

LE TRAITE DE L'EMPLOI DU GLOBE CELESTE D'AL-'URDĪ (XIIIe siècle)

Hossam ELKHADEM

LES GLOBES CELESTES ISLAMIQUES

Le monde islamique, pas plus que l'antiquité classique, ne conçut de cartes du ciel à deux dimensions qui, avec un système de coordonnées, auraient ressemblé aux cartes terrestres. Seul le rete de l'astrolabe fait exception. Les cartes d'étoiles n'apparurent qu'au début du XV^e siècle en Europe (1). Les manuscrits astronomiques islamiques n'offraient jamais une vision complète du ciel, avec les constellations assemblées dans un système coordonné et cohérent : chaque constellation, au contraire, était dessinée séparément, sans rien qui la rattachât aux groupes d'étoiles voisins. Seuls les globes célestes pouvaient résoudre le problème de ces constellations isolées comme elles apparaissaient sur les folios des manuscrits. D'autre part, les globes célestes sont valables pour toutes les latitudes de ce qui leur donne un avantage par rapport aux astrolabes.

Un globe céleste islamique contient en général le cercle écliptique divisé en 12 sections de 30° chacune représentant le zodiaque tandis que le cercle équatorial est gradué par degré. Un cercle méridien gradué permet de trouver les coordonnées des étoiles et le cercle d'horizon est également gradué. Un globe pouvait être incliné pour correspondre à n'importe quelle latitude en ajustant le cercle méridien par rapport au cercle d'horizon ou en changeant la position de son axe dans le cas d'un globe à cercle méridien fixe.

Différentes espèces de globes circulaient dans le monde islamique. Al-Bīrūnī, dans son *Fi tasfīh al-ṣūwar wa tabfīh al-kuwar* parle de globes de différentes dimensions. Selon lui, la fonction d'un globe céleste est de donner une représentation générale et complète du ciel (2). Al-Ṣūfī affirme avoir examiné "une grande sphère" faite par 'Alī Ibn 'Īsā al-Ḥarrānī (3) ce qui laisse supposer l'existence de petites sphères. Les globes de grandes dimensions étaient chers et souvent faits

-
1. Deborah J. WARNER, *The Sky Explored, Celestial Cartography 1500-1800* (New York — Amsterdam : Alan R. Liss — Theatrum Orbis Terrarum 1979) : X.
 2. *Fi tasfīh al-ṣūwar wa tabfīh al-kuwar* (Leiden, Rijksuniversiteit te Leiden, MS 1068 14 (15), fol. 2v.) Une traduction allemande est publiée par Heinrich SUTER "Über die Projektion der Sternbilder und der Länder von Al-Bīrūnī" in *Beiträge zur Geschichte der Mathematik bei den Griechen und Arabern, Abhandlungen zur Geschichte der Naturwissenschaften und der Medizin* 4 (1922) : 79-93.
 3. *Ṣūwar al-kawākib al-thābita*, traduit en français par H.C.F.C. SCHJELLERUP, sous le nom *Description des étoiles fixes, composées au milieu du dixième siècle de notre ère par l'astronome persan Abd-Al-Rahman Al-Ṣūfī* (St. Petersburg : Académie Impériales des Sciences, 1874) : 31.

d'argent ou d'une autre matière précieuse. Al-Qifī explique que l'astrolabiste et fabricant d'instruments Ibn al-Sanbādī racontait qu'en 435/1043 il avait vu au Caire, dans une bibliothèque publique, deux globes. L'un "en bronze", était fait par Ptolémée et, selon l'inscription, avait été acquis par le prince Khālīd Ibn Yazīd Ibn Mu'awīya (4). "Je me suis demandé en le contemplant quel âge il avait et j'ai trouvé qu'il avait 1250 ans. L'autre globe avait été fait par Abi al-Ḥusain al-Ṣūfī pour le roi 'Aḍud al-Dawla (5). Il pesait 3000 dirhams et avait coûté 3000 dinars" (6). L'autre espèce de globes était beaucoup plus petite et était faite de matériaux plus modestes : bois, cuivre, alliages variés, papier mâché, pulpe de papier ou tissu. Cependant, la plupart d'entre eux étaient en métal.

Comme source sur la fabrication des globes célestes, les astronomes du moyen âge islamique ont eu comme référence disponible le livre VIII, 3, de l'*Almageste* de Ptolémée. Cependant les sources islamiques elles-mêmes ne sont pas explicites concernant les techniques de construction des globes célestes. Toutefois, on trouve dans les *Libros del saber de astronomia* (7) une traduction en castillan du traité de Quṣṭā Ibn Lūqā *Kitāb al-'amal bi al-kūra al-falakīyya* (8) qui jette quelque lumière sur le sujet. Par ailleurs il est très probable que les astronomes musulmans connaissaient des globes célestes grecs qu'ils purent utiliser comme modèles.

Dans la traduction castillane de Quṣṭā Ibn Lūqā, on trouve des indications sur la façon de construire un globe (9) : après avoir examiné les qualités et les défauts de chaque matériau possible, il décrit les techniques de construction d'un globe en bois, solide ou creux. Dans le cas d'un globe solide, l'artisan doit indiquer sur son bloc de bois deux points qui représentent les deux pôles, puis il donne à l'ensemble une forme sphérique en travaillant au tour. Les constellations seront ensuite dessinées ou peintes sur ce globe.

Dans le cas d'un globe creux, on part de disques de bois coupés dans une sphère puis évidés et ajustés ensemble à la colle. La surface du globe est polie et les constellations y sont alors dessinées.

On peut aussi fabriquer un globe creux à partir d'anneaux de bois qui sont ensuite recouverts d'abord de parchemin appliqué avec une colle très forte puis de cuir. Le cuir est poli jusqu'à ce qu'on obtienne une sphère. Cette sphère est enduite de plâtre et polie jusqu'à obtention d'une sphéricité parfaite.

Une autre technique consiste à assembler des anneaux de bois graduellement plus petits jusqu'aux extrémités. Ces anneaux sont collés ensemble et le volume ainsi obtenu est couvert de cuir puis de plâtre.

4. Alchimiste qui, selon les sources islamiques, patronna les premières traductions scientifiques faites en arabe ; (m. ca 85/704).

5. Un sultan buwayhid (325/936-373-983) patron et élève d'al-Ṣūfī.

6. *Tārīkh al-ḥukamā'* ; éd. Julius LIPPERT (Leipzig : Dieterich'sche Verlagsbuchhandlung, 1903) : 440.

7. *Libros del saber de astronomia del rey D. Alfons X* de CASTILLA avec commentaire par Don Manuel Rico y Sinobas (Madrid : Don E. Aguado, 1863-1867) : Livre VII.

8. W.H. WORREL, "Quṣṭā Ibn Lūqā on the use of the Celestial Globe," *Isis*, 35 (1944) : 285-293. Pour les différents titres du traité de Quṣṭā Ibn Lūqā, voir Fuat SEZGIN, *Geschichte des Arabischen Schrifttums*, Band VI (Leiden : Brill, 1978) : 181.

9. Emilie SAVAGE-SMITH, *Islamicate Celestial Globes, Their History, Construction and Use* (Washington, D.C. : Smithsonian Press, 1985) : 88 ff.

La plupart des globes célestes islamiques existants sont des sphères métalliques creuses, parmi ceux-ci on distingue ceux qui ont une jointure apparente et ceux qui n'en ont pas. Les sources littéraires médiévales restent muettes en ce qui concerne la fabrication des globes sans jointure tandis que les *Libros del saber de astronomia* expliquent sommairement les techniques pour construire les autres types de globes. Emilié Savage-Smith les résume ainsi : Un globe céleste creux est fait de deux hémisphères fondus ou martelés séparément puis soudés ou joints ensemble par une bande intérieure. L'ancienne technique métallurgique de cire perdue a été également appliquée dans la fabrication des globes creux (10).

D'autre part, lorsque al-Šūfī parle des positions des étoiles, il mentionne des globes célestes qu'il a lui-même examinés, et il nous donne l'impression qu'il s'agissait d'un objet facilement accessible. Dans le *Šūwar al-kawākib* il critique deux types de globes dont aucun ne lui donne satisfaction sur le plan scientifique. Le premier type est fait par des artisans peu familiers avec l'astronomie qui ne déterminaient pas eux-mêmes scientifiquement la position des étoiles sur le globe. L'autre type de globes est basé sur des catalogues d'étoiles dont les auteurs se contentaient d'ajouter quelques minutes aux longitudes de Ptolémée tout en prétendant s'être livrés à des observations originales. Un autre point qu'al-Šūfī critique est la mauvaise indication des magnitudes ou même des localisations erronées dues, selon lui, à un manque d'observations personnelles.

La littérature astronomique du moyen âge islamique mentionne quant à elle trois types (11) de globes célestes. Dans son *Kitāb al-'amal bi al-kūra al-falakīyya* Qusṭā Ibn Lūqā décrit le plus simple des trois types qui est probablement aussi le plus répandu : ce globe a un cercle méridien et un cercle horizontal divisés chacun en 360° et un pied. Sur le globe lui-même sont dessinés l'écliptique et l'équateur également divisés en 360°. Six grands cercles coupent l'écliptique en 12 sections de 30°, chacune représentant un signe du zodiaque. Le globe ne montre que les étoiles les plus marquantes, celles de l'astrolabe, sans reproduire les silhouettes des constellations. Le long de l'écliptique sont tracées les 28 *manāzil* lunaires (12).

Le second type de globes est décrit par al-Battānī (13). Il consiste en une sphère armillaire pivotante. Il a une armille supplémentaire qui pivote autour du zénith et du point opposé pour pouvoir mesurer les altitudes et les azimuths ailleurs que sur le méridien. Ces globes sont pourvus d'une alidade mobile qui pointe vers le haut et vers le bas en direction du soleil.

Le troisième type de globes célestes islamiques possède un quadrant gradué qui permet de mesurer l'altitude et l'azimuth ; la rotation se fait de façon mécanique (14). Un modèle de ce type de globes a été décrit par al-Khazīnī dans

10. *Idem* : 90-95.

11. Richard LORCH and Paul KUNITZSCH, "Habash al-Hasib's Book on the Sphere and its Use," *Zeitschrift für Geschichte der Arabisch-Islamischen Wissenschaften* 2 (1985) : 68-70.

12. WORREL, *op. cit.* et *Los libros del saber de astronomia*, 163-208.

13. AL-BATTANĪ, *Al-Battani sive Albatanii, Opus Astronomicum*, trad. & éd. par Carlo Alfonso NALLINO, 1-3 (Milano : 1899-1907).

14. LORCH and KUNITZSCH, *op. cit.*, 69-70 ; Richard LORCH, "Al-Khazīnī's Sphere That Rotates by Itself", *Journal for the History of Arabic Science* 4 (1980) : 287-329.

un ouvrage qui date de la première moitié du XII^e siècle et dont Richard Lorch a fait une étude critique et une traduction anglaise. Le mécanisme est mis en mouvement par le poids du sable qui descend lentement en actionnant un ensemble de roues, de roues dentées et de tympan, ce qui provoque la rotation d'un axe qui entraîne le globe. Comme la plupart des mécanismes islamiques, celui-ci repose sur les travaux des ingénieurs mécaniciens hellénistiques.

Parmi les trois systèmes de coordonnées décrits par Ptolémée dans l'*Almageste*, à savoir l'horizontal, l'équatorial et l'écliptique, les fabricants de globes islamiques ont choisi le dernier comme moyen de localiser les étoiles. A vrai dire, Ptolémée lui-même avait choisi la longitude et la latitude écliptiques comme coordonnées des étoiles fixes dans son catalogue d'étoiles. La raison de ce choix réside dans le fait que la latitude écliptique ne change jamais et que la longitude écliptique n'a besoin d'être modifiée qu'en fonction d'un degré de précession fixe, tandis que les coordonnées équatoriales exigeraient des calculs compliqués pour établir la position d'une étoile à toute autre époque que celle du catalogue.

Il est vrai aussi que tous les catalogues d'étoiles islamiques, d'al-Şūfī à Ulug Bēg sans exception, ont suivi celui de Ptolémée à tous points de vue, y compris le système de coordonnées écliptiques. Par conséquent, les fabricants de globes islamiques qui employaient ces catalogues pour dessiner les constellations et placer les étoiles fixes ont adopté la longitude et la latitude écliptiques de préférence au système de l'équateur céleste et de l'horizon.

Il existe une relation étroite entre les globes célestes et les catalogues d'étoiles. Cette relation est bien illustrée quand on réalise que le catalogue de Ptolémée prévoyait la construction d'une sphère sur laquelle les constellations célestes devaient être figurées avec leur dos vers l'observateur, dans l'idée qu'elles faisaient face à la terre. La même relation existe dans le monde islamique entre les catalogues d'étoiles et les globes. Dans ce contexte, le catalogue le plus employé par les fabricants de globes est celui d'al-Şūfī qui d'ailleurs se prête facilement à cet usage, en offrant une double iconographie pour chaque constellation telle qu'elle apparaît dans le ciel et telle qu'elle est dessinée à la surface d'un globe. Cependant, à partir du XVI^e siècle presque tous les globes sont basés sur le catalogue d'Ulug Bēg. Les deux catalogues d'étoiles avaient comme point de départ le catalogue de Ptolémée.

La précession dans les globes varie selon le catalogue d'étoiles choisi par le fabricant : pour Ptolémée elle est d'1° tous les 100 ans, pour al-Şūfī d'1° tous les 66 ans, pour Ibn A'lam, Ibn Yūnīs et Naşīr al-Dīn al-Ṭūsī d'1° tous les 70 ans. Par conséquent, un globe céleste islamique n'est valable que pour une époque déterminée et cette validité, comme pour l'astrolabe, varie entre 50 et 75 ans.

Dans la préface de son catalogue d'étoiles al-Şūfī annonce qu'il gardera les latitudes données par Ptolémée puisqu'elles n'ont pas changé, mais qu'il modifiera les longitudes en y ajoutant 12°42' pour être en concordance avec l'année 353/964. Ulug Bēg de son côté souligne qu'il a observé toutes les étoiles mentionnées par Ptolémée sauf 27 qu'il n'a pas pu localiser. A son tour il modifie les longitudes d'al-Şūfī en y ajoutant 6°59' pour l'année 841/1437.

Bon nombre de catalogues d'étoiles du moyen âge islamique sont arrivés à nous tandis que seulement 126 globes ont survécu aux vicissitudes du temps alors

que les globes étaient certainement l'instrument le plus commun en Islam après l'astrolabe (15). Le plus ancien globe céleste islamique qui nous soit parvenu date du XI^e siècle. Il a été fait à Valence par Ibrāhīm Ibn Sa'īd al-Sahli al-Wazzān et son fils Muḥammad. Ce globe se trouve maintenant au Museo di Storia della Scienza à Florence (16). Le globe céleste islamique le plus récent date de la deuxième moitié du XIX^e siècle.

MŪ'AYYĪD AL-DĪN AL-'URDĪ

L'auteur du traité intitulé *Risālat al-'amal bi al-kura* (17) (Essai sur l'emploi du globe céleste) est Mū'ayyid al-Dīn al-'Urđī, astronome et ingénieur syrien de la deuxième moitié du XIII^e siècle. Après avoir achevé à Damas l'élaboration d'un certain nombre de constructions hydrauliques et d'instruments astronomiques, al-'Urđī se trouvait dès 658/1259 à l'observatoire de Maragha (18) en Azerbaïdjan, récemment fondé par le Mongol Hulagu, petit-fils de Gengis Khan.

Al-'Urđī fut membre de l'équipe d'astronomes attachés à cet observatoire et qui travaillaient sous la direction du mathématicien et astronome Naṣīr al-Dīn al-Ṭūsī (598/1201-673/1274). Au sein de l'équipe se trouvaient des astronomes chinois et le nom d'un certain Fao-Mun-Ji est arrivé jusqu'à nous.

L'observatoire de Maragha produit ce qui est connu dans la littérature astronomique islamique comme le *Zij Ilkhānī*. Muḥammad, le fils d'al-'Urđī, se trouvait aussi à l'observatoire de Maragha. Il construisit vers 678/1279 un globe céleste pour cet observatoire. Ce globe se trouve aujourd'hui au Mathematisch-Physikalischen Salon à Dresde (19).

Dans la littérature astronomique arabe, il existe un traité anonyme dont le titre est : *Risala fī Kaifiyat al-raṣd wa ma yuḥtaju ʿilā ilmīhi wa 'amalihi min al-ṭuruq al-mu'adiya ʿilā ma 'rifat 'awdat al-kawākib* (Essai sur les méthodes des observations astronomiques et ce qu'on a besoin de savoir de façon théorique et pratique concernant les méthodes qui permettent de connaître les régularités des étoiles). L'auteur y décrit les instruments employés à l'observatoire de

15. E. SAVAGE-SMITH donne une description détaillée de leurs caractéristiques (213-275). Dans l'Addendum à son catalogue, elle signale l'existence de six globes supplémentaires (275-276).

16. F. MEUCCL, *Il globo celeste arabico del secolo XI esistente nel gabinetto degli strumenti antichi di astronomia, di fisica e di matematica* (Firenze : Le Monnier, 1878) : 1-13 ; *Répertoire chronologique d'Epigraphie Arabe* (Le Caire : Institut Français d'Archéologie Orientale, 1936), 7 : 208-209 ; Maria Luisa RIGINI BONELLI, *Il Museo di Storia della Scienza a Firenze* (Milano : Electa, 1976) : 156 ; E. SAVAGE-SMITH : 217-16.

17. Le traité se trouve à l'état actuel en manuscrit à Topkabi Sarai, Istamboul. Il porte la cote : Ahmet III 3505 et il est non daté.

Pour l'instant André Koeckelenbergh et Hossam Elkhadem préparent l'édition critique et la traduction française de ce traité.

18. Sur l'Observatoire de Maragha voir, Aydin SAYILI, *The Observatory in Islam* (Ankara : Turk Tarih Kurumu Basimevi, 1960) : 187-223.

19. Adolph DRECHSLER, *Der Arabische Himmelglobus des Mohammad ben Muyid al-'Ordi vom Jahre 1279 im Mathematisch-physikalischen Salon zu Dresden* (Dresden : Baensch Stiftung, 1922) : 3-19 ; *Répertoire chronologique d'Epigraphie Arabe* (Le Caire : Institut Français d'Archéologie Orientale, 1943), 12 : 200.

Maragha. La critique historique moderne nous permet d'attribuer ce traité à Mū'ayyid al-Dīn al-'Urḏī lui-même (20).

Al-'Urḏī a également écrit plusieurs autres traités astronomiques :

Un sur la détermination de la distance entre le centre du soleil et l'apogée. Un autre sur l'astronomie de Ptolémée, ainsi qu'un manuel astronomique intitulé *al-Zīj al-'Alāʾ*.

RISĀLAT AL-'AMAL BI AL-KURA

La *Risālat al-'amal bi al-kura* (Essai sur l'emploi du globe céleste) d'al-'Urḏī contient 97 feuillets. Il est divisé en trois parties dont la première partie est une introduction. Al-'Urḏī y constate que le globe céleste, parmi les différents instruments astronomiques, est le plus ressemblant à la voûte céleste. Il remarque cependant que plusieurs opérations astronomiques ne sont pas réalisables avec le globe, tandis qu'elles le sont facilement avec d'autres instruments comme l'astrolabe sphérique et planisphérique. C'est précisément ce qui apparaît comme une lacune dans l'usage du globe céleste qui l'a motivé pour essayer de perfectionner cet instrument et tenter de le rendre le plus parfait et le plus utile des instruments d'observation. Les perfectionnements apportés au globe céleste, pour al-'Urḏī, doivent lui permettre de réaliser toutes les opérations astronomiques exécutées par les autres instruments basées sur les observations de l'ombre et des rayons de lumière, et en plus il garde évidemment ses propres avantages. Al-'Urḏī, en effet, a écrit l'*Essai* pour analyser les multiples usages du globe céleste (21).

Dans la première partie du traité, al-'Urḏī examine la littérature astronomique relative au globe céleste. Son examen est critique et il n'hésite pas à montrer les lacunes ou les défauts qu'il découvre dans chaque oeuvre. Le premier traité qui est discuté par al-'Urḏī est : *Sur l'emploi du globe céleste* de Qusṭā Ibn Lūqā (22), un célèbre ouvrage du IX^e siècle dont le contenu a été incorporé au XIII^e siècle dans les *Libros del saber de astronomia*.

Ce qu'al-'Urḏī critique dans le traité de Qusṭā Ibn Lūqā, c'est que lorsque ce dernier a voulu fixer les latitudes et les longitudes des étoiles, il l'a réalisé au moyen d'un cercle qui passe par le point d'intersection du méridien avec l'écliptique, alors que pour al-'Urḏī ce cercle-là sert, en fait, à obtenir le degré du passage d'une étoile en relation avec l'équateur céleste. Mais on n'obtient pas par ce cercle, comme le prétend Qusṭā Ibn Lūqā, le degré de longitude et de latitude des étoiles, à l'exception de certaines qui se trouveraient accidentellement soit sur le cercle de l'écliptique ou la ceinture zodiacale, soit sur le cercle passant par les quatre pôles (23). Qusṭā Ibn Lūqā, selon al-'Urḏī, au lieu de préciser les

20. Hugo J. SEEMANN, "Die Instrumente der Sternwarte zu Maragha nach den Mitteilungen von al Urḏī", *Sitzungsberichte der Physikalisch-medizinischen Sozietät zu Erlangen*, Band 60, (1928) : 15-126 ; Amable JOURDAIN, "Mémoire sur l'observatoire de Mēragha et les instruments employés pour y observer", *Magasin Encyclopédique*, 6 (1809) : 43-101.

21. fol. 3r.

22. voir supra n 8.

23. fol. 3r-3v.

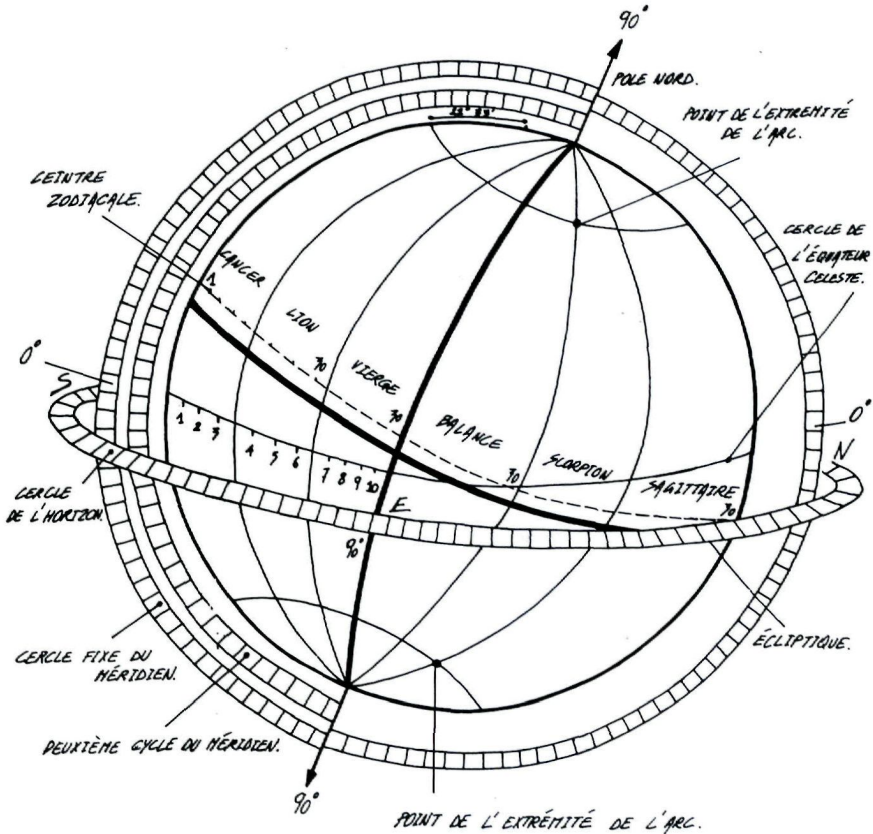


Fig. 1 — Le globe céleste classique islamique décrit par al-'Urdī.

cas exceptionnels, a établi indûment une règle générale qu'il applique à toutes les étoiles. En plus le degré de passage d'une étoile peut précéder son degré de hauteur, ou être en retard sur le degré de hauteur, ou encore il peut y avoir simultanéité par rapport au cercle du méridien.

Après cette critique de Qusṭā Ibn Lūqā, al-'Urdī expose sa propre solution au problème : le point auquel il est correct de prendre la longitude et la latitude d'une étoile est un cercle dont le tracé passe d'une part par l'extrémité présumée de la ligne droite qui sort du centre de l'étoile, abouti à la surface du globe et, d'autre part, par les pôles de l'écliptique sur le globe.

Al-'Urdī forme une autre critique du traité de Qusṭā Ibn Lūqā : au chapitre 53 Qusṭā mentionne un moyen de prendre la hauteur du soleil : on fixe à un angle droit un gnomon sur la surface du globe dans la partie où se trouve le soleil, puis on fait tourner le globe jusqu'à ce que le gnomon n'ait plus d'ombre. Dans cette position on peut lire la hauteur du soleil.

Al-'Urdī signale la difficulté de prendre la hauteur du soleil de cette façon.

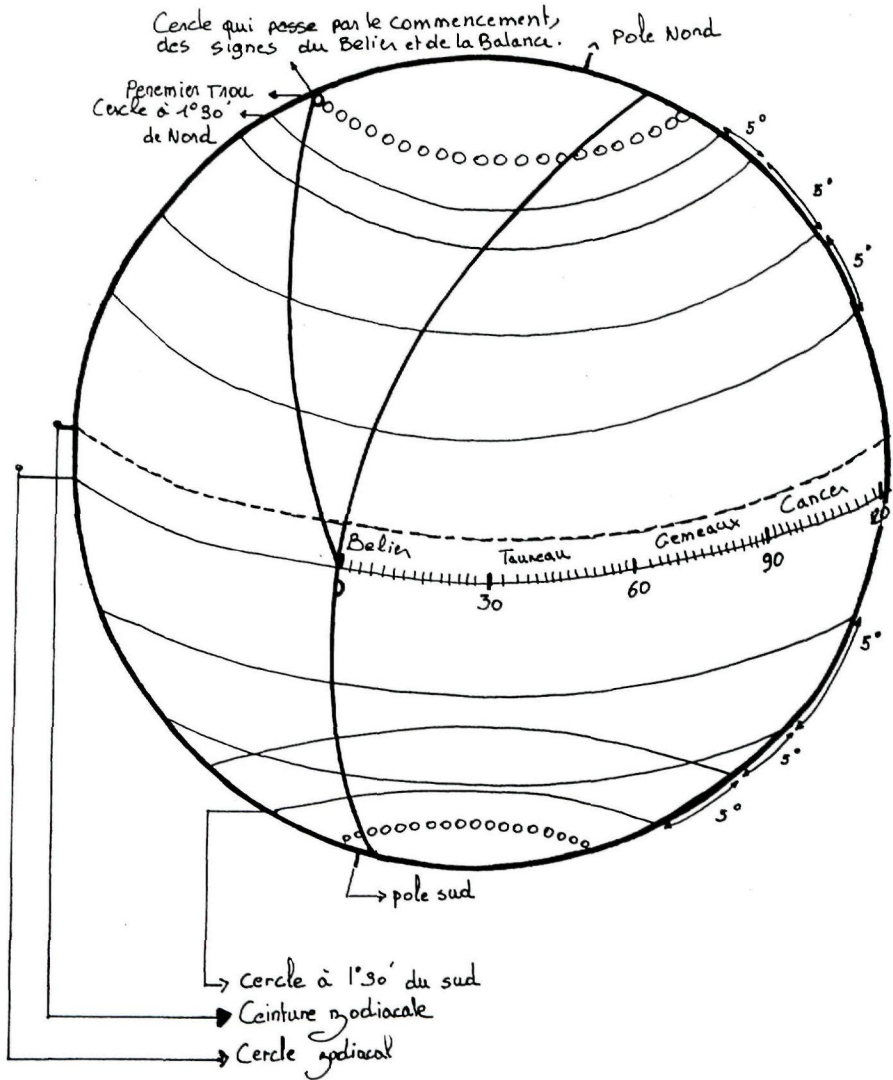


Fig. 2 — Le premier globe d'al-'Urđī.

En plus, selon lui, Qusṭā Ibn Lūqā ne montre pas comment prendre la hauteur des étoiles au moyen d'un globe céleste, car même si on réussit à obtenir la hauteur du soleil, la mesure est impossible dans le cas des étoiles (24).

Al-'Urđī critique également, mais cette fois de façon moins spécifique, l'as-

tronome 'Alī Ibn 'Īsā al-Aṣṭurlābī (actif ca 246/860). Pour al-'Urdī, 'Alī Ibn 'Īsā n'a pas montré d'originalité dans son traité. En effet, l'ensemble ne diffère pas de ce que Qusṭā Ibn Lūqā a exposé dans le sien. En plus la description qu'Alī Ibn 'Īsā donne de son globe est, pour al-'Urdī, obscure et n'aide le lecteur ni à imaginer le globe en question, ni à le dessiner (25).

Un autre astronome qui fait également l'objet de critique de la part d'al-'Urdī est Ziyadatallāh Ibn al-Qadīm. Al-'Urdī constate qu' Ibn al-Qadīm a ajouté un cercle à ceux qui se trouvent habituellement sur un globe céleste afin de permettre de prendre la hauteur du soleil. Al-'Urdī rejette ce cercle pour son inutilité et son manque de maniabilité (26).

Ce sont ces défauts sérieux, et d'autres encore, qui motivent al-'Urdī pour composer son traité. En plus, il promet d'introduire des solutions aux problèmes qui n'ont pas été traités dans les oeuvres précédentes. En conséquence, il divise son traité en trois parties. La première est consacrée aux tracés qui figureront sur la surface du globe. Al-'Urdī mentionne ici ses propres contributions dans ce domaine, ainsi que ce qui était généralement connu dans les autres traités sur le sujet. La deuxième partie du traité est relative aux différents emplois du globe. Al-'Urdī, pour cette partie offre au lecteur une table des matières détaillée (27). La troisième partie du traité est consacrée aux techniques d'observations et aux justifications de chaque opération astronomique réalisée par le globe.

LA DESCRIPTION PAR AL-'URDĪ DU GLOBE CÉLESTE CLASSIQUE ISLAMIQUE

Al-'Urdī commence son traité en donnant une description du globe céleste classique islamique (28). Pour lui c'est un corps sphérique dont tous les points de la surface sont également distants du centre. Sur sa surface on trouve le cercle de l'équateur céleste, ainsi qu'un autre grand cercle qui passe par les pôles de l'équateur céleste et coupe l'équateur à angle droit. On prend deux arcs de ce cercle dont la valeur correspond à l'obliquité de l'écliptique par rapport à l'équateur céleste. Les débuts de ces deux arcs sont les deux pôles. La valeur de chaque arc, chez Ptolémée est de $23^{\circ}51'$, tandis que chez les contemporains (29), elle est de $23^{\circ}33'$, et chez d'autres (30) de $23^{\circ}35'$. On marque deux points à chaque extrémité d'un arc. Ces deux points sont les pôles d'un grand cercle qui est celui des signes du zodiaque. On indique sur l'un des pôles de l'équateur céleste "le pôle nord" ainsi que sur l'un des pôles de l'écliptique "le pôle de l'écliptique".

On prend sur le cercle du pôle de l'écliptique qui passe par les quatre points cardinaux, un arc de 90° et on trace autour de ce pôle un grand cercle que l'on appelle "la ceinture zodiacale" ; elle divise l'équateur céleste en deux moitiés. La ceinture zodiacale, elle aussi, sera divisée en deux moitiés ainsi que les arcs

25. fol. 4r.

26. fol. 4v.

27. fol. 18r-24r. Le traité contient 111 chapitres.

28. fol. 9v-17r.

29. Les astronomes de la deuxième moitié du XIII^e siècle.

30. Comme al-Battānī (X^e siècle).

qui représentent les demi-cercles qui passent par les quatre pôles. La moitié de la ceinture zodiacale qui suit les pôles nord contient les signes zodiacaux appelés "signes zodiacaux du nord". Quant à l'autre moitié, ses signes sont appelés "signes zodiacaux du sud".

Ensuite on divise la ceinture zodiacale en 12 secteurs égaux. On divise le globe lui-même de la même façon.

La partie de la ceinture zodiacale qui va de l'équateur céleste en direction de l'est et du nord est désignée sous le nom du signe du Bélier. Celle qui la suit en direction de l'est le signe du Taureau, puis les Gémeaux, ensuite le Cancer, le Lion et la Vierge.

La partie qui va de l'équateur céleste en direction de l'est et du sud, est le signe de la Balance suivi des signes qui se succèdent dans cette direction jusqu'au Sagittaire. Ensuite en direction de l'est et du nord jusqu'à la fin du signe des Poissons.

Il faut encore, pour al-'Urđī, diviser l'écliptique et l'équateur céleste chacun en 360°. Le début de cette division est le signe du Bélier. Cependant dans le cas de l'écliptique, il faut que chaque signe zodiacal trouve ses limites entre 1° et 30°, tandis que dans le cas de l'équateur céleste la graduation est continue de 1° à 360°, ce qui correspond à la fin du signe des Poissons.

Après avoir tracé les cercles nécessaires sur le globe, al-'Urđī aborde le tracé des étoiles et des constellations. On trace sur la surface du globe la position des étoiles selon leur longitude et leur latitude après avoir changé la valeur de leur longitude en fonction du décalage de temps entre la date de la compilation du catalogue d'étoiles employé et la date de construction du globe. Après avoir localisé la position des étoiles, on dessine les configurations représentant les 48 constellations. Ensuite on note le nom de chaque configuration et de chaque étoile connue.

Pour le cercle fixe du méridien, al-'Urđī précise qu'on prend un cercle [métallique] dont la concavité corresponde parfaitement à la convexité du globe. Le cercle du méridien qui entoure le globe est fixé à celui-ci en deux points symétriques.

A l'intérieur du cercle fixe du méridien on attache un autre cercle directement accroché au globe par ce cercle [fixe] qui représente le méridien. Les cercles de méridien contiennent chacun dans leur ensemble 360°. La graduation de ces cercles commence au point d'attache des cercles méridiens au globe jusque 90°, puis en sens contraire de 0° jusque 90°. On répète alors la graduation pour les 180° restant.

Al-'Urđī recommande une autre graduation contraire à la première car, au lieu de prendre les points d'attache des cercles méridiens au globe comme 0°, elle les prend pour 90° et elle régresse jusqu'à 0°. Al-'Urđī estime que la deuxième méthode de graduation rend la lecture des coordonnées d'une étoile plus facile. Le cercle du méridien, signale al-'Urđī, contient les arcs de jour et les arcs de nuit. Le méridien du globe est parallèle au méridien céleste.

Un autre cercle sur le globe est celui de l'horizon. Comme pour les cercles méridiens, la concavité de ce cercle doit être calculée sur la convexité du globe. La surface supérieure du cercle d'horizon divise le globe en deux moitiés égales :

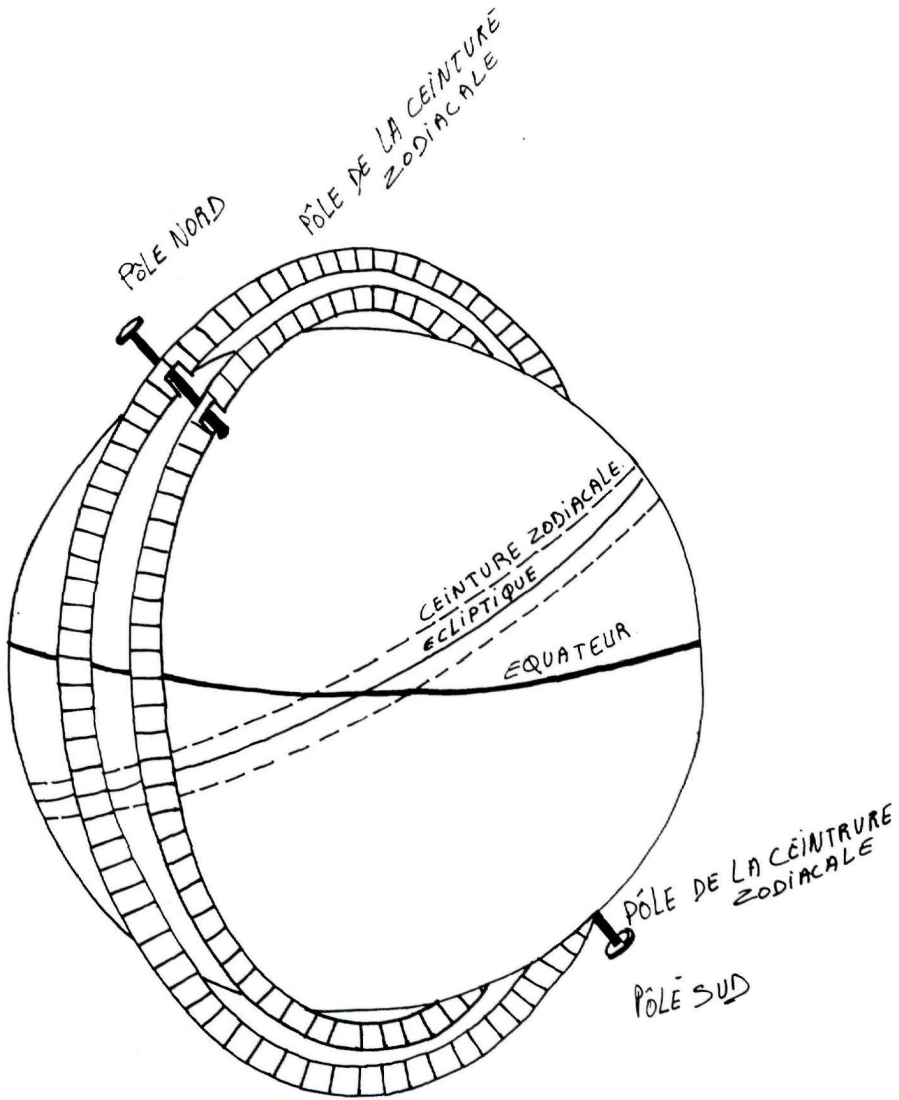


Fig. 3 — Le deuxième globe d'al-'Urđī.

une moitié est apparente pour l'observateur et l'autre est cachée. Le cercle d'horizon comporte 360° qui commencent au point d'intersection à angle droit du cercle du méridien avec le cercle d'horizon. La graduation se répète tous les 90° . On indique les quatre points cardinaux sur le cercle d'horizon.

La dernière étape est la construction de l'armature dans laquelle le globe sera enchâssé. Al-'Urđī ne donne pas d'instructions particulières pour cette étape.

D'un autre côté al-'Urđī nous propose la construction d'un autre globe de sa propre invention (31). L'avantage de ce globe pour al-'Urđī est que, contrairement aux globes traditionnels, sa validité et son emploi ne sont pas limités dans le temps. En effet, si le globe céleste classique avait, comme l'astrolabe, une durée de validité voisine de 50 à 75 ans, le globe qu'al-'Urđī nous propose restera utilisable pour une durée indéterminée.

Al-'Urđī constate que son invention est la première du genre (32). On procède pour le tracé de globe selon les étapes suivantes :

On trace légèrement sur la surface du globe un grand cercle qui représente le cercle zodiacal. On prend un point sur le cercle pour indiquer le commencement du signe du Bélier en un temps donné. On inscrit sur les deux pôles du cercle le nord et le sud. Ensuite on divise le cercle en 360° et on marque le commencement de chacun des signes zodiacaux ainsi que son nom. Puis on fixe les positions des étoiles sur le globe en déterminant pour chacune sa longitude et sa latitude, selon le catalogue d'étoiles de Ptolémée dans l'*Almageste* ou selon un autre catalogue sans additionner ni soustraire de degré (33). On écrit l'époque du catalogue sur le globe. Ensuite on trace un grand cercle qui passe par le commencement du signe du Bélier, par le pôle de la ceinture zodiacale et par le commencement du signe de la Balance. Ce cercle doit être dessiné légèrement sur la surface du globe. A partir de ce cercle, et précisément à partir des deux points par lesquels il passe, on trace deux arcs égaux dont la valeur de $1^\circ 30'$ plus grande que celle de la déclinaison majeure.

Ensuite on trace autour de ces deux pôles et à la même distance, deux cercles parallèles entre eux et à la ceinture zodiacale. De ces deux cercles sortent, vers les deux pôles, une série de cercles à 5° de distance l'un de l'autre. Puis on trace aussi autour des pôles deux cercles dans lesquels on perce autant de trous que possible : ce sont des pôles de l'équateur céleste et ils entourent les pôles de l'écliptique (34). Les premiers trous doivent être percés sur le cercle qui passe par le commencement du signe du Bélier et du signe de la Balance. Les distances entre eux doivent être égales, pour que tous les deux trous, on trouve un pôle qui passe par le centre du globe.

Après on trace autour des pôles de l'écliptique deux cercles sur lesquels on perce des trous qui sont [en même temps] des pôles. Puis on trace aussi autour des pôles deux autres cercles de $1^\circ 30'$ en moins que la valeur de la déclinaison majeure pour que tous les pôles soient enfermés entre ces deux cercles : le nord et le sud et les deux autres cercles tracés précédemment.

Les chiffres sont ensuite écrits dans les places qui ont été réservées à côté de l'intersection des cercles. Pour le cercle qui passe par le commencement du signe du Bélier et du signe de la Balance les chiffres sont écrits à rebours de la succession des signes zodiacaux, jusqu'à ce qu'on arrive au commencement de la notation des chiffres. On divise la graduation comme on le fait pour l'écliptique et ses pôles, soit en 360° .

31. fol. 13v. seqq.

32. fol. 14r.

33. fol. 14r.

34. fol. 15v-16r.

On peut remplacer tous les petits cercles, sauf le cercle sur lequel se trouvent les trous des pôles de l'équateur céleste, par la graduation du cercle zodiacal dont on écrit la graduation à rebours à partir du commencement du signe du Bélier. Toutefois la première méthode, pour al-'Urđī, est plus facile pour localiser les étoiles.

Lorsqu'on désire employer ce globe pour une date donnée, ou pour la date du catalogue d'étoiles que l'on a employé pour déterminer les positions des étoiles sur le globe, on fixe les pôles de l'équateur céleste dans les deux trous par lesquels passe le grand cercle qui touche les points de commencement des signes du Bélier et de la Balance.

Mais si la date à laquelle on ajuste le globe précède la date du catalogue d'étoiles employé, on fixe les deux pôles selon la succession des signes du zodiaque à 1° pour tous les 100 ans, selon l'opinion des anciens, et à près de 1°30' selon l'opinion des contemporains. Il est très rare qu'on demande de réaliser cette opération.

Mais lorsque la date donnée pour fixer le globe est plus tardive que celle du catalogue d'étoiles, on doit procéder dans le sens contraire.

Il faut remarquer ici, et al-'Urđī insiste, qu'on doit écrire sur le globe la date du catalogue d'étoiles sur lequel les positions des étoiles ont été copiées pour connaître le laps de temps écoulé entre la date du catalogue et la date donnée pour l'exécution de l'opération demandée ; ensuite généralement on ajuste les positions des pôles selon le besoin (35).

D'un autre côté on doit, pour al-'Urđī, déplacer les deux pôles en sens contraire au sens de la succession des signes du zodiaque du côté du grand cercle qui est à angle droit sur le cercle qui passe par les premiers points du signe du Bélier et du signe de la Balance en reprenant, par exemple, 1° tous les 100 ans.

On ajuste le globe, selon la position déduite de ce calcul, sur un seul pôle. Ce pôle est le pôle du globe pour la date de cette opération.

En ce qui concerne les autres cercles et l'armature du globe, on les fait comme il a été expliqué plus haut sans aucun changement.

D'un autre côté, al-'Urđī précise que le point d'intersection est celui qui se trouve à une distance de 90° des deux pôles, à partir du cercle passant par les quatre pôles.

Lorsque après avoir tourné le globe, il est revenu à sa position initiale, le point d'intersection est situé sur le cercle de l'équateur céleste pour ce moment donné.

En conséquence l'entrée dans le signe du Bélier à un moment donné est indiqué par le point de l'écliptique qui atteint 90° avant de changer la position du pôle après rotation du globe. L'écliptique étant orienté vers l'est et le nord. Si au contraire l'écliptique est orienté vers l'est et le sud, ce point est l'entrée dans le signe de la Balance.

Cependant al-'Urđī signale qu'on peut substituer aux trous que nous avons faits comme pôles de l'équateur céleste, deux cercles mobiles attachés au corps même du globe et animés d'un mouvement circulaire (36). Les surfaces de ces

35. fol. 16v.

36. fol. 17r.

cercles doivent être face à la surface du globe. On fait dans chaque cercle un seul trou qu'on peut déplacer selon le nombre de degrés qu'on présume nécessaire pour un intervalle de temps donné. On fixe les centres de ces deux trous sur le grand cercle qui passe par les pôles de la ceinture zodiacale ainsi que par le degré nécessaire pour le temps donné.

Ce type de globe, selon al-'Urđī, ne doit pas non plus changer avec l'écoulement du temps. On peut l'employer à tout moment. On utilise le fil à plomb lorsqu'on emploie le globe afin d'ajuster sa position de telle façon que son horizon soit parallèle à l'horizon réel.

Dans l'introduction à la deuxième partie de son traité, al-'Urđī donne les deux définitions suivantes :

1. "Lorsque nous disons que nous faisons tourner le globe dans un premier mouvement, nous entendons par là déplacer la partie qui se trouve sur le cercle du méridien en direction de l'horizon de l'ouest et la partie qui est sur l'horizon de l'est vers le cercle du méridien" (37).
2. "Lorsque nous disons que nous faisons tourner [le globe] à l'inverse de ce premier mouvement ou de l'ordre de la succession des signes du zodiaque, nous entendons par là déplacer la partie qui se trouve sur le cercle du méridien en direction de l'est" (38).

Après les deux définitions, al-'Urđī nous donne la table des matières du traité. Elle contient 111 chapitres : 105 chapitres relatifs aux différentes opérations astronomiques et géodésiques et 6 chapitres consacrés au tracé des cadrans solaires. A titre d'exemple voici quelques problèmes astronomiques et les solutions proposés par al-'Urđī au moyen du globe céleste :

CHAPITRE 1 : *Sur la technique pour ajuster la position du globe de façon à déterminer la hauteur angulaire et le méridien.* Al-'Urđī propose deux techniques : soit en déposant le globe sur une surface parfaitement horizontale et en ajustant la mise à niveau au moyen d'un fil à plomb, soit en suspendant le globe par des chaînes après avoir déterminé la longueur de ces chaînes au moyen d'un fil à plomb. Dans les deux cas l'horizon du globe doit être parallèle à l'horizon réel (39).

CHAPITRE 2 : *Sur la technique pour déterminer la hauteur angulaire du soleil.* On ajuste le globe dans sa position horizontale. On introduit un gnomon dans un trou du cercle méridien, ensuite on tourne le globe jusqu'à ce que le cercle méridien ne projette plus d'ombre sur la surface du globe. On relève le gnomon, le rayon de soleil passe alors par le trou et se projette, en forme circulaire, sur le globe. On lit ensuite sur la graduation du cercle méridien la hauteur angulaire du soleil à ce moment-là (40).

CHAPITRE 7 : *Sur la détermination de la latitude d'une localité en observant une étoile qui apparaît de façon permanente dans cette localité.* On ajuste la position du globe et on prend la culmination supérieure et la culmination inférieure

37. Mouvement diurne ; fol. 18r.

38. Mouvement annuel ; fol. 18r.

39. fol. 24r.

40. fol. 24r-24v.

d'une étoile qui apparaît toujours dans la localité. Cette observation doit avoir lieu pendant une nuit d'hiver, c'est-à-dire au début et à la fin d'une telle nuit et non à un autre moment. Cette observation doit être faite sur une étoile particulière. On additionne les deux valeurs des deux hauteurs angulaires. Ensuite on divise le résultat par deux. Le résultat [de la division] est égal à la hauteur angulaire du pôle pour cette localité qui est également la valeur de la distance du zénith de l'équateur céleste. C'est aussi la latitude de la localité.

Si on veut, on peut aussi prendre la moitié de la soustraction des valeurs des deux hauteurs angulaires et ensuite la soustraire de la valeur la plus élevée des deux altitudes tandis qu'on l'additionne à la valeur moindre. Ce qui reste est l'altitude du pôle qui est aussi la latitude de la localité (41).

CHAPITRE 8 : *Sur la détermination de l'obliquité de l'écliptique de celle de l'équateur céleste en vue de connaître la latitude d'une localité.* On observe le soleil jusqu'à ce qu'il soit proche de l'un des solstices et avant qu'il l'atteigne. Savoir cela est facile : on ajuste le globe dans un endroit où le ciel est découvert pour effectuer des observations. On observe le soleil plusieurs jours successivement à midi. Lorsque [le gnomon attaché au] cercle méridien ne projette plus d'ombre, il y a culmination supérieure du soleil ou culmination inférieure dans le cercle méridien pour ce solstice considéré. J'entends par "culmination inférieure" ici l'altitude minimale du soleil dans le méridien pour tous les jours de l'année. De même j'entends par "culmination supérieure" l'altitude maximale du soleil pour l'ensemble des jours de l'année également.

On obtient de ces deux observations les déclinaisons de deux endroits extrêmes auxquels le soleil peut se trouver sur l'arc de la sphère céleste à midi. On divise cet arc en deux. Le point [de commencement] d'une moitié est [sur un cercle] parallèle à l'équateur céleste. La valeur de cette moitié est un extremum de la déclinaison de l'écliptique par rapport à l'équateur céleste. Cette valeur correspond à celle du point situé à 90° sur le cercle d'azimut et à sa distance angulaire au zénith lorsqu'il atteint l'un des points de solstice, [tandis qu'] il est à sa valeur angulaire maximale du zénith lorsqu'il atteint l'autre point solsticielle. On peut ainsi connaître l'ordre de grandeur de la hauteur du soleil et on déduit la latitude de la localité (42).

CHAPITRE 9 : *Sur la détermination de la latitude d'une localité au moyen d'une étoile tracée sur le globe.* On fixe le globe à la position d'observation et on prend la hauteur d'une étoile qui se trouve sur le globe dans la direction du nord ou du sud par rapport au zénith. On fait une marque de la même valeur d'altitude sur la moitié de la culmination supérieure de l'étoile et dans la même direction. Ensuite, on fait coïncider la valeur de cette moitié sur le cercle du méridien, qui n'est que la face biseauté du cercle complet des pôles. Alors on fixe le globe et on ajuste le pôle apparent jusqu'à ce que le centre de l'étoile atteigne la hauteur de la marque sur la moitié de la culmination supérieure de l'étoile. Lorsqu'on a réalisé l'opération, on arrive à rendre la position du globe parallèle à celle de

41. fol. 26v-27r.

42. fol. 27r-28r.

la sphère céleste à ce moment-là. Lorsqu'on regarde le pôle apparent dans cette position du globe, on trouve que la valeur numérique, qui est plus élevée de celle de la moitié de la culmination supérieure de l'étoile, est celle du pôle apparent et aussi la latitude de la localité (43).

CHAPITRE 14 : *Autre technique pour déterminer dans quelle partie de l'écliptique se trouve le soleil au moyen de sa culmination supérieure, de la saison et de l'attitude de la localité.* On ajuste le globe à la position d'observation et on prend l'extremum supérieur du soleil ce jour-là. On marque l'endroit éclairé du cercle méridien au moment où le soleil atteint son extremum supérieur. Ensuite on côtoie le quart de l'écliptique où le soleil se trouve avec le cercle du méridien où le soleil se trouve à ce moment-là (44).

CHAPITRE 15 : *Sur la détermination de la partie ascendante de l'écliptique et des autres points cardinaux durant la journée.* On détermine le degré [de la hauteur angulaire] du soleil et on ajuste le globe pour l'observation. On prend la hauteur angulaire du soleil à ce moment là. On fixe [la position] du degré, le cercle d'azimuth et le pôle en accord [avec cette mesure]. On fait tourner le globe jusqu'à ce que la partie [face au] soleil soit éclairée par le rayon qui passe à travers l'appareil de mesure sur la surface du globe. Lorsque cette partie du globe se trouve au centre de la lumière du rayon, c'est à ce moment-là que nous mettons le degré du soleil à sa hauteur angulaire et que nous côtoyons la position du globe avec celle de la sphère céleste. J'entends par "côtoyer" que chaque point sur le globe dans sa position en relation avec le cercle d'horizon du globe et les autres cercles, correspond à sa position dans la sphère céleste, [c'est-à-dire] sur l'horizon et sur les autres cercles astronomiques équivalant aux cercles du globe.

On regarde l'horizon est, ce qu'on y trouve de degrés des signes du zodiaque, c'est l'ascendant, [tandis que] ce qui se trouve sur l'horizon ouest, ce sont [les signes du zodiaque] couchants. Sur le cercle du méridien se trouve la deuxième [partie des signes du zodiaque] et sur la moitié inférieure de ce cercle, la quatrième [partie des signes du zodiaque] (45).

CHAPITRE 19 : *Sur la détermination du nombre d'heures égales et de fractions d'heures qui se sont écoulées de jour et de nuit pour une localité dont la latitude est connue, lorsque le degré du soleil sur l'écliptique est connu.* On détermine l'arc du jour pour la partie traversée par le soleil dans la localité. On le divise par 15. Le résultat est le nombre d'heures égales complètes [car l'arc du jour qui contient 360° est traversé par le soleil en 24 heures, donc une heure est égale à 15°]. Les fractions, on les multiplie par 4. Le chiffre obtenu est une fraction de 60 qui représente le nombre de minutes dans l'heure égale. Ce qu'on obtient de fractions d'heures égales et de fractions du jour est une partie de l'ensemble de 24 heures qui représente les heures de jour et de nuit (46).

43. fol. 28r.

44. fol. 31r.

45. fol. 31v-32r.

46. fol. 32r-32v.

CHAPITRE 21 : *Sur la détermination de la durée des heures inégales de jour et de nuit pour un degré connu dans une latitude connue.* On détermine l'arc du jour pour ce degré dans cette latitude. On le divise par 12 [pour obtenir la durée des heures inégales]. Le nombre obtenu est celui des heures inégales de ce degré dans cette latitude. Ensuite on soustrait de la longueur des heures 30. Le reste est le nombre des heures inégales de la nuit dans cette latitude.

L'heure inégale est un douzième du temps qui sépare le lever du coucher du soleil pour le jour et le coucher du lever du soleil pour la nuit (47).

CHAPITRE 36 : *Sur la détermination de la distance entre une étoile et l'équateur céleste ainsi que l'orientation de cette distance.* On détermine le centre de l'étoile dont on désire connaître la distance [de l'équateur céleste] et on le marque sur le cercle méridien. On note le chiffre sur le cercle méridien qui se trouve à la même hauteur que celui qui correspond au centre de l'étoile. Ce chiffre est celui de la distance entre l'étoile et le pôle le plus proche d'elle. Ce chiffre moins 90° est celui de la distance [de cette étoile] à l'équateur céleste. Le chiffre au-dessus de 90° est celui de sa distance à l'autre pôle (48).

CHAPITRE 40 : *Sur la détermination des ascensions des signes zodiacaux sur un globe ajusté.* On place les deux pôles du globe sur l'horizon et on fixe le premier point du signe dont on veut déterminer l'ascension sur l'horizon, puis on marque son équivalent sur l'équateur céleste. Ensuite on fait tourner le globe une première fois jusqu'à ce que les degrés des signes zodiacaux soient sur l'horizon est. On marque l'équivalent sur l'équateur céleste. Ensuite on compte [les degrés] entre la première et la deuxième marque. Ce qu'on obtient est le degré de l'ascension du signe du zodiaque [choisi]. Selon le même procédé, on obtient les ascensions des autres signes zodiacaux (49).

CHAPITRE 51 : *Sur la détermination de la longitude et de la latitude des étoiles tracées sur le globe.* On observe l'étoile, si elle est dans la moitié nord de la ceinture zodiacale, on fixe le pôle nord des signes du zodiaque sur le point du zénith et on fixe le globe [sur cette position-là]. Ensuite on fait tourner le cercle d'azimut jusqu'à ce qu'on voie au milieu de l'incision le centre de l'étoile dont on désire connaître la latitude et alors on le fixe aussi. Ensuite on manoeuvre l'index jusqu'à ce qu'on voie au milieu de la pinnule de l'appareil de mesure. On regarde l'index de hauteur pour connaître le degré [que le centre de l'étoile occupe] sur sa graduation. Ce degré est celui de la latitude de l'étoile. Le degré qui figure sur le cercle d'azimut dans la ceinture zodiacale est celui de la longitude de cette étoile (50).

*Université Libre de Bruxelles
Faculté de Philosophie et Lettres
50 av. F. Roosevelt
B-1050 Bruxelles*

47. fol. 33v.

48. fol. 41v.

49. fol. 44r.

50. fol. 47v-48r.

SUMMARY

The first part of this article presents an overview of the general principles of construction and fabrication of Islamic celestial globes. The second part analyses the treatise *Risālat al-'amal bi al-kura* (On the use of the celestial globe) by the 13th century Syrian astronomer and engineer Mū'ayyid al-Dīn al-'Urḍī, who invented a celestial globe that could be used for an indefinite period of time.