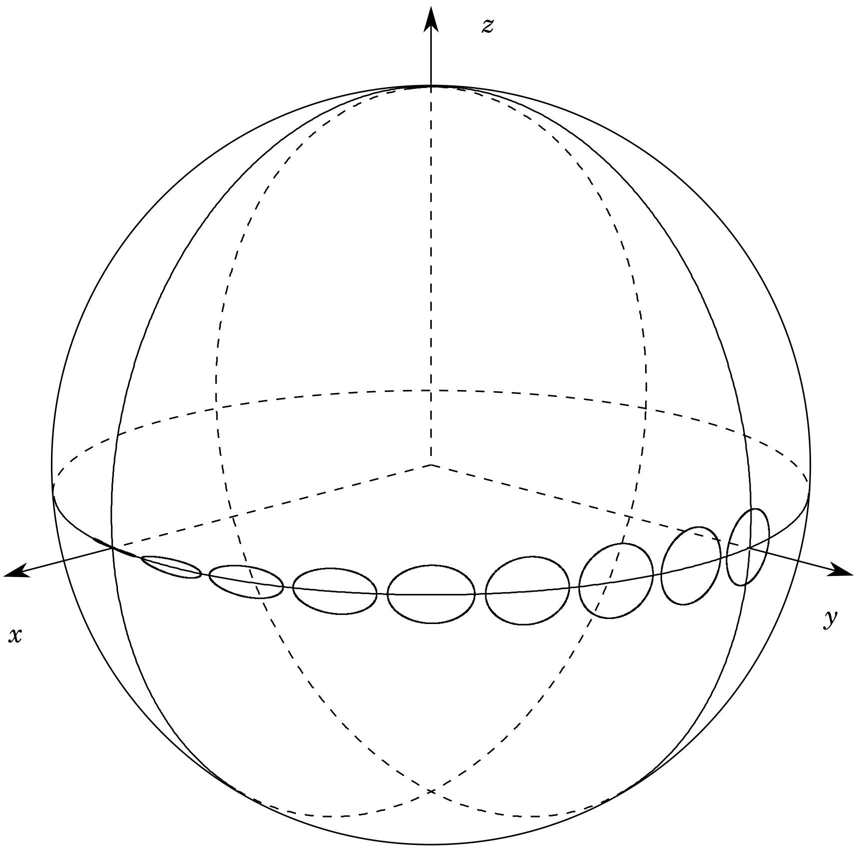

FIG. 4. Les trajectoires de quelques points du cercle de l'épicycle, pour $\varepsilon = 5°$.

https://doi.org/10.1017/S0957423919000110 Published online by Cambridge University Press

corps de la petite sphère mouvant le corps de la planète[30] ». Comme la sphère de l'épicycle est elle-même animée d'un mouvement de rotation par rapport à la seconde sphère, la description de cette trajectoire va impliquer une troisième transformation affine. Supposons que le centre du globe planétaire est, à l'instant initial, situé à l'apogée $(-\sin\varepsilon, \cos\varepsilon, 0)$. Si la vitesse angulaire de la sphère de l'épicycle est $\dot{\overline{\alpha}}$, la position de la planète après Δt sera donnée par :

$$\mathrm{R}_{\mathbf{j},-\dot{\overline{\kappa}}\Delta t} \circ \mathrm{R}_{\mathbf{t},\dot{\overline{\kappa}}\Delta t} \circ \mathrm{R}_{\mathbf{k},\dot{\overline{\alpha}}\Delta t} \begin{pmatrix} -\sin\varepsilon \\ \cos\varepsilon \\ 0 \end{pmatrix}.$$

On a représenté cette ligne, fig. 5, pour $\varepsilon = 5°$, en prenant, comme pour Jupiter, $\dot{\overline{\kappa}} = \dot{\overline{\alpha}}/12$. Notons que la trajectoire est périodique si $\dot{\overline{\kappa}}/\dot{\overline{\alpha}}$ est rationnel.

4. DEUXIÈME OBJECTION : IL FAUDRAIT DONNER UNE OBLIQUITÉ AU DIAMÈTRE TRANSVERSE POUR LES PLANÈTES SUPÉRIEURES

La deuxième objection du Šayḫ n'est que la suite logique de la première. Pour les planètes supérieures, si le diamètre transverse doit être dans le plan de l'écliptique quand le centre de l'épicycle arrive aux nœuds, c'est qu'il est incliné par rapport au plan de l'excentrique. Or Ibn al-Haytham aurait choisi le plan de l'excentrique comme plan de référence $(\mathrm{C}, \mathbf{i}, \mathbf{j})$ par rapport auquel le plan de l'épicycle oscille. C'est donc qu'il faut aussi soumettre le diamètre transverse à un mouvement oscillatoire, et lui donner une « obliquité », comme Ptolémée le faisait pour Mercure et Vénus.

Dans sa réponse à cette objection, Ibn al-Haytham insiste sur le fait que Ptolémée introduit une nette distinction entre planètes supérieures et planètes inférieures dans son livre sur les latitudes : il ne décrit explicitement le mouvement produisant l'obliquité du diamètre

[30] Voir *infra* p. 108, l. 6-7.

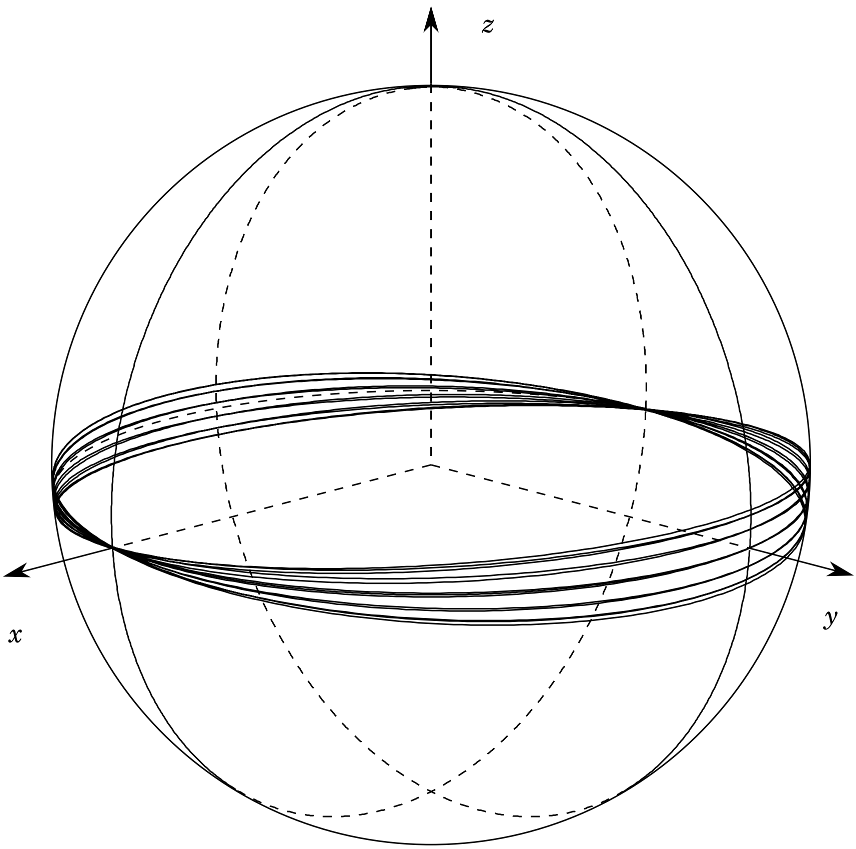

Fig. 5. « Une ligne qu'on imagine s'enrouler sur le corps de la petite sphère mouvant le corps de la planète.»

https://doi.org/10.1017/S0957423919000110 Published online by Cambridge University Press

transverse *que pour les planètes inférieures*. S'il avait aussi supposé un tel mouvement pour les planètes supérieures, il aurait dû le décrire plus explicitement, et il aurait au moins indiqué « son commencement et son terme » comme il le fait pour Mercure et Vénus quand il dit :

> Et enfin le point de départ et de restitution pour Vénus, est au nœud du demi-cercle additif ; et pour Mercure, il est au nœud du demi-cercle soustractif[31].

Si le modèle proposé par Ibn al-Haytham est tel que nous l'avons restitué ci-dessus, étant donné l'ambiguïté des paroles de Ptolémée rapportées ci-dessus p. 36 et 37, l'idée du Šayḫ est justifiable. Le diamètre transverse est, aux nœuds, à peu près dans le plan $(C,\mathbf{i},\mathbf{j})$ puisqu'il parcourt une lemniscate qui reste très proche de ce plan (voir fig. 3 en bas à droite, et fig. 4 près de l'axe des x). Ce diamètre n'est donc pas dans le plan de l'écliptique.

Un dernier indice renforce notre restitution : Ibn al-Haytham semble être en désaccord avec une assertion du Šayḫ selon laquelle « le plan de l'épicycle ne peut à aucun moment du mouvement des cinq planètes être dans le plan de l'orbe excentrique[32] ». Ibn al-Haytham avait donc posé que le plan de l'épicycle se superpose au plan de l'excentrique, aux nœuds, pour les planètes supérieures, même si cette intention n'était peut-être pas explicite dans le traité perdu[33].

L'argument décisif dans la réponse d'Ibn al-Haytham concerne l'interprétation du passage de l'*Almageste* déjà cité :

> Les diamètres qui coupent à angles droits les diamètres apogées, et périgées, s'il s'agit des trois planètes que nous avons nommées les premières, demeurent constamment parallèles au plan de l'écliptique, où la variation est du moins insensible [...][34]

Ibn al-Haytham cite une traduction un peu différente : « quant aux diamètres des épicycles, perpendiculaires aux diamètres déjà cités,

[31] Ptolémée, *Composition mathématique*, p. 373.

[32] Voir *infra* p. 82, l. 31 – p. 84, l. 10.

[33] Comme on l'a vu ci-dessus, Ibn al-Haytham nie avoir écrit ceci, cf. *supra* section 2 et *infra* p. 78, l. 22-24.

[34] Ptolémée, *Composition mathématique*, p. 372.

https://doi.org/10.1017/S0957423919000110 Published online by Cambridge University Press

ils restent en permanence parallèles au plan de l'écliptique, pour les trois planètes », et « s'ils dévient, leur déviation serait d'une grandeur négligeable [35] ». Le mot « déviation » (*inḥirāf* que nous avons rendu plus haut par « obliquité ») est ici précisément le terme utilisé ailleurs dans le livre XIII pour désigner le mouvement du diamètre transverse causé par un dispositif *adhoc*, pour Mercure et Vénus ; mais Ibn al-Haytham pense qu'il ne faut pas ici l'entendre en ce sens. Il faudrait l'entendre dans le sens plus général d'un simple « changement de position » qui serait seulement la conséquence des autres hypothèses.

Pour conclure, il semble donc qu'Ibn al-Haytham tienne à garder pour $(C, \mathbf{i}, \mathbf{j})$ le plan de l'excentrique, et qu'il soit conscient de cette conséquence fâcheuse : le diamètre transverse n'est pas parallèle au plan de l'écliptique quand le centre arrive aux nœuds. Il s'en accomode en songeant que ce « changement de position » du diamètre transverse est négligeable, et que Ptolémée avait déjà choisi de le négliger.

5. LE MOUVEMENT DES PLANÈTES SUPÉRIEURES

L'enquête précédente va nous permettre de greffer le modèle géométrique d'Ibn al-Haytham aux modèles des livres X, XI, XII de l'*Almageste*.

Dans un premier temps, nous allons résumer le modèle géométrique de Ptolémée pour les longitudes des planètes supérieures, ainsi que son modèle numérique pour les latitudes, afin de définir toutes les notations utiles [36]. Les paramètres numériques sont le rayon de l'excentrique R, l'excentricité e, le rayon de l'épicycle r, et les mouvements moyens $\dot{\bar{\lambda}}$, $\dot{\bar{\lambda}}_a$, $\dot{\bar{\lambda}}_\odot$. L'équation du mouvement en longitude est

[35] Voir *infra* p. 80, l. 27-32.

[36] Nous suivons à peu près les notations d'Olaf Pedersen, *A survey of the Almagest* (Odense Univ. Press, 1974) ; son analyse de la théorie des latitudes présente des défauts qu'il faut corriger en s'aidant de N. M. Swerdlow, « Ptolemy's theories of the latitude of the planets in the *Almagest*, *Handy Tables*, and *Planetary Hypotheses* », dans Jed Z. Buchwald et Allan Franklin (éd.), *Wrong for the right reasons* (Springer, 2005).

$q + p$, avec :

$$q = -\arcsin\left(\frac{2e\sin\overline{\kappa}}{\rho}\right), \quad p = \arcsin\left(\frac{r\sin\alpha}{\Delta}\right),$$

$$\rho = \sqrt{(2e\sin\overline{\kappa})^2 + (\sqrt{R^2 - (e\sin\overline{\kappa})^2} + e\cos\overline{\kappa})^2},$$

$$\Delta = \sqrt{(r\sin\alpha)^2 + (\rho + r\cos\alpha)^2},$$

$$\overline{\kappa} = \overline{\kappa}(0) + t\dot{\overline{\kappa}}, \quad \dot{\overline{\kappa}} = \dot{\overline{\lambda}} - \dot{\overline{\lambda}}_a,$$

$$\alpha = \overline{\alpha} - q, \quad \overline{\alpha} = \overline{\lambda}_\odot - \overline{\lambda}.$$

Pour calculer la latitude β de la planète, on considère l'*argument nodal de latitude* λ_d défini par :

$$\lambda_d = \overline{\kappa} + q + \overline{\lambda}_a - \lambda_{\Omega},$$

où $\lambda_{\Omega} - \overline{\lambda}_a = -140°$ pour Saturne, $-70°$ pour Jupiter, et $-90°$ pour Mars. On note i_1 l'inclinaison de l'excentrique par rapport à l'écliptique, et $i_1 + i_2$ l'inclinaison maximale de l'épicycle par rapport à l'excentrique. La méthode numérique de Ptolémée consiste en une interpolation. Si $\sin\lambda_d > 0$, alors

$$\beta \simeq \beta_{90}\sin\lambda_d \; ;$$

si $\sin\lambda_d \leq 0$, alors

$$\beta \simeq \beta_{270}\,|\sin\lambda_d|\,.$$

Ici β_{90} et β_{270} sont les latitudes calculées en fonction de α comme si l'on avait $\lambda_d = 90°$, resp. $270°$:

$$\beta_{90} = \arcsin\left(\frac{\mathrm{TK}\sin(i_1+\gamma)}{D}\right),$$

$$\begin{aligned}\mathrm{TK} &= \sqrt{(\rho(\overline{\kappa}_{90}) + r\cos(i_1+i_2)\cos\alpha)^2 + (r\sin(i_1+i_2)\cos\alpha)^2} \\ &\simeq \rho(\overline{\kappa}_{90}) + r\cos(i_1+i_2)\cos\alpha,\end{aligned}$$

https://doi.org/10.1017/S0957423919000110 Published online by Cambridge University Press

où $\overline{\kappa}_{90}$ est la valeur de $\overline{\kappa}$ vérifiant $\overline{\kappa} + q(\overline{\kappa}) + \overline{\lambda}_a - \lambda_{\Omega} = 90°$, et où :

$$\gamma = \arcsin\left(\frac{-r\sin(i_1+i_2)\cos\alpha}{\mathrm{TK}}\right),$$

$$D = \sqrt{\mathrm{TK}^2 + (r\sin\alpha)^2}.$$

Les mêmes formules s'appliquent pour $\overline{\kappa}_{270}$ et β_{270}, au signe près pour β_{270} :

$$\beta_{270} = -\arcsin\left(\frac{\mathrm{TK}\sin(i_1+\gamma)}{D}\right).$$

Pour greffer le modèle géométrique d'Ibn al-Haytham à la théorie de Ptolémée, il va falloir écrire les formules de changement de coordonnées et passer du référentiel $(\mathrm{C}, \mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k})$ à un référentiel défini par le centre du monde (la Terre), le cercle de l'écliptique et le point vernal. Notons O le centre du monde, $\mathbf{u}$ la direction du solstice d'hiver par rapport au centre du monde, $\mathbf{v}$ la direction du point vernal, et $\mathbf{w}$ un vecteur unitaire orthogonal à l'écliptique. On obtient le trièdre $(\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k})$ partir de $(\mathbf{u}, \mathbf{v}, \mathbf{w})$ en appliquant la transformation vectorielle suivante :

$$\mathrm{R}_{\mathrm{R}_{\mathbf{w},\lambda_{\Omega}}(\mathbf{v}),i_1} \circ \mathrm{R}_{\mathbf{w},\overline{\lambda}_a+\kappa} = \mathrm{R}_{\mathbf{w},\lambda_{\Omega}} \circ \mathrm{R}_{\mathbf{v},i_1} \circ \mathrm{R}_{\mathbf{w},\kappa+\overline{\lambda}_a-\lambda_{\Omega}}.$$

La rotation $\mathrm{R}_{\mathbf{w},\overline{\lambda}_a+\kappa}$ a pour effet de transformer la direction $\mathbf{v}$ du point vernal en la direction OC du vecteur $\mathbf{j}$; la seconde rotation a pour effet de transformer le plan de l'écliptique $(\mathbf{u}, \mathbf{v})$ en le plan de l'excentrique $(\mathbf{i}, \mathbf{j})$ qui est incliné d'un angle i_1 autour de la direction des nœuds $\mathrm{R}_{\mathbf{w},\lambda_{\Omega}}(\mathbf{v})$.

Notons M la matrice de cette transformation dans la base $(\mathbf{u}, \mathbf{v}, \mathbf{w})$.

Ici $\kappa = \overline{\kappa} + q$. Si $(x_\mathrm{C}, y_\mathrm{C}, z_\mathrm{C})$ sont les coordonnées de C dans le repère $(\mathrm{O}, \mathbf{u}, \mathbf{v}, \mathbf{w})$, et si (x, y, z) sont les coordonnées de la planète dans le repère $(\mathrm{C}, \mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k})$, ses coordonnées sphériques (D, β, λ) dans le référentiel de l'écliptique vérifient donc :

$$\begin{pmatrix} -D\cos\beta\sin\lambda \\ D\cos\beta\cos\lambda \\ D\sin\beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_\mathrm{C} \\ y_\mathrm{C} \\ z_\mathrm{C} \end{pmatrix} + M \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}.$$

https://doi.org/10.1017/S0957423919000110 Published online by Cambridge University Press

Mais si $\rho = \|\overrightarrow{\mathrm{OC}}\|$, alors $\overrightarrow{\mathrm{OC}}$ est précisément l'image de $\rho\mathbf{v}$ par les mêmes rotations que ci-dessus :

$$x_{\mathrm{C}}\mathbf{u} + y_{\mathrm{C}}\mathbf{v} + z_{\mathrm{C}}\mathbf{w} = \overrightarrow{\mathrm{OC}} = \mathrm{R}_{\mathbf{w},\lambda_{\Omega}} \circ \mathrm{R}_{\mathbf{v},i_1} \circ \mathrm{R}_{\mathbf{w},\kappa+\overline{\lambda}_a-\lambda_{\Omega}}(\rho\mathbf{v}).$$

Enfin, (x, y, z) se calcule au moyen des éléments décrits ci-dessus p. 48, en prenant $\varepsilon = i_1 + i_2$. À noter toutefois que nous règlerons le mouvement de la « première sphère » et de la « seconde sphère » d'Ibn al-Haytham sur κ, et non sur le *centre moyen* $\overline{\kappa}$, puisque Ptolémée écrit, au sujet des petits cercles :

> Leurs mouvements uniformes ne s'accomplissent pas autour de leurs propres centres, mais autour d'un centre qui donne à ces petits cercles la même équation que celle de longitude de l'astre rapportée à l'écliptique[37].

De même, il n'y a aucune raison de supposer que le mouvement de la sphère de l'épicycle soit un mouvement de rotation uniforme. On prendra donc $\alpha = \overline{\alpha} - q$ au lieu de $\overline{\alpha}$, pour obéir à Ptolémée qui impose de mesurer le mouvement de l'épicycle par rapport au « diamètre de l'apogée vrai » passant par le point équant[38]. Finalement,

$$x\mathbf{i} + y\mathbf{j} + z\mathbf{k} = \mathrm{R}_{\mathbf{j},-\kappa-\overline{\lambda}_a+\lambda_{\Omega}} \circ \mathrm{R}_{\mathbf{t},\kappa+\overline{\lambda}_a-\lambda_{\Omega}} \circ \mathrm{R}_{\mathbf{k},\alpha}(r\mathbf{t}),$$

où les coordonnées du vecteur $\mathbf{t}$ dans la base $(\mathbf{i},\mathbf{j},\mathbf{k})$ sont :

$$\begin{pmatrix} -\sin(i_1+i_2) \\ \cos(i_1+i_2) \\ 0 \end{pmatrix}.$$

À la fig. 6, nous comparons la latitude β de Jupiter calculée au moyen de ce modèle à celle calculée au moyen de la formule d'interpolation de l'*Almageste* rappelée ci-dessus, pour $0 < t < 12$ ans. Comme

---

37 Ptolémée, *Composition mathématique*, p. 373.

38 La sixième réponse au Šayḫ confirmera qu'Ibn al-Haytham souhaitait aussi rendre compte de la théorie du point équant dans son traité perdu (cf. *infra* p. 102-104).

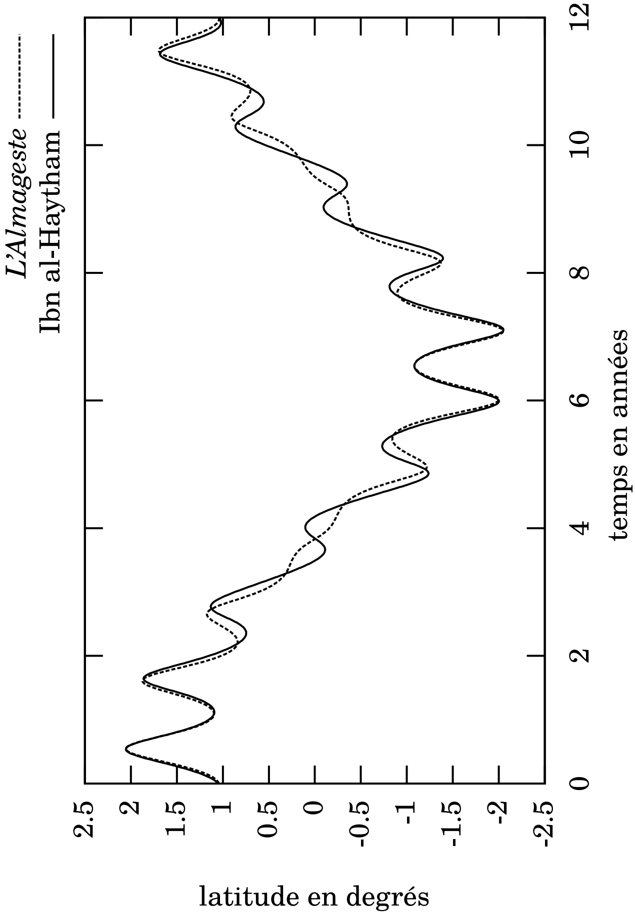

FIG. 6. Latitudes de Jupiter sur 12 ans.

https://doi.org/10.1017/S0957423919000110 Published online by Cambridge University Press

la comparaison avec des positions observées importe peu, nous avons pris pour *radices* des mouvements moyens :

$$\overline{\lambda}_a(0) = 0, \quad \overline{\lambda}(0) = 0, \quad \overline{\lambda}_\odot(0) = 0.$$

Pour simplifier, on suppose $\overline{\lambda}_a$ constant en négligeant précession et mouvement des apogées planétaires. Pour les autres paramètres, on suit Ptolémée :

$$\dot{\overline{\lambda}} \simeq 30° \text{ par an}, \quad \dot{\overline{\lambda}}_\odot \simeq 360° \text{ par an},$$

$$R = 60, \quad r = 11{,}5, \quad e = 2{,}75,$$

$$i_1 = 1°30', \quad i_2 = 1°, \quad \lambda_\Omega - \overline{\lambda}_a = -70°.$$

Aux extrémités nord et sud de l'excentrique, l'ajustement entre les deux courbes est bon ; en revanche, on observe des écarts de l'ordre de $0°20'$ près des nœuds.

6. UN MODÈLE ALTERNATIF

Un scénario alternatif, un peu plus élaboré et donc moins vraisemblable historiquement, nous permettra de réfléchir davantage aux possibilités conceptuelles qui s'ouvraient à l'astronomie du xe siècle. Les autres réponses au Šayḫ contribueront à rendre ce scénario un peu plus plausible.

On a vu que le choix du plan de référence $(C, \mathbf{i}, \mathbf{j})$, confondu avec le plan de l'excentrique, dépendait essentiellement, au dire d'Ibn al-Haytham, de l'ordre d'exposition adopté par Ptolémée dans l'*Almageste* : le plan de l'épicycle était *d'abord* supposé confondu avec le plan de l'excentrique dans les livres X, XI, XII.

Et si les données de l'observation – celles mêmes transmises par Ptolémée – nous obligeaient finalement, après vérification, à choisir un plan de référence parallèle au plan de l'écliptique ? Et si l'hypothèse contraire produisait un effet non « négligeable » sur le diamètre transverse, aux nœuds ? Car c'est précisément cela que nous révèle la fig. 6 ci-dessus. Est-il raisonnable de croire qu'Ibn al-Haytham eût pu trouver une solution à ce problème, dans son traité perdu ou ailleurs ?

Bien sûr, si l'on décrète que le plan $(\mathrm{C},\mathbf{i},\mathbf{j})$ est un plan parallèle à l'écliptique, il faut changer l'inclinaison maximale en conséquence. Si l'inclinaison de l'excentrique par rapport à l'écliptique vaut i_1, et que l'inclinaison maximale de l'épicycle par rapport à l'excentrique vaut i_1+i_2, alors l'inclinaison maximale de l'épicycle par rapport à l'écliptique vaut i_2. Dans les formules ci-dessus, il faut donc prendre $\varepsilon = i_2$ au lieu de $\varepsilon = i_1+i_2$, et changer en conséquence les coordonnées du vecteur $\mathbf{t}$ en :

$$\begin{pmatrix} -\sin i_2 \\ \cos i_2 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

D'autre part, la matrice de changement de base M sera ici simplement la matrice de la rotation $\mathrm{R}_{\mathbf{w},\bar{\lambda}_a+\kappa}$ dans la base $(\mathbf{u},\mathbf{v},\mathbf{w})$, puisque le plan $(\mathrm{C},\mathbf{i},\mathbf{j})$ doit rester parallèle au plan $(\mathrm{O},\mathbf{u},\mathbf{v})$.

Le modèle obtenu après ces deux petites corrections semble presque plus simple que le modèle de la section précédente, mais ne nous laissons pas abuser par l'habillage algébrique. Ce nouveau modèle présente une difficulté qui aurait pu arrêter les astronomes du x^e siècle. Le plan de référence $(\mathrm{C},\mathbf{i},\mathbf{j})$ étant à présent parallèle au plan de l'écliptique, il ne contient plus le point O. La direction $(\mathrm{C},\mathbf{j})$ ne passe donc plus par O, et ce n'est plus, à proprement parler, la direction de « l'apogée ». En fait, la direction $\overrightarrow{\mathrm{OC}}$ n'est même plus une direction constante dans le référentiel $(\mathbf{i},\mathbf{j},\mathbf{k})$, puisqu'elle est parfois dans le plan $(\mathbf{i},\mathbf{j})$, à savoir, aux nœuds, et parfois non ! Si l'on ne peut plus parler de diamètre de l'apogée, la description du modèle dans le langage de l'époque devient ardue [39].

[39] Pourtant, à cet égard, les propos d'Ibn al-Haytham p. 98, l. 24-25, ajoutent vraisemblance à ce scénario alternatif. Là, il envisage en effet un cas où « le centre du petit cercle est en dehors de cette ligne », *i. e.* la ligne OC : il faudrait donc, au profit du scénario alternatif, rejeter notre premier scénario puisque l'axe de rotation de la première sphère y est toujours confondu avec la droite OC. Pourtant un *troisième* scénario reste envisageable : on pourrait décréter que la droite $(\mathrm{C},\mathbf{j})$,

En tout cas, la courbe des latitudes calculées au moyen de ce modèle alternatif s'ajuste presque parfaitement avec la courbe de l'*Almageste* (au point qu'à l'échelle de la fig. 6, on ne pourrait guère les distinguer). Ce modèle alternatif donne donc une excellente réalisation géométrique du modèle numérique de Ptolémée.

7. TROISIÈME OBJECTION : PTOLÉMÉE MENTIONNE LE MOUVEMENT D'ENROULEMENT DANS LES *HYPOTHÈSES PLANÉTAIRES*

Concernant les *Hypothèses planétaires* de Ptolémée, la position d'Ibn al-Haytham est tranchée. Selon lui :

– Ptolémée n'y utilise pas le mouvement d'enroulement pour les latitudes ;

– pour construire le mouvement d'enroulement avec des solides, il faut utiliser des sphères entières et l'on ne peut pas se contenter de troncs de sphères (les « prismes », *manšūrāt*, du livre II des *Hypothèses planétaires*).

La troisième objection du Šayẖ concerne le premier point, mais nous n'en connaissons pas la teneur exacte ; Ibn al-Haytham mentionne seulement [40] de « longs propos à la fin desquels il a dit : "Cela est contraire aux principes posés dans l'*Almageste*" ». Ailleurs, nous verrons qu'Ibn al-Haytham lui aussi reproche à Ptolémée d'avoir commis des erreurs dans les *Hypothèses* ; mais dans sa réponse à la troisième objection, il préfère défendre Ptolémée contre le Šayẖ, et accuser le Šayẖ d'avoir pris Ptolémée à la lettre.

Nous verrons qu'il existe en effet des occurrences explicites d'un « mouvement d'enroulement » (*iltifāf*) dans le livre II arabe des *Hypothèses* de Ptolémée. Pourtant, au dire d'Ibn al-Haytham, la seule manière de comprendre ce que fait Ptolémée dans les *Hypothèses* est

axe de rotation de la première sphère, doit passer par le centre de l'excentrique, et non par le centre O de l'écliptique (voir à ce sujet la cinquième objection du Šayẖ)… En l'absence d'autre indice textuel, nous ne pouvons trancher.

40 Voir *infra* p. 84, l. 30-31.

https://doi.org/10.1017/S0957423919000110 Published online by Cambridge University Press

justement d'admettre qu'il y a renoncé au mouvement d'enroulement pour modéliser les latitudes planétaires.

Le texte des *Hypothèses* donne raison à Ibn al-Haytham : Ptolémée n'y utilise, pour chaque planète, que des mouvements de rotation autour d'axes orthogonaux à l'un des trois plans suivants : l'équateur, l'écliptique et l'excentrique. Le mouvement d'enroulement qu'Ibn al-Haytham a trouvé dans le livre XIII de l'*Almageste* implique au contraire un axe de rotation contenu dans le plan de l'excentrique, ou bien dans un plan parallèle à l'écliptique : l'axe $(C,\mathbf{j})$.

Le Šayḫ avait-il remarqué que Ptolémée formule néanmoins dans les *Hypothèses* une théorie produisant une oscillation du plan de l'épicycle par rapport au plan de l'excentrique ? La réponse d'Ibn al-Haytham, au ton assez polémique, ne nous permet pas d'en savoir davantage.

Cette réponse est surtout intéressante car elle montre les deux savants arabes aux prises avec les passages des *Hypothèses* où il est question des latitudes planétaires. Or la théorie qu'y décrit Ptolémée contient un orbe solide centré en le centre de l'épicycle et dont le plan orthogonal à l'axe reste constamment parallèle à l'écliptique [41]. C'est là l'ingrédient essentiel à notre « modèle alternatif » ci-dessus. Il faut donc penser que ce modèle était à la portée d'Ibn al-Haytham.

8. QUATRIÈME OBJECTION : POSSIBILITÉ DE CONSTRUIRE LE MOUVEMENT D'ENROULEMENT AU MOYEN DE PRISMES

Comme on l'a dit, Ibn al-Haytham aurait soutenu dans son traité perdu qu'il est impossible de construire le mouvement d'enroulement au moyen de prismes (*manšūrāt*) [42]. Le Šayḫ aurait au contraire expliqué que cela est possible ; son objection est peut-être citée intégralement par Ibn al-Haytham, p. 86, l. 15 – p. 88, l. 4. À cette occasion,

[41] Voir notre commentaire du modèle des *Hypothèses* dans la section suivante : l'axe Ḏ̣Ḏ̣ d'une des sphères de l'épicycle reste en permanence perpendiculaire au plan de l'écliptique. Cf. Swerdlow, « Ptolemy's theories of the latitude », p. 65.

[42] Il le dit explicitement *infra*, p. 94, l. 6-10.

https://doi.org/10.1017/S0957423919000110 Published online by Cambridge University Press

le Šayẖ reprend les paroles mêmes de Ptolémée. Lisons en effet le début du livre II des *Hypothèses planétaires*, où Ptolémée introduit les prismes qu'il conçoit comme des troncs de sphères (*qiṭᶜa min kura*) :

> L'autre manière, c'est de ne pas distinguer une sphère entière pour chacun des mouvements, mais d'établir seulement un tronc de sphère, en tronquant des deux côtés du grand cercle – l'un des plus grands parmi les cercles de cette sphère – <le long> duquel est le mouvement en longitude ; et ce que ce tronc <de sphère> occupe, des deux côtés, est de la grandeur de la latitude [43]. De sorte que, s'il est dans un orbe d'épicycle, la forme de ce tronc <de sphère> est semblable à un tambour ; et s'il est dans les sphères creuses, il est semblable à une ceinture, à un bracelet ou à un peson de fuseau comme l'a dit Platon. Or le point de vue mathématique montre qu'il n'y a aucune différence entre ces deux manières que nous avons décrites [44].

Les raisons *non* mathématiques qui poussent Ptolémée à préférer cette « autre manière » semblent être les suivantes :

– Les troncs de sphères constituent une économie considérable de matière à mouvoir : au contraire les sphères entières « prennent au sein de l'éther un grand espace [45] ».

– Éviter l'utilisation de coquilles sphériques permet de regrouper certaines paires d'orbes animés tous deux d'un même mouvement mais séparés par une coquille sphérique (l'un étant situé à l'intérieur et l'autre à l'extérieur de la coquille). Ceci permet de réduire le nombre total de corps utilisés dans le modèle de l'univers, « l'excès en leur nombre [46] ».

– Si l'on ne regroupe pas ainsi certaines paires d'orbes, le fait que deux corps ou deux composantes connexes d'un même corps soient

---

[43] Cette dernière phrase serait citée presque textuellement par le Šayẖ, cf. *infra* p. 86, l. 29 – p. 88, l. 2.

[44] Voir le fac-similé, accompagné d'un apparat critique, publié par Bernard R. Goldstein, « The Arabic version of Ptolemy's *Planetary hypotheses* », *Transactions of the American Philosophical Society*, Philadelphia, 1967, 57 (4) : 1-55, en particulier p. 37, l. 11-17.

[45] Voir *infra*, p. 114, l. 7, où Ibn al-Haytham rappelle lui-même les raisons formulées dans les *Hypothèses planétaires*.

[46] Voir *infra*, p. 114, l. 6.

animés exactement du même mouvement est une coïncidence inexplicable du point de vue d'une physique céleste qui associe à chaque corps son mouvement propre [47].

– L'utilisation de sphères pose la question de la nature physique des pôles situés sur l'axe de rotation. Les pôles d'une sphère solide étant fixes dans la sphère qui la contient, ils permettent certes d'expliquer comment une sphère en entraîne une autre par contrainte ; mais ces pôles n'étant pas des points idéaux, ne risquent-il pas aussi d'entraver, voire d'empêcher, le mouvement de rotation ? En supposant l'axe de symétrie extérieur au solide (comme dans un « bracelet »), on évite cette question délicate. Ptolémée ne voulait pas concevoir l'entraînement mutuel des orbes comme un mouvement par contrainte.

Ibn al-Haytham avait certainement conscience de ces raisons, mais l'impossibilité mathématique l'emporte ici : l'usage de prismes n'est pas compatible avec la géométrie du mouvement d'enroulement. Pour comprendre cela, il faut comprendre quelles sont les troncatures autorisées par Ptolémée. L'entraînement mutuel des orbes se fait par attachement de chaque orbe en son « lieu » (*makān*) au sein de l'orbe qui le contient. Soit un orbe A contenant un orbe B. Si l'orbe B est animé d'un mouvement propre par rapport à l'orbe A qui le contient, il ne peut donc s'agir que d'un mouvement de rotation par rapport à un axe de symétrie de l'orbe B. Sinon, comme le dit Ibn al-Haytham, l'orbe B « sortirait de son lieu pour en remplir un autre » et il aurait besoin « d'un lieu plus grand que son lieu ». Ptolémée peut évider les sphères pleines et en faire des coquilles sphériques creuses ; il peut aussi leur soustraire deux calottes dont les bases sont perpendiculaires à l'axe de rotation. Or revenons à la figure 2 décrivant les trois solides utilisés pour le mouvement d'enroulement ; **j**, **t** et **k** sont leurs axes de rotation. Notre dessin représente des coquilles sphériques pour la première et la seconde sphère, et une sphère pleine

47 Ce point et le suivant sont peut-être confondus dans la formulation rapide qu'en donne Ibn al-Haytham quand il dit, *infra*, p. 114, l. 9-12 : « Ptolémée a considéré que le besoin d'un grand vide pour ces sphères et *le fait qu'elles s'entraînent mutuellement* forment un argument contre ce mouvement. »

pour la sphère de l'épicycle. La sphère de l'épicycle ayant pour axe de rotation le vecteur $\mathbf{k}$, on peut éventuellement lui soustraire deux calottes sphériques et en faire un « tambourin » dont les deux bases sont perpendiculaires à $\mathbf{k}$. Ce tambourin restera attaché en son lieu au sein de la seconde sphère, et il contiendra bien sûr la droite $(C, \mathbf{t})$, puisque cette droite indique le « diamètre de l'apogée », et que la planète elle-même, portée par le tambourin, doit pouvoir atteindre ce diamètre à chaque tour. Le corps de la « seconde sphère » doit être suffisamment vaste pour contenir ce tambourin : si l'on veut soustraire une calotte de la coquille sphérique représentant la seconde sphère sur la fig. 2, il faut donc prendre une calotte dont la base soit perpendiculaire à $\mathbf{t}$, direction de l'axe de rotation, tout en conservant le segment de la droite $(C, \mathbf{t})$, diamètre de l'apogée, contenu dans le tambourin ! La hauteur de la calotte soustraite doit donc être inférieure à l'épaisseur de la coquille sphérique. Pour économiser de la matière, autant réduire l'épaisseur des coquilles sphériques… À la limite, l'économie des calottes sera nulle.

Le Šayḫ objecte que Ptolémée lui-même, dans les *Hypothèses*, parvient à soustraire des calottes à deux corps sphériques centrés en C pour chaque planète. Ibn al-Haytham répond que Ptolémée n'a pas disposé ces deux corps sphériques pour produire le mouvement d'enroulement dans les *Hypothèses* ; en effet, le mouvement d'enroulement utilise au moins trois corps. D'ailleurs, Ibn al-Haytham mettra le Šayḫ au défi de construire le mouvement d'enroulement avec deux corps seulement [48]. Le rôle de la seconde sphère est en effet essentiel pour éviter que l'épicycle ne « bascule ». Si l'on omet la seconde sphère,

> […] l'épicycle bascule en conséquence : sa face nord devient face sud et sa face sud devient face nord, son côté est passe à l'ouest et son côté ouest passe à l'est [49].

Ibn al-Haytham ne se contente pas de répondre à cette quatrième objection. Il veut montrer que Ptolémée a commis « une erreur grave »

[48] Voir *infra* p. 118, l. 4-17.
[49] Voir *infra*, p. 92, l. 9-11.

https://doi.org/10.1017/S0957423919000110 Published online by Cambridge University Press

dans les *Hypothèses planétaires*, une erreur qu'il n'avait pas relevée dans son traité perdu [50]. Selon Ibn al-Haytham, le modèle des planètes supérieures dans les *Hypothèses* ne rend certes pas compte du mouvement d'enroulement décrit dans l'*Almageste*, mais pire encore, ce modèle est erroné. Pour comprendre, il faut étudier le livre II des *Hypothèses* ; nous donnons la traduction du passage concernant les orbes de Saturne dans l'appendice 1. Nous renvoyons à la figure 7 p. 126 pour les noms des points utilisés ci-dessous. Supposons que l'arrangement décrit par Ptolémée et représenté sur cette figure corresponde à la position des orbes quand Saturne est à l'apogée de son épicycle, quand le centre de l'épicycle est à l'apogée de l'excentrique, et quand l'apogée est en direction du point vernal. Attention, on a ḤḌ ∥ AC, et ḤC′ ∥ ZŠ, mais les droites AC, AZ et ZŠ ne sont pas coplanaires, contrairement à ce que pourrait laisser croire la figure si on l'interprète abusivement comme une figure plane, section des corps solides par un plan perpendiculaire à l'écliptique [51]. On obtiendra la position de Saturne à un instant ultérieur en appliquant au point L une composée de rotations affines. En première lecture, on est tenté d'interpréter les indications de Ptolémée par la composée de rotations suivante :

$$\mathrm{R}_{\overrightarrow{\mathrm{AC}},\lambda_a} \circ \mathrm{R}_{\overrightarrow{\mathrm{Z\check{S}}},\overline{\kappa}} \circ \mathrm{R}_{\overrightarrow{\mathrm{\d{H}C'}},-\overline{\kappa}} \circ \mathrm{R}_{\overrightarrow{\mathrm{\d{H}\d{D}}},\overline{\alpha}}(\mathrm{L}).$$

Mais il faut corriger $\overline{\kappa}$ en $\overline{\kappa} - \arcsin \dfrac{e \sin \overline{\kappa}}{R}$. En effet, à cause du point équant, le mouvement rotatoire de l'excentrique n'est pas supposé uniforme par rapport au centre de l'excentrique. Ptolémée le rappelle en ces termes :

> Les sphères et les prismes analogues au corps NO ont toujours pour centre le point Z, mais ce n'est pas par rapport à lui que s'accomplissent l'uniformité du mouvement et la *neusis* <du diamètre de l'apogée> de l'orbe de l'épicycle : comme nous l'avons dit et démontré au sujet des orbes,

50 Voir *infra*, p. 94, l. 11-15.

51 Les trois droites serait coplanaires si l'on avait $\lambda_{\Omega} - \overline{\lambda}_a = -90°$; mais pour Saturne, $\lambda_{\Omega} - \overline{\lambda}_a = -140°$.

<elles s'accomplissent> plutôt par rapport à un point de AḤ dont la distance à A est <le double> de la distance à Z[52].

Enfin, pour comprendre comment corriger $\overline{\alpha}$, censé mesurer le mouvement de l'épicycle par rapport au diamètre de l'apogée vrai, il faut comprendre ce qu'est le diamètre de l'apogée dans notre système de sphères solides. Il s'agit du diamètre ḤL de la coquille sphérique B′D̲ contenant la sphère de l'épicycle D̲LḌ. Dans la disposition représentée sur la figure, apogée vrai, apogée moyen et apogée apparent sont bien sûr confondus puisqu'on a supposé le centre de l'épicycle situé à l'apogée de l'excentrique ; mais quelle est l'image de ḤL par les rotations mouvant la coquille sphérique B′D̲ ? La direction de ce diamètre devient à peu près (on omet la correction de $\overline{\kappa}$) :

$$\mathrm{R}_{\overrightarrow{\mathrm{AC}},\lambda_a} \circ \mathrm{R}_{\overrightarrow{\mathrm{Z\check{S}}},\overline{\kappa}} \circ \mathrm{R}_{\overrightarrow{\mathrm{\d{H}C'}},-\overline{\kappa}} \left(\overrightarrow{\mathrm{\d{H}L}}\right) = \mathrm{R}_{\overrightarrow{\mathrm{AC}},\lambda_a} \left(\overrightarrow{\mathrm{\d{H}L}}\right),$$

car $\overrightarrow{\mathrm{Z\check{S}}} = \overrightarrow{\mathrm{\d{H}C'}}$. Par rapport au centre du monde, il pointera donc toujours vers l'apogée de l'excentrique. Il n'indiquera donc l'apogée de l'épicycle que lorsque le centre de l'épicycle est à l'apogée de l'excentrique. C'est ce qu'explique Ibn al-Haytham en disant que « l'apogée de l'épicycle devient tantôt le périgée et tantôt la position moyenne[53] ». Pour avoir un modèle qui produise des effets en longitude à peu près équivalents à celui de l'*Almageste*, il faut donc corriger drastiquement $\overline{\alpha}$ d'une grandeur à peu près égale à $\overline{\kappa}$; il faudrait par exemple adopter la composée de rotations suivantes :

$$\mathrm{R}_{\overrightarrow{\mathrm{AC}},\lambda_a} \circ \mathrm{R}_{\overrightarrow{\mathrm{Z\check{S}}},\overline{\kappa}-\arcsin\frac{e\sin\overline{\kappa}}{R}} \circ \mathrm{R}_{\overrightarrow{\mathrm{\d{H}C'}},-\overline{\kappa}+\arcsin\frac{e\sin\overline{\kappa}}{R}} \circ \mathrm{R}_{\overrightarrow{\mathrm{\d{H}\d{D}}},\kappa+\alpha}(\mathrm{L}).$$

Cette correction n'est guère évidente, et elle n'est pas mentionnée dans le livre II des *Hypothèses*. Certes Ptolémée ne s'y attachait

[52] Cf. Bernard R. Goldstein, « The Arabic version », p. 47, l. 18-23. On voit que les deux sources arabes utilisées par Goldstein sont vraisemblablement corrompues : l'omission du mot « double » laisse croire que le point équant est le milieu entre le centre du monde et le centre de l'excentrique, contrairement à ce qu'enseigne l'*Almageste*. Nous avons traduit l'arabe *mayl* par le grec *neusis* pour désigner ici l'oscillation du diamètre de l'apogée vrai due au point équant.

[53] Cf. *infra*, p. 90, l. 22-27.

guère à donner une description mathématique précise du mouvement en termes de transformations géométriques (contrairement à Ibn al-Haytham) : pour lui, il s’agissait surtout, semble-t-il, d’ordonner un système de corps présentant suffisamment de degrés de liberté pour permettre les mouvements célestes.

C’est cette omission, aggravant celle du mouvement d’enroulement, qu’Ibn al-Haytham a qualifiée d’« erreur ».

9. CINQUIÈME OBJECTION : LE DIAMÈTRE OSCILLANT PEUT-IL RESTER ALIGNÉ AVEC LE CENTRE DU MONDE ?

Au début du chapitre XIII.2 de l’*Almageste*, Ptolémée écrit :

> Les diamètres *des apogées apparents* des épicycles qui, à certain point de départ, étaient dans le plan de l’excentrique, sont transportés par de petits cercles fixés, pour ainsi dire, à leurs extrémités périgées [54].

Le Šayḫ y voit une contradiction avec les propos d’Ibn al-Haytham que celui-ci reprend dans sa réponse [55]. D’après le Šayḫ, Ibn al-Haytham semblerait en effet avoir aligné le centre du petit cercle avec le centre de l’épicycle et le centre de l’excentrique. Le centre du petit cercle serait alors situé sur le diamètre de l’« apogée moyen », et non sur le diamètre de l’« apogée apparent » qui passe par le centre de l’écliptique. Mais il est difficile de savoir vraiment à qui attribuer chacun des propos rapportés dans ce paragraphe : certes Ibn al-Haytham ne renie pas les citations que semble lui avoir attribuées le Šayḫ, mais celui-ci n’aurait-il pas poussé un peu certains traits pour mieux le critiquer ? Nous nous garderons donc d’en tirer des conclusions hâtives.

D’après la restitution que nous avons faite du modèle d’Ibn al-Haytham dans la section 5 *supra*, le vecteur $\mathbf{j}$ indique toujours la di-

54 Ptolémée, *Composition mathématique*, p. 371. En italiques, nous avons corrigé la traduction de Halma : il rend αἱ τῶν φαινομένων ἀπογείων διάμετροι par « les diamètres apogées » en omettant le mot « apparents » qui nous importe tant ici.

55 Cf. p. 94 l. 16-30 *infra*.

https://doi.org/10.1017/S0957423919000110 Published online by Cambridge University Press

rection OC de l'apogée apparent ; dans notre modèle « alternatif », la composante de $\mathbf{j}$ projetée dans le plan de l'écliptique indique aussi toujours la direction de l'apogée apparent. Pour construire un modèle où $\mathbf{j}$ indique la direction de l'apogée moyen, il faudrait faire intervenir des rotations dont l'axe passe par le centre de l'excentrique : on pourrait le faire, à condition de corriger en conséquence le mouvement du centre, $\kappa = \overline{\kappa} + q$, en $\overline{\kappa} - \arcsin \dfrac{e \sin \overline{\kappa}}{R}$, comme nous l'avons fait dans la section précédente pour expliquer le mouvements des orbes solides dans les *Hypothèses planétaires*.

À partir du moment où l'on souhaite interpréter les modèles de l'*Almageste* en termes de rotations affines, il serait certes assez naturel de procéder ainsi, et il est bien possible que ce fût là l'intention d'Ibn al-Haytham, mais nous nous abstiendrons de compliquer davantage nos deux scénarios en y faisant intervenir le centre de l'excentrique.

Le Šayḫ va plus loin encore, en attribuant aussi l'intention suivante aux paroles de Ptolémée rapportées ci-dessus : il faudrait que les transformés successifs du diamètre $(\mathrm{C}, \mathbf{t})$ de l'épicycle, dans le mouvement engendré par le petit cercle, restent constamment dans la direction de l'apogée apparent !

Ibn al-Haytham va s'attacher à réfuter cette prétention par une démonstration apodictique. Le caractère universel de l'énoncé nous rappelle le style dont témoignent les autres ouvrages du grand savant :

> Toute droite qui possède un point fixe et qui se déplace d'un mouvement circulaire continu ne reste, durant le temps de son mouvement, dirigée vers aucun autre point fixe que son propre point fixe [56].

Le lecteur moderne notera vite l'ambiguïté : il n'est ici question d'aucun référentiel, mais le contexte même laisse penser que la première occurrence du mot « fixe » ne renvoie pas au même référentiel que la seconde. Ne nous y trompons pas, Ibn al-Haytham ajoute : « C'est une proposition universelle *que je montre pour le diamètre*

[56] Cf. p. 96, l. 30-33, *infra*.

de l'épicycle. » Gardons à l'esprit ce cas particulier, si l'on veut comprendre la démonstration d'Ibn al-Haytham.

Il s'agit de démontrer que les transformés successifs de la droite $(C, \mathbf{t})$ ne peuvent pas constamment passer par le centre de l'écliptique. Pour le démontrer, Ibn al-Haytham conçoit la ligne composée (*ḫaṭṭ murakkab*) décrite par l'intersection de cette droite mobile et du plan de l'écliptique. Montrons que cette courbe ne se réduit pas à un unique point situé au centre de l'écliptique. Les transformés successifs de la droite $(C, \mathbf{t})$ ne sont qu'exceptionnellement dans le plan de l'excentrique, puisque ce diamètre de l'épicycle « oscille autour du plan de l'orbe excentrique » ; donc leur intersection avec le plan de l'écliptique ne sera qu'exceptionnellement sur la droite des nœuds. Ainsi la courbe décrite ne peut pas se réduire à un unique point.

Ibn al-Haytham conclut la réponse à cette cinquième objection en citant le chapitre XIII.1 de l'*Almageste* :

> Nous supposons <les inclinaisons> des épicycles relatives à leurs diamètres dirigés vers le centre de l'écliptique et sur lesquels on observe les apogées et périgées apparents [57].

Ibn al-Haytham cite deux traductions arabes de l'*Almageste* où le mot πρὸς, « relatives à », est traduit tantôt par *bi-ḥasab*, tantôt par *ᶜalā*. Il comprend que ces inclinaisons sont « rapportées », *bi-al-qiyās*, à ces diamètres : les diamètres inclinés eux-mêmes ne passent bien sûr pas, quant à eux, par le centre de l'écliptique.

10. SIXIÈME OBJECTION : *NEUSIS* ET POINT ÉQUANT

La section suivante du texte d'Ibn al-Haytham (p. 102, l. 7 – p. 106, l. 1) aborde un autre sujet : la question de la *neusis* du diamètre de l'apogée vrai en direction du point équant. Il semble donc qu'il s'agisse de la réponse à une sixième objection, mais Ibn al-Haytham ne rapporte pas ici les paroles du Šayḫ.

[57] Cf. Ptolémée, *Composition mathématique*, p. 368, mais nous n'avons pas suivi ici la traduction de Halma qui s'éloigne un peu du texte grec.

Il décrit en détail comment il a construit, dans son traité perdu, un modèle produisant la *neusis* du diamètre de l'apogée vrai en direction du point équant, au moyen du mouvement d'enroulement. Pour suivre ses explications, il faut bien distinguer centre du monde, centre du déférent excentrique et point équant [58]. Les diamètres de l'épicycle passant par ces trois points s'appellent respectivement apogée apparent, apogée moyen et apogée vrai. On dirait aujourd'hui qu'Ibn al-Haytham souhaite décrire le mouvement d'un cercle matériel, appelé cercle de l'épicycle et portant l'apogée vrai, dans le référentiel attaché au déférent excentrique.

Négligeons les inclinaisons produisant les mouvements en latitude. Pour commencer, on supposera donc le cercle de l'épicycle attaché dans le plan de l'orbe excentrique et entraîné par le mouvement de rotation de celui-ci autour de son axe, en même temps que le centre de l'épicycle. La direction de l'apogée moyen, définie par la droite joignant centre du déférent et centre de l'épicycle, subira donc le même mouvement de rotation. Il est clair qu'aucun diamètre matériel du cercle de l'épicycle ne pourra alors rester constamment aligné avec le point équant.

Or Ptolémée impose au diamètre de l'apogée vrai d'être constamment aligné avec le point équant. Il faut donc changer notre hypothèse, et autoriser le cercle de l'épicycle et ses diamètres à se mouvoir au sein de l'orbe excentrique. Pour cela, Ibn al-Haytham introduit deux sphères comme il l'a fait pour les latitudes (voir fig. 2) ; maintenant l'axe $(C,\mathbf{j})$ de la première sphère est le diamètre de l'apogée moyen, fixe au sein de l'orbe excentrique, et l'axe de la seconde sphère sera animé d'un mouvement d'oscillation autour du diamètre de l'apogée moyen ; à condition de bien régler l'amplitude des oscillations dictée par l'angle $\varepsilon = (\mathbf{j}, \mathbf{t})$, cet axe reproduira assez bien l'oscillation causée par la *neusis* de l'apogée vrai. Le cercle de l'épicycle, le long duquel se déplace la planète, peut donc à présent être attaché à la seconde sphère : le mouvement de la planète se rapportera à l'apogée vrai,

[58] Dans le texte, le point équant est appelé centre de l'orbe équant (*al-falak al-muʿaddil al-masīr*).

https://doi.org/10.1017/S0957423919000110 Published online by Cambridge University Press

approximativement.

Naṣīr al-Dīn al-Ṭūsī s'est peut-être inspiré de cette idée puisqu'il a lui aussi décidé d'expliquer un mouvement de *neusis* (celui du point de prosneuse dans le troisième modèle de la Lune de l'*Almageste*) au moyen du même dispositif que pour les latitudes des cinq planètes [59].

Les propos d'Ibn al-Haytham illustrent clairement une méthode scientifique à double visage : la mesure du phénomène sensible (ici l'inclinaison sensible par rapport au diamètre de l'apogée apparent, *al-mayl al-maḥsūs*), et la recherche de sa cause (*ᶜilla*) dans une composition de mouvements simples et continus (*basīṭa wa-muttaṣila* [60]). La « simplicité » du mouvement suppose qu'il engendre une ligne simple (ici un cercle) ; sa « continuité » suppose qu'il ne s'interrompe pas – le mouvement de rotation doit parcourir un cercle complet, et non seulement un petit arc en va-et-vient. C'est probablement ainsi qu'il faut comprendre ces deux termes, et Ibn al-Haytham ne semble pas postuler ici l'uniformité en vitesse des mouvements élémentaires, contrairement à ses lointains successeurs Naṣīr al-Dīn et Ibn al-Šāṭir.

11. SEPTIÈME OBJECTION : DÉFINITION DU MOUVEMENT D'ENROULEMENT

La septième objection du Šayḫ fait allusion au passage suivant du *Livre des Hypothèses* :

> Quant à ceux qui ont pris pour point de départ de leur raisonnement les mouvements sphériques que l'on a ici-bas, ceux-là avaient raisonné en physiciens en posant des sphères entières ; car ils ont vu, dans les sphères que l'on fait ici-bas, qu'il y a dans les mouvements sphériques deux points qui retiennent la sphère par contrainte, et ce sont ceux qu'on appelle les deux pôles. Imaginer ceci pour les positions des prismes est difficile ; mais c'est facile avec des sphères entières ; donc ils se sont appuyés, comme l'a aussi fait Aristote, sur l'affirmation que les pôles des sphères contenues sont fixés sur les sphères contenantes. Ensuite, puisqu'il ne restait plus

59 Voir Ragep, *Naṣīr al-Dīn al-Ṭūsī's Memoir*, II.11 [12] et [13], p. 208-211.
60 Voir p. 104, l. 8-21, *infra*.

https://doi.org/10.1017/S0957423919000110 Published online by Cambridge University Press

> aucune contiguïté entre les sphères intérieures et la première sphère extérieure, et que le mouvement de toutes les sphères n'était pas égal en vitesse mais qu'il était variable en diverses différences, alors ils ont été contraints de chercher à savoir de quelle manière chacun des astres se meut selon le premier mouvement [mouvement diurne], comme on le voit et comme cela nous apparaît, étant donné que les sphères situées entre nous et entre elle [la première sphère] diffèrent en position et en mouvement ; et pour cela, Aristote a utilisé les mouvements qui sont semblables à l'enroulement [61].

Il n'est pas évident que les deux savants arabes aient lu, dans l'exposé de la doctrine d'Eudoxe résumée au livre Λ de la *Métaphysique* d'Aristote, précisément ce que les historiens modernes ont su y voir. La description du modèle du Soleil d'Aristote par Ibn al-Haytham (*infra*, p. 108, l. 18-29) permet d'en douter puisqu'elle mentionne deux sphères seulement là où Aristote en donne trois (voire cinq, suivant Callippe). Aristote nous dit en effet :

> Eudoxe plaçait donc, d'une part, le transport du Soleil et de la Lune dans trois sphères pour chacun : la première était celle des étoiles fixes, la deuxième suivait le cercle qui passe par le milieu du Zodiaque, et la

[61] Voici le texte arabe, établi à partir du fac-similé et de l'apparat critique publiés par Goldstein, *op. cit.* dans la note 44 p. 60 *supra*, p. 37 l. 20 – p. 38 l. 3 :
وأمّا الذين جعلوا ابتداء قياسهم من الحركات الكريّة التي تكون عندنا فإنّهم قد قاسوا قياساً طبيعيّاً في وضع الأكر التامّة، وذلك أنّهم زاوا زاواً فيما يظهر عندنا من الأكر أنّ الحركات الكريّة تكون فيها نقطتان تُمسِكان الكرة اضطراراً وهما اللتان يُسميان قطبين؛ وتوهّم ذلك في الوضع الذي للمنشورات عسر. وأمّا في الأكر التامّة فيسهل. فركنوا إلى القول بذلك كما فعل أرسطاطاليس أيضاً حتّى يكون أقطاب الأكر التي تحاط بها ثابتة على الأكر المحيطة ثمّ لمّا لم يبق شيء من الاتّصال بين الأكر الداخلة وبين الكرة الخارجة الأولى، ولم تكن حركة الأكر كلّها متساوية السرعة لكن مختلفة اختلافات شتّى اضطروا إلى طلب معرفة الوجه الذي به يتحرّك كلّ واحد من الكواكب بالحركة الأولى كما تراه ويظهر لنا إذ كانت الأكر التي فيما بيننا وبينها مختلفة في وضعها وفي حركتها ولذلك استعمل ارسطاطاليس الحركات التي تكون شبيهاً بالالتفاف.

troisième suivait le cercle oblique dans la largeur du Zodiaque (mais le cercle sur lequel la Lune est transportée est oblique selon un plus grand angle que celui que suit le Soleil)[62].

En tout cas, le Šayḫ peine à voir la différence entre les propos d'Aristote, ceux de Ptolémée, et ceux d'Ibn al-Haytham ; et ce dernier lui explique que les trois savants ont tous fait allusion, sous ce vocable d'« enroulement », à une même « espèce » (*nawᶜ*) de mouvement, mais pas au même mouvement.

Au dire d'Ibn al-Haytham, le Šayḫ fait bien de décrire le mouvement d'enroulement comme étant « des mouvements de sphères contenues les unes dans les autres, tels que la sphère externe entraîne la sphère interne si les deux axes sont distincts, alors que la sphère interne se meut d'un mouvement qui lui est propre ». Il pourrait donc s'agir là d'une *définition générale* du mouvement d'enroulement, définition qu'il faudrait sûrement préciser en affirmant que les deux sphères doivent être concentriques. Confrontons à présent cette définition à ce que l'on rencontre chez Aristote et Ptolémée.

Aristote n'aurait utilisé ce mouvement que pour des orbes géocentriques : Ibn al-Haytham explique à titre d'exemple un modèle simple pour le Soleil, combinant le mouvement diurne (orbe du premier moteur) au mouvement du Soleil le long de l'écliptique.

Le Ptolémée de l'*Almageste* aurait eu recours au mouvement d'enroulement pour les latitudes des planètes, mais sans l'expliquer, comme on l'a vu. Enfin, nous avons déjà commenté le point de vue d'Ibn al-Haytham concernant la théorie des latitudes des *Hypothèses planétaires* : elle est différente de celle de l'*Almageste*, Ptolémée n'y explique pas davantage le modèle géométrique de l'*Almageste*, et il y aurait même commis une erreur.

Si le Ptolémée des *Hypothèses* cite l'usage par Aristote du mouvement d'enroulement pour des orbes géocentriques, c'est d'ailleurs pour le rejeter. Il y a certes des orbes géocentriques d'axes distincts dans les *Hypothèses* : par exemple l'orbe des étoiles fixes animé du mou-

62 Aristote, *Métaphysique : Livre lambda*, prés. et trad. Fabienne Baghdassarian (Paris : Vrin, 2019), ch. 8, 1073b, p. 72.

https://doi.org/10.1017/S0957423919000110 Published online by Cambridge University Press

vement de précession autour d'un axe perpendiculaire à l'écliptique, et entraîné par le premier moteur qui est un orbe animé du mouvement diurne autour d'un axe perpendiculaire à l'équateur. Or Ptolémée dit ici : « L'affirmation que des sphères tournent et *s'enroulent* les unes sur les autres est une étape dont nous n'avons pas besoin [63]. » C'est peut-être ce qui fait dire à Ibn al-Haytham que ce mouvement d'enroulement (pour des orbes géocentriques) « n'est pas utilisé par les mathématiciens, car ils n'en ont pas besoin ». Puisque les mouvement planétaires sont en général décrits dans un référentiel attaché au « premier moteur », le mouvement diurne n'apparaîtra pas dans la description géométrique du modèle. Il n'apparaîtrait que si l'on adoptait un référentiel attaché à l'observateur [64]. Quant aux autres irrégularités des mouvements planétaires, l'astronomie ptoléméenne les représente plutôt au moyen d'une combinaison d'excentriques et d'épicycles, non homocentriques.

Quoiqu'en dise Ibn al-Haytham, le refus par Ptolémée d'utiliser le mouvement d'enroulement, ne serait-ce que pour les sphères géocentriques, était peut-être aussi dicté par un argument de philosophie de la nature : il ne serait pas convenable que la perfection d'un corps céleste fût soumise à la contrainte de deux pôles fixes. En effet le discours de Ptolémée semble mêler étroitement le concept d'« enroulement » aux modèles conçus au moyen de sphères solides. Or selon Ptolémée :

> [...] il ne convient pas que nous attribuions aux corps éthérés les choses que nous sommes obligés de poser dans les corps d'ici-bas [65].

---

[63] Cf. fac-similé Goldstein, p. 43, l. 13-14 :
فأمّا أنّ القول بأنّ أكرًا تطيف وتلتفّ بعضها على بعضٍ فصل لا نحتاج إليه [...]

[64] D'ailleurs, Ibn al-Haytham adoptera un référentiel attaché à l'observateur dans un autre ouvrage, la *Configuration des mouvements*, cf. *op. cit.* dans la note 4 p. 28, *supra* ; ainsi, on pourrait presque voir en cet ouvrage une suite logique de ces recherches sur le « mouvement d'enroulement ».

[65] Cf. fac-similé Goldstein, p. 38, l. 3-4 :
ليس ينبغي لنا أن ننسب إلى الجسم الأثيري الأشياء الّتي نضطرّ إلى وضعها فيما عندنا من الأجسام.

Mais Ibn al-Haytham ne semble pas recourir à un tel argument, car il n'en dit rien.

12. HUITIÈME OBJECTION

La huitième objection était peut-être une vraie question : le Šayḫ voudrait qu'on lui explique, pour une planète donnée, le mouvement des sphères géocentriques dans les modèles des *Hypothèses* compris sous l'hypothèse que les sphères s'entraînent de la manière attribuée à Aristote, c'est-à-dire comme des sphères entières, par le truchement de pôles. C'est en tout cas ainsi qu'Ibn al-Haytham semble comprendre la demande du Šayḫ.

Il s'agit donc d'expliquer le mouvement des coquilles sphériques BN et NO représentées sur la fig. 7 p. 126 ci-dessous, bien que ces deux solides ne soient pas concentriques ; en général, leurs axes de rotation AC et ZŠ ne sont même pas des droites concourantes. Ibn al-Haytham affirme que, sauf en ce qui concerne cette différence des centres, ce mouvement est bien « comme le mouvement par les sphères » exposé dans son traité perdu, soulignant ainsi l'unité de la méthode mathématique face à la diversité des cas offerts par la géométrie des modèles. Hélas, il esquive aussitôt la question du Šayḫ sous le prétexte que Ptolémée a critiqué, dans ce cas précis, l'usage de sphères entières avec leurs pôles pour les raisons physiques que nous avons rappelées ci-dessus p. 60 *sq*.

Quand les « mathématiciens » (*aṣḥāb al-taʿlīm*) imaginent plusieurs configurations ou modèles (*hayʾa*) pour un même mouvement, Ibn al-Haytham conçoit en effet que l'une puisse être rejetée au profit de l'autre à cause d'incohérences ou d'impossibilités de nature physique. Mais la prudence du savant ne doit pas masquer ici l'essentiel. Ibn al-Haytham semble hésiter à concevoir un cosmos tout en sphères entières solides ; néanmoins, quand il est poussé par l'analyse mathématique du modèle géométrique de Ptolémée pour les latitudes, on le voit recourir librement à de telles sphères et affirmer que son modèle ne peut pas être construit avec seulement des prismes. Le

https://doi.org/10.1017/S0957423919000110 Published online by Cambridge University Press

texte s'achève d'ailleurs sur le défi lancé au Šayḫ de trouver un modèle équivalent avec seulement deux prismes, là où Ibn al-Haytham utilise trois corps dont deux au moins sont sphériques.

Ce qui importe aux yeux du mathématicien est donc surtout d'avoir un modèle géométrique bien défini, avec des référentiels solides au sein desquels il puisse analyser la trace engendrée par le mouvement d'un point matériel. La « ligne composée » décrite en réponse à la cinquième objection, et la ligne qui « s'enroule autour du corps d'une sphère » représentée fig. 5, sont deux exemples de telles courbes. Les référentiels solides ne sont pas les seuls invariants du mouvement : nous avons vu qu'Ibn al-Haytham envisageait l'étude générale « de points fixes » sur des droites mobiles, au sujet du cas particulier traité dans la réponse à la cinquième objection. Enfin, à défaut d'une analyse numérique des trajectoires, peut-être encore trop lointaine, la perspective d'une analyse en termes de connus, comme on en trouvera dans d'autres ouvrages du savant, pouvait motiver ces évolutions conceptuelles.

13. ÉDITION ET TRADUCTION

https://doi.org/10.1017/S0957423919000110 Published online by Cambridge University Press

La résolution des doutes sur le mouvement d'enroulement
par Ibn al-Haytham
Au nom de Dieu clément et miséricordieux
Que Dieu facilite et achève <les choses> par le bien
Traité d'al-Ḥasan ibn al-Ḥasan ibn al-Haytham sur la résolution des doutes sur le mouvement d'enroulement

J'ai pris connaissance des doutes de Monseigneur le Šayḫ, que Dieu lui prête longue vie, et j'y ai réfléchi ; alors j'ai constaté, tout d'abord, d'après la teneur de ses propos sur ceux-ci, qu'il a utilisé trois notions qui l'ont troublé et qui l'ont dévié de la lumière de la vérité vers l'obscurité du doute.

La première de ces notions est qu'il a pris les paroles de Ptolémée de façon apparente sans les interpréter ni les méditer, mais il s'est trompé à propos de Ptolémée ; car si l'on prenait toutes les paroles de Ptolémée dans leur apparence sans les interpréter ne serait-ce que quelques-unes, la majeure partie de l'*Almageste* serait fausse. La preuve de l'exactitude de cette affirmation est que Ptolémée utilise dans la plupart des notions développées dans l'*Almageste* la concision plutôt que l'explication et l'approximation plutôt que l'exactitude. Toute parole ainsi caractérisée et prise dans son apparence donne des résultats non voulus par cet homme.

La deuxième de ces trois notions est que s'il imagine une des notions dont la vérité est douteuse sans qu'elle soit impossible, s'il m'interroge à son propos et s'il veut que ma réponse rectifie ce qu'il a imaginé, alors cela n'est pas obligatoire, car si tout ce que l'homme imagine était vrai il n'y aurait pas d'opinion dans le monde qui soit un péché. Or Dieu, qu'il soit loué et exalté, a dit que certaines opinions sont des péchés.

https://doi.org/10.1017/S0957423919000110 Published online by Cambridge University Press

<حل شكوك حركة الالتفاف>

<لابن الهيثم>

| بسم الله الرحمن الرحيم رب يسر وتمم بالخير ل ١ظ

ب ١١٨ظ

مقالة للحسن بن الحسن بن الهيثم

في

حل شكوك حركة الالتفاف

وقفت على شكوك مولاي الشيخ أطال الله بقاءه وتأمّلتها فتبين لي أوّلًا من تضاعيف كلامه فيها أنّه قد استعمل ثلاثة معان هي التي شككته وعدلت به عن إضاءة الحقّ إلى ظلمة التشكيك.

وأوّل هذه المعاني أنّه أخذ كلام بطلميوس على ظاهره من غير تأوّل فيه ولا تأمّل له، وهذا غلط على بطلميوس لأنّه لو أخذ جميع كلام بطلميوس على ظاهره من غير تأوّل فيه ولا في شيء منه لَبطل أكثر المجسطي. والدليل على صحّة هذا القول أنّه يستعمل في أكثر المعاني التي ذكرها في المجسطي الاقتصار دون الشرح والتقريب دون التحقيق. وما هذه صفته من الكلام إذا أخذ على ظاهره كانت نتائجه غير ما قصد له الرجل.

والثاني من هذه المعاني الثلاثة هو أنّه إذا تخيّل معنى من المعاني المتشكّك في صحّته ولم تجز فيه الاستحالة، فإذا سألني عنه فيريد أن يكون جوابي مصحّحًا لما تخيله، فهذا غير الواجب لأنّه لو كان كلّ ما يتخيله الإنسان حقًّا لَما كان في العالم ظن هو إثمًا. والله تبارك وتعالى يقول إن بعض الظن إثم.

٣ رب يسر وتمم بالخير: جملة ناقصة [ل]. ٤ مقالة: قول [ل]. ٧ أطال الله بقاءه: ناقصة [ب]. ١٢ في: فوق السطر في [ل]. ١٤–١٥ وما هذه صفته ... ما قصد له الرجل: في الهامش وأشار إلى موضوعها [ل]. ١٦ هذه: ناقصة [ب]. ١٦ المتشكّك: لم يُشك [ل]. ١٧ تجز: تجوز [ل،ب]. ١٧ فيريد: يريد [ل]. ١٧ مصحّحًا: في الهامش وأشار إلى موضوعها [ل]؛ معنى الجملة لا يصح إلا إذا فهمت كلمة مصححا بمعنى مثبتا.

https://doi.org/10.1017/S0957423919000110 Published online by Cambridge University Press

La troisième de ces notions est qu'il a eu le sentiment que le mouvement d'enroulement est une notion obscure, cachée, subtile et difficile, qu'on ne peut résumer et saisir qu'après une intense fatigue et qu'il est comme le phénix de la fable. Le mouvement d'enroulement est plus proche que ce qu'il avait imaginé ; ce qui l'a fait glisser vers ce sentiment, c'est l'excuse que Ptolémée a faite. En fait Ptolémée ne s'est pas excusé, à propos du mouvement d'enroulement, parce que ce mouvement est extrêmement difficile et compliqué jusqu'à un point où personne ne peut l'étudier, mais il s'est excusé, car il a dit dans l'*Almageste* que les mouvements du ciel sont des mouvements simples, alors que le mouvement d'enroulement ne l'est pas.

Ce sont ces trois notions qui l'ont fait tomber dans le doute. Je montrerai plus loin comment il s'est servi de ces notions lorsque je parlerai de <ces> doutes.

Après cette introduction, je commence à résoudre les doutes. Le premier de ces doutes concerne une affirmation faite dans ce mémoire : si le diamètre de l'épicycle qui passe par l'apogée et par le périgée se trouve dans le plan de l'orbe excentrique pour les trois planètes, alors tout le plan de l'épicycle se trouve dans le plan de l'orbe excentrique. Puis il a rappelé, après cette citation, une assertion de Ptolémée ; cette assertion n'a pas été citée par moi dans mon mémoire sur le mouvement d'enroulement ; et je n'ai pas dit non plus dans ce mémoire quand le plan de l'épicycle se trouve dans le plan de l'orbe excentrique ni quand il se trouve dans le plan de l'écliptique.

J'ai plutôt montré dans ce livre comment Ptolémée a ordonné le mouvement d'enroulement et comment il a déterminé le petit cercle sur lequel se déplace le diamètre de l'épicycle. J'ai dit que Ptolémée a supposé que l'épicycle était dans le plan de l'excentrique ; qu'il a mené ensuite le diamètre dont les extrémités sont l'apogée et le périgée ; et que ce diamètre est alors dans le plan de l'orbe excentrique. Puis il a supposé à l'extrémité de ce diamètre un petit cercle et il a supposé que l'extrémité de ce diamètre se meut sur ce petit cercle. J'ai

https://doi.org/10.1017/S0957423919000110 Published online by Cambridge University Press

والثالث من | المعاني هو أنّه استشعر* أنّ حركة الالتفاف هو معنى غامض خفي ل ٢و دقيق عسير لا يُتلخّص ولا يتحصّل إلّا بعد تعب شديد وأنّه مثل عنقاء مغرب. وحركة الالتفاف أقرب ممّا ذهب إليه. والذي أوقعه في هذا الاستشعار هو اعتذار بطلميوس. وإنّما اعتذر بطلميوس من حركة الالتفاف لأنّه قال في المجسطي إنّ حركات السماء هي حركات بسيطة وحركة الالتفاف ليست بسيطة، فلذلك اعتذر منها، لا من أجل أنّها في غاية العسر والصعوبة حتّى لا يمكن أحد أن يبحث عنها.

فهذه المعاني الثلاثة هي التي أوقعته في التشكُّك. وأنا أبين فيما بعد أنّه استعمل هذه المعاني عند كلامي في الشكوك.

وإذ قد تقرّرت هذه المقدمة، فإنّي أبتدئ بحل الشكوك. فأوّل الشكوك هو قوله: « قيل في هذه المقالة: إن قطر فلك التدوير الذي يمرّ بالبعد الأبعد والبعد الأقرب في الكواكب الثلاثة، أذا صار في سطح الفلك الخارج المركز، صار جميع سطح فلك التدوير في سطح الفلك | الخارج المركز. » ثمّ ذكر كلام بطلميوس من بعد هذا ل ٢ظ القول. وهذه القول ما ذكرته أنا في مقالتي في حركة الالتفاف، وما ذكرت في تلك المقالة متى يصير سطح فلك التدوير | في سطح الفلك الخارج المركز ولا متى يصير ب ١١٩و في سطح فلك البروج.

وإنّما بيّنت في تلك المقالة كيف رتب بطلميوس حركة الالتفاف وكيف استخرج الدائرة الصغيرة التي يتحرّك عليها قطر فلك التدوير. فقلت: إنّ بطلميوس فرض فلك التدوير في سطح الفلك الخارج المركز، ثمّ أخرج القطر الذي طرفاه البعد الأبعد والبعد الأقرب، فصار هذا القطر في سطح الفلك الخارج المركز. ثمّ فرض عند طرف هذا

١ أنّ: ناقصة [ل]. ٢ لا يُتلخّص ولا يتحصّل: لا يتخصّل ولا يتحصّل [ب]، لا يتخلّص ولا يتلخّص [ل]. ٦ يبحث: يقرب [ل]؟ ٧ أبين: أبين له [ل]. ٩ الشكوك: شكوكه [ل]، شكوك [ب]. ١٣ وما: ولا [ل،ب]. ١٤ في: ناقصة [ل].

* في اللسان: « تقول للرجل استشعر خشية اللّه أيّ اجعله شعار قلبك، واستشعر فلان الخوف إذا أضمره. »

https://doi.org/10.1017/S0957423919000110 Published online by Cambridge University Press

montré ainsi, par ces propos, comment Ptolémée a ordonné le mouvement d'enroulement. C'est d'après la première hypothèse que j'ai supposé l'épicycle et son diamètre dans le plan de l'excentrique ; je veux dire que Ptolémée dans son rapport sur les mouvements des planètes a supposé le plan de l'épicycle dans le plan de l'orbe excentrique. Puis il a représenté l'épicycle, dans le treizième livre, dans le plan de l'orbe excentrique. En fait, ce que j'ai expliqué sur l'ordre de Ptolémée concernant le mouvement d'enroulement ne comprend pas le fait que si le diamètre de l'épicycle qui passe par l'apogée et par le périgée pour les trois planètes se trouve dans le plan de l'orbe excentrique, alors il faut que tout le plan de l'épicycle soit dans le plan de l'orbe excentrique. Ce qui indique que je n'ai pas voulu l'entendre en ce sens, c'est que j'ai dit que Ptolémée n'a pas trouvé <ces résultats> par l'observation mais qu'il <les> a plutôt supposés comme hypothèses. Et ce qui montre que je n'ai pas voulu l'entendre en ce sens, c'est que lorsque j'ai ordonné le mouvement d'enroulement, je n'ai pas utilisé cette notion, et je n'ai pas dit que l'épicycle parvient dans le plan de l'orbe excentrique ni qu'il en sort ; j'ai plutôt renoncé à cela en m'appuyant sur le fait que Ptolémée avait déjà détaillé cette notion et l'avait établie. Cela constituait l'un des doutes, le voici levé.

Quant à son assertion selon laquelle le diamètre de l'épicycle, qui coupe <orthogonalement> le diamètre sur lequel se trouvent l'apogée et le périgée, s'incline comme le fait le diamètre qui lui est homologue dans les deux mouvements de Vénus et de Mercure, elle est en contradiction avec les hypothèses de Ptolémée, car Ptolémée a distingué ce diamètre dans les trois planètes de ce même diamètre dans les deux planètes restantes en disant : quant aux diamètres des épicycles, perpendiculaires aux diamètres déjà cités, ils restent en permanence parallèles au plan de l'écliptique, pour les trois planètes, comme nous l'avons dit ; c'est que, en disant « restent en permanence », il nie le mouvement de ce diamètre ; tandis qu'en disant que « s'il dévie, sa déviation serait d'une grandeur négligeable », il veut <dire que> si l'épicycle se déplace sur l'orbe excentrique, ce diamètre doit changer de position par rapport à l'écliptique. Ceci est la déviation qu'il a crue né-

https://doi.org/10.1017/S0957423919000110 Published online by Cambridge University Press

القطر دائرة صغيرة، ثمّ فرض طرف القطر يتحرّك على محيط الدائرة الصغيرة. فبيّنت بهذا القول كيف رتّب بطلميوس حركة الالتفاف. وإنّما فرضت فلك التدوير وقطره في سطح الفلك الخارج المركز لأنّه بالفرض الأوّل كذلك، أعني أنّ بطلميوس في تقريره لحركات الكواكب فرض سطح فلك التدوير في سطح الفلك الخارج المركز. ثمّ، في المقالة الثالثة عشرة، مثّل فلك التدوير على سطح | الفلك الخارج المركز. فالذي ل ٣و شرحته من ترتيب بطلميوس لحركة الالتفاف لم يتضمّن أنّ قطر فلك التدوير الذي يمرّ بالبعد الأبعد والبعد الأقرب، في الكواكب الثلاثة، إذا صار في سطح الفلك الخارج المركز، فلا بدّ أن يصير جميع سطح فلك التدوير في سطح الفلك الخارج المركز. والذي يدلّ على أنّي لم أرد هذا المعنى أنّي قلت: إنّ بطلميوس فرض ولم أَقل وجد بالرصد. وممّا يدلّ على أنّي لم أرد هذا المعنى أنّي، لمّا رتّبت حركة الالتفاف، لم أستعمل فيها هذا المعنى ولم أقل إنّ فلك التدوير يصير في سطح الفلك الخارج المركز ويخرج عنه، بل أعرضت عن ذلك معوِّلًا على أنّ بطلميوس قد فصّل هذا المعنى وقرّره، فهذا أحد الشكوك، وقد بطل.

وأمّا قوله: إنّ قطر فلك التدوير المقاطع للقطر الذي عليه البعد الأبعد والبعد الأقرب ينحرف كما ينحرف القطر النظير له في حركتي الزهرة وعطارد فإنّه مخالف لما فرضه بطلميوس؛ لأنّ بطلميوس | فرّق بين هذا القطر في الكواكب الثلاثة وبينه في الكوكبين ل ٣ظ الباقيين بقوله: فأمّا أقطار أفلاك التداوير القائمة على زوايا قائمة على الأقطار التي تقدم ذكرها فإنّها في الكواكب الثلاثة تبقى كما قلنا أبدًا موازيةً لسطح فلك البروج. فبقوله « تبقى أبدًا » قد نفي الحركة عن هذا القطر. فأمّا قوله « وإن انحرفت كان انحرافها لا قدر له يُعتد به » | فإنّه يريد أنّ فلك التدوير إذا تحرّك على محيط الفلك الخارج المركز ب ١١٩ظ فلا بدّ أن يتغيّر وضع هذا القطر بالقياس إلى فلك البروج. فهذا هو الانحراف الذي

٩ أقل: يقل [ب]. ١١ ولم أقل: ولا قلت [ب]. ١٤ وأمّا: فأمّا [ب]. ١٧ القائمة: القائم [ل].

https://doi.org/10.1017/S0957423919000110 Published online by Cambridge University Press

gligeable ; il (le diamètre) n'a pas de mouvement de déviation comme le diamètre des deux planètes restantes. Ce terme est l'un des termes de Ptolémée ; Monseigneur le Šayẖ l'a prise selon son apparence, je veux dire la parole de Ptolémée ; par le mot « s'il dévie » il a cru qu'il s'agissait du mouvement de déviation, mais il n'en est pas ainsi.

Ce qui montre que ce diamètre n'a pas de mouvement de déviation, est que s'il avait un mouvement de déviation, Ptolémée aurait mentionné son commencement et son terme, comme il l'a fait pour le diamètre des deux planètes restantes. Il n'y a aucune nécessité de croire que, parmi les mouvements de ces trois planètes, il existe un mouvement de déviation. Ce qu'il a imaginé – que ce diamètre dévie à la manière des deux diamètres des deux planètes restantes – est une étape dont on n'a pas besoin. Ce qui l'a conduit à croire cela est la supposition que ce diamètre est dans le plan de l'écliptique au moment où l'épicycle est au nœud ; il a cru, en raison de cela, qu'il avait dévié ; mais ce diamètre peut se trouver dans le plan de l'écliptique lorsque l'épicycle est au nœud, sans qu'il y ait déviation. En effet ce diamètre et le diamètre qui passe par l'apogée et le périgée sont toujours dans le même plan qui est le plan de l'épicycle. Alors si le plan de l'épicycle se trouve dans le plan de l'écliptique, comme il l'a supposé dans ses propos, ce diamètre se trouve dans le plan de l'écliptique sans déviation ; et il est possible que le plan de l'épicycle soit dans le plan de l'écliptique au cours du mouvement de l'épicycle autour du petit cercle. En fait, Ptolémée a dit que ce diamètre reste toujours, comme nous l'avons dit, parallèle au plan de l'écliptique ; alors lorsque le centre de l'épicycle se trouve au nœud, ce diamètre se trouve dans le plan de l'écliptique sans qu'il soit mû par un mouvement de déviation. Ainsi pour les trois planètes, il n'y a pas de déviation pour ce diamètre, et il n'y a aucun impératif, dans le mouvement de ces planètes, qui oblige à la déviation de ce diamètre.

Il a dit ensuite, après ce propos : ce que je ressens de l'assertion de Ptolémée est que le plan de l'épicycle ne peut à aucun moment

https://doi.org/10.1017/S0957423919000110 Published online by Cambridge University Press

اعتقد أنّه لا يعتد به، لا أنّ له حركة انحراف مثل حركة قطري الكوكبين الباقيين. وهذه اللفظة هي من ألفاظ بطلميوس، التي أخذها مولاي الشيخ على ظاهرها، أعني قول بطلميوس «وإن انحرفت»، ظنّ بقوله «انحرفت» أنّه يريد حركة الانحراف وليس الأمر كذلك.

والذي يدلّ على أنّه ليس لهذا القطر حركة انحراف هو أنّه لو كان له حركة انحراف لكان بطلميوس قد ذكر | مبدأها وانتهاءها كما ذكره في قطري الكوكبين الباقيين. ل ٣ظ وليس في حركات هذه الكواكب الثلاثة ضرورة تدعو إلى أن نعتقد أن لها حركة انحراف. فتخيُّله لانحراف هذا القطر وأنّه على مثل قطري الكوكبين الباقيين هو فضَل لا يحتاج إليه. والذي قاده إلى هذا الاعتقاد هو أنّه فرضه في سطح فلك البروج في وقت كون فلك التدوير في العقدة، فاعتقد من أجل ذلك أنّه انحرف. وهذا القطر قد يمكن أن يحصل في سطح فلك البروج عند كون فلك التدوير في العقدة من غير انحراف؛ وذلك أنّ هذا القطر هو أبدًا والقطر الذي يمرّ بالبعد الأبعد والبعد الأقرب في سطح واحد، وهو سطح فلك التدوير. فإذا صار سطح فلك التدوير في سطح فلك البروج، كما فرضه في كلامه، فقد صار هذا القطر في سطح فلك البروج من غير انحراف؛ وهو ممكن أن يصير سطح فلك التدوير في سطح فلك البروج بحركة فلك التدوير حول الدائرة الصغيرة. وإنّما قال بطلميوس في هذا القطر أنّه يبقى كما قلنا أبدًا موازيًا لسطح | فلك البروج؛ حتّى إذا صار مركز فلك التدوير على العقدة، صار ل ٤ظ هذا القطر في سطح فلك البروج من غير أن يتحرّك حركة انحراف. فليس لهذا القطر في الكواكب الثلاثة انحراف ولا في حركات هذه الكواكب إمارةً توجب انحراف هذا القطر.

ثمّ قال من بعد هذا الكلام: فالذي يحصل في نفسي من كلام بطلميوس أنّ سطح

٢ هي: فوق السطر في [ل]. ٣ أنّه: ناقصة [ب]. ١٠ كون: دون [ب]؟ ١٠ من أجل ذلك: في الهامش [ل] ١١ كون: دون [ب]؟ ١٥ بحركة: بحركة بحركة [ب]. ١٦ أنّه: ناقصة [ب،ل]. ٢١ من: ناقصة [ب].

https://doi.org/10.1017/S0957423919000110 Published online by Cambridge University Press

du mouvement des cinq planètes être dans le plan de l'orbe excentrique, car pour tout plan d'épicycle, son inclinaison s'annule lors du maximum de déviation et sa déviation s'annule lors du maximum d'inclinaison ; et la déviation et l'inclinaison coexistent pendant son déplacement entre les deux positions où ces phénomènes se produisent. C'est un propos incomplet en soi, car il a dit « ce que je ressens de l'assertion de Ptolémée », puis il a dit « car pour tout plan d'épicycle son inclinaison s'annule lors du maximum de déviation et sa déviation s'annule lors du maximum d'inclinaison », ce que Ptolémée n'a pas dit à propos de tous les épicycles. Et si Ptolémée n'a pas dit cela à propos de tous les épicycles, comment comprendre cette notion à partir du propos de Ptolémée ? C'est plutôt un sentiment dont il n'a pas mis en doute l'exactitude ; c'est l'un des sentiments dont j'ai déjà parlé et que j'ai décidé de clarifier. Ce doute est alors levé, car la raison qui y a conduit – la croyance que le diamètre transverse de l'épicycle peut se trouver dans le <plan> de l'écliptique par déviation – n'est plus valable.

Il a dit ensuite après cette affirmation, et il a été dit dans ce mémoire, que Ptolémée n'a pas expliqué dans le livre des *Hypothèses* comment est le mouvement des corps qu'il a supposés pour les mouvements des planètes dans l'épicycle, et qu'il n'a pas ajouté de corps supplémentaire dans les orbes de Vénus et Mercure pour le mouvement supplémentaire qu'est le mouvement de déviation. Le mouvement d'enroulement, pris selon l'apparence de ce qu'il a dit, implique des choses affreuses. Le fait qu'il a supposé pour l'épicycle deux corps seulement est contraire aux principes qu'il a établis dans l'*Almageste*. Le mouvement d'enroulement, s'il est supposé avec des prismes, impliquerait nécessairement des choses affreuses.

Il a dit ensuite : « ce que j'ai compris des paroles de Ptolémée… » ; et il a mentionné de longs propos à la fin desquels il a dit : « Cela est contraire aux principes posés dans l'*Almageste*. » En fait, s'il a su que cela est contraire aux principes posés dans l'*Almageste*, c'est qu'il a su que c'est faux ; et s'il a su que c'est faux et contraire aux principes posés

فلك التدوير لا يمكن أن يكون وقتًا من الأوقات في شيء من الكواكب الخمسة في سطح الفلك الخارج المركز، لأنّ كلّ سطح فلك تدوير يفنى ميله عند نهاية انحرافه ويفنى | انحرافه عند نهاية ميله، ويجتمع فيه الانحراف والميل في مسيره بين المواضع ب ١٢٠و التي يعرض ذلك فيها. وهذا قول منتقص من نفسه، لأنّه قال « والذي يحصل في نفسي من كلام بطلميوس »، ثمّ قال « لأنّ كل سطح فلك تدوير يفنى ميلُه عند نهاية انحرافه ويفنى انحرافه عند نهاية ميله »، ولم يقل بطلميوس هذا القول في جميع أفلاك التداوير. وإذا لم يكن بطلميوس قال هذا القول في جميع أفلاك التداوير، فما فهم هذا | المعنى من كلام بطلميوس؟ وإنّما هو استشعار استشعره ثمّ لم يشكّ في صحّته، ل ٥٥و وهذا هو من الاستشعارات التي قدمت ذكرها وصمّمت أن أبيّنها. فهذا الشكّ أيضًا قد بطل، لأنّ العلّة الّتي قادته إلى هذا الشكّ قد بطلت، وهي اعتقاده أنّ قطر فلك التدوير المعترض إنّما يحصل في دائرة البروج بالانحراف.

ثمّ قال من بعد هذا القول: وقيل في هذه المقالة إنّ بطلميوس لم يشرح في كتاب الاقتصاص كيفيّة حركة الأجسام التي فرضها لحركات الكواكب في فلك التدوير ولم يزد في فلكي الزهرة وعطارد جسمًا زائدًا للحركة الزائدة التي هي حركة الانحراف. وإنّ حركة الالتفاف، إن حُملت على ظاهر ما ذكره، لزمت منها أشياء شنيعة؛ وإنّ في فرضه لفلك التدوير جسمين فقط مخالف للأصول التي قررها في المجسطي، وإنّ حركة الالتفاف إن فرضت بمنشورات فلا بدّ أن يلزم منها أشياء شنيعة.

ثمّ قال من بعد ذلك: « والذي فهمته أنا من كلام بطلميوس »، وذكر كلامًا | طويلًا، ثمّ قال في آخره: « وهذا مخالف للأصول الموضوعة في المجسطي. » ل ٥٥ظ وإذا كان قد علم أنّه مخالف للأصول الموضوعة في المجسطي فقد علم أنّه باطل؛

[٣] مسيره: مسيرةٍ [ب]. [٤] قول: ناقصة [ب]. [٥] يفنى: يعني [ل]. [٦] ويفنى: ويعني [ل]. [٦] يقل: ناقصة [ب]. [١٠] وهي: وبقي [ب]. [١١] المعترض: المعرض [ل]. [١١] إنّما: أيضًا [ب]. [١٤] وإنّ: خلف [ب]. [١٥] منها: منه [ب]. [١٦] مخالف: مخالفةً [ل].

https://doi.org/10.1017/S0957423919000110 Published online by Cambridge University Press

dans l'*Almageste*, c'est qu'il n'a pas compris cela à partir des paroles de Ptolémée, puisque ce que l'on comprend de ce qu'a dit Ptolémée n'est pas en contradiction avec ce qu'a dit Ptolémée dans l'*Almageste*. Ce qu'il a compris, ce sont des sentiments faux qu'il a éprouvés, de ces sentiments que j'ai déjà cités. La cause de ces sentiments est qu'il a pris les propos de Ptolémée dans leur apparence sans les méditer ni les interpréter. Si ce qu'il a compris est faux, je n'ai pas besoin d'y répondre. D'ailleurs il n'aurait pas eu lui-même besoin d'en parler.

Il a dit après cela : « ou bien Ptolémée n'a pas utilisé le mouvement d'enroulement, ce qui est clair d'après ses propres propos à certains endroits du livre des *Hypothèses* », puis il a mentionné ses propos. Cet aveux prouve l'exactitude de ce que j'ai dit, à savoir que Ptolémée n'a pas expliqué, dans le livre des *Hypothèses*, les caractéristiques du mouvement d'enroulement.

Il a dit ensuite que le petit prisme qui est dans l'épicycle nécessite quand il se déplace un lieu plus grand que son lieu ; il en est ainsi si les deux bases de ce prisme sont parallèles au cercle, incliné sur le plan de l'orbe excentrique, sur lequel se déplace le centre de la planète. Mais si les deux bases de ce prisme étaient parallèles au plan de l'orbe excentrique, et si sa largeur correspondait à l'éloignement de la planète en latitude de part et d'autre du plan de l'orbe excentrique, alors que ce prisme tournerait autour d'un axe perpendiculaire aux deux plans de ses deux bases, le centre de la planète tournant sur un cercle incliné tangent à deux cercles parallèles à ces deux bases, à une distance égale au rayon du globe planétaire, sur l'axe de ce cercle incliné selon les hypothèses de Ptolémée, alors le prisme ne sortirait pas de son emplacement et il ne nécessiterait pas plus que son lieu. En fait, il a montré cela au début du deuxième chapitre du livre des *Hypothèses*. Ce tronc <de sphère> se trouve de part et d'autre du grand cercle de cette sphère dans lequel a lieu le mouvement en longitude. La grandeur de ce lieu qui contient ce

https://doi.org/10.1017/S0957423919000110 Published online by Cambridge University Press

وإذا علم أنّه باطل ومخالف للأصول الّتي في المجسطي فإنّه لم يفهمه من كلام بطلميوس، لأنّ ما يُفهم من كلام بطلميوس لا يكون مخالفًا لما قرره بطلميوس في المجسطي. والذي فَهِم إنّما هو استشعارات باطلة استشعرها؛ وهي من الاستشعارات التي قدمت ذكرها. وعلّة هذه الاستشعارات هي أنّه أخذ كلام بطلميوس على ظاهره ولم يتأمّله ولا تأوّل فيه. وإذا كان هذا الذي فَهِم باطلًا فما أحتاج أن أجيب عنه؛ وقد كان لا يحتاج هو أيضًا إلى ذكره.

ثمّ قال من بعد هذا الكلام | «وأمّا أنّ بطلميوس لم يستعمل حركة الالتفاف فهو ب ١٢٠ ظ بيِّن من نفس كلامه في مواضع من كتاب الاقتصاص» وذكر كلامه. واعترافه بهذا دليل على صحّة ما قلته من أنّ بطلميوس لم يشرح في كتاب الاقتصاص كيفيّة حركة الالتفاف.

ثمّ قال من بعد هذا الكلام: وأمّا أنّ المنشور الأصغر الذي في فلك التدوير | إذا ل ٦ و تحرّك احتاج إلى أكبر من مكانه؛ فإنّ هذا يكون كذلك لو كانت قاعدتا هذا المنشور موازيتين للدائرة المائلة عن سطح الفلك الخارج المركز التي عليها يتحرّك المركز الكوكب. وأمّا إذا كان هذا المنشور قاعدتاه موازيتين لسطح الفلك الخارج المركز، و <كان> عرضه بحسب تباعد الكوكب في العرض عن جنبتي سطح الفلك الخارج المركز، وهو يدور على محور قائم على سطحي قاعدتيه، ومركز الكوكب يدور على الدائرة المائلة المماسّة لدائرتين موازيتين لهاتين القاعدتين بعدهما منها بمقدار نصف قطر كرة الكوكب على محور هذه الدائرة المائلة كما فرضه بطلميوس، فليس يخرج عن مكانه ولا يحتاج إلى أكبر منه. وقد بيّن هذا بقوله في أوّل المقالة الثانية من كتاب الاقتصاص، وتكون تلك القطعة عن جنبتي الدائرة العظمى من الدوائر التي في تلك الكرة، وهي التي تكون فيها حركة الطول. ويكون ما تحوزه هذه القطعة من الجانبين

[١] يفهمه من: يفهم [ل]. [٣] هو: هي [ل]. [٣] وهي من: وذلك من [ل]. [٦] أيضًا إلى ذكره: إلى ذكره أيضًا [ل]. [٨] بهذا: فهذا [ب]. [١٣-١٤] المركز الكوكب: مركز للكوكب [ب]. [١٩] ولا: وليس [ل].

https://doi.org/10.1017/S0957423919000110 Published online by Cambridge University Press

tronc <de sphère> de part et d'autre est selon la grandeur de la latitude. Comme il dit « où a lieu le mouvement en longitude », il est clair que les deux bases du prisme sont parallèles au plan de l'orbe excentrique.

Cette assertion de sa part, que Dieu le garde, montre une conception erronée, je veux dire dans ses hypothèses sur les prismes de l'épicycle semblables aux prismes du mouvement en longitude, car la situation qu'il décrit est possible dans le mouvement en longitude et dans les orbes entourant la Terre ; cela est impossible dans le mouvement de l'épicycle. Les orbes excentriques qui se meuvent selon le mouvement en longitude pour les trois planètes ont toujours leur inclinaison d'un seul côté, et leurs plans ne se déplacent pas en s'inclinant tantôt vers le nord et tantôt vers le sud. Ces planètes sont les seules pour lesquelles l'hypothèse faite par Ptolémée est valable. Ptolémée a supposé que le plan de l'épicycle est tel que <le côté> du périgée de ce plan s'incline tantôt vers le nord et tantôt vers le sud du plan de l'orbe excentrique ; il en est de même du côté de l'apogée dans ce plan. De même les prismes <du mouvement> en longitude tournent autour du centre du monde sans que leur apogée s'approche ni s'éloigne de ce centre. Mais il n'en est pas ainsi pour l'épicycle, car, l'épicycle tournant autour d'un axe perpendiculaire au plan de l'orbe excentrique, son apogée s'approche du centre du monde ; alors si l'on suppose pour l'épicycle deux prismes ayant les caractéristiques déjà citées et si les deux bases du plus grand prisme (qui est le moteur du plus petit prisme) étaient parallèles au plan de l'orbe excentrique, de sorte que le petit prisme serait enfermé à l'intérieur du grand prisme et que le petit prisme serait incliné et en rotation autour de l'axe du cercle incliné, alors le cercle incliné serait dans une position unique, son inclinaison serait unique et d'un côté unique ; je veux dire que le voisinage de l'apogée dans le cercle incliné serait toujours incliné du même côté par rapport au plan de l'orbe excentrique ; le voisinage du périgée incliné d'un même côté opposé à celui du voisinage de l'apogée. Ainsi, le périgée dans le plan de l'épicycle ne serait pas, selon ce

بمقدار العرض. فقد تبيّن بيانًا واضحًا بقوله: « التي تكون فيها حركة الطول »، أنّ
قاعدتي المنشور موازيتان لسطح الفلك الخارج المركز.

وهذا القول منه، | حرسه اللّه، يدلّ على تصوّر غير صحيح، أعني في فرضه ل ٦ظ
منشورات فلك التدوير شبيهة بمنشورات الطول، لأنّ الوضع الذي ذكره إنّما يمكن في
حركة الطول وفي الأفلاك المحيطة بالأرض؛ وليس يمكن ذلك في حركة فلك التدوير؛
وذلك أنّ [حركات] الأفلاك الخارجة المراكز التي تتحرّك حركة الطول في الكواكب
الثلاثة ميلها أبدًا في جهة واحدة؛ وليس تنتقل سطوحها فتميل تارةً إلى الشمال وتارةً
إلى الجنوب. وهذه الكواكب فقط هي التي يصحّ فيها الفرض الذي فرضه بطلميوس.
وسطح فلك التدوير قد فرضه بطلميوس، يميل | البعد الأقرب من سطحه تارةً إلى ب ١٢١و
جهة الشمال عن سطح الفلك الخارج المركز وتارةً إلى الجنوب، وكذلك ما يلي البعد
الأبعد من سطحه. وأيضًا فإنّ منشورات الطول تدور حول مركز العالم وليس يبعد بعدها
الأبعد عن مركز العالم ولا يقرب منه. وليس كذلك فلك التدوير، لأنّ فلك التدوير إذا
دار على محور قائم على سطح الفلك الخارج | المركز، قرب بعده الأبعد من مركز ل ٧و
العالم؛ فإذا فُرض لفلك التدوير منشوران على الصفة التي ذكرناها وكانت قاعدتا الأعظم
منهما المحرّك للأصغر موازيتين لسطح الفلك الخارج المركز، وكان المنشور الأصغر
محصورًا في داخل المنشور الأعظم، وكان الأصغر مائلًا، فإنّ المنشور الأصغر، إذا
دار على محور الدائرة المائلة، كان وضع الدائرة المائلة أبدًا وضعًا واحدًا وميلها ميلًا
واحدًا وفي جهة واحدة؛ أعني أنّه يكون ما يلي البعد الأبعد من الدائرة المائلة مائلًا
أبدًا إلى جهة واحدة من جهتي سطح الفلك الخارج المركز، وما يلي البعد الأقرب
منها إلى جهة واحدة وهي الجهة المقابلة لجهة البعد الأبعد، فلا يصير البعد الأقرب

١–٢ فقد تبيّن بيانًا واضحًا ... الخارج المركز: في الهامش، وأشار إليها [ل]. ٧ جهة: حصّة [ب]. ٩ يميل: فميل [ب]. ٩ البعد: القرب [ل،ب]. ١١ وليس: فليس [ل]. ١٤ منشوران: منشور [ل،ب]. ١٤ ذكرناها: ذكر [ب]. ١٥ منهما: منها [ب]. ١٥ موازيتين: مواز [ب]. ١٧ كان: فإن [ب]. ٢٠ منها: منهما [ل].

https://doi.org/10.1017/S0957423919000110 Published online by Cambridge University Press

mouvement, tantôt du côté nord et tantôt du côté sud par rapport au plan de l'orbe excentrique ; de même pour l'apogée.

Ainsi si le grand prisme tourne autour de son axe perpendiculaire à ses deux bases qui sont parallèles au plan de l'orbe excentrique, il fait tourner avec lui le petit prisme car les deux bases de celui-ci ne sont pas parallèles aux deux bases du grand prisme ; alors tout point du petit prisme se déplace sur un cercle parallèle aux deux bases du grand prisme, ce qui fait que l'apogée et le périgée de l'épicycle se déplacent <respectivement> sur deux cercles parallèles au plan de l'orbe excentrique, l'un de ces deux cercles se trouve toujours du côté du nord alors que l'autre se trouve au sud par rapport au plan de l'orbe excentrique. Par conséquent, l'inclinaison du périgée par rapport à l'épicycle se fait, selon ce mouvement aussi, toujours d'un même côté par rapport au plan de l'orbe excentrique ; il en est de même pour l'apogée. Ainsi, selon les deux mouvements, l'inclinaison du périgée de l'épicycle est toujours d'un même côté par rapport au plan de l'orbe excentrique ; de même l'inclinaison de l'apogée <de l'épicycle> est toujours, selon ces deux mouvements, d'un même côté par rapport au plan de l'orbe excentrique. Ainsi le périgée de l'épicycle ne peut pas être incliné tantôt du côté nord et tantôt du côté sud par rapport au plan de l'orbe excentrique ; il en est de même pour l'apogée. Cela est différent de ce que Ptolémée a supposé du mouvement de l'épicycle ; de même si le grand prisme se déplace autour de son axe en faisant mouvoir le petit prisme, et si l'apogée et le périgée se déplacent <respectivement> sur deux cercles parallèles au plan de l'orbe excentrique, l'apogée de l'épicycle devient tantôt le périgée et tantôt la position moyenne, et de même le périgée devient tantôt l'apogée et tantôt la position moyenne, or c'est une impossibilité grave. L'extrémité du diamètre qui est le périgée se déplace sur un grand cercle parallèle au plan de l'orbe excentrique et non sur un petit cercle perpendiculaire au plan de l'orbe excentrique.

من سطح فلك التدوير بهذه الحركة تارة في جهة الشمال عن سطح الفلك الخارج المركز وتارة في جهة الجنوب عنه، وكذلك البعد الأبعد.

وأيضًا فإنّه إذا دار المنشور الأعظم حول محوره القائم على قاعدتيه الموازيتين لسطح | الفلك الخارج المركز، فإنّه يدور معه المنشور الأصغر، لأنّ قاعدتي المنشور الأصغر (ل ٧ظ) ليستا موازيتين لقاعدتي المنشور الأعظم، فتتحرّك كلّ نقطة من المنشور الأصغر على محيط دائرة موازية لقاعدتي المنشور الأعظم، فيتحرّك البعد الأبعد من فلك التدوير والبعد الأقرب منه على دائرتين موازيتين لسطح الفلك الخارج المركز، وتكون إحداهما أبدًا في جهة الشمال عن سطح الفلك الخارج المركز والأخرى في جهة الجنوب عنه؛ فيكون ميل البعد الأقرب من فلك التدوير بهذه الحركة أيضًا أبدًا في جهة واحدة عن سطح الفلك الخارج المركز، وكذلك البعد الأبعد. فيكون ميل البعد الأقرب من فلك التدوير بالحركتين جميعًا أبدًا في جهة واحدة عن سطح الفلك الخارج المركز، وكذلك البعد الأبعد يكون ميله أبدًا | بالحركتين جميعًا في جهة واحدة عن سطح (ب ١٢١ظ) الفلك الخارج المركز؛ فلا يصير البعد الأقرب من فلك التدوير تارةً مائلًا إلى جهة الشمال عن سطح الفلك الخارج المركز | وتارةً إلى جهة الجنوب عنه، وكذلك البعد (ل ٨و) الأبعد. وهذا خلاف ما فرضه بطلميوس لحركة فلك التدوير. وأيضًا فإنّه إذا تحرّك المنشور الأعظم حول محوره وحرّك معه المنشور الأصغر وتحرّك البعد الأبعد والبعد الأقرب من فلك التدوير على دائرتين موازيتين لسطح الفلك الخارج المركز، فإنّه يصير البعد الأبعد لفلك التدوير تارةً هو البعد الأقرب وتارةً هو البعد الأوسط. وكذلك البعد الأقرب يصير تارةً هو البعد الأبعد وتارةً هو البعد الأوسط، وهذا محالٌ فاحش. ومع ذلك فإنّ طرف القطر الذي هو البعد الأقرب يكون متحرّكًا على دائرة كبيرة موازية لسطح الفلك الخارج المركز لا على دائرة صغيرة قائمة على سطح الفلك الخارج المركز.

٢٢ المركز: في الهامش [ب].

https://doi.org/10.1017/S0957423919000110 Published online by Cambridge University Press

Le diamètre de l'épicycle ne se meut pas autour d'un petit cercle perpendiculaire au plan de l'orbe excentrique et le plan de l'épicycle ne se meut avec lui que par un mouvement d'un corps qui tourne autour de l'axe du petit cercle qui est dans le plan de l'orbe excentrique. Le fait d'imposer que le grand prisme se meuve autour de l'axe du petit cercle qui est dans le plan de l'orbe excentrique implique que ses deux bases ne sont plus parallèles au plan de l'orbe excentrique ; cela implique aussi que le grand prisme vide un lieu et en remplit un autre ; alors il a besoin d'un lieu plus grand que son lieu ; l'épicycle bascule en conséquence : sa face nord devient face sud et sa face sud devient face nord, son côté est passe à l'ouest et son côté ouest passe à l'est. Si on impose que les deux bases du grand prisme soient orthogonales au plan de l'orbe excentrique et qu'elles soient parallèles au petit cercle, l'axe du grand prisme devient l'axe du petit cercle et ce prisme coupe le petit prisme ; alors, si ce <grand> prisme se meut autour de son axe, le cercle de l'épicycle tourne autour du petit cercle selon l'hypothèse de Ptolémée ; mais cette situation implique que le petit prisme quitte son lieu. Ainsi il remplit un lieu et vide un lieu ; cela implique aussi que le cercle de l'épicycle bascule : le côté est de sa circonférence devient ouest et le côté ouest devient est, le côté nord de son plan devient sud et son côté sud devient nord ; et cela est en contradiction avec ce qui existe et avec les hypothèses de Ptolémée. Ainsi quelle que soit l'hypothèse sur la position du grand prisme, il est nécessaire que l'un des deux prismes vide un lieu et remplisse un lieu, et cela implique aussi que la position du plan de l'épicycle change : ou bien l'apogée devient le périgée et le périgée devient l'apogée, ou bien le côté est devient ouest et le côté ouest devient est. De même si l'on suppose que le prisme aux bases parallèles au plan de l'excentrique est à l'intérieur du prisme incliné et qu'il entraîne le prisme incliné dans son mouvement, cela implique les impossibilités vues plus haut. Alors si, quelle que soit la position supposée du prisme, ces impossibilités que nous avons citées en découlent, cette notion dont on a dit que Ptolémée l'avait expliquée très clairement devient de façon très claire incohérente et impossible.

وليس يتحرّك قطر فلك التدوير حول دائرة صغيرة قائمة على سطح الفلك الخارج المركز ويتحرّك معه سطح فلك التدوير إلّا بحركة جسمٍ يدور على محور الدائرة الصغيرة الذي هو في سطح الفلك الخارج المركز. فإن فرض المنشور الأعظم يتحرّك على محور | ل ٨ظ الدائرة الصغيرة الذي هو في سطح الفلك الخارج المركز، ولزم منه أن تخرج قاعدتاه عن موازاة سطح الفلك الخارج المركز، ولزم المنشور الأعظم أن يفرغ مكانًا ويملأ مكانًا فيحتاج إلى مكانٍ أوسع من مكانه وينقلب مع ذلك فلك التدوير فتصير جهته الشمالية جنوبية والجنوبية شمالية وتصير جهته الشرقية غربية والغربية شرقية. فإن فرض قاعدتي المنشور الأعظم قائمتين على سطح الفلك الخارج المركز وكانتا موازيتين للدائرة الصغيرة وصار محوره محور الدائرة الصغيرة، وصار هذا المنشور مقاطعًا للمنشور الأصغر، فإذا تحرّك هذا المنشور حول محوره، فإنّ دائرة فلك التدوير تدور حول الدائرة الصغيرة كما فرضها بطلميوس؛ إلّا أنّه يلزم من هذا الوضع أن يخرج المنشور الأصغر عن مكانه فيملأ مكانًا ويفرغ مكانًا، ويلزم منه أيضًا أن تنقلب دائرة فلك التدوير، فتصير الجهة الشرقية من محيطه غربية والغربية شرقية، وتصير جهة سطحه الشمالية جنوبية وجهته | ل ٩و الجنوبية شمالية | ب ١٢٢و وهاذ بخلاف الوجود وبخلاف ما فرضه بطلميوس. فعلى أي وضعٍ فرض المنشور الأعظم فلا بدّ أن يلزم منه أن يكون أحد المنشورين يفرغ مكانًا ويملأ مكانًا ويلزم منه أيضًا أن يتغيّر وضع سطح فلك التدوير، فإمّا أن يصير البعد الأبعد هو البعد الأقرب والبعد الأقرب هو البعد الأبعد، وإمّا أن تصير الجهة الشرقية منه غربية والغربية شرقية. وكذلك إن فرض المنشور، الموازي قاعدتاه لسطح الفلك الخارج المركز، في داخل المنشور المائل وجُعِل محرِّكًا للمنشور المائل، لزمت منه المحالات التي تقدّمت وعلى أي وضع فرض المنشور، وإن لزم منه المحالات التي ذكرناها. فهذا المعنى الذي ذكر أنّ بطلميوس بيّنه بيانًا واضحًا قد تبيّن فساده

[٤] ولزم منه: لزم منه [ل]، ولزم [ب]. [٨] وكانتا: كانا [ل]. [١٠] حول: حرك [ل]. [١٦] وضع: فوق السطر في [ل]. [١٧] والبعد الأقرب هو البعد الأبعد: والأقرب هو الأبعد [ل]. [٢٠] المنشور وإن: المنشورات [ل]؟

https://doi.org/10.1017/S0957423919000110 Published online by Cambridge University Press

Il s’ensuit que Ptolémée a commis une erreur grave en supposant que les prismes meuvent l’épicycle, car ces prismes impliquent deux impossibilités dont l’une est la sortie de l’un des deux prismes de son lieu et l’autre est le basculement de l’épicycle ; ces deux impossibilités ont lieu quelles que soient les positions des deux prismes qui entraînent le mouvement de l’épicycle autour du petit cercle. Il est clair, d’après ce que nous venons d’expliquer, que ce que j’ai dit dans mon mémoire sur le mouvement d’enroulement, à propos de la sortie du prisme de l’épicycle de son lieu et de son besoin d’un lieu plus grand que son lieu, sont des propos exacts ; et ce qu’il (le Šayḫ) a conçu contre cette opinion est une imagination erronée. Il apparaît également après cela une impossibilité supplémentaire que je n’ai pas signalée dans mon mémoire, et apparaît clairement de l’ensemble de ce qui a été montré l’erreur de Ptolémée dans son hypothèse sur les prismes pour les mouvements des épicycles.

Après cet énoncé, il a cité ce mémoire : ordonnons maintenant, pour le mouvement d’enroulement, des corps qui se meuvent de mouvements circulaires autour de centres et de pôles fixes. Il a complété le propos puis il a dit qu’il restait des doutes qu’il fallait clarifier. Il a dit qu’on prenait pour centre de chacun de ces petits cercles un point bien précis de la ligne qui joint le centre de l’orbe excentrique autour duquel tourne l’épicycle <et le centre de l’épicycle>. Il en est venu ensuite à dire : on sait qu’il – le diamètre de l’épicycle – est dirigé vers le centre de l’orbe excentrique ; puis il a dit : Ptolémée a disposé les inclinaisons des orbes excentriques selon leurs diamètres passant par les extrémités nord et sud ; et il a ajouté : si le centre de l’épicycle de chacun d’eux est à l’une des deux extrémités, alors son diamètre dirigé vers le centre de l’orbe excentrique est celui qui passe par l’apogée moyen, <à la différence du> diamètre dirigé vers le centre de l’écliptique, qui passe par l’apogée apparent.

https://doi.org/10.1017/S0957423919000110 Published online by Cambridge University Press

واستحالته بيانًا واضحًا. وتبيّن منه أيضًا أنّ بطلميوس قد غلط غلطًا فاحشًا في فرضه المنشورات تحرِّك فلك التدوير لأنّه يلزم من المنشورات محالان أحدهما خروج أحد المنشورين عن مكانه والآخر انقلاب | فلك التدوير؛ ويلزم هذان المحالان على جميع ل ٩ظ أوضاع المنشورين التي تؤدّي حركة فلك التدوير حول الدائرة الصغيرة. فقد تبيّن من هذا القول الذي شرحناه أنّ القول الذي ذُكر في مقالتي في الالتفاف من خروج منشور فلك التدوير عن مكانه وحاجته إلى مكان أوسع من مكانه قولٌ صحيح، وأنّ الذي تخيّله من ضد هذا القول هو تخيّلٌ غير صحيح. ويتبيّن مع ذلك أيضًا محالٌ زائد، لم أذكره في تلك المقالة، ويتبيّن من مجموع ما تبيّن، غلط بطلميوس في فرضه المنشورات لحركة أفلاك التداوير.

ثمّ قال من بعد هذا القول ما قيل في هذه المقالة: « فلنرتب الآن لحركة الالتفاف أجسامًا تتحرّك حركات مستديرة حول مراكز وأقطاب ثابتة. » وتمّم الكلام ثمّ قال: « وفيه شكوك نحتاج إلى حلّها. » وقال « قد فرض مركز كلّ دائرة من هذه الدوائر الصغار على نقطة واحدة بعينها من الخطّ الذي يصل بين مركز الفلك الخارج المركز الذي يدور حوله | فلك التدوير <وبين مركز فلك التدوير>. » وانتهى في كلامه إلى ل ١٠و أن قال: « ومعلوم أنّه يكون محاذيًا لمركز الفلك الخارج المركز »، يعني قطر | فلك ب ١٢٢ظ التدوير؛ ثمّ قال « وقد وضع بطلميوس ميول الأفلاك الخارجة المراكز بحَسَب أقطارها التي تمرّ بالنهايات الشمالية والجنوبية »؛ ثمّ قال: « وإذا كان مركز فلك تدوير كلّ واحدٍ منها على إحدى النهايتين، فإنّ قطره الذي يحاذي مركز الفلك الخارج المركز وهو الذي يمرّ بالبعد الأبعد الوسط [عن] <غير> القطر الذي يحاذي مركز فلك البروج الذي يمرّ بالبعد الأبعد الذي يُرى. »

[٢] محالان: محالين [٤] حركة: فوق السطر في [ل]. [٥] ذُكر: ذكرته [ل]. [١٠] هذا القول ما قيل: هذا القول من قبل [ل]، هذا القول ثم قيل [ب]. [١٢] من هذه: هو هذه [ب]. [١٨–١٩] مركز الفلك ... الذي يحاذي: ناقصة في [ب] بسبب قفزة إلى سطر آخر لتشابه الكلمات.

https://doi.org/10.1017/S0957423919000110 Published online by Cambridge University Press

Il a continué ce récit, puis il a dit : cela est différent de ce que Ptolémée a posé, car il fait dans la première phrase du treizième chapitre une assertion générale, et il dispose les inclinaisons des épicycles selon leurs diamètres qui sont dirigés vers le centre de l'écliptique, ces diamètres étant ceux sur lesquels se trouvent le périgée et l'apogée apparents, à partir de chaque <épicycle>. Il dit ensuite : Ptolémée n'a prescrit le mouvement que pour les extrémités des diamètres dirigés vers le centre de l'écliptique, et sa parole – il veut parler de Ptolémée – disant que ces diamètres entraînent avec eux les plans des épicycles montre que ce même diamètre se déplace sur le petit cercle mais qu'il doit toujours suivre le centre de l'écliptique sans échange ni alternance. Tout ce discours montre qu'il n'a pas médité – que Dieu le garde – les propos de Ptolémée, et qu'il n'a pas remarqué le but que poursuivait celui-ci en disant : « Nous disposons les inclinaisons des épicycles selon leurs diamètres dirigés vers le centre de l'écliptique, ces diamètres étant ceux sur lesquels se trouvent le périgée et l'apogée apparents. » Ces paroles, je veux dire celles de Ptolémée, font partie des paroles que Monseigneur le Šayḫ a prises selon leur apparence ; il ne les a pas méditées, ni ne les a interprétées ; alors il a cru que le diamètre incliné reste en permanence dirigé vers le centre de l'écliptique. Ce qui prouve cela, c'est son assertion : « Ceci montre que ce diamètre se déplace sur le cercle et qu'il doit toujours être dirigé vers le centre de l'écliptique sans échange ni alternance. » Cette croyance fait partie de ses sentiments dont j'ai parlé plus haut ; je veux dire qu'il n'en doute pas et qu'il veut que la réponse s'y conforme, car sa parole, « il doit toujours être dirigé vers le centre de l'écliptique sans échange ni alternance », montre qu'il s'est laissé convaincre par cette idée et qu'il l'a admise sans douter de sa vérité. Cette croyance est à un degré ultime d'incohérence et d'impossibilité.

Je montre cela par une preuve incontestable : c'est que toute droite qui possède un point fixe et qui se déplace d'un mouvement circulaire continu ne reste, durant le temps de son mouvement, dirigée vers aucun autre point fixe que son propre point fixe. C'est une proposition universelle que je montre pour le diamètre de l'épicycle.

ثمّ استمرّ في هذا الكلام ثمّ قال من بعد هذا: « وهذا خلاف ما وضعه بطلميوس، لأنّه يقول في الجملة الأولى من المقالة الثالثة عشرة قولًا عامًا ويضع ميول أفلاك التداوير بحسب أقطارها المحادية لمركز فلك البروج، وهي الأقطار التي عليها يوجد البعد الأبعد والبعد الأقرب الذي يُرى من كلّ واحد منها. » ثمّ قال من بعد ذلك: « فلم يفرض بطلميوس الحركة إلّا لأطراف الأقطار التي تحاذي مركز فلك البروج؛ | وقوله، يعني ل ١٠ظ
بطلميوس، أنّ هذه الأقطار تدور معها سطوح أفلاك التداوير، يدلّ على أنّ هذا القطر بعينه يتحرّك على الدائرة الصغيرة، وهو أبدًا لازمٌ لمحاذاة مركز فلك البروج من غير تبديل ولا مغادرة. » وهذا الكلام كلّه يَدُلّ على أنّه، حرسه اللّه، لم يتأمّل كلام بطلميوس ولا لاحظ غرضه في قوله « ونضع ميول أفلاك تداويرها بحسب أقطارها المحاذية لمركز فلك البروج، وهي الأقطار التي عليها يُوجَد البعد الأقرب والبعد الأبعد الذي يُرى من كلّ واحد منها. » وهذا الكلام، أعني كلام بطلميوس، هو من الكلام الذي أخذه مولاي الشيخ على ظاهره ولم يتأمّله ولم يتأوّل فيه؛ فاعتقد أنّ القطر المائل يكون أبدًا محاذيًا لمركز فلك البروج. والدليل على ذلك قوله: « يدلّ على أنّ هذا القطر يتحرّك على الدائرة وهو أبدًا لازمٌ لمحاذاة مركز فلك البروج من غير تبديل ولا مغادرة. » وهذا الاعتقاد هو من استشعاراته التي قدمت ذكرها؛ | أعني أنّه لا يشكّ فيها ويريد أن ل ١١و
يكون الجواب موافقًا لها، لأنّ قوله: « وهو أبدًا لازم لمحاذاة مركز فلك البروج من غير تبديل ولا مغادرة »، يدلّ على أنّه قد تبيّن هذا الاعتقاد وتحقّقه ولم يشكّ فيه. وهذا الاعتقاد هو في نهاية الفساد والاستحالة.

وأنا أبيّن ذلك بالبرهان الذي لا يُشكّ فيه: وهو أنّ كلّ خطّ يتحرّك حركة مستديرة متصلة ونقطة منه ثابتة، فليس يلزم محاذيًا في جميع زمان حركته لنقطة ثابتة غير النقطة التي هي منه. وهذه قضيّة كلّيّة | وأنا أبيّنها في قطر فلك التدوير. ب ١٢٣و
فليُتوهّم قطر فلك التدوير الذي يدور حول الدائرة الصغيرة في وقت كونه خارجًا

٥ التي: الذي [ب]. ٦ تدور: تعود [ل،ب]. ٩ تداويرها: تداويره [ب]. ١٦ وهو: هو [ل]. ١٧ ولم: ولا [ل،ب]. ٢٠ يلزم: يكون

https://doi.org/10.1017/S0957423919000110 Published online by Cambridge University Press

Considérons le diamètre d'un épicycle qui tourne autour du petit cercle au moment où il est en dehors du plan de l'écliptique. Si on prolonge ce diamètre suivant la ligne droite, il aboutit au plan de l'écliptique, car le plan du petit cercle coupe, en s'étendant, le plan de l'écliptique, quelle que soit la position du petit cercle, puisque le plan du petit cercle est toujours orthogonal au plan de l'orbe excentrique, alors que l'orbe excentrique est incliné sur le plan de l'écliptique. Donc si on prolonge en ligne droite le diamètre qui se déplace autour du petit cercle, il aboutit au plan de l'écliptique, il le coupe et le dépasse. Alors si ce diamètre aboutit au plan de l'écliptique, qu'il le coupe, le dépasse, puis se déplace sur le petit cercle, il décrit par ce mouvement un cône dont le sommet est le centre de l'épicycle. Le plan de l'écliptique coupe ce cône dans tous les cas où le cône se prolonge du côté du plan de l'écliptique, car le diamètre de l'épicycle qui tourne autour du petit cercle n'est pas parallèle au plan de l'écliptique, puisqu'il coupe toujours le plan du petit cercle qui coupe toujours le plan de l'écliptique. Il coupe donc toujours le plan de l'écliptique, sauf lorsque l'épicycle se trouve au nœud ; ainsi l'intersection entre le plan de l'écliptique et la surface du cône est une des sections coniques, et le centre de l'écliptique est ou bien à l'intérieur du cône ou bien à l'extérieur du cône ou bien sur sa surface ; parce que, si le centre du petit cercle est sur la droite joignant le centre de l'écliptique et le centre de l'épicycle, le centre de l'écliptique ne peut être qu'à l'intérieur de la section <conique> ; et si le centre du petit cercle est en dehors de cette ligne, le centre de l'écliptique peut être à un moment donné sur le périmètre de cette section ou à l'extérieur du périmètre de cette section. Donc le diamètre de l'épicycle ne peut, dans son mouvement, qu'être dirigé vers le périmètre de la section qui se trouve dans le plan de l'écliptique, et il est à chaque moment dirigé vers l'un de ses points ; donc, ou bien le diamètre mobile n'est dirigé vers le centre de l'écliptique à aucun moment, ou bien il l'est à l'un des moments au cours desquels il tourne autour du petit cercle. Si

https://doi.org/10.1017/S0957423919000110 Published online by Cambridge University Press

عن سطح فلك البروج، قد امتدّ على استقامة فهو ينتهي إلى سطح فلك البروج، لأنّ سطح الدائرة الصغيرة إذا انبسط فهو يقطع سطح فلك البروج في جميع أوضاع الدائرة الصغيرة، لأنّ سطح الدائرة الصغيرة هو أبدًا قائم على سطح الفلك الخارج المركز، والفلك الخارج المركز | (ل ١١ظ) مائل على سطح فلك البروج. فالقطر المتحرّك حول الدائرة الصغيرة إذا امتدّ على استقامة فهو ينتهي إلى سطح فلك البروج ويقطعه ويتجاوزه. فإذا انتهى هذا القطر إلى سطح فلك البروج وقطعه وتجاوزه ثمّ تحرّك حول الدائرة الصغيرة، حَدُث من حركته مخروطٌ رأسه مركز فلك التدوير. وسطح فلك البروج يقطع هذا المخروط على تصاريف الأحوال إذا امتدّ المخروط في جهة سطح فلك البروج لأنّ قطر فلك التدوير المتحرّك حول الدائرة الصغيرة ليس يكون موازيًا لسطح فلك البروج، لأنّه يقطع أبدًا سطح الدائرة الصغيرة القاطع أبدًا لسطح فلك البروج. فهو أبدًا يقطع سطح فلك البروج إلّا في وقت كون فلك التدوير في العقدة؛ فيكون الفصل المشترك بين سطح فلك البروج وبين سطح هذا المخروط قطعًا من قطوع المخروط، ويكون مركز فلك البروج إمّا في داخل هذا المخروط وإمّا خارجًا عنه وإمّا على محيطه؛ لأنّ مركز الدائرة الصغيرة إن | (ل ١٢و) كان على الخطّ الواصل بين مركز فلك البروج وبين مركز فلك التدوير، فمركز فلك البروج ليس يكون إلّا داخل القطع؛ وإن كان مركز الدائرة الصغيرة خارجًا عن هذا الخطّ، أمكن أن يكون مركز فلك البروج في وقت من الأوقات على محيط القطع وأمكن أن يكون في وقت من الأوقات خارجًا عن محيط القطع. فقطر فلك التدوير إذا تحرّك فليس يحاذي إلّا محيط القطع الذي يحدث في سطح فلك البروج، ويكون في كلّ آن محاذيًا لنقطة منه؛ فالقطر المتحرّك إمّا ألّا يحاذي مركز فلك البروج في وقت من الأوقات أو يحاذيه في آنٍ واحد من آنات الزمان الذي يدور فيه حول الدائرة الصغيرة. ثمّ إذا تحرّك فلك التدوير فانتقل من موضعه فإنّ القطع

[٣] هو: فوق السطر في [ل]. [٣] سطح: في الهامش، وأشار أليه [ل]. [٤] فالقطر: ناقصة [ب]. [٥] فهو: فهي [ب]. [١١] إلّا في وقت كون: الأقرب دور [ل].

https://doi.org/10.1017/S0957423919000110 Published online by Cambridge University Press

l'épicycle se déplace ensuite de sa position, la section se déplace avec lui et le périmètre de la section devient une courbe composée, et le centre de l'écliptique est soit à l'intérieur, soit à l'extérieur, soit sur cette courbe. Si ce diamètre se trouve sur l'intersection du <plan> de l'écliptique et du <plan> de l'excentrique au moment où l'épicycle se trouve au nœud, alors il n'est dirigé vers le centre de l'écliptique qu'à un instant <donné> unique, puis il s'en éloigne. Cette même notion implique que, si le mouvement du diamètre est composé de plusieurs mouvements, alors d'après cette démonstration le diamètre de l'épicycle qui se meut autour du petit cercle ne peut pas être toujours dans la direction du centre de l'écliptique, et il ne peut pas l'être, en particulier, si le centre du petit cercle est sur la ligne droite joignant le centre de l'écliptique au centre de l'épicycle. De même, l'un des points de ce diamètre, je veux dire le diamètre de l'épicycle, est toujours dans le plan de l'orbe excentrique : c'est le centre de l'épicycle. Le centre de l'écliptique étant dans le plan de l'excentrique, si le diamètre était toujours dans la direction du centre de l'écliptique, alors tout le diamètre serait toujours dans le plan de l'orbe excentrique ; malgré cela il oscille autour du plan de l'orbe excentrique : c'est une impossibilité grave. Ainsi ce que le Šayḫ a ressenti et sur quoi il a insisté est faux.

Ce doute est étonnant, car il a posé que ce diamètre reste toujours dans le plan de l'orbe excentrique alors qu'il oscille constamment autour du plan de l'orbe excentrique ; c'est une croyance dont l'incohérence et l'erreur sont démontrées, ce qui entraîne la fausseté de ce qu'il a ordonné pour le mouvement du diamètre de l'épicycle. Cette croyance étant fausse, il devient exact que ce que j'ai ordonné pour le mouvement du diamètre est en accord avec ce que j'ai ordonné. Je montre l'exactitude de cela, après avoir expliqué l'assertion de Ptolémée, à savoir ce qu'il a dit : « et nous disposons les inclinaisons de leurs épicycles selon leurs diamètres qui sont dirigés vers le centre de l'écliptique », ou, suivant certaines copies, « selon leurs différents diamètres qui sont dirigés vers le centre de l'écliptique ». L'essence de cette affirmation est que le diamètre mobile de l'épicycle et l'inclinaison du plan de l'épicycle sont rapportés au diamètre de l'orbe de

يتحرّك معه | فيصير محيط القطع خطًّا مركّبًا ويكون مركز فلك البروج في داخله أو ب ١٢٣ظ
على محيطه أو خارجًا عن محيطه. وإن صار هذا القطر على الفصل المشترك بين
فلك البروج وبين الفلك الخارج المركز في وقت كون فلك التدوير في العقدة، فليس | ل ١٢ظ
يحاذي مركز فلك البروج إلّا آنًا واحدًا ثمّ يتحرّك خارجًا عنه. ويلزم هذا المعنى بعينه إن
كانت حركة القطر مركّبة من عدّة حركات؛ فقد تبيّن بهذا البرهان أنّ قطر فلك التدوير
المتحرّك حول الدائرة الصغيرة ليس يكون أبدًا محاذيًا لمركز فلك البروج ولا يصحّ أن
يحاذيه وخاصّة إنْ كان مركز الدائرة الصغيرة على الخطّ الواصل بين مركز فلك البروج
وبين مركز فلك التدوير. وأيضًا فإنّ نقطة من هذا القطر، أعني قطر فلك التدوير، هي
أبدًا في سطح الفلك الخارج المركز، وهي مركز فلك التدوير. ومركز فلك البروج هو في
سطح الفلك الخارج المركز، فإذا كان هذا القطر أبدًا محاذيًا لمركز فلك البروج كان
جميع القطر أبدًا في سطح الفلك الخارج المركز وهو مع ذلك متحرّك حول سطح
الفلك الخارج المركز؛ وهذا محالٌ فاحش. فقد بَطُل الذي استشعره وصمّم عليه.

وهذا من عجائب الشكوك، لأنّه جعل هذا القطر في سطح الفلك الخارج المركز
أبدًا، وهو يتحرّك حول سطح الفلك الخارج المركز أبدًا. وهذا الاعتقاد الذي قد تبيّن
فساده وبطلانه هو الذي بطل به ما رَتَّبه في حركة قطر فلك التدوير. وإذ قد بطل هذا
الاعتقاد، فقد صحّ أنّ الذي رتبته من حركة هذا القطر هو على ما رتبته. | وأنا أبيّن ل ١٣و
صحّة ذلك من بعد أن أبيّن معنى قول بطلميوس، أعني قوله: « ونضع ميول أفلاك
تداويرها بحسب أقطارها المحاذية لمركز فلك البروج »، وفي بعض النسخ، « على
أقطارها المختلفة المحاذية لمركز فلك البروج ». ومعنى هذا القول أنّ ميل قطر فلك
التدوير المتحرّك وميل سطح فلك التدوير إنّما هو بالقياس إلى قطر فلك البروج الذي في

[١] داخله: داخلها [ب]. [٧–٩] على الخطّ الواصل ... هي أبدًا: في الهامش، وأشار إليها [ل]. [١٤] وهو يتحرّك ... أبدًا: ناقصة في [ب] بسبب قفزة لتشابه الكلمات. [١٤] قد: ناقصة [ل]. [١٥] رَتَّبه: رتبته [ل]. [١٨] تداويرها: تدويرها [ل]. [١٩] المختلفة: ناقصة في [ل]، ضرب عليها بالقلم في [ب]. [١٩] ميل: ناقصة [ب].

https://doi.org/10.1017/S0957423919000110 Published online by Cambridge University Press

l'épicycle qui est dans le plan de l'orbe excentrique et qui est toujours dirigé vers le centre de l'écliptique. En effet le diamètre que Ptolémée a signalé et qui est toujours dirigé vers le centre de l'écliptique est le diamètre par rapport auquel s'incline le diamètre dont l'inclinaison mobile est apparente, et non pas le diamètre mobile lui-même. Cette notion est claire et comprise à partir de ses propos.

Pour ce qui concerne le diamètre mobile que j'ai ordonné dans mon mémoire avec le petit cercle, j'ai mené un diamètre joignant le centre de l'orbe déférent jusqu'au centre de l'épicycle et j'ai supposé que l'orbe de l'épicycle est dans le plan de l'orbe excentrique par hypothèse, afin que l'agencement soit plus clair. Ce diamètre est celui qui entraîne l'épicycle dans son mouvement autour de l'orbe déférent, et cela est possible dans n'importe quelle position supposée de ce diamètre, car cette notion va être montrée dans la suite. J'ai supposé que le diamètre de l'épicycle qui passe par l'apogée et par le périgée vrais dans le plan de l'épicycle était dans le plan de l'orbe excentrique. Ce diamètre, je veux dire celui de l'épicycle, est tel que si on le prolonge en ligne droite il aboutit au centre de l'orbe équant <autour duquel> se mesure le mouvement en longitude ; ce diamètre est alors incliné par rapport au diamètre sortant du centre de l'orbe déférent vers le centre de l'épicycle, et il le coupe au centre de l'épicycle ; c'est la raison pour laquelle j'ai supposé le plan de l'épicycle dans le plan de l'orbe excentrique, pour que nous montrions que le diamètre incliné mobile est celui qui, d'après la première hypothèse, était dirigé vers le centre de l'orbe équant, c'est-à-dire le centre le plus éloigné ; et si l'on n'avait pas posé le plan de l'épicycle dans le plan de l'orbe excentrique, on aurait pu croire que le diamètre mobile était, selon ma première hypothèse, dirigé vers le centre du déférent ou vers le centre du monde.

J'ai mené ensuite de l'extrémité du diamètre incliné la perpendiculaire au diamètre de l'orbe déférent, puis j'ai posé le pied de cette perpendiculaire comme centre, et j'ai tracé un cercle, de rayon égal à la longueur de cette perpendiculaire, orthogonal au plan de l'orbe excentrique ; ainsi l'extrémité du diamètre incliné se trouve sur la circonférence du petit cercle. J'ai fait ensuite mouvoir le diamètre autour

https://doi.org/10.1017/S0957423919000110 Published online by Cambridge University Press

سطح الفلك الخارج المركز المحاذي أبدًا لمركز فلك البروج. فالقطر الذي أشار إليه بطلميوس المحاذي أبدًا لمركز فلك البروج، هو القطر الذي يميل عنه القطر المتحرّك الميل الذي يُرى لا القطر المتحرّك نفسه. وهذا المعنى بيِّنٌ مفهومٌ من كلامه.

فأمّا القطر المتحرّك الذي رتبته في مقالتي والدائرة الصغيرة، فإني أخرجت قطرًا من مركز الفلك الحامل إلى مركز فلك التدوير، وفرضت فلك التدوير في سطح الفلك الخارج المركز فرضًا ليكون الترتيب أبيّن. وهذا القطر هو الذي ذاته يحرّك فلك التدوير
حول محيط الفلك الحامل، وفي أيّ موضع فرض هذا القطر جاز لأنّ | هذا المعنى ب ١٢٤و
يتبيّن فيما | بعد. وفرضت قطر فلك التدوير الذي يمرّ بالبعد الأبعد والبعد الأقرب ل ١٣ظ
المحقّقين في سطح فلك التدوير، وكان في سطح الفلك الخارج المركز. وهذا القطر أعني قطر فلك التدوير هو الذي إذا امتدّ على استقامةٍ انتهى إلى مركز معدّل المسير الذي إليه تقاس حركة الطول؛ فيكون هذا القطر مائلًا عن القطر الخارج من مركز الفلك الحامل إلى مركز فلك التدوير، مقاطعًا له على مركز فلك التدوير؛ ولهذه العلّة فرضت سطح فلك التدوير في سطح الفلك الخارج المركز، لِنتبيّن أنّ القطر المائل المتحرّك هو الذي كان بالفرض الأوّل محاذيًا لمركز معدّل المسير الذي هو المركز الخارج الأبعد؛ ولو لم يفرض سطح فلك التدوير في سطح الفلك الخارج المركز لكان يُظنّ أنّ القطر المتحرّك هو الذي كان بالفرض الأوّل محاذيًا لمركز الحامل أو لمركز العالم.

ثمّ أخرجت من طرف هذا القطر المائل عمودًا على قطر الفلك الحامل، ثمّ جعلت
مسقط العمود مركزًا وأدرت ببعد العمود | دائرةً قائمةً على سطح الفلك الخارج المركز، ل ١٤و
فصار طرف القطر المائل على محيط الدائرة الصغيرة. ثمّ حرّكت القطر حول محيط هذه الدائرة، فتَحَرّر بهذا الترتيب هيئة حركة القطر وتبيّن أنّ القطر المتحرّك هو الذي

[١] لمركز: بمركز [ل]. [٢] عنه: عند [ب]. [٦] ذاته: كأنه [ل]. [١٢] مقاطعًا له على مركز فلك التدوير: ناقصة [ب]. [١٦] الحامل: الفلك الحامل [ل]. [٢١] فتَحَرّر: فيجور [ب].

https://doi.org/10.1017/S0957423919000110 Published online by Cambridge University Press

du périmètre de ce cercle ; en ordonnant ainsi on a achevé la configuration du mouvement du diamètre, ce qui a montré que le diamètre mobile est celui dont les extrémités sont l'apogée et le périgée vrais. Puis, si l'épicycle se déplace autour de l'orbe excentrique déférent, il fait mouvoir avec lui le diamètre de l'orbe déférent sur lequel se trouve le centre du petit cercle, le petit cercle est entraîné avec lui, et le diamètre mobile est toujours sur le petit cercle.

Malgré cela, on imagine toujours une ligne droite, menée du centre du monde vers le centre de l'épicycle jusqu'à la surface supérieure dont le centre est l'orbe de l'épicycle quelle que soit la position de l'épicycle. Alors, à partir de cette ligne droite, s'engendre pour l'épicycle un diamètre dirigé vers le centre de l'écliptique et tel que l'inclinaison du diamètre mobile soit mesurable par rapport à lui, car l'inclinaison sensible mesurée par l'observation est l'inclinaison du diamètre mobile par rapport au diamètre dirigé vers le centre de l'écliptique. La cause de cette inclinaison est le mouvement du diamètre dirigé vers le centre de l'orbe équant, sur lequel se trouvent en permanence l'apogée et le périgée vrais, autour du centre du petit cercle dont le centre est sur le diamètre de l'orbe excentrique déférent. Le mouvement du diamètre mobile ne peut avoir lieu qu'autour d'un petit cercle unique et précis, afin qu'il soit simple et continu. Le centre du petit cercle ne peut que se trouver sur le diamètre de l'orbe excentrique déférent, de manière que si l'orbe excentrique déférent se meut et qu'il meut l'épicycle, alors le petit cercle se meut. Quant aux lignes <droites> qui sont menées du centre du monde vers le centre de l'épicycle et qui servent de repère pour mesurer les inclinaisons sensibles, elles se modifient ; c'est que, si le centre du petit cercle était sur le diamètre qui sort du centre du monde, alors ou bien le petit cercle devrait se modifier, ou bien le mouvement de l'épicycle serait autour du centre du monde. Ces deux notions sont impossibles ; et ce que j'ai ordonné pour le petit cercle et pour le diamètre qui se meut autour de lui est l'ordre vrai. Aucun autre n'est vrai ni possible. Cette notion indiquée par Ptolémée étant avérée et clairement définie, le doute dont elle a fait l'objet et que le Šayḫ a imaginé et ressenti a été levé ; le Šayḫ s'est trompé

https://doi.org/10.1017/S0957423919000110 Published online by Cambridge University Press

طرفاه البعد الأبعد والبعد الأقرب المحقّقين. ثمّ إذا تحرّك فلك التدوير حول محيط الفلك الخارج المركز الحامل تحرّك قطر الفلك الحامل الذي عليه مركز الدائرة الصغيرة معه، وتحرّكت الدائرة الصغيرة معه، وكان القطر المتحرّك أبدًا على محيط الدائرة الصغيرة.

ومع ذلك فإنّه يُتخيّل أبدًا خطّ خارج من مركز العالم إلى مركز فلك التدوير وينتهي إلى السطح الأعلى، مركزه فلك التدوير، في كلّ موضعٍ من أوضاع فلك التدوير. فيحدث من ذلك الخطّ قطرًا لفلك التدوير محاذيًا لمركز فلك البروج، يكون ميل القطر المتحرّك مقيسًا إليه، فالميل المحسوس المقيس بالأرصاد هو ميل القطر المتحرّك عن القطر المحاذي لمركز فلك البروج. وعلّة هذا الميل | هو حركة القطر المحاذي لمركز ل ١٤ظ
معدّل المسير الذي عليه أبدًا البعد الأبعد والبعد الأقرب المحقّقين حول مركز الدائرة الصغيرة التي مركزها على قطر الفلك الخارج المركز الحامل. وليس يمكن أن تكون حركة القطر المتحرّك إلّا حول دائرة واحدة صغيرة بعينها لتكون الحركة بسيطة ومتّصلة. وليس يمكن أن يكون مركز الدائرة الصغيرة إلّا على قطر الفلك الحامل حتّى إذا تحرّك الفلك الحامل وحرّك فلك التدوير | تحرّكت الدائرة الصغيرة. فأمّا الخطوط التي تخرج ب ١٢٤ظ
من مركز العالم إلى مركز فلك التدوير، التي إليها تقاس الميول المحسوسة، فإنّها تتبدّل؛ فلو كان مركز الدائرة الصغيرة على القطر الذي يخرج من مركز العالم، لزم أن تتبدّل الدائرة الصغيرة أو تكون حركة فلك التدوير حول مركز العالم. وهذان المعنيان محالان، فالترتيب الذي رتبته للدائرة الصغيرة وللقطر المتحرّك حولها هو الترتيب الصحيح الذي لا يصحّ ولا يجوز غيره. وهو المعنى الذي | أشار إليه بطلميوس، وقد صحّ وتحرّر؛ ل ١٥و
وبطل معه الشكّ الذي تخيّله واستشعره وزلّ عن الطريق المستقيم في تخيُّله.

ثمّ قال من بعد ذلك، فهذه الشكوك هي التي يحتاج إلى حلّها وتحقّق الأصول

١٠ مركز: ناقصة [ل]. ١٣ قطر: في الهامش, وأشار إليها [ل]. ١٦ لزم: يلزم [ل]؟ ١٨ الصحيح: ناقصة [ل]. ١٩ لا يصحّ ولا يجوز: لا يجوز ولا يصحّ [ل]. ١٩ وهو: وهذا [ب].

https://doi.org/10.1017/S0957423919000110 Published online by Cambridge University Press

en l’imaginant et il s’est éloigné du droit chemin.

Il a dit ensuite que l’on a besoin de résoudre ces doutes et de vérifier les principes qui ne sont pas tachés de doute. La réponse à cela est que les doutes sont clarifiés et que les principes exempts de doute ont été vérifiés. Il a dit ensuite : « Je dis après tout cela que je n’ai compris de ce mémoire et du livre des *Hypothèses* rien d’autre que des mouvements de sphères contenues les unes dans les autres, tels que la sphère externe entraîne la sphère interne si les deux axes sont distincts, alors que la sphère interne se meut d’un mouvement qui lui est propre. Si ce mouvement était le mouvement d’enroulement, ce serait celui que Ptolémée a imposé pour les corps qu’il a considérés dans le livre des *Hypothèses* ; alors pourquoi dit-il qu’Aristote a parlé du mouvement d’enroulement sans reconnaître que <Ptolémée> aussi en a parlé ? » La réponse à ce qu’il a dit (« je n’ai compris de ce mémoire et du livre des *Hypothèses* rien d’autre que des mouvements de sphères contenues les unes dans les autres ») est que ce qu’il a compris des mouvements des sphères contenues les unes dans les autres est bien le mouvement d’enroulement ; mais il a cru qu’il y avait autre chose qui s’appelle mouvement d’enroulement, car il a estimé que le mouvement d’enroulement était une notion vague cachée et extrêmement difficile, alors qu’il n’en est pas ainsi. La raison d’une telle croyance est l’excuse faite par Ptolémée à propos de ce mouvement. Ptolémée s’en est excusé non pas parce que ce mouvement est très difficile et caché, mais parce qu’il est le plus difficile de tous les mouvements cités dans l’*Almageste*. Quant à ses propos concernant ce mémoire et le livre des *Hypothèses*, la réponse à cela est que ce qu’il a compris de ce mémoire est différent de ce qu’il a compris du livre des *Hypothèses*, car Ptolémée n’a pas expliqué ce mouvement dans le livre des *Hypothèses* et il n’est pas parvenu à l’ordonner. Si Monseigneur le Šayḫ l’avait compris du livre des *Hypothèses*, il n’aurait pas eu besoin de me questionner là-dessus ; s’il avait compris les mouvements des sphères contenues les unes dans les autres, il n’aurait pu le faire qu’à l’aide de mon mémoire qu’il possède. Il n’est pas correct que le mouvement que Ptolémée a signalé et qui induit les mouvements en latitude pour les cinq

التي لا يشكّ فيها؛ فالجواب عن هذا القول هو أنّ الشكوك قد انحلّت وتحقّقت الأصول ولم يبق فيها شيء من الشكوك. ثمّ قال من بعد هذا القول: « ثمّ إنّي أقول من بعد هذا كلّه إنّي لم أفهم من هذه المقالة ولا من كتاب الاقتصاص غير حركات كرات تحيط بعضها ببعض وتُحرِّك الخارجة الداخلة إذا اختلف المحوران، ثمّ تتحرّك الداخلة بحركة تخصّها. فإن كانت هذه الحركة هي حركة الالتفاف فهي التي فرضها بطلميوس في الأجسام التي وضعها في كتاب الاقتصاص؛ فلِمَ قال إنّ أرسطو قال بحركة الالتفاف ولم يعترف أنّه هو أيضًا نفسه قد قال بها؟ » فالجواب عن هذا القول أمّا قوله « لم أفهم من هذه المقالة ولا من كتاب الاقتصاص | غير حركات أكر يحيط ل ١٥ظ
بعضها ببعض »، فالجواب عنه أنّ الذي فهم من حركات الكرات المحيط بعضها ببعض هو حركة الالتفاف؛ وإنّما اعتقد أنّ هناك شيءًا آخر هو حركة الالتفاف لأنّه قدّر في نفسه أنّ حركة الالتفاف هو معنى غامض خفي في نهاية العُسْر. وليس الأمر كذلك. والعلّة في هذا الاعتقاد – وهو اعتذار بطلميوس من هذه الحركة –، وليس إذا اعتذر بطلميوس من هذه الحركة وجب أن تكون في غاية العسر والخفاء، وإنّما اعتذر منها لأنّها أعسر من جميع الحركات التي تقدم ذكرها في المجسطي. وأمّا قوله من هذه المقالة ومن كتاب الاقتصاص، فإنّ جوابه أنّ الذي فهم من هذه المقالة ليس هو الذي فهم من كتاب الاقتصاص، لأنّ بطلميوس لم يشرح هذه الحركة في كتاب الاقتصاص ولا تأتى لترتيبها. ولو كان مولاي الشيخ فهمها من كتاب التقتصاص لما كان يحتاج إلى أن يسألني عنها، فإن كان فهم حركات الكرات المحيط بعضها ببعض، فما فهمها إلّا من مقالتي التي عنده. وليس يصحّ أن تكون حركة | الالتفاف، ل ١٦و
التي أشار إليها بطلميوس، التي يكون منها حركات العرض | للكواكب الخمسة إلّا ب ١٢٥و

[١] فالجواب: والجواب [ل]. [٣] غير: من غير [ب]. [٤] تحيط: محيط [ل]. [٦] أرسطو: أرسطوطالس [ل].
[٨] أكر يحيط: محيط [ل]. [٩] المحيط: المحيطة [ل،ب]. [١١] في: وفي [ل]. [١٢] وهو: هو [ب].
[١٢–١٣] وليس إذا اعتذر بطلميوس من هذه الحركة: ناقصة [ب]. [١٣–١٤] وإنّما اعتذر ... في المجسطي: ناقصة [ب]. [١٤] وأمّا: فأمّا [ب].

planètes soit le mouvement d'enroulement, sauf s'il est conçu selon la configuration que j'ai construite et les détails que j'ai donnés. C'est d'abord une configuration qui n'est susceptible d'aucune impossibilité, qui n'est l'objet d'aucune absurdité, et à partir de laquelle s'engendre pour la planète un mouvement par lequel se produit, par le mouvement de son centre, une ligne qu'on imagine s'enrouler sur le corps de la petite sphère mouvant le corps de la planète. C'est à cause de l'enroulement de cette ligne sur le corps de l'orbe de l'épicycle, et à cause de rien d'autre, que j'ai désigné ce mouvement par « mouvement d'enroulement ».

Quant à ce qu'il a dit : « Pourquoi dit-il qu'Aristote a parlé du mouvement d'enroulement ? », la réponse est : il veut dire qu'Aristote a parlé de ce mouvement, c'est-à-dire qu'il a utilisé ce type de mouvements, mais il n'a pas voulu dire qu'il a utilisé le mouvement même que Ptolémée signalait et qui est le mouvement de l'épicycle. C'est que le mouvement dont on dit qu'Aristote l'a utilisé et adopté et qu'on appelle « mouvement d'enroulement » est le mouvement composé de tous les mouvements de la planète. C'est le cas du mouvement du Soleil qui est composé de son mouvement d'est en ouest, selon ce que voit Aristote, et de son mouvement du nord vers le sud ; ce mouvement est celui qui se compose, chez les mathématiciens, du mouvement du Soleil d'ouest en est autour des deux pôles de son orbe et du mouvement du Tout d'est en ouest. Par ces deux manières il se produit pour le centre du Soleil un mouvement sur une ligne hélicoïdale, enroulée sur son orbe, dont l'une des extrémités est le point du solstice d'été et l'autre est le point du solstice d'hiver ; et elle s'enroule autour de l'orbe du Soleil ; elle ressemble à la ligne qui se produit par les mouvements des sphères de l'orbe de l'épicycle que nous avons disposées pour le mouvement d'enroulement. Ainsi le mouvement d'enroulement dont on dit qu'Aristote l'a utilisé est le mouvement composé de tous les mouvements de l'astre.

Monseigneur le Šayḫ dit, dans ses pages, qu'il a amené un propos d'Aristote où l'on comprend le mouvement d'enroulement de façon différente de celle que l'on comprend <à partir> du mémoire. On soupçonne qu'il a compris, du propos d'Aristote, ce mouvement que je

https://doi.org/10.1017/S0957423919000110 Published online by Cambridge University Press

على الهيئة التي بينتها، والتفصيل الذي فصلته. وهي هيئةٌ لا يعرض فيها شيء من المحالات ولا يلزمها شيء من الشناعات، ويتولّد منها للكوكب حركةً يحدث بها من حركة مركزه خطّ متخيّل كأنّه ملتفّ على جسم الكرة الصغرى المحرِّكة لجرم الكوكب. ولالتفاف هذا الخطّ على جسم فلك التدوير، سميت هذه الحركة حركة الالتفاف، لا لعلّةٍ أخرى.

فأمّا قوله: «فلِمَ قال إنّ أرسطو قال بحركة الالتفاف»، فالجواب عنه أنّه يريد أنّ أرسطو قال بهذه الحركة يعني أنّه استعمل هذا النوع من الحركات، ولم يرد أنّه استعمل نفس الحركة التي أشار إليها بطلميوس التي هي حركة فلك التدوير. وذلك أنّ الحركة التي يقال إنّ أرسطوطاليس استعملها وقال بها، <وهي> التي قيل إنّها حركة الالتفاف، هي الحركة التي تتركّب من جميع حركات الكوكب: مثل حركة الشمس التي هي | مركّبةٌ من حركتها من المشرق إلى المغرب، على ما يراه أرسطو، ل ١٦ظ ومن حركتها من الشمال إلى الجنوب؛ وهذه الحركة هي التي تتركّب، عند أصحاب التعليم، من حركة الشمس من المغرب إلى المشرق على قطبي فلكها ومن تحرّك الكلّ بها من المشرق إلى المغرب. وبكِلا الوجهين يحدث لمركز الشمس حركة على خطٍّ لولبي ملتفّ على فلكها، أحد طرفيه عند نقطة الانقلاب الصيفي والآخر عند نقطة الانقلاب الشتوي؛ وهو ملتفّ على فلك الشمس وهو شبيهٌ بالخطّ الذي يحدث من حركات كرات فلك التدوير التي رتبت لحركة الالتفاف. فحركة الالتفاف التي يقال إنّ أرسطو استعملها هي الحركة التي تتركّب من جميع حركات الكوكب.

وذكر مولانا الشيخ في رقعته أنّه أحضر كلام أرسطو تُفهم منه حركة الالتفاف على خلاف ما فهم من المقالة. ويشتبه أن يكون فهم من كلام أرسطو هذه الحركة

[١] هيئةٌ: هذه [ب]. [٦] أرسطو: أرسطاطس [ل]. [٧] أرسطو: أرسطاطالس [ل]. [٧] يعني: معنى [ل]. [٩] أرسطوطاليس: أرسطالس [ل]. [٩] وقال: وتلك [ب]. [١٠] الحركة: ناقصة [ل]. [١١] من حركتها: فوق السطر في [ل]. [١١] أرسطو: أرسطالس [ل] (وسنقول الآن «أرسطو» بغير إشارة). [١٥] طرفيه: طرفيها [ب]. [١٨] الكوكب: الكواكب [ل].

https://doi.org/10.1017/S0957423919000110 Published online by Cambridge University Press

viens de citer. Ce mouvement n'est pas cité par les mathématiciens et ils ne l'utilisent pas, car ils n'en ont pas besoin. Ce que les mathématiciens désignent par « mouvement d'enroulement » est le mouvement de l'épicycle autour du petit cercle. Ce mouvement se compose de plusieurs mouvements ; à partir de ce mouvement s'engendre une ligne qui s'enroule autour de la sphère de l'épicycle. C'est à ce mouvement que Ptolémée fait référence dans le livre des *Hypothèses* ; c'est le mouvement dont les mathématiciens ont un besoin impérieux, car c'est de lui que résultent les mouvements en latitude des planètes. En fait, Monseigneur le Šayḫ a compris du propos d'Aristote une chose différente de celle qu'il a comprise du mémoire, car le mouvement d'enroulement qu'Aristote a signalé est autre que le mouvement d'enroulement que Ptolémée a signalé ; ils sont homonymes car ils sont de même espèce. En fait, Ptolémée a cité la parole d'Aristote à propos du mouvement d'enroulement car les deux mouvements sont de même espèce. Si Monseigneur le Šayḫ soulève la question du mouvement d'enroulement signalé par les mathématiciens, c'est celui qui est cité dans le mémoire qu'il possède ; mais si sa question porte sur le mouvement d'enroulement signalé par Aristote, c'est celui qu'il a compris de ce qu'il a cité du propos d'Aristote. Mais s'il veut que l'un soit l'autre, c'est une demande impossible, car l'un n'est pas l'autre, mais il lui ressemble seulement. La preuve de cela est que les mathématiciens n'utilisent pas l'autre ni ne le mentionnent, je veux dire celui signalé par Aristote, car ils n'en ont pas besoin ; de plus Aristote n'utilise pas le mouvement de l'épicycle et il ne lui consacre pas un mot. De même le mouvement que signale Aristote est un mouvement qui se produit incidemment de toute façon, et cela quelles que soient les caractéristiques des mouvements de la planète, sans que des corps lui soient attribués et sans que des mouvements précis lui soient ordonnés ; car tout corps possède différents mouvements circulaires, et il faut donc que se produise, de tous ses mouvements, un mouvement composé, et que ce mouvement soit enroulant. Le mouvement que signale Ptolémée est un mouvement pour lequel il a disposé des corps bien déterminés ayant des mouvements déterminés. Ainsi, ce que j'ai expliqué sur l'essence du mouvement d'enroulement est suffisant.

التي ذكرتها الآن. وهذه الحركة لا يذكرها أصحاب التعاليم ولا يستعملونها لأنّهم لا يحتاجون إليها. والذي يسميه أصحاب التعليم حركة | ل ١٧و الالتفاف هو حركة فلك التدوير حول الدائرة الصغيرة. وهذه الحركة تتركّب من عدّة حركات، ويحدث منها خطّ ملتفّ على كرة فلك التدوير؛ وإلى هذه الحركة أشار بطلميوس في كتاب الاقتصاص، وهذه الحركة يحتاج إليها أصحاب التعاليم حاجة شديدة لأنّ منها تتحصّل حركات الكواكب في العرض. وإنّما فهم مولاي الشيخ من كلام أرسطو غير ما فهم من المقالة، لأنّ حركة الالتفاف التي أشار إليها أرسطو هي غير حركة الالتفاف التي أشار إليها بطلميوس؛ وهما تشتركان في الاسم لأنّهما من نوعٍ واحد. وإنّما استشهد بطلميوس بقول أرسطو في حركة الالتفاف لأنّ الحركتين | ب ١٢٥ظ من نوعٍ واحد. فإن كان مولاي الشيخ يسأل عن حركة الالتفاف التي يشير إليها أصحاب التعاليم فهي التي ذكرتها في المقالة التي عنده؛ وإن كان يسأل عن حركة الالتفاف التي يشير إليها أرسطو فهي التي فهمها على ما ذكره من كلام أرسطو؛ وإن كان يريد أن | ل ١٧ظ تكون هذه هي تلك فهذا مطلوب مستحيل لأنّ هذه ليست تلك وإنّما تشبهها فقط. والدليل على ذلك أنّ أصحاب التعاليم لا يستعملون تلك ولا يذكرونها، أعني التي أشار إليها أرسطو، لأنّهم لا يحتاجون إليها؛ وأرسطو لا يستعمل حركة فلك التدوير ولا يخصّها بقول. وأيضًا فإنّ التي يشير إليها أرسطو هي حركة تحدث بالعرض، على تصاريف الأحوال وعلى أي صفةٍ كانت حركات الكوكب، من غير أن تتكلّف لها أجسام ولا ترتّب لها حركات معيَّنة لأنّ كلّ جسم يتحرّك حركات مختلفة مستديرة فلا بدّ أن يحدث من حركاته حركة مركّبة وتكون ملتفّة. والذي أشار إليه بطلميوس هي حركة تُكلّف لها أجسام معينة وفرض لها حركات معينة. فهذا الذي شرحته كافٍ في ماهية حركة الالتفاف.

٩ حركة: ناقصة [ل]. ١٠ التعاليم: التعليم [ب]. ١٣ وإنّما: وإنّما هي [ل]. ١٤ التعاليم: التعليم [ب].

https://doi.org/10.1017/S0957423919000110 Published online by Cambridge University Press

⁂

Il a dit ensuite : « S'il y avait ici autre chose que je n'ai pas comprise et qui est le mouvement d'enroulement, qu'il soit assez bon pour le montrer ; je pose une question concernant le mouvement d'enroulement grâce auquel chacune des sphères des planètes se meut par le premier mouvement, parce que les sphères qui se trouvent entre la sphère de chaque planète et la sphère qui produit le premier mouvement sont différentes de position et de mouvement ; ce sont elles qui impliquent l'excès dans le nombre <des sphères>, qui occupent un grand espace et qui s'entraînent ensemble vers une même région. Ce sont les mouvements dont Ptolémée dit qu'Aristote les a utilisés ; or ils ressemblent à l'enroulement. » La réponse à cela est que le mouvement sur lequel il pose une question est le mouvement que j'ai montré dans le mémoire qu'il possède : c'est que, si les mouvements de ces sphères étaient supposés assujettis à des sphères ayant des centres différents, cela impliquerait que ces sphères s'entraînent mutuellement et qu'elles ont besoin d'un grand espace. L'hypothèse des sphères ayant des centres différents et qui s'entraînent mutuellement est tout à fait possible et réalisable de plusieurs manières. Ce n'est pas toujours difficile si ces sphères ont des centres différents et qu'elles s'entraînent mutuellement en prenant un grand espace ; sauf quand cela est en contradiction avec les principes sur lesquels se fondent les mouvements dans le ciel ; et il est plutôt difficile d'imposer ce mouvement à des sphères qui ne s'entraînent pas mutuellement et qui n'ont pas besoin d'un lieu plus grand que leur lieu. Les mathématiciens sont d'accord sur le fait que si un quelconque mouvement dans le ciel est possible selon une configuration n'impliquant ni impossibilité ni incohérence et aussi selon une autre configuration impliquant des impossibilités et des incohérences, alors la seconde configuration est fausse. En fait la configuration de ce mouvement a été établie dans le mémoire qu'il possède, et cela d'une manière n'impliquant ni incohérence ni impossibilité ; alors l'autre configuration au sujet de laquelle il <nous> interroge maintenant est fausse ; de plus on n'a pas besoin de cette configuration, car Ptolémée l'a critiquée et a montré que l'on n'en a pas besoin (cela dans ses affirmations sur les prismes). Monseigneur

⁂

ثمّ قال من بعد ذلك: « فإن كان هاهنا شيء آخر لم أفهم هو حركة الالتفاف تفضّل به وبيَّنه، فعن حركة الالتفاف سألت التي بها تتحرّك كلّ واحدة من كرات الكواكب الحركة الأولى؛ إذ | ل ١٨و كانت الكرات التي بين كرة كلّ كوكب وبين الكرة التي منها الحركة الأولى مختلفة في وضعها وحركتها؛ وهي التي يلزمها الإفراط في كثرة العدد وتأخذ فضاءً كبيرًا وتندفع معًا إلى ناحية واحدة. وهي الحركات التي يقول بطلميوس إنّ أرسطالس استعملها وإنّها شبيهة بالالتفاف. » فالجواب عنه أنّ هذه الحركة التي يسأل عنها هي الحركة التي بينتها في المقالة التي عنده: إذا فُرِضت الحركات التي في تلك الأكر في أكر مختلفة المراكز فيلزم أن تتدافع وتحتاج إلى فضاءٍ كبير. وفَرْض أكر مختلفة المراكز تتدافع ممكن ومتيسر وعلى وجوه كثيرة ولا يتعذّر فرضها بكلّ وجه إذا كانت مختلفة المراكز وتتدافع وتأخذ فضاء كبيرًا؛ إلّا أنّه مخالف للأصول التي قُررت عليها حركات السماء؛ وإنّما الصعب أن تفرض هذه حركة في أكر لا تتدافع ولا تحتاج إلى مكان أوسع من مكانها. والذي لا يختلف فيه أصحاب التعاليم هو أنّ كلّ حركة في السماء إذا كان ممكنًا أن تكون على | ل ١٨ظ هيئة لا يلزم منها محال ولا شناعة، وكان ممكنًا أن تكون على هيئة أخرى يلزم منها محال وشناعة، فالهيئة الأخرى باطلة. وقد تقرّرت | ب ١٢٦و هيئة هذه الحركة في المقالة التي عنده بوجهٍ لا شناعة فيه ولا استحالة، فهذه الهيئة الأخرى التي يسأل عنها الآن هي هيئة باطلة؛ ومع ذلك فإنّ هذه الهيئة لا يحتاج إليها لأنّ بطلميوس قد طعن عليها وبيّن أنّه لا يحتاج إليها، وذلك في نصرته للمنشورات. وقد ذكر مولاي الشيخ قوله في شكوكه قبل ذكره للمنشور الأصغر، وهو قوله إنّها تحرّك، يعني المنشورات، في الحركة التي تظهر مع أنّها أقلّ عددًا من الأكر،

[٢] وبيَّنه: «و» فوق السطر في [ب]. [٥–٦] بطلميوس إنّ أرسطالس استعملها: أرسطو إنّه استعملها [ب].
[٨] أكر: آلة [ب]. [٩] أكر: آلة [ب]. [١١] حركة: الحركة [ل،ب]. [١١] لا تتدافع: لا تتدافع ولا تتراجع [ل]. [١٢] التعاليم: التعليم [ب]. [١٣] منها: فيها [ب]. [١٤] منها: فيها [ب]. [١٦] ومع: ومن [ب].
[١٧] نصرته: تقرير [ل]. [١٩] تحرّك: تحوي [ب]. [١٩] المنشورات: المنشور [ب].

https://doi.org/10.1017/S0957423919000110 Published online by Cambridge University Press

le Šayẖ a cité sa parole, <lors de l'évocation> de ses doutes, avant de parler du petit prisme, à savoir : ils – il veut dire les prismes – se meuvent par le mouvement apparent bien qu'ils soient moins nombreux que les sphères ; cela implique l'impossibilité et les incohérences elles-mêmes dans le fait de poser des sphères qui s'enroulent les unes sur les autres, avec ce que cela implique d'excès en leur nombre ; c'est qu'elles prennent au sein de l'éther un grand espace, et l'on n'en a pas besoin dans les mouvements apparents pour les planètes ; mais elles s'entraînent ensemble dans une même direction. En effet, Ptolémée a considéré que le besoin d'un grand vide pour ces sphères et le fait qu'elles s'entraînent mutuellement forment un argument contre ce mouvement. La raison qui appuie cette critique est que la parole de Ptolémée montre que certains de ses contemporains ont réfuté son hypothèse sur les prismes ; alors il a parlé très longuement en défendant les prismes et en réfutant les sphères par une parole visant à amener ses adversaires à préférer les prismes aux sphères. Ainsi puisque Ptolémée a critiqué cette configuration, puisque cette configuration contredit les principes établis pour les mouvements des planètes et puisqu'on n'en a pas besoin pour les mouvements des planètes, il est clair que cette configuration est fausse. Par ailleurs, il a été établi à l'aide du mouvement d'enroulement une configuration vraie n'impliquant aucune impossiblité, cette configuration étant celle que j'ai montrée dans le mémoire qu'il possède ; l'établissement de la configuration fausse et le questionnement à son propos sont une affaire incohérente qui n'est d'aucune utilité. Néanmoins, nous avons montré que la configuration de ce mouvement est qu'il est comme le mouvement par les sphères que nous avons ordonnées dans le mémoire qu'il possède, si les sphères ont des centres distincts et non pas un centre commun.

Ainsi nous arrivons à dévoiler toutes les obscurités que Monseigneur le Šayẖ a mentionnées, à montrer leur incohérence et à expliquer leur fausseté et leur impossibilité. Il ne reste plus alors, pour le mouvement d'enroulement, qu'une seule configuration vraie qui n'est autre que la configuration que nous avons établie dans le mémoire qu'il possède. C'est ce que nous avons voulu montrer.

ويلزم منه الاستحالة والشناعات بعينها في وضع أكر يلتفّ بعضها على بعض سوى ما يلزم من إفراطها في كثرة العدد، وذلك أنّها تأخذ من الأثير فضاءً كبيرًا وليس يحتاج إليها في الحركات التي تظهر للكواكب؛ لكن إنّما تندفع معًا إلى ناحية واحدة. فقد جعل بطلميوس حاجة هذه الأكر إلى فضاء كبير وتدافعها طعنًا عليها. وعلّة هذا الطعن هو أنّه يتبيّن من كلام | بطلميوس أنّ قومًا من أهل زمنه أنكروا عليه فرضه المنشورات، ل ١٩و فتكلم على المنشورات كلامًا طويلًا ينصر به المنشورات وطعن على الأكر بالقول الذي يقوم على طريق الإلزام لخصومه ليفضل المنشورات على الأكر. وإذا كان بطلميوس قد طعن على هذه الهيئة، وكانت هذه الهيئة مخالفة للأصول المقرّرة لحركات الكواكب وغير محتاج إليها في حركات الكواكب، فقد تبيّن أنّها باطلة. وإذا كان قد تقرر بحركة الالتفاف هيئة صحيحة لا يلزم منها شيء من المحالات وهي الهيئة التي بينتها في المقالة التي عنده، فإثبات هذه الهيئة الباطلة والسؤال عنها من الأغراض الفاسدة التي لا تؤدي إلى فائدة. ومع ذلك فقد بينّا هيئة هذه الحركة وهي أنّها مثل الحركة التي بالأكر التي رتبناها في المقالة التي عنده إذا كانت مراكز الأكر مختلفة لا مركزًا واحدًا.

فقد أتينا على كشف جميع الشبهات التي ذكرها مولاي الشيخ وبيّنا فسادها وأوضحنا بطلانها | واستحالتها، ولم تبق هيئة صحيحة تتمّ بها حركة الالتفاف غير ل ١٩ظ الهيئة التي قررناها في المقالة التي عنده، وذلك ما أردنا أن نبيّن.

وقد تبيّن لي من تضاعيف كلام مولاي الشيخ أنّه يصدق قول بطلميوس في جميع ما | يقوله من غير استنادٍ إلى برهان ولا تعويلٍ على حجة بل تقليدًا محضًا. فهذا هو ب ١٢٦ظ اعتقاد أصحاب الحديث في الأنبياء صلوات الله عليهم، وليس هو اعتقاد أصحاب التعاليم وأصحاب العلوم البرهانية.

٢ وذلك أنّها: في الهامش، وأشار إليها [ل]. ٤ الطعن: الظن [ب]. ٥ أنّه: أن [ب]. ٧ لخصومه: ناقص [ب]. ٨ لحركات: بحركات [ل]. ١٢ هيئة: منها [ب]. ١٤ التي: الذي [ل]. ١٨ حجة: صحّة [ب]. ١٨ فهذا: وهذا [ل]. ١٩ هو: هذا [ل]. ٢٠ وأصحاب: في أصحاب [ل،ب].

https://doi.org/10.1017/S0957423919000110 Published online by Cambridge University Press

De ce qui ressort des propos de Monseigneur le Šayḫ, il est clair qu'il croit en la parole de Ptolémée dans tout ce qu'il dit, sans s'appuyer sur une démonstration et sans invoquer de preuve, mais par pure imitation ; c'est ainsi que les spécialistes de la tradition prophétique ont foi en les prophètes, que Dieu les bénisse. Mais il n'en est pas ainsi des mathématiciens et des spécialistes des sciences démonstratives.

J'ai constaté qu'il lui est pénible que j'aie démenti Ptolémée, et qu'il en éprouve du dépit ; ses propos laissent paraître que l'erreur est étrangère à Ptolémée. Or il y a bien des erreurs chez Ptolémée, en bien des passages de ses livres. Entre autres, ce qu'il dit dans l'*Almageste* : si on l'examine attentivement, on y découvre bien des contradictions. Il a en effet affirmé des principes pour les configurations qu'il mentionne, puis il a proposé pour les mouvements des configurations en contradiction avec les principes qu'il a affirmés, et cela non pas seulement à un endroit <de ce livre>, mais en de nombreux endroits. S'il veut que je les découvre et que je les montre, je dis que j'ai l'intention d'écrire un livre pour établir la vérité en astronomie, dans lequel je montrerai tout d'abord les endroits contradictoires du livre de l'*Almageste*, puis j'y montrerai les endroits exacts, et j'y montrerai ensuite comment j'établis la vérité de ces endroits.

Il a commis aussi des erreurs dans le livre d'optique ; l'une d'elles est une erreur dans la démonstration de l'une des propositions à propos des miroirs, erreur qui prouve la faiblesse de sa conception. Quant au livre des *Hypothèses*, les notions qu'il a mentionnées dans le deuxième chapitre et les configurations qu'il établit à l'aide de sphères et de prismes ont des preuves qui s'évanouissent et s'affaiblissent si on les examine. Dans l'immédiat, j'ai montré son erreur pour les deux prismes qu'il a supposés pour l'épicycle, et je l'ai montrée par une démonstration qui ne comporte pas de doute, en prouvant que quelle que soit la position supposée des deux prismes, une impossibilité infranchissable en découle. Alors si Monseigneur le Šayḫ peut supposer, pour les deux prismes qu'il a cités pour le mouvement de l'épicycle, une position qui permette d'avoir un mouvement de l'épicycle autour du petit cercle sans que l'un des deux prismes quitte son emplace-

https://doi.org/10.1017/S0957423919000110 Published online by Cambridge University Press

ووجدته أيضًا يصعب عليه تغليطي بطلميوس ويمتعض منه؛ ويظهر من كلامه أنّ بطلميوس لا يجوز عليه الغلط. ولبطلميوس أغلاط كثيرة في مواضع كثيرة من كتبه. فمنها أنّ كلامه في المجسطي إذا حُقّق النظر فيه وجد فيه أشياء كثيرة متناقضة؛ وذلك أنّه قرر أصولًا للهيئات التي يذكرها، ثمّ أتى بهيئات للحركات مناقضة للأصول التي قررها، وليست موضعًا واحدًا بل مواضع كثيرة. فإن أحبّ أن أكشفها وأبيّنها فعلت؛ وقد كنت عزمت أن أعمل كتابًا في تحقيق الحقّ من علم الهيئة، وأبيّن | فيه أوّلًا ل ٢٠و المواضع المتناقضة من كتاب المجسطي، ثمّ أبيّن المواضع الصحيحة منه، ثمّ أبيّن كيف تُحقق المواضع المتناقضة.

وله أغلاط في كتاب المناظر؛ فمنها غلط في البرهان في شكل من المرايا يدلّ على ضعف تصوّره. فأمّا كتاب الاقتصاص، فإنّ المعاني التي ذكرها في المقالة الثانية والهيئات التي قررها بالأكر والمنشورات إذا حُقّق النظر فيها بطل بالبرهان واضمحلّ. وفي عاجل الحال قد بيّنت غلطه في هذا الجواب في المنشورين اللذين فرضهما لفلك التدوير، وأوضحته بالبرهان الذي لا شكّ فيه، وبيّنت أنّه، على أي وضع فُرض المنشوران، عرض منهما المحال الذي لا عذر فيه. فإن كان مولاي الشيخ يمكنه أن يفرض للمنشورين اللذين ذكرهما لحركة فلك التدوير وضعًا يتمّ به حركة فلك التدوير حول الدائرة الصغيرة من غير أن يخرج أحد المنشورين عن مكانه ومن غير أن ينقلب فلك التدوير، فيقرره مولاي الشيخ ويبيّنه وينفذه إلي. فإنّ الوضع | الذي قرره مولاي ل ٢٠ظ الشيخ لهذين المنشورين الذي أعتقد أنّه لا يعرض فيه محال قد بطل واضمحلّ. ولعلّه إذا أنعم النظر في هذين المنشورين يلوح له وجه صحيح؛ فإن أمكنه أن يقرر لهذين المنشورين وضعًا | صحيحًا، فإنّه إذا أنفذه إلي ووقفت عليه شكرته عليه شكرًا دائمًا ب ١٢٧و واعتذرت له به وأتوب من بعده أن أغلّط بطلميوس في شيء من أقاويله. وإن لم يمكنه

[٣] النظر فيه: فيه النظر [ل]. [٣] كثيرة: ناقصة [ل]. [٤] يذكرها: في الهامش [ب]. [٧] منه: ناقصة [ب].
[٨] المتناقضة: ناقصة [ب]. [١١] النظر: للنظر [ب]. [١١] بالبرهان: لكرها [ل]. [١٦] مكانه: كلامه [ل].
[٢٠] المنشورين: للمنشورين [ب]. [٢١] واعتذرت له: واعتذر لي [ل].

https://doi.org/10.1017/S0957423919000110 Published online by Cambridge University Press

ment et sans que l'épicycle soit renversé, que Monseigneur le Šayḫ l'établisse, qu'il le montre et qu'il me l'envoie. En fait, la position que Monseigneur le Šayḫ a établie pour ces deux prismes et dont il a cru qu'elle n'implique pas d'impossibilité s'évanouit et disparaît. Il apercevrait peut-être en examinant bien ces deux prismes une manière vraie ; s'il lui est possible d'établir pour ces deux prismes une position exacte, s'il me le fait parvenir pour que je l'examine, je le remercierai à jamais, je lui demanderai de m'excuser et je renoncerai à contredire Ptolémée dans aucune de ses paroles. Mais s'il n'arrive pas à imposer pour les deux prismes une position avec laquelle il accomplisse le mouvement de l'épicycle autour du petit cercle sans qu'il en découle une impossibilité, alors il sera exact que Ptolémée a commis une erreur, Monseigneur le Šayḫ devra reconnaître l'erreur de Ptolémée et il devra renoncer à s'émouvoir pour lui, à l'imiter et à croire à l'une de ses paroles sans qu'elle ne soit étayée par une preuve ou un argument. Je m'attends à une réponse sur ce dernier chapitre pour finir cette affaire. Si Monseigneur le Šayḫ décide d'établir cette réponse et de la présenter, même s'il reste dans sa démonstration quelque chose du comportement du mouvement d'enroulement, qu'il en parle afin que j'en dissipe l'obscurité, si Dieu le veut ; louange et salutation à notre maître Muḥammad.

Vérifié conforme à l'original. Fin du traité sur la résolution des doutes sur le mouvement d'enroulement. Grâces infinies soient rendues à celui qui donne la raison.

أن يفرض للمنشورين وضعًا يتمّ به حركة فلك التدوير حول الدائرة الصغيرة من غير أن يلزم منه محال، فقد صحّ أنّ بطلميوس قد غلط ووجب على مولاي الشيخ أن يعترف بغلط بطلميوس، ووجب عليه أن يتوب من الامتعاض له ويتوب من تقليده ومن تصديقه في شيء من أقاويله التي لا يأتي معها ببرهان ولا حجة. وأنا أتوقّع الجواب عن هذا الفصل الآخر لأتمّ الأمر عليه.

فإن رأى مولاي الشيخ أن يقيم هذا الجواب ويقدمه، وإن كان قد بقي من تبيينه شيء من سلوك حركة الالتفاف ذكره لأكشف الشبهة فيه، إن شاء الله والحمد للّه وصلاتة على سيدنا محمد.

قوبل بالأصل وصحّ. تمّت مقالة حلّ شكوك حركة الالتفاف، ولواهب العقل حمدًا بلا نهاية.

٥ لأتمّ: لأبين [ل]. ٦–٧ فإن رأى ... لأكشف الشبهة فيه: هذه الجملة وردت في [ل] فقط. ٧–٨ والحمد ... محمد: هذه الجملة وردت في [ل] فقط. ٩ قوبل بالأصل وصحّ: هذه الجملة وردت في [ل] فقط. ٩–١٠ تمّت مقالة ... حمدًا بلا نهاية: هذه الجملة وردت في [ب] فقط.

https://doi.org/10.1017/S0957423919000110 Published online by Cambridge University Press

APPENDICE 1 : UN EXTRAIT DU LIVRE II DES *HYPOTHÈSES PLANÉTAIRES* DE PTOLÉMÉE

[1] […] Montrons donc, après cela, ce qui s'ensuit nécessairement pour la position et l'ordre des sphères de Saturne.

Autour de A, centre de l'orbe de l'écliptique appartenant à la deuxième sphère parmi les sphères motrices, celle qui contient le cercle BC, que ce soit comme si le moteur était autour de ce <cercle> et contenait ce <cercle>, si nous l'avions déplacée de sa position la plus haute et si nous l'avions posée le plus à l'extérieur possible de ce qui est sous cette <position>. Faisons passer par A, dans le plan de l'orbe de l'écliptique, la droite DA ; et faisons aussi passer par ce point, dans le plan de l'orbe incliné qui contient la Terre, et par le centre de l'orbe excentrique, la droite HZA ; imaginons sur cette <droite> le centre de l'orbe excentrique – où se meut l'orbe de l'épicycle – au point Z, et le centre de la sphère de l'orbe de l'épicycle Ḥ. Traçons du centre Ḥ deux cercles ṬK et LM, et menons, dans le plan de l'orbe qui est incliné par rapport à l'orbe de l'épicycle, la droite LḤM ; traçons autour du centre Z les figures qui contiennent les orbes des épicycles, c'est-à-dire NHŠ et OFQ ; et nous traçons le cercle RST de centre A, et le cercle qui est sous celui-ci ; et nous imaginons des points T R B C sur l'axe passant par le point A qui est l'axe de l'orbe de l'écliptique, et nous imaginons des points N O Q Š sur l'axe passant par le point Z qui est l'axe du mouvement circulaire de l'orbe excentrique. Aussi, imaginons deux points B′ C′ sur l'axe passant par le centre Ḥ, perpendiculaire à HF, et imaginons deux points Ḏ Ḍ sur l'axe passant par le point Ḥ perpendiculaire à LM et nous imaginons le point L sur l'astre.

Soit les droites déterminées en raison de l'astre et qui lui sont propres : les droites AZ et ḤZ, et la droite qui joint le point Ḥ au centre

[1] L'apparat critique de notre édition s'appuie sur deux manuscrits : Londres add7473 f. 97r-97v [*bāʾ*] et Leyde Or. 180 f. 33r-34v [*lām*]. L'original grec étant perdu, nous avons tenté de restituer les noms des points de la figure en suivant un ordre alphabétique méthodique. Ceci nous a parfois conduit à forcer un peu la lecture de l'arabe, tout en conservant une lecture plus prudente dans l'apparat critique.

فقرة من كتاب الاقتصاص لبطلميوس

[...] فلنبيّن بعد هذا ما يلزم في وضع وترتيب أكر زحل.

فليكن حول ا، الّذي هو مركز فلك البروج للكرة الثانية من الأكر المحرِّكة، وهي الّتي تحيط بدائرة بج، كما كأن يكون المحرِّك حولها أو محيطًا بها لو نقلناها من موضعها الأعلى فجعلناها في أكثر ما يكون خروجًا ممّا هو دونه. ونجيز على نقطة ا في سطح فلك البروج خطّ دا. ونجيز أيضًا عليها في سطح الفلك المائل الّذي يحيط بالأرض وعلى مركز الفلك الخارج المركز خطّ هزا. ونتوهّم عليه مركز الفلك الخارج المركز، الّذي عليه يتحرّك فلك التدوير، نقطة ز، ومركز كرة فلك التدوير ح. ونخطّ على مركز ح دائرتي طك ولم، ونخرج في سطح الفلك المائل عن فلك التدوير خطّ لحم. ونخطّ على مركز ز الأشكال الّتي تحيط بأفلاك التداوير وهي نهش وعفق. ونخطّ على مركز ا دائرة رست والدائرة الّتي دونها. ونتوهّم نقط ت ر ب ج على السهم الّذي يمرّ بنقطة ا الّذي هو سهم فلك البروج. ونتوهّم نقط ن ع ق ش على السهم الّذي يمرّ بنقطة ز الّذي هو سهم حركة فلك الخروج عن المركز المستدير. وأيضًا فإنّا نتوهّم | نقطتي ب ج على السهم الّذي يمرّ بمركز ح القائم على هف على زوايا ل ٣٣ظ قائمة. ونتوهّم نقطتي ذ ض على السهم الّذي يمرّ بنقطة ح القائم على لم على زوايا قائمة. ونتوهّم نقطة ل على الكوكب.

ولتكن الخطوط الّتي تُحدّ بسبب الكوكب الخاصّة له، از زح، والخطّ الّذي بين نقطة ح ومركز الكوكب.

[٣] فليكن: فليكون [ب،ل]. [٣] للكرة: الكرة [ل]. [٣] الثانية: الثابتة [ل،ب]. [٤] أو محيطًا: ومحيطًا [ب]. [٤] نقلناها: تفلناها [ب]. [٥] ممّا هو: من ما [ل]. [٦] دا: جا ا [ب]. [٦] أيضًا عليها: عليها أيضًا [ل]. [٧–٨] خطّ ... الخارج المركز: ناقصة في [ب] بسبب قفزة لتشابه الكلمات. [٨] عليه: فوق السطر [ل]. [١٠] وهي نهش: وهي وهي نهس [ل]. [١١] رست: زشت [ب]، رشت [ل]. [١١] ت ر ب ج: نر بجـ [ب]، نر بجـ تمرّ [ل]. [١٢] ن ع ق ش: نعقس [ل،ب]. [١٣] الخروج عن المركز: البروج عن المركز [ل]. [١٤] ب ج: نح [ب]، قح [ل]. [١٤] بمركز: كر [ل]. [١٥] ذ ض: د ص [ل،ب]. [١٧] ولتكن: وليكن [ل]. [١٧] الّتي: الّذي [ل]. [١٧] از زح: ار وح [ل].

https://doi.org/10.1017/S0957423919000110 Published online by Cambridge University Press

de l'astre.

Or il est clair, d'après ce que nous avons introduit précédemment, que la sphère contenant le cercle BC, quand elle se meut d'est en ouest, meut aussi la sphère contenue entre les cercles BC et NŠ, et qui est la première des sphères de Saturne. Parce que cette sphère motrice se meut autour de l'axe de l'équateur et que les deux pôles de la sphère BNCŠ, qui sont B et C, sont situés sur l'axe de l'orbe de l'écliptique, si la sphère BN se meut, au voisinage de la sphère qui la meut, d'ouest en est, par le mouvement appartenant à l'apogée de l'orbe excentrique, alors se meut aussi avec elle la sphère contenue entre les deux cercles NŠ et OQ. Et parce qu'il y a ici deux autres pôles N et Š qui sont situés sur un autre axe différent de l'axe passant par B et C, <cette dernière sphère> se meut aussi, du côté de H et F, vers l'est, d'un mouvement semblable au mouvement <du centre> de l'orbe de l'épicycle ; et la sphère contenue entre OQ et RT ne se meut pas du mouvement de la sphère NO mais reste en la position appartenant à BN, car les deux pôles de la sphère NO, qui sont N Š, et les deux pôles de la sphère OR, qui sont O Q, sont aussi sur un même axe. Avec la sphère OR se meut la sphère que contient <le cercle> RT parce que les deux pôles de ORT, qui sont O Q, ne sont pas alignés avec les deux points RT sur un seul axe. Et si la sphère que contient RT tourne autour des positions situées sur l'axe contenant B et C, d'est en ouest, de la même grandeur que la sphère BN d'ouest en est, alors celle qui se meut avec le moteur, c'est-à-dire la sphère contenant le cercle BC, et celle que contient le cercle RT, auront toutes deux une même position.

فهو بيّن ممّا قدمنا أوّلًا أنّ الكرة الّتي تحيط بدائرة بجِ، إذا تحرّكت من المشرق إلى المغرب، حرّكت أيضًا الكرة الّتي تحيط بها دائرة بج ودائرة نش الّتي هي أوّل أكر زحل. ولأنّ هذه الكرة المحرِّكة تتحرّك على سهم معدّل النهار، وقطبا كرة بنجش، اللذان هما ب ج، هما موضوعان على سهم فلك البروج، فإنّ كرة بن، إذا تحرّكت بالقرب من الكرة الّتي تُحرِّكها من ناحية المغرب إلى ناحية المشرق بالحركة الّتي هي لأوج الفلك الخارج المركز، تحرّكت معها أيضًا الكرة الّتي تحيط بها دائرتا نش عق. فلأنّ هاهنا أيضًا قطبان آخران وهما ن ش وهما موضوعان على سهمٍ آخر سوى السهم الّذي يمرّ ببج، فإنّها هي أيضًا تتحرّك إلى جانب هف، إلى ناحية المشرق، بمثل حركة مركز فلك التدوير. وليس يتحرّك الكرة الّتي تحيط بها عق ورت مع حركة كرة نع، لكن تبقى على الوضع الّذي لبن، لأنّ قطبي كرة نع، وهما ن ش، وقطبي كرة عر، اللذين هما ع ق، هي أيضًا | على سهم واحدٍ. وتتحرّك مع كرة عر الكرة الّتي ل ٣٤و تحيط بها رت لأنّ قطبي كرة عرت، اللذان هما ع ق، لا يقعان مع نقطتي رت على سهم واحدٍ. وإن دارت الكرة الّتي يحيط بها رت حول هذه المواضع الّتي هي على العمود الّذي عليه بج، من المشرق إلى المغرب، بمثل المقدار الّذي تتحرّك <به> من المغرب إلى المشرق كرة بن، الّتي تتحرّك مع المحرِّك فإنّه تكون الكرة الّتي تحيط بدائرة بج والّتي تحيط بها دائرة رت وضع واحد.

[١] فهو: وهو [ل]. [٢] حرّكت: حركة [ل]. [٢] نش: قس [ب]، يس [ل]. [٣] الكرة: الحركة [ب].
[٣] بنجش: بن جس [ب]، بنجس [ل]. [٤] ب ج: بج [ب،ل]. [٤] بن: فن [ب]. [٥] تُحرِّكها: تحرّكهما [ل]. [٦] نش عق: نس عق [ب]، نس وعق [ل]. [٧] فلأنّ: ولأنّ [ل]. [٧] أيضًا قطبان آخران: قطبين آخرين [ب]. [٧] ن ش: نس [ب]، زس [ل]. [٧] آخر: أخرى [ل]. [٨] هف: بن [ب]، بق [ل].
[٩] مركز: ناقصة [ب،ل]. [٩] يتحرّك: تُحرِّك [ب]. [٩] عق ورت: عف ورث [ب]. [١٠] نع: بع [ب].
[١٠] لأنّ: لا [ب]. [١٠] كرة: لز [ب]. [١٠] ن ش: نس [ب]، يس [ل]. [١١] عر: عف [ل]. [١٢] رت: رث [ب]. [١٢] قطبي: فوق السطر [ب]. [١٢] كرة عرت: عرت [ل]، كرة عز [ب]. [١٢] اللذان: اللذين [ب]. [١٢] يقعان: تقعان [ب]. [١٢] رت: رث [ب]. [١٣] رت: رث [ب]. [١٣] هي: ناقصة [ل].
[١٤] من المشرق إلى المغرب: كُتب فوق السطر في [ل] «من المغرب إلى المشرق». [١٥] كرة: وكرة [ل].
[١٥] الكرة: للكرة [ل]. [١٦] رت: زث [ب].

https://doi.org/10.1017/S0957423919000110 Published online by Cambridge University Press

La sphère contenant le cercle BC, la deuxième, est parmi les sphères motrices, et elle est parmi les sphères de Saturne, donc la sphère contenue par RT est la troisième des sphères motrices, et elle est parmi les sphères de Jupiter.

Quant aux sphères des épicycles, il y a parmi elles la sphère de l'orbe de l'épicycle contenue entre les deux cercles ṬK et LM ; elle est creuse et elle se meut sur un axe B′C′ d'un mouvement égal au mouvement de la sphère entre H et F, mais elle se meut en <sens> opposé. C'est qu'elle meut la portion proche de l'apogée vers l'ouest, et celle du périgée vers l'est. La sphère contenue par le cercle LM, qui est contiguë à l'astre où est <le point> L, est mue par la sphère B′Ḏ vers le côté vers lequel <celle-ci> se meut, parce que ses deux pôles ne sont pas sur cet axe ; et elle se meut avec l'astre, d'un mouvement différent de celui autour de l'axe <de> B′Ḏ – je veux dire que la portion de <cette sphère> proche de l'apogée se déplace vers l'est et que celle du périgée <se déplace> vers l'ouest.

https://doi.org/10.1017/S0957423919000110 Published online by Cambridge University Press

وقد كانت الكرة الّتي تحيط بدائرة بجـ، الثانية، هي من الأكر المحرِّكة وهي من أكر زحل، فتصير الكرة الّتي تحيط بها رت هي الكرة الثالثة من الأكر المحرِّكة وهي من أكر المشتري.

فأمّا من أفلاك التداوير فإنّ كرة فلك التدوير الّتي تحيط بها دائرتا طك ولم الّتي هي مجوّفة تتحرّك على سهم بجـ حركةً مساويةً لحركة الكرة الّتي تحيط بها الّتي هي هف، إلّا أنّها تتحرّك على الخلاف. وذلك أنّها تحرّك القطعة الّتي تلي الأوج إلى المغرب، والّتي البُعد الأقرب إلى المشرق. والكرة الّتي تحيط بها دائرة لم، الّتي هي متّصلة بالكوكب الّذي عليه ل، تُحرِّكها كرة بذ إلى الناحية الّتي تتحرّك إليها، لأنّ أقطابها ليست على سهم تلك. وتتحرّك هي مع الكوكب حركةً مخالفةً لتلك على سهم بذ، أعني أنّ القطعة | منها الّتي تلي الأوج تنقلها إلى المشرق والّتي تلى البُعد ل ٣٤ظ
الأقرب إلى المغرب.

[١] الثانية هي: هي الثابتة [ل]. [١] المحرِّكة: المتحركة [ب]. [٢] رت: زث [ب]. [٤] فأمّا: وأمّا [ل]. [٥] تتحرّك: يتحرّك [ل]. [٥] بها: به [ل]. [٦] تلي: يلى [ل]. [٧] والّتي: والّتي يلى [ل]. [٨] عليه ل: عليه ا [ل]. [٨] بذ: ند [ب]، تد [ل]. [٨] تتحرّك: يتحرّك [ل]. [١٠] بذ: ند [ب]، منذ [ل]. [١٠] تلي: يلى [ل]. [١٠] تلى: يلى [ل]. [١١] الأقرب: كتب أوّلًا « الأبعد » ثمّ ضرب عليها بالقلم وكتب فوقها « الأقرب ».

https://doi.org/10.1017/S0957423919000110 Published online by Cambridge University Press

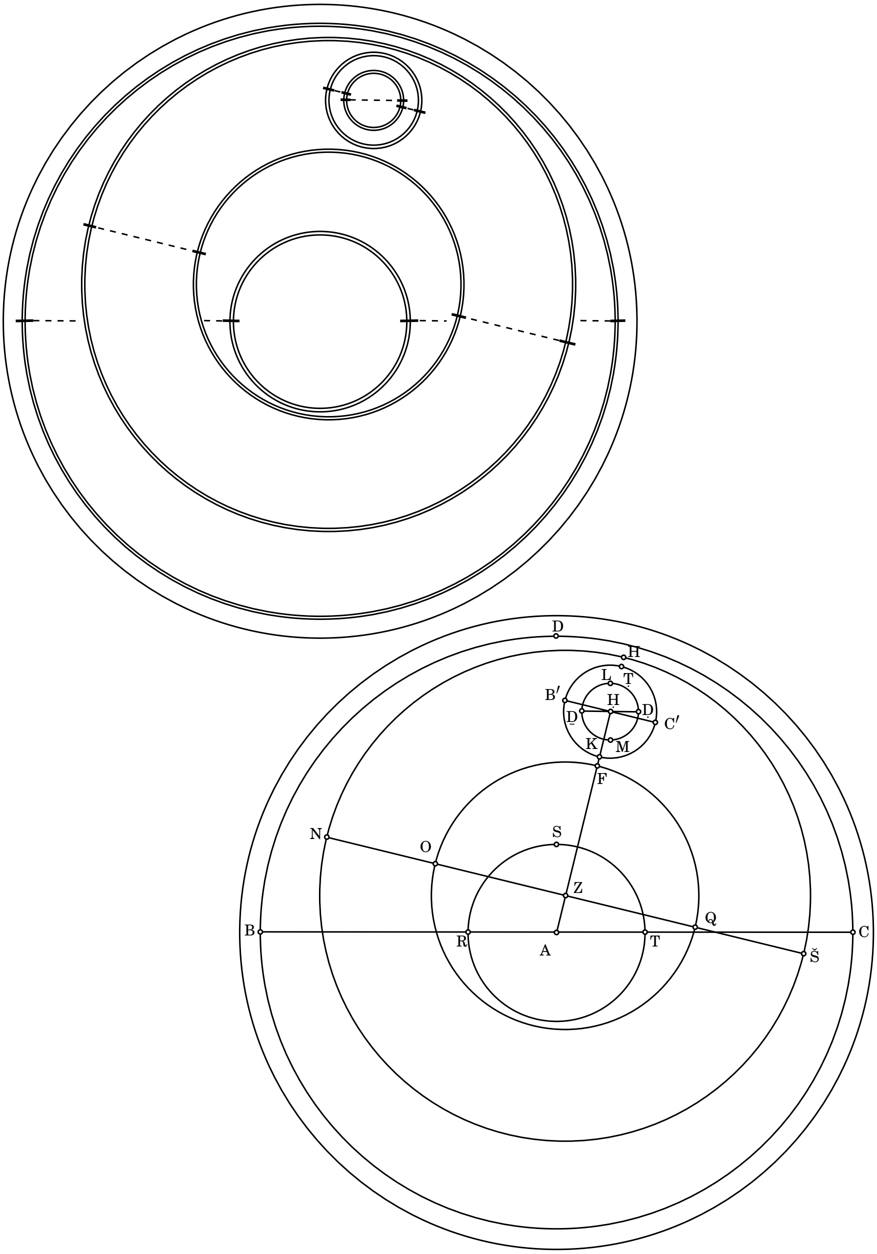

Fig. 7. Les sphères de Saturne : une section perpendiculaire au plan de l'écliptique (mais attention, à moins de faire un rabattement, les droites AC, AZ et ZŠ ne sont pas coplanaires…).

https://doi.org/10.1017/S0957423919000110 Published online by Cambridge University Press

APPENDICE 2 : ᶜUMAR AL-KHAYYĀM ET L'OSCILLATION DU PLAN INCLINÉ DES PLANÈTES INFÉRIEURES

Nous donnons dans cet appendice un extrait de la *Nihāyat al-idrāk* de Quṭb al-Dīn al-Šīrāzī. Celui-ci y résume les travaux d'Ibn al-Haytham sur le mouvement d'enroulement, dans des termes voisins de ceux de son contemporain Naṣīr al-Dīn al-Ṭūsī [66] ; mais Quṭb al-Dīn ajoute une longue citation d'un chapitre que ᶜUmar al-Khayyām aurait annexé au traité perdu d'Ibn al-Haytham. Cette annexe est très intéressante.

ᶜUmar al-Khayyam se propose de modéliser un effet que Ptolémée attribuait à une oscillation du plan incliné de l'excentrique de part et d'autre du plan de l'écliptique, pour les deux planètes inférieures [67].

Pour ce faire, il adjoint deux sphères à l'orbe incliné, analogues aux deux sphères qu'Ibn al-Haytham avait adjointes à l'orbe de l'épicycle. Il y a cependant une différence notable avec le modèle d'Ibn al-Haytham : al-Khayyām fixe les pôles de l'orbe incliné très proches des pôles de la seconde sphère, de sorte que la différence soit « presque complètement insensible ». Il rechigne à les superposer, car une sphère solide fixée par des pôles ne peut être entraînée par le mouvement de son contenant que si celui-ci tourne autour d'un axe distinct. Notons O le centre du monde, $(\mathrm{O},\mathbf{i},\mathbf{j})$ le plan de l'écliptique, $\mathbf{i}$ la direction de l'intersection de l'écliptique avec le plan incliné, $\mathbf{k}$ la direction perpendiculaire à l'écliptique, l'orbe incliné étant la sphère unité, et $\mathbf{t}$ la

66 Cf. *supra*, section 3 p. 38.

67 Cf. Ptolémée, *Composition mathématique*, p. 371 : « Les cercles excentriques des cinq planètes se trouvent inclinés sur le plan du cercle milieu du zodiaque autour du centre du zodiaque, et cette inclinaison est constante pour Saturne, Jupiter et Mars […] Mais pour Mercure et Vénus, les effets changent avec le mouvement des épicycles, et portent toujours la planète vers la même latitude, Vénus vers les ourses, et Mercure vers le midi. » Voir aussi Swerdlow, « Ptolemy's theories of the latitude », où l'amplitude de cette oscillation est notée i_3.

https://doi.org/10.1017/S0957423919000110 Published online by Cambridge University Press

direction de l'axe de l'orbe incliné, avec, dans la base $(\mathbf{i},\mathbf{j},\mathbf{k})$:

$$\mathbf{t} = \begin{pmatrix} 0 \\ -\sin i_3 \\ \cos i_3 \end{pmatrix},$$

où i_3 est l'inclinaison maximale du plan incliné par rapport à l'écliptique. Supposons que le centre de l'épicycle est situé, à l'instant initial, dans la direction suivante, à l'apogée de l'excentrique, et à son extrémité nord (pour Vénus) :

$$\begin{pmatrix} 0 \\ \cos i_3 \\ \sin i_3 \end{pmatrix}.$$

La direction du centre de l'épicycle à un instant quelconque sera alors décrite en fonction du paramètre κ par :

$$\mathrm{R}_{\mathbf{k},-\kappa} \circ \mathrm{R}_{\mathbf{t},\kappa} \circ \mathrm{R}_{\mathbf{t},\kappa} \begin{pmatrix} 0 \\ \cos i_3 \\ \sin i_3 \end{pmatrix}.$$

On a représenté cette ligne, fig. 8, pour $i_3 = 5°$. Mais on n'obtient pas tout à fait l'effet souhaité, puisque la ligne oscille entre deux cercles parallèles situés de part et d'autre du plan de l'écliptique. Pour avoir une trajectoire qui reste constamment au nord de l'écliptique, comme Ptolémée le souhaite pour Vénus, il convient donc de translater cette ligne vers le nord, ou bien – comme nous l'avons fait sur la figure – de poser le centre du monde en $\mathrm{T} = (0, 0, -\sin i_3)$ au sud du centre O des sphères.

Le texte de Quṭb al-Dīn al-Šīrāzī est établi au moyen des trois manuscrits suivants : Majlis Šūrā 6457 [*mīm*], Londres add7482 [*lām*], Paris 2518 [*bāʾ*].

https://doi.org/10.1017/S0957423919000110 Published online by Cambridge University Press

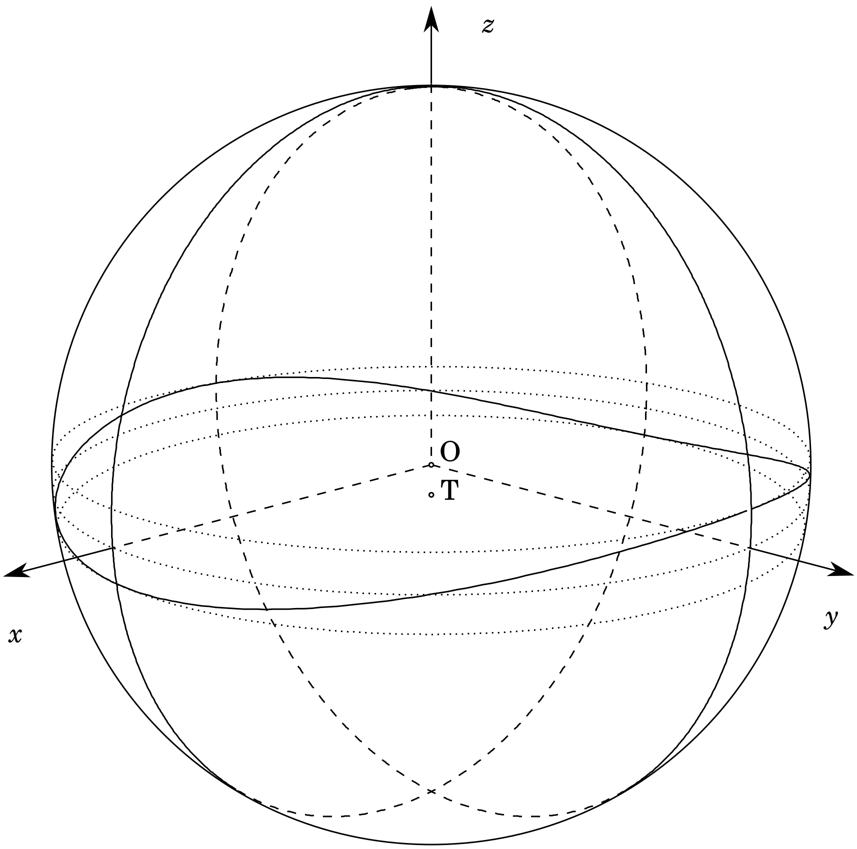

FIG. 8. Trajectoire du centre de l'épicycle de Vénus, selon al-Khayyām.

https://doi.org/10.1017/S0957423919000110 Published online by Cambridge University Press

La compréhension dernière dans la connaissance des orbes
par Quṭb al-Dīn al-Šīrāzī
Dixième chapitre
Les latitudes des cinq astres errants

Comme il est apparu que Ptolémée était revenu sur ce qu'il avait cru du rapprochement des deux ceintures et du mouvement des apogées sur les petits cercles, par conséquent il n'y a pas besoin des choses arbitraires que les Modernes ont appliquées pour le corriger ; mais comme il est possible que ce sur quoi il est revenu soit pourtant la vérité, alors rien n'empêche les Modernes de continuer de s'efforcer à déterminer des principes occasionnant de tels mouvements.

Parmi les principes qui exigent le rapprochement des deux ceintures d'après ce qui précède, le dernier principe, dont nous avons donné le modèle, dans lequel il y a augmentation et diminution de l'inclinaison, s'accomplit seulement par l'ajout de trois orbes contenant la Terre, suivant la manière expliquée là-bas. <Ce principe> est excellent puisqu'il implique l'effet visé tel qu'il est, sans manquer d'aucune chose à première vue ; mais c'est à examiner et on l'indiquera plus tard si Dieu le veut.

Quant au fait que sa cause serait que chaque <planète> aurait un orbe entraînant l'orbe incliné en latitude sans qu'il achève une révolution complète (parce que les mouvements des orbes sont volontaires), rien n'empêche que la révolution ne s'achève pas comme il a été dit ; donc on ne le rejette pas, même si quelqu'un a dit d'abord qu'il n'était pas permis que la révolution ne s'achève pas et qu'il rejettait cela.

Quant au fait que sa cause est ce que l'éminent philosophe ᶜUmar al-Khayyām – Dieu lui accorde sa miséricorde – a indiqué dans un chapitre qu'il a annexé à l'épître d'Abū ᶜAlī ibn al-Haytham sur le mouvement d'enroulement, je n'y ai pas vu quelle en était l'intention. Mais je l'ai copié tel que je l'ai trouvé pour qu'on puisse l'examiner, et peut-être quelqu'un le découvrira-t-il. Il a dit :

« Quant à ce qu'a mentionné Ptolémée sur le mouvement de l'<orbe> incliné des planètes inférieures, que le point apogée est tantôt au nord, tantôt au sud, il faut le représenter comme suit.

كتاب نهاية الادراك في دراية الأفلاك
لقطب الدين الشيرازي
الباب العاشر
في عروض الخمسة المتحيِّرة

وإذ قد ظهر أنّ بطلميوس قد رجع عمّا كان يظنّه من تقارب المنطقتين وحركة الذري على الدوائر الصغار فلا حاجة إذن إلى التعسُّفات التى يرتكبها المتأخّرون في تصحيحها؛ لكن لمّا كان من الممكن أن يكون المرجوع عنه هو الحقّ، لا جرم المتأخّرون لا يزالون يحتالون في استخراج أصول يحدث منها تلك الحركات.

فمن الأصول المقتضية لتقارب المنطقتين على ما سبق، الأصل الأخير، الذي جعلنا المثال الذي فيه ازدياد الميل وانتقاصه، وإنّما يتمّ بزيادة أفلاك ثلاثة محيطة بالأرض على الوجه المشروح ثمّة. وهو في نهاية الحسن إذ يلزم منه المقصود على ما هو عليه من غير إخلال بشيء أصلًا في بادئ الرأي؛ وفيه نظر ستجيئ الإشارة إليه إن شاء الله.

وأمّا أنّ سببه أنّ لكلّ منهما فلكًا يحرّك المائل في العرض من غير أن تتمّم الدورة (لكون حركات الأفلاك إراديّة)، فلا مانع من أن لا تتمّم الدورة على ما قيل؛ فلا يمنع، وإن كان قول من قال أوّلًا لا يجوز أن لا تتمّم الدورة ويمنع.

وأمّا أنّ السبب فيه ما ذكره الحكيم الفاضل عُمر الخيّام رحمه الله في فصل ألحقه برسالة أبي علي بن الهيثم في حركة الالتفاف، فلم يترآى لي منه المقصود. ولكن نقلته كما وجدته ليُنظر فيه، فلعلّ أحدًا يطلع عليه. قال:

« وأمّا ما ذكره بطلميوس في حركة مائل السفليين من كون نقطة الأوج تارةً في

[٥] عمّا: على ما [ب]. [٩] المقتضية: المقضية [م،ب]. [٩] الأصل: ناقصة [ب]. [١٠] الذي: ناقصة [ب،ل]. [١٢] عليه: ناقصة [ب]. [١٢] إخلال: اختلال [م]. [١٦] لا: ناقصة [ب]. [١٦] الدورة: الذروة [ب]. [١٧] الحكيم: ناقصة [م،ل]. [١٧] رحمه الله: ناقصة [م]. [١٨] لي: ناقصة [ب]. [٢٠] من كون: وكون [م،ب].

https://doi.org/10.1017/S0957423919000110 Published online by Cambridge University Press

« On suppose qu'un orbe contient l'orbe incliné et qu'il le meut d'ouest en est d'un mouvement proche de son propre mouvement en grandeur, de sorte que l'astre arrive au nœud deux fois par révolution. L'arrivée au nœud se fait pendant que le centre de l'épicycle traverse la moitié de l'orbe incliné dont le centre est le centre du Monde. Or on sait que l'apogée, pendant cet intervalle, complète sa révolution jusqu'au nœud qui est à l'est. Le pôle de cet orbe doit être dans <la région> entre les deux pôles de l'écliptique et de l'excentrique, de sorte que chaque point de la ceinture de l'excentrique décrive un circuit qui coupe l'écliptique ; il est alors nécessaire que chaque point de la ceinture de l'excentrique soit tantôt au nord, tantôt au sud. Si donc le centre de l'épicycle de Vénus est dans la moitié de l'apogée, il est au nord ; et ayant atteint les nœuds il est dans l'orbe de l'écliptique ; alors, si la moitié de l'excentrique <contenant> le périgée part de l'extérieur vers le nord, le centre de l'épicycle est dans cette moitié, et le centre de l'épicycle est donc toujours nécessairement au nord ou sur la ceinture. Et ainsi, inversement, pour Mercure, au sud.

« La grandeur qui est attachée à la différence des inclinaisons dans ces deux orbes excentriques s'amenuise beaucoup et est presque complètement insensible, mais cette position implique que l'apogée de l'astre se meut en coupant deux fois par an l'orbe de l'écliptique ; à cause de cela, le mouvement des astres et des astres moyens est modifié, ainsi que le lieu de l'apogée et du périgée. C'est pourquoi il faut un autre orbe contenant ces deux orbes, qui leur soit concentrique, dont le pôle est le pôle de l'écliptique ou très proche de lui, et qui meuve les deux orbes d'est en ouest d'un mouvement égal au mouvement du deuxième orbe.

« Ce troisième <orbe> conserve l'apogée, le périgée et les autres points en leurs positions relatives à l'écliptique, le deuxième orbe meut l'inclinaison vers le nord et vers le sud, et le premier orbe meut le centre de l'épicycle comme le mouvement du Soleil, d'une révolution par an. »

https://doi.org/10.1017/S0957423919000110 Published online by Cambridge University Press

الشمال وتارةً في الجنوب فيجب أن يُتصوّر هكذا:

« يُفرض فلك يحيط بالمائل ويحرّكه من المغرب إلى المشرق حركةً قريبةً من حركته في المقدار، بحيث يصل الكوكب إلى العقدة في كلّ دورة مرّتين. ويكون الوصول إلى العقدة | في مدّة قطع مركز التدوير نصف المائل الذي مركزه مركز العالم. ب ١٣٤و فمعلوم أنّ الأوج في هذه المدّة يوافي مداره إلى العقدة التي عند المشرق. ويجب أن يكون قطب هذا الفلك فيما بين قطبي البروج والخارج، بحيث يكون كلّ نقطة من منطقة الخارج تدور في مدار قاطع للبروج؛ فيلزم أن يكون كلّ نقطة من منطقة الخارج تارةً في الشمال وتارةً في الجنوب. فإذا كان مركز تدوير الزهرة في النصف الأوجي، كان في الشمال؛ وعند موافاة العقدتين، يكون في فلك البروج؛ فإذا أخذ النصفُ الحضيضي من الخارج <أن> يصير إلى الشمال كان مركز التدوير في ذلك النصف، فيلزم أن يكون مركز التدوير في الشمال أبدًا أو في المنطقة. وهكذا عطارد في الجنوب بالعكس.

« والقدر الذي يلحق من اختلاف الميول في هذين الفلكين الخارجي المركز فيسير جدًا لا يكاد يُحسّ ألبتّة؛ لكن من هذا الوضع يلزم أن يتحرّك أوج الكوكب في السنة مرّتين قاطعًا لفلك البروج، فتتغيّر بسببه حركة الكواكب والأوساط وموضع الأوج والحضيض. فلذلك يجب أن يكون فلك آخر يحيط بهذين الفلكين وعلى مركزهما وقطبه قطب البروج أو قريب منه جدًّا يحرّك الفلكين من المشرق الى المغرب حركة مساوية لحركة الفلك الثاني.

« فيكون هذا الثالث يحفظ الأوج والحضيض | وسائر النقط على مواضعها من ل ٧٤ظ البروج، والفلك الثاني يحرّك الميل إلى الشمال والجنوب، والفلك الأوّل يحرّك مركز التدوير مثل حركة الشمس في السنة دورة واحدة. »

[٢] بالمائل: بالمائلة [ل]. [٥] يوافي: يوافي في [م،ل]. [٦] بين: ناقصة [ل]. [١٠–١١] في ذلك النصف، ... مركز التدوير: ناقصة [م]. [١١] أبدًا: ناقصة [م]. [١٢] في الجنوب: بالجنوب [م]. [١٤] الوضع: الموضع [ب]. [١٦] يحيط: محيط [م].

https://doi.org/10.1017/S0957423919000110 Published online by Cambridge University Press

Il a dit : « Ceci n'implique ni trou ni vide, et ce n'est pas différent de l'affirmation de Ptolémée dans ce qu'il a dit du mouvement d'inclinaison sans que cela achève la révolution dans les affaires célestes » ; et quelqu'un peut dire que ceci n'implique pas non plus ce qui est visé, car sa faiblesse n'est pas masquée, pas même à un idiot – pour ne pas parler d'un intelligent.

Quant à la raison pour laquelle chacune des planètes inférieures a un grand épicycle dont le centre est sur la ceinture de l'orbe incliné, et le centre de l'épicycle de Vénus est au nord du centre du grand <épicycle>, c'est-à-dire <au nord> du plan de l'orbe incliné, et pour Mercure <il est> au sud, dont on déduit que le centre de l'épicycle de Vénus est toujours au nord, et pour Mercure, toujours au sud : cette raison est faible. Car supposer que le centre de l'épicycle de Vénus est à l'extérieur du plan de l'orbe incliné n'implique pas que le centre de leurs épicycles soit toujours au nord <ou toujours au sud> ; à moins qu'on suppose la distance de leur centre au plan de l'orbe incliné plus grande que la distance de l'orbe incliné au parécliptique, mais ceci ne s'accorde pas avec ce que Ptolémée a trouvé par l'observation : que le centre de l'épicycle arrive à la ceinture quand il est au nœud, que son éloignement maximal de la ceinture est de la grandeur de l'inclinaison maximale de l'orbe incliné, et qu'il se meut sur l'orbe incliné (à moins de dire que ces choses ne sont qu'une intuition de Ptolémée, qu'elles n'ont pas été trouvées par l'observation car la grandeur <de cette inclinaison> est tout à fait insensible). La faiblesse <de cet argument> n'est pas cachée.

Quant à la cause de l'inclinaison des apogées, Ibn al-Haytham a composé un traité où il a mentionné les corps qui font ces mouvements, et il a ajouté, pour chacun des épicycles des cinq <planètes>, deux sphères en vue de l'inclinaison ; et dans les deux planètes inférieures, deux autres sphères en vue de la déviation.

Son affirmation consiste à supposer une sphère qui entoure l'épicycle et qui a deux pôles dont la distance aux extrémités du diamètre passant par l'apogée et le périgée, symétriquement de part et d'autre, est de la grandeur de l'inclinaison maximale de ce diamètre – pour

قال: «ولا يلزم من هذا الخرق ولا الخلاء ولا يخالفه قول بطلميوس فيما ذكره | من حركة الميل وإلّا أن لا تتمم الدورة في الأمور السماوية.» ولقائل ان يقول ولا ب ١٣٤ظ المقصود أيضا إذ اختلاله لا يخفى على غبي فضلا عن ذكي.

وأمّا أنّ السبب أنّ لكلّ من السفليين تدويرًا كبيرًا مركزه على منطقة المائل، ومركز تدوير الزهرة شمالي عن مركز الكبيرة، أي عن سطح المائل، ولعطارد جنوبي، ليلزم منه كون مركز تدوير الزهرة دائمًا شماليًا، ولعطارد جنوبيًا: فضعيف. لأنّ فرض مركز تدوير الزهرة خارجًا عن سطح المائل لا يستلزم كون مركز تدويرهما شماليًا أبدًا؛ إلّا أن يُفرض بعد مركزيهما عن سطح المائل أكثر من بعد المائل عن الممثّل، ولكنّه لا يوافق ما وجده بطلميوس بالرصد: من وصول مركز التدوير إلى المنطقة عند العقدة، وكون غاية بعده من المنطقة بقدر غاية ميل المائل، وكونه متحرّكًا على المائل (اللّهمّ إلّا أن تقال هذه الأمور إنّما هي حدس حدسه بطلميوس وليس ممّا وجد بالرصد لأنّ مقداره ليس ممّا يحسّ به ألبتة). وضعفه لا يخفى.

وأمّا سبب ميل الذري، فقد عمل ابن الهيثم رسالة ذكر فيها الأجسام التي تحرّك هذه الحركات، فزاد في كلّ تدوير من تداوير الخمسة كرتين لأجل الميل، وفي السفليين كرتين أخرتين لأجل الانحراف.

وتقريره أن يفرض كرة تحيط بالتدوير ويكون لها قطبان بعدهما عن طرفي القطر المارّ بالذروة والحضيض، في جهتين متبادلتين، بقدر غاية ميل ذلك القطر لذلك الكوكب عن السطح الذي هو فيه فيكون عديم الميل. ويفرض لها حركة مثل التي فرضت

[١] ولا الخلاء: و الخلاء [م]. [١] يخالفه: مخالفة [ب،ل]. [٢] وإلّا أن لا: ولا ان لا [ب،ل]، ولا ان [م]. [٤] كبيرًا مركزه: كبير منطقته [م]. [٦] مركز: ناقصة [ل،م]. [٦] فرض: فضل [م]. [٧] خارجًا: خارج [ل]. [٧] تدويرهما: يعني مركز تدوير عطارد ومركز تدوير الزهرة. [٨] ولكنّه لا: ولا [ب]. [٩] وجده: ذكره [م]. [١٢] به: ناقصة [م]. [١٣] الذري: الذي [ب]. [١٣] رسالة: مقالة [م]. [١٨] فيكون: يكون [ب،م]. [١٨] مثل: ميل [م]. [١٨] التي: الذي [ل،م].

https://doi.org/10.1017/S0957423919000110 Published online by Cambridge University Press

cette planète – par rapport au plan dans lequel il est quand il n'a pas d'inclinaison. Il suppose que <cette sphère> a un mouvement comme celui qu'on a supposé pour le petit cercle mentionné pour cette planète, afin que les deux extrémités du diamètre mentionné, par son mouvement, se meuvent sur un circuit égal au petit cercle lui-même, d'un mouvement uniforme par rapport à un point autre que son centre (comme on l'a supposé pour le petit cercle).

Mais il s'ensuit du mouvement <de cette sphère> un mouvement de toutes les parties de l'épicycle jusqu'au diamètre du milieu. Celui-ci quitte sa position à cause de ce mouvement : son extrémité du matin devient <extrémité> du soir, et inversement. Il en est de même pour les autres parties des épicycles. À cause de cela, il faut donc supposer une autre sphère entre cette sphère et la sphère de l'épicycle, ayant pour pôles les deux extrémités du diamètre mentionné, c'est-à-dire les deux points de l'apogée et du périgée. On suppose qu'elle a un mouvement égal au mouvement même mentionné pour la première sphère, mais en sens contraire. <Ce mouvement> ramène toutes les parties de l'épicycle qui étaient sur le point de quitter leur position nécessaire ; il ne reste aucun effet du mouvement de la première sphère, sauf ce qui est nécessaire à cause du mouvement du diamètre mentionné et de ce qui lui est contigu dans le plan de la ceinture de l'épicycle.

Pour chacune des deux <planètes> inférieures, on suppose deux autres sphères en vue de la déviation, de la même manière, pour que l'une fasse dévier le diamètre du milieu de l'épicycle, et pour que l'autre conserve la position du reste de l'épicycle afin que l'apogée ne devienne pas périgée, ni le périgée, apogée.

Évidemment, si on pose que les deux pôles de la sphère supposée d'abord sont à une distance des deux pôles de l'épicycle égale à la distance qu'il a supposée entre eux et les deux extrémités du diamètre de l'épicycle, alors on atteint ainsi aussi ce qu'il cherchait, c'est-à-dire que l'apogée se meut sur le petit cercle. <C'est> comme ce qu'on a vu au début du livre, quant au fait qu'un seul mobile suffise pour les deux irrégularités : les deux mouvements d'accès et récès, et d'augmentation et diminution de l'inclinaison.

للدائرة الصغيرة المذكورة لذلك الكوكب، ليتحرّك بحركتها طرفا القطر | المذكور على م ٤٤ظ مدار مثل الدائرة الصغيرة بعينها، حركةً متشابهةً عند نقطة غير مركزها (كما فرضت للدائرة الصغيرة).

لكن يلزم من حركتها | حركة جميع أجزاء التدوير حتّى القطر الأوسط. فإنّه يزول ب ١٣٥و بتلك الحركة عن وضعه: فيصير طرفه الصباحي مسائيًا، وبالعكس. وكذلك في سائر أجزاء التداوير. فيجب لذلك أن نفرض كرة أخرى بين هذه الكرة وبين كرة التدوير، قطباها طرفا القطر المذكور أعني نقطتي الذروة والحضيض. ويفرض لها حركة مساوية للحركة المذكورة في الكرة الأولى بعينها، لكنّها إلى خلاف تلك الجهة، لِردّ جميع أجزاء التدوير التي كادت أن تزول عن وضعها الواجب؛ ولا يبقى فيها من الكرة الأولى أثر حركة، سوى ما كان يلزم بسبب حركة القطر المذكور وما يتّصل به من سطح منطقة التدوير.

ويُفرض لكلّ واحد من السفليين كرتان أخرتان لأجل الانحراف، بهذه الصفة بعينها، لتُحرَّف إحداهما القطر الأوسط من التدوير وتحفظ الأخرى وضع باقي التدوير كي لا تصير الذروة حضيضًا والحضيض ذروةً.

ولا يخفى أنّه إن جعل قطبى الكرة التي فرضها أوّلًا على بُعد من قطبي التدوير مساوٍ للبعد الذي فرضه بينهما وبين طرفي قطر التدوير، لَتمّ مقصوده بذلك أيضًا، أعني تحرّك الذروة على الدائرة الصغيرة، بمثل ما مرّ في أوائل الكتاب في الاكتفاء بمحركٍ واحدٍ للاختلافين: أعني حركتي الإقبال والإدبار، وازدياد الميل وانتقاصه.

[١] المذكورة: المذكورة التي [ب،ل]. [١] لذلك الكوكب... المذكور: تردد [م]. [١] لذلك الكوكب: لذلكوكب [ب]. [١] ليتحرّك: فيتحرك [م]. [١] طرفا: طرف [ب]. [٦] فيجب: بحيث [ب]. [٦] بين هذه الكرة وبين: من هذه الحركة ومن [ب]. [٨] في الكرة: ناقصة [م]. [٨] لكنّها: ناقصة [م]. [٩] فيها: ناقصة [م]. [١٠] به: ناقصة [م]. [١٧] بمثل: مثل [ب،م]. [١٧] أوائل: اول [م].