12- Saliba, G. and Kennedy, E.S., "The spherical case of Tūsī couple", *Arabic sciences and philosophy* I (1991) 285-91

13- Saliba, G., "The astronomical tradition of Maragha: A historical survey and prospects for future researceh", *Arabic science and philosophy*, I (1991), 67-99.

14- Swerdlow, N.M and Neugebauer, O, *Mathematical astronoy in Copernicus's De revolutionibus*, New York, 1984, 46-48

15- Veselovsky, I.N., "Copernicus and Nāsīr al-Dīn al-Tūsī", *Journal for the History of Astronomy*, IV (1973), 128-30

Kepler, New York, 1953, 269, n.1.

3- Hartner, W. "Nasīr al-Din al-Tūsī's lunar theory", *Physis,* xi (1969), 287-304

4- Kennedy, E.S., "Late medieval planetary theory", *Isis,* VII (1966), 365-78;

5- Kennedy, E.S., "Planetary theory in the medieval Near East and its transmission to Europe", in *Atti del convegno internazionale sul tema: Oriente e Occidente nel Medioeveo: filosofia e sciencze,* 9-15 aprile 1969, Rome, 1971

6- Livingston, J.W., "Nasīr al-Dīn al-Tūsī's al-Tadhkirah: A category of Islamic astronomical literature", *Centaurus,* XVII (1973), 260-75

7- Neugebauer, O., *A history of ancient mathematical astronomy,* New York, 1975, 1035, 1456

8- Neugebauer, O., *The exact sciences in Antiquity,* 2nd edition (Provident, 1957), 197

9- Ragep, F.J., *Cosmography in the 'Tadhkira' of Nāsīr al-Dīn al-Tūsī,* Ph. D. dissertation, Harvard University, 1982

10- Ragep, F.J., "The two versions of the Tūsī couple", in *Form deferent to equant: A volume of studies in the history of science in the ancient and medieval Near East in honor of E.S.Kennedy,* ed. By D.A. King and G. Saliba, New York, 1987, 329-57.

11- Rosinska, G., "Nāsīr al-Dīn al-Tūsī and Ibn al-Shātir in Cracow?", *Isis,* IXV (1974),239-43

a réalisé que cet ovale ne correspondait pas non plus à l'orbite de cette planète. Il a chois, finalement, une courbe très proche de cet ovale, c'est-à-dire, ≪ellipse≫ comme représentation de l'orbite de Mars et d'autres planètes.

BIBLIOGRAPHIE

Une partie du mémoire astronomique de Tusi (*Tadhkira*) a été traduit en français par Baron Carra de Vaux:

B. Carra de Vaux, "Les sphères célestes selon Nasir-Eddin Attusi", Appendix VI in P. Tannery, *Recherches sur l'histoire de l'astronomie ancienne* (Paris, 1893), 337-61.

Le texte arabe de *Tadhkira* avec la traduction anglaise et des commentaires historiques et astronomiques a été publié par F.J. Ragep:

Nasīr al-Dīn al-Tūsi, *Memoir on Astronomy* (al-Tadhkira fī 'ilm al-hay'a), Edited with Introduction, Translation and Commentary by F.J. Ragep, 2 vols., XV + 656 + XV pp., figs., index. New York-Berlin-Heidelberg-,Springer Verlag, 1993 (Sources in the History of Mathematics and Physical Sciences, 12).

Sur cette publication voir:

R. Morelon ≪Deux éditions récentes de textes d'astronomie arabe≫, *Arabic Sciences and Philosophy,* vol. 11 (2001) 297-303

Le texte arabe de ce traité a été publié également en 1993 par A. Soleyman au Caire.

Ce traité fut l'objet de nombreuses études dont en particulier:

1- Di Bono, Mario, ≪Copernicus, Amico, Fracastoro and Tusī' device: observations on the use and transmission of a model≫, *Journal for the History of Astronomy,* XXVI (1995) 133-152.

2- Dreyer, J.L., *History of the planetary systems from Thales to Kepler,* Cambridge, 1906, reprinted as *History of astronomy from Thales to*

Or, à partir de tout ce qui vient d'être montré, les historiens de l'astronomie pensent que lors de son séjour en Italie Copernic a probablement consulté le manuscrit du Vatican ou d'autres manuscrits semblables.[24]

Conclusion

A partir de ce que nous venons d'analyser dans cet article, nous pouvons établir notre conclusion sur deux plans distincts: épistémologique et mathématique.

Sur le plan épistémologique, Tusi, bien avant Copernic, a détruit la barrière entre le monde sublunaire et le monde supra lunaire en montrant par son ≪couple≫ que le mouvement circulaire se trouve partout dans l'Univers. L'univers de Tusi était donc homogène. Cet univers était encore homogène du fait que Tusi a proposé un modèle planétaire qui représentait les planètes se mouvant autour d'un seul centre, c'est-à-dire, la Terre avec un mouvement circulaire et uniforme. On voit alors une révolution dans l'astronomie. La deuxième révolution a été faite beaucopu, plus tard, par Copernic. Celui-ci, qui par ailleurs, connaissant l'œuvre de Tusi et de ses élèves a compris qu'il fallait transformer le système géocentrique de l'école de Maragha en système héliocentrique.

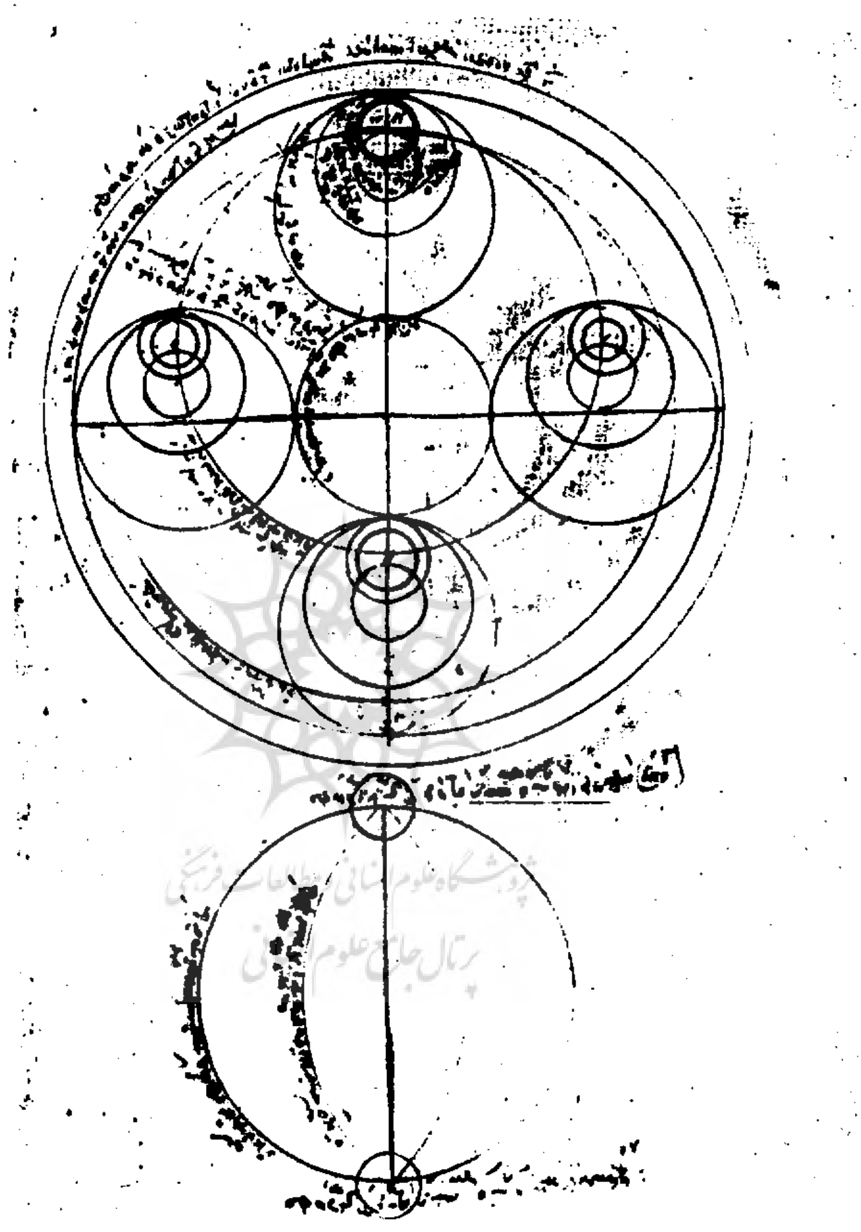
Sur le plan mathématique, nous signalons que Tusi, pour la permière fois, a substitué à la courbe de Ptolémée une autre plus facile que celle-ci.≪Cette courbe ovale et presque elliptique est passée, par l'entremise des traductions réunies dans les *Libros del Saber*, aux astromomes de la Renaissance (on l'y retrouve pour la première fois dans les *Théoricae plaetarum* de Purbach) et qu'elle a en effet incité Kepler à réfléchir à la possibilité de substituer aux cercles des courbes non circulaires≫[25]

Mais, après les observations précises de Tycho Brahe sur Mars, Kepler

---

24. "Of Copernicus's concern with astronomy during his years in Italy, 1496-1503, we know only that he assisted Dominico Maria di Novara in Bologna, gave some kind of lecture on mathematics in rome, and made some observations recorded in his notes or later used in *De revolutionibus*. Nevertheless, there is evidence that some account of Marāgha planetary theory was transmitted to Italy in the fifteenth century through Byzantine Greek sources, that it reached both Rome and Padua, and that it was of interest to Aristotelians concerned with physical problems of uniform circular motion of spheres, and even with homocentric spheres. It is thus probable that whatever Copernicus learned of Marāgha theory, and perhaps also his concern with physically permissible planetary models, were the result of his period in Italy, more specifically in Padua during 1501-03, which thus made a substantial contribution to his later work." (→ Swerdlow et Neugebauer, *op. cit.* p.)

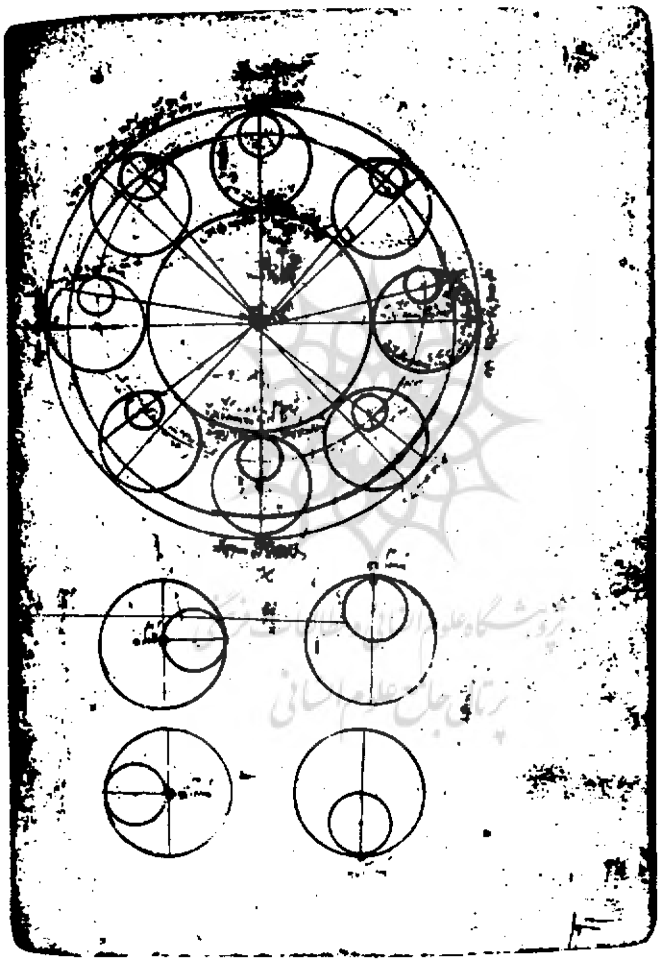
25. W. Hartner, ≪La science dans le monde de l'islam après la chute du califat≫, Studia Islamica, vol. XXXI, p. 147.



Une autre page de ce manuscrit

Figure 18

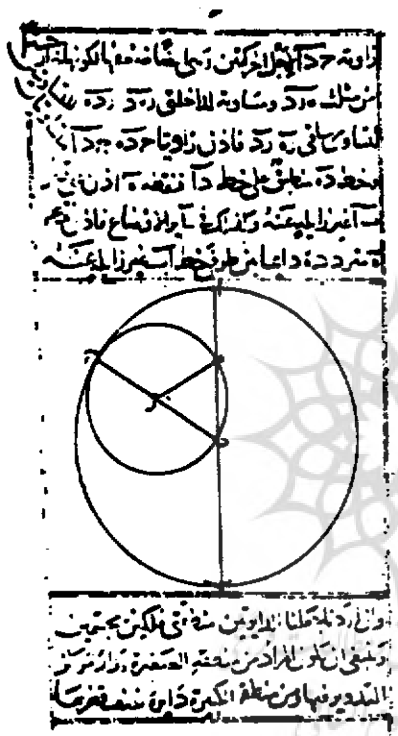
Reste à savoir comment Copernic aurait eu à sa disposition l'œuvre de Tusi et de l'école de Maragha. Car, jusqu'à présent, on ne connaît aucune traduction latine de ces ouvrages. Par contre, dans la Bibliothèque du Vatican, est conservé depuis 1475 un manuscrit qui contient une traduction en langue grecque de la théorie lunaire de Tusi. Cette traduction a été exécutée vers 1300 par un dénommé Chioniade à partir du texte arabe.



Une page du manuscrit Vatican (vat. Gr. 211. f. 1117r) montrant le modèle lunaire de Tusi

Figure 17

naire aussi est identique à celui de Ibn Shatir. Willy Hartner. Tout en comparant certains schémas de Tusi avec ceux de Copernic, a montré que les lettres utilisées dans ces schémas sont également identiques.[23]



Le couple de Tusi dans *Tadhkira* (Ms. Laleli 2116 fols. 38b)

Le couple de Tusi avec les mêmes lettes dans *De Revolutionibus* de Copernic publié en 1543 à Nuremberg

---

"In *De revolutionibus* he [Copernic] uses the form of Tūsi's device with inclined axes for the inequality of the precession and the variation of the obliquity of the ecliptic, and in both the *Commentariolus* and *De revolutionibus* he uses it for the oscillation of the orbital planes in the latitude theory. In the *Commentariolus* he uses the form with parallel axes for the variation of the radius of Mercury's orbit, and by implication does the same in *De revolutionibus* although without giving a description of the mechanism. The planetary models for longitude in the *Commentariolus* are all based upon the models of Ibn ash-Shātir." (→ N.M. Swerdlow and O. Neugebauer, *Mathematical astronomy in Copernicus's De revolutionibus*, New York, 1984, p.).

23. W. Hartner, "Trepidation ...", *op. cit.* p. 618.

de Vaux qui avait pourtant traduit le texte de Tusi, ignorait sa valeur car il ne connaissait pas suffisamment le système de Copernic. Ce n'est qu'en 1957 que Neugebeauer, grand historien de l'astronomie, après avoir comparé l'œuvre de Tusi avec celle de Copernic, affirma que Copernic avait vraiment subi son influence ainsi que celle de l'école de Maghara.[20]

Otto E. Neugebauer a affirmé en 1957 l'influence de Tusi sur Copernic

Les recherches ultérieures ont confirmé cette affirmation.[21] En effet, Copernic dans son système a utilisé à plusieurs reprises ≺le couple de Tusi≻, notamment dans son modèle pour Mercure.[22] Son modèle lu-

à toucher ce que les penseurs grecs avaient déclaré purement fictif et abstrait; ils ont voulu réaliser, en des sphères solides roulant au sein des cieux, les excentriques et les épicyles que Ptolémée et ses successeures donnaient comme artifices de calcul; mais, dans cette œuvre même, ils n'ont fait que copier Ptolémée.≻
(→ P. Duhem, *Le système du monde*, Paris, Hermann, 1914, vol. 2, pp. 117-118

20. "... Copernicus had at his disposal a device of at-Tusi" (→ O.Neugebauer, *The exact sciences in Antiquity*, second edn, Providence, 1957, p. 203).

21. W. Hartner, "Trepidation and Planetary Theories common features in late Islamic and early Renaissance astronomy", in W. Hartner. *Oriens-Occidens*, Hidelesheim, 1968, vol. 1, pp.

22. Swerdlow et Neugebauer à ce propos ont ècrit:

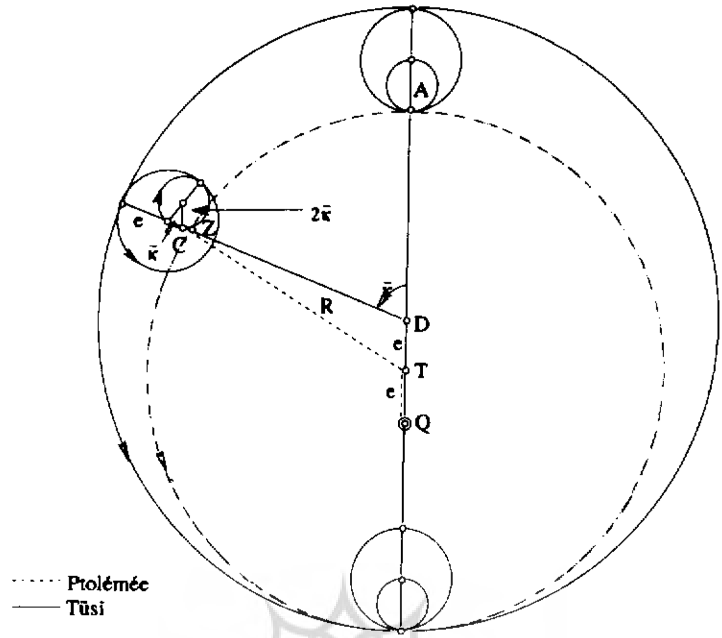


Figure 16

Voilà ce que nous pouvons exposer dans un article sur l'originalité de Tusi en astronomie. L'influence de Tusi dans l'Orient musulman est très remarquable. Cette influence est visible particulièrement chez ses contemporains tels Qutb al-Din Shirazi et 'Urdhi et on trouve plus tard encore cette influence chez Ibn Shatir, grand astronome syrien.

III- L'influence de Tusi sur copernic

L'influence de Tusi sur Copernic est indéniable, mais n'a vraiment été mise en évidence que depuis un demi siècle. La raison de cette négligence vient du fait que les historiens de l'astronomie tels P. Duhem qui méprisaient l'astronomie islamique, ignorait complètement les innovations de l'école de Marāgha.[19] Paradoxalement, quelqu'un comme le Baron Carra

19. En dehors de cette ignorance, Duhem comme la plupart des historiens occidentaux, regardait toujours la science islamique avec des préjugés raciaux. Par exemple, à propos de l'astronomie islamique, il prétend que: ≪Les Arabes n'ont pas reçu en partage la prodigieuse ingéniosité géométrique des Grecs; ils n'ont pas connu davantage la précision et la sûreté de leur sens logique. Ils n'ont apporté que de bien minces perfectionnements aux hypothèses par lesquelles l'Astronomie hellène était parvenue à résoudre en mouvements simples la marche compliquée des planètes. Et d'autre part, lorsqu'ils ont examiné ces hypothèses, lorsqu'ils ont tenté d'en découvrir la véritable nature, leur vue n'a pu égaler en pénétration celle d'un Posidonius, d'un Ptolémée, d'un Proclus ou d'un Simplicius; esclaves de l'imagination, ils ont cherché à voir et

al-Din. Puisque les méthodes à employer ici pour calculer cette différence maxima ne sont pas du tout triviales, on a une raison de plus d'admirer l'intuition géniale de ce grand maître.≫[17]

II-3 Théorie de Tusi pour le mouvement des planètes supérieures:

Dans le système de Ptolémée une planète supérieure, comme on peut le voir dans la figure, se meut sur la circonférence d'un épicycle de centre C. Ce centre ≪C≫ se meut également tout au long d'un cercle excentrique, de centre T, ce mouvement est uniforme non par rapport à T, mais par rapport à D qui est situé sur la ligne ATQ de sorte que QT=TD.

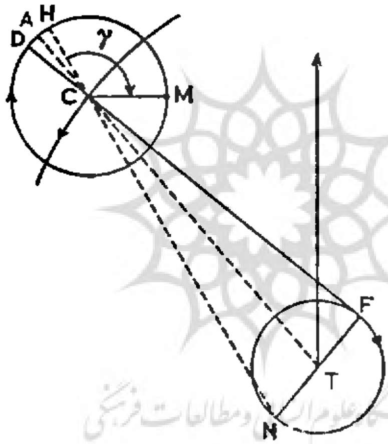


Figure 15

Comme pour sa théorie lunaire, ici encore Tusi tâche de faire tourner la planète P avec un mouvement circulaire et uniforme autour de la terre - le centre de l'univers. Pour cela il fait tourner ≪un couple≫ de telle façon que le ≪centre de l'épicycle se rapproche également de l'équant lorsque l'épicycle se trouve au périgée. Le ≪couple≫ lui-même est porté par un déférent qui est maintenant concentrique à l'équant.≫[18]

17. W. Hartner, ≪La science dans le monde de l'islam après la chute du califat≫, *Studia Islamica*, vol. XXX, p. 166.

18. G. Saliba, ≪Les théories planétaires en astronomie arabe après le XIè siècle≫, in *Histoire des sciences arabes, op. cit.* pp. 126-127.

Maintenant pour trouver la différence maxima entre les rayons vecteurs de la courbe de Tusi et ceux de la courbe de Ptolémée nous devons écrire: $r - p = R - e - \sqrt{(R-e)^2 - e^2 Sin^2\varphi}$. Cette différence atteint évidemment son maximun en $\varphi = 90°$.
Nous avons donc

$$|r - p|_{90} = R - e - \sqrt{(R-e)^2 - e^2}$$

$$|r - p|_{90} = \frac{\left[(R-e) - \sqrt{R^2 - 2eR}\right]\left[(R-e) + \sqrt{R^2 - 2eR}\right]}{(R-e) + \sqrt{R^2 - 2eR}}$$

$$|r - p|_{90} = \frac{e^2}{(R-e) + \sqrt{R^2 - 2eR}}$$

Si l'on considère: $\sqrt{R^2 - 2eR} \approx (R - e)$

On a: $|r - p|_{90} = \frac{e^2}{2(R-e)} = \frac{10;19^2}{99;22} = 1;04^p$

$$p_{90} = \sqrt{(R-e)^2 - e^2} = 48;37^p$$

Mais puisque le rayon de l'épicycle est $\rho = 5;15^p$, nous obtenons la valeur maxima de la *prosthaphairesis* dans le cas de la courbe de Tusi de la manière suivante:

$$Sin\xi_1 = \frac{\rho}{r_{90}} = \frac{5;15}{49;41} = 0,10567$$

$$Sin\xi_1 = 6°2'57''$$

et dans le cas de la courbe de Ptolémée nous obtenons:

$$Sin\xi_2 = \frac{\rho}{r_{90}} = \frac{5;15}{48;37} = 0,10799$$

$$Sin\xi_2 = 6°11'57''$$

Donc:

$$|\xi_1 - \xi_2| \max = 8'0'' < 10'$$

Alors, ≪les différences en longitude [du modèle de Tusi] avec le ptoléméen en résultant ne surpassent pas en effet les 8 minutes d'arc, ce qui est en parfait accord avec la valeur maxima de 10 minutes indiquée par Nasir

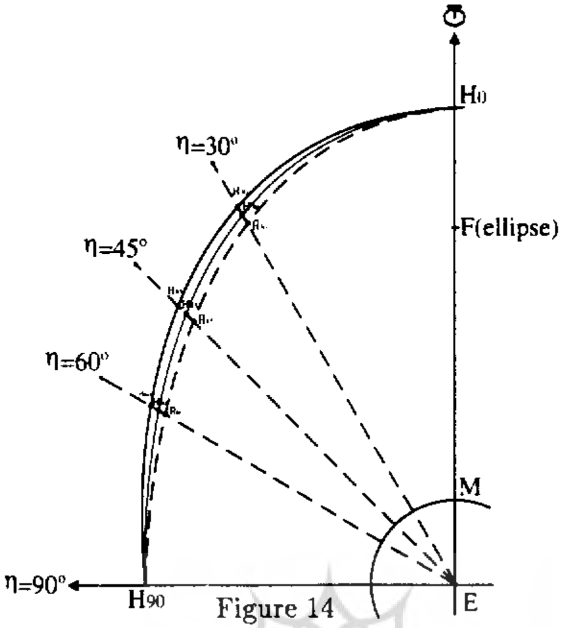


Figure 14

Pour un rayon vecteur r=EH d'un point sur la circonférence de la courbe de Tusi, nous avons: $r = R - e + eCos\varphi$. De même, pour un rayon vecteur de la courbe de Ptolémée p =EH' nous avons:

$$p = \sqrt{(R-e)^2 - e^2 Sin^2\varphi} + eCos\varphi$$

Car, si dans la figure - nous traçons la perpendiculaire MN sur EH nous avons:

$$EH = EN + NH = eCos\varphi + NH$$

Mais dans le triangle rectangle MNH nous avons:

$$NH = \sqrt{(R-e)^2 - e^2 Sin^2\varphi}$$

Donc $p = eCos\varphi + \sqrt{(R-e)^2 - e^2 Sin^2\varphi}$

Et pour $q = \overline{EH}$ le rayon vecteur de l'ellipse nous avons:

$$q = \frac{R(R-2e)}{\sqrt{(R-e)^2 + e^2 - 2e(R-e)Cos\varphi}}$$

Et pour la théorie lunaire de Tusi, nous avons:
($\varphi = 2\eta =$ double de l'élongation du centre de l'épicycle à partir du soleil moyen.)

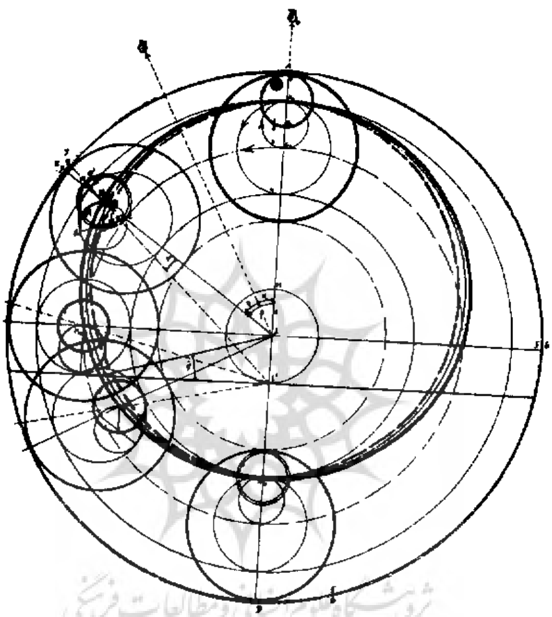


Figure 13

Pour comparer ces deux théories nous devons tracer la courbe de Ptolémée et celle de Tusi. Dans la figure 14 nous avons trois courbes: la courbe extérieure est celle de Tusi et celle du milieu appartient à Ptolémée. Enfin, la courbe inférieure est une ellipse.

Et pour montrer que la théorie de Tusi est aussi exacte que celle de Ptolémée, nous utilisons la démonstration de W. Hartner.[16] La figure suivante montre le modèle lunaire de Ptolémée.

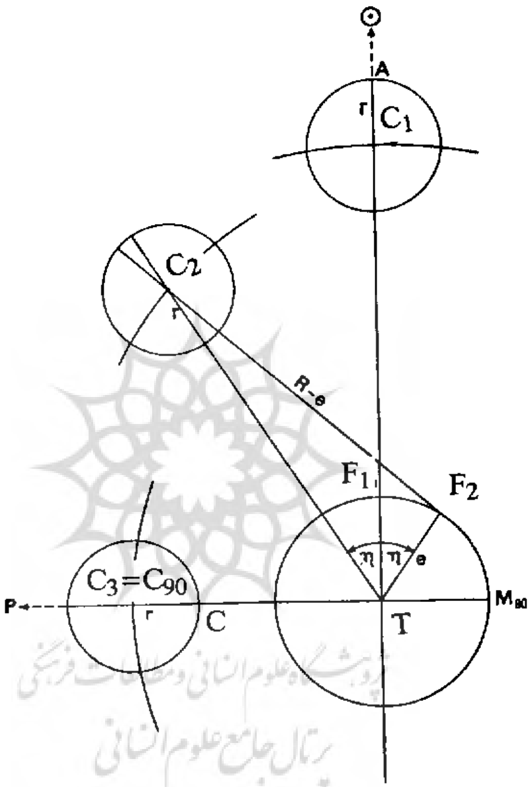


Figure 12

16. W. Hartner, "Nasīr al-Din al-Tūsī's lunar theory", *Physis*, xi (1969), pp. 287-304

dans chaque sens un angle égal à l'équation maximale de Ptolémée.≫[15]

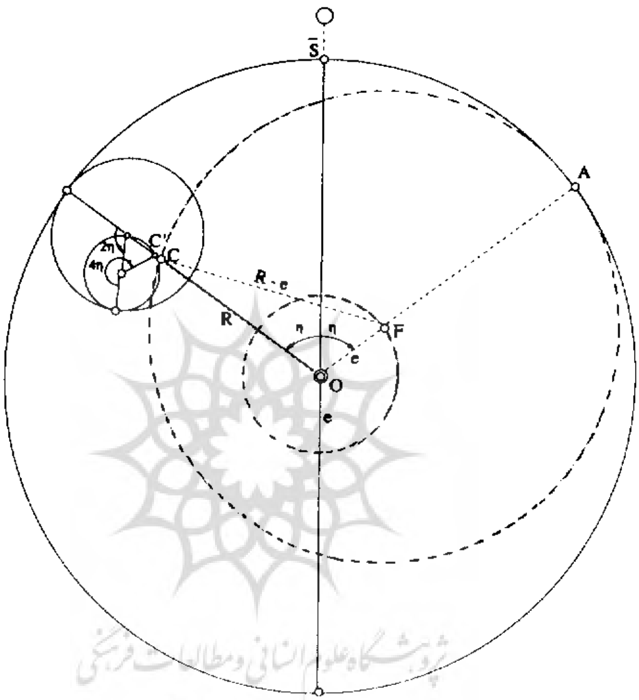


Figure 11

15. G. Saliba, ≪Les théories planétaires en astronomie arabe après le XIè siècle≫, in *Histoire des sciences arabes*, sous la direction de R. Rashed, Paris, Seuil, 1997, vol. 1 pp. 110.

traire. A la position (1) le modèle équivaut à un modèle épicyclique simple. A la position (3), quand la Lune est à l'apogée ou au périgée sur l'épicycle (c'est-à-dire en a ou en c) le modèle équivaut encore à un modèle épicyclique simple, en ce qui concerne la distance angulaire de la Lune par rapport au Soleil. Mais à la position (3), lorsque la Lune est en b ou en d, à mi-chemin de l'apogée et du périgée sur l'épicycle, l'effet du nouveau modèle est d'augmenter le diamètre apparent de l'épicycle.≫[14]
Ainsi Ptolémée a réussi à trouver corectement la position de la Lune dans le ciel.Mais ce modèle ne correspondait pas à la réalité physique. Autrement dit, pour les savants de cette époque, il était impensable que ce systme-là soit réalisable dans l'Univers. Car, la Lune ne tournait pas d'après ce modèle autour de la Terre. De plus dans ce système on trouve aussi un mouvement d'oscillation en ligne droite, ce qui contrarie le dogme métaphysique de la circularité.
Le modèle qui a été proposé par Tusi est aussi exacte que celui de Ptolémée avec cet avantage qu'il n'a pas les défauts de celui-ci.

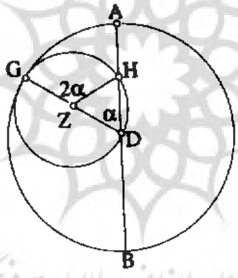


Figure 10

En effet si dans le modèle lunaire de Ptolémée on fait intervenir le ≪couple AGD≫ de telle sorte que la Lune soit au point H et que le point D soit sur le cercle déferant. Ainsi le déférant de la Lune tourne uniformément autour de la Terre. De plus l'épicycle se trouve ≪plus près de la Terre aux quadratures et plus loin d'elle aux conjonctions et aux oppositions de façon à se rapprocher des équations maximales observées par Ptolémée. Pour le point de prosneuse, Tusi adopte un ≪couple≫ sphérique qui, comme dans le cas du plan, permette à l'extrémité du diamètre de l'épicycle d'osciller en arrière et en avant en parcourant

14. Geoffrey, E. R. Lloyd, *La science grecque après Aristote*, traduit de l'anglais par Jacques Brunschwig, Paris, 1990, p. 142.

II-2- La théorie lunaire de Tusi

Nous avons déjà discuté sur l'anomalie du soleil. L'anomalie de la lune est encore plus compliquée. Pour expliquer l'anomalie de sa révolution (rétrograde) Ptolémée représentait la Lune en mouvement sur son épicycle, tandis que le centre de celui-ci se mouvait lui-même sur un cercle excentrique.

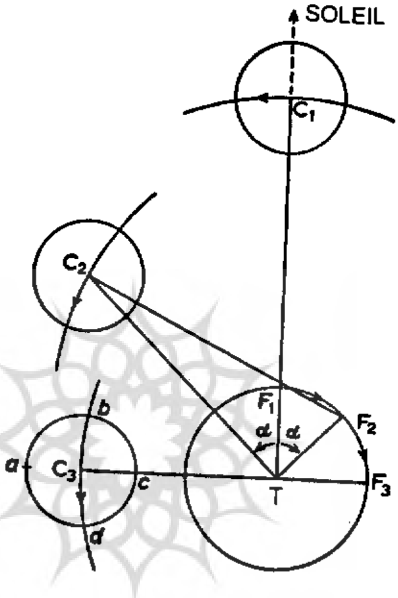


Figure 9

Mais la Terre n'étant pas au centre du cercle déférent, cette inégalité paraissait plus grande lorsque la Lune était plus près de la Terre; plus petite lorsqu'elle en était plus loin. Cependant, il résulte de ce que la Terre n'est pas au centre, que si, dans un point quelconque, la Lune a eu une inégalité plus grande, parce que la Terre était plus près, elle doit en avoir une d'autant plus petite dans le point diamétralement opposé parce que la Terre est plus loin. Ptolémée a senti qu'il fallait une orbite étendue dans sa longueur dans le sens des sizygies, resserrées dans ses flancs, dans le sens des quadratures. C'est pour cette raison que Ptolémée représentait un nouveau modèle. Dans celui-ci ≪l'épicycle de la Lune, de centre C, se meut autour d'un centre F qui lui-même tourne autour de la Terre (T). F tourne autour de T avec la même vitesse angulaire que le mouvement de C autour de T, mais dans le sens con-

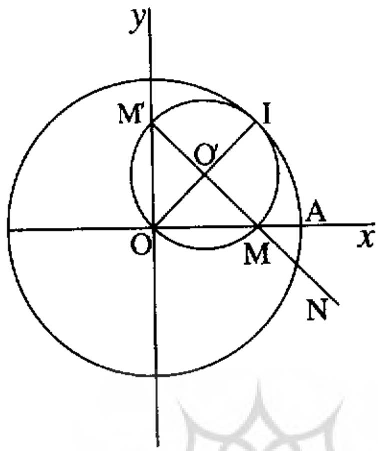


Figure 8

Le couple de Tusi que nous venons de démontrer, en dehors de son intérêt géométrique, a du point de vue philosophique une importance capitale. Car il a aboli ainsi l'un des principes fondamentaux de la physique d'Aristote selon lequel le mouvement circulaire appartient uniquement au monde céleste.[12] Il faut signaler également que Tusi après avoir démontré son couple généralise cèlui-ci,dans l'espace sans en donner de démonstration.[13] Nous allons voir comment Tusi utilise ce couple pour son système planétaire.

12. Mario di Bono à ce propos écrit: "Tūsī's lemma, afterwards used by the other astronomers of the Marāgha School, is both "trivial and revolutionary": trivial because of its simplicity, and revolutionary because it undermines the foundation of one of the fundamental assumptions of Aristotelian physics, namely the distinction between circular celestial and rectilinear terrestrial motion; and it is significant that neither Copernicus nor any of his contemporaries took the opportunity to use this argument to challenge Aristotle's authority."
(→ Mario di Bono "Copernicus, Amico, Fracastoro and Tusī's device: Observations on the use and transmission of a model", *Journal for the history of Astronomy*, XXVI (1995), p. 135.

13. G. Saliba and E.S. Kennedy, ≪The spherical case of the Tūsī couple≫, *Arabic sciences and philosophy*, i (1991), 285-91.

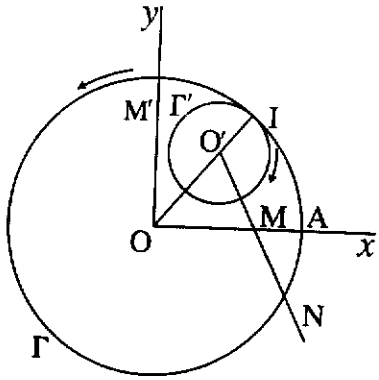


Figure 7

l'indique la figure, la projection orthogonale du contour OO'N sur Ox donne:

$$x = \overline{OO'}Cos\phi + \overline{O'N}Cos(Ox, O'N)$$

C'est-à-dire:

$$x = (r - r')Cos\phi + dCos(\phi' - \phi) \tag{2}$$

On aura de même:

$$y = (r - r')Cos\phi - dCos(\phi' - \phi) \tag{3}$$

Par exemple, si $r = nr'$, on a $\phi' = n\phi$ et

$$x = (n-1)r'Cos\phi + dCos(n-1)\phi,$$
$$y = (n-1)r'Sin\phi - dSin(n-1)\phi$$

On en conclut aisément que la courbe décrite par le point N est unicursale, car $Sin\phi, Cos\phi$, $Sin(n-1)\phi, Cos(n-1)\phi$, s'expriment rationnellement en fonction de $Tan\frac{\phi}{2}$.

En particulier, si n= 2, on a:

$$x = (r' + d)Cos\phi, y = (r' - d)Sin\phi$$

Si l'on suppose de plus $d = r'$, le point N confondu avec M décrit le diamètre AA' de la base.

b- Démonstration géométrique

Dans cette partie nous démontrons tout d'abord le couple de Tusi dans un cas général et nous analysons par la suite le cas particulier évoqué par Tusi lui-même.
Imaginons donc qu'un cercle C'appelé roulette roule sans glisser à l'intérieur d'un cercle fixe C appelé base. Un point M de C' décrit sur le plan fixe une courbe qu'on appelle hypocycloïde.
Soient O et O'les centres de la base et de la roulette, r et r'leurs rayons respectifs. Dans le déplacement de C', le point M vient plusieurs fois sur C; soit A l'une de ses positions particulières. I étant le point de contact de C et C', l'un des arcs AI, compté sur C, est égal à l'un des arcs MI, compté sur C', puisque le roulement a lieu sans glissement. Soient ϕ et ϕ' les angles AOI, MO'I mesurés en radians; on a donc:

$$r\phi = r'\phi' \qquad (1)$$

Si r vaut nr', n désignant un nombre naturel, le point M revient n fois sur C aux sommets d'un polygone régulier convexe de n côtés inscrit dans la base. M décrit alors une courbe fermée composée de n arceaux égaux. Si r vaut $\frac{p}{q}$r' la fraction étant irréductible et supérieure à l, le point M revient p fois sur C, aux sommets d'un polygone régulier étoilé de p côtés, inscrit dans la base et obtenu en joignant les points de division de p en q.
M décrit encore une courbe fermée, composée de p arceaux, mais, cette fois, les arceaux se croisent au lieu d'être juxtaposés.
si r et r'n'ont pas de commune mesure, la courbe décrite par M ne se ferme pas.
Dans tous les cas, les points tels que A sont des points de rebroussement de la courbe décrite par M; en vertu des propriétés générales du déplacement d'un plan mobile sur un plan fixe, la normale à la trajectoire de M est MI et la tangente est MI' le point I' étant diamétralement opposé à I sur la roulette, de sorte que si M vient en A, la tangente correspondante est OA.
Cherchons une représentation paramétrique du lieu décrit sur le plan fixe par un point quelconque N du plan entraîné avec C'. Prenons N sur le prolongement de O'M et posons O'N=d.
L'axe Ox étant placé suivant OA et l'axe Oy perpendiculaire, comme

Tusi revendique la paternité de ce théorème et il le démontre par la géométrie élémentaire. Dans cet article nous démontrons celui-ci de deux manières différentes, c'est-à-dire expérimentale et géométrique.

a- Démonstration expérimentale:

supposons le centre C du cercle mobile fixé à un disque tournant D, alors qu'une tige est attachée au point P du même cercle. Dans sa rotation, le disque D entraîne le petit cercle et le fait rouler à l'intérieur du grand et la rotation ainsi provoquée fait mouvoir la tige en ligne droit de gauche à droite et de droite à gauche.

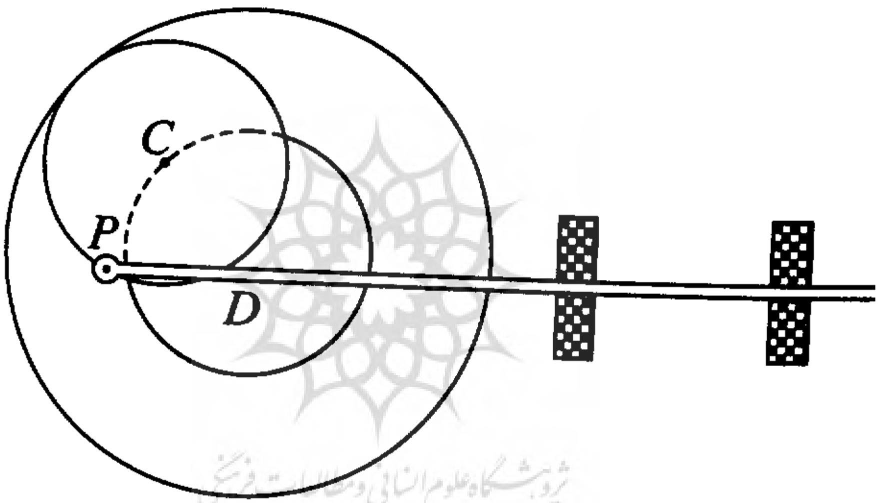


Figure 6

II-1- Le couple de Tusi

La théorie planétaire de Tusi est étroitement liée à un théorème géométrique que l'on appelle couramment ≪le couple de Tusi≫. D'après ce théorème, si un cercle roule sans glisser à l'intérieur d'un cercle de rayon double, tout point du cercle mobile se meut simplement de gauche à droit et de droite à gauche le long du diamètre du grand cercle.

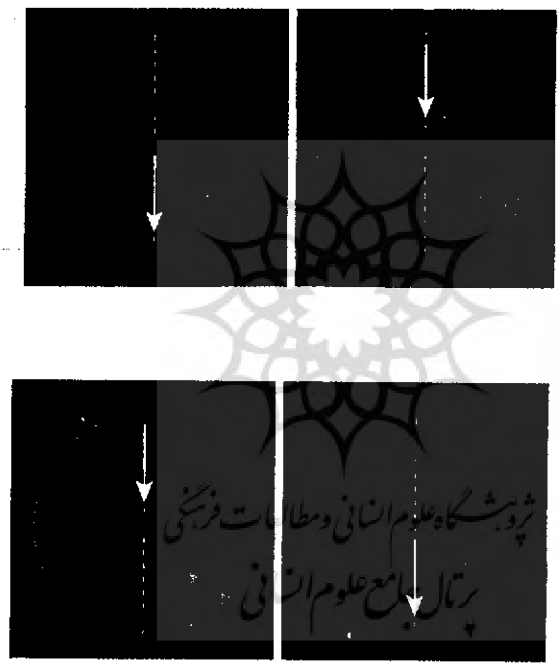
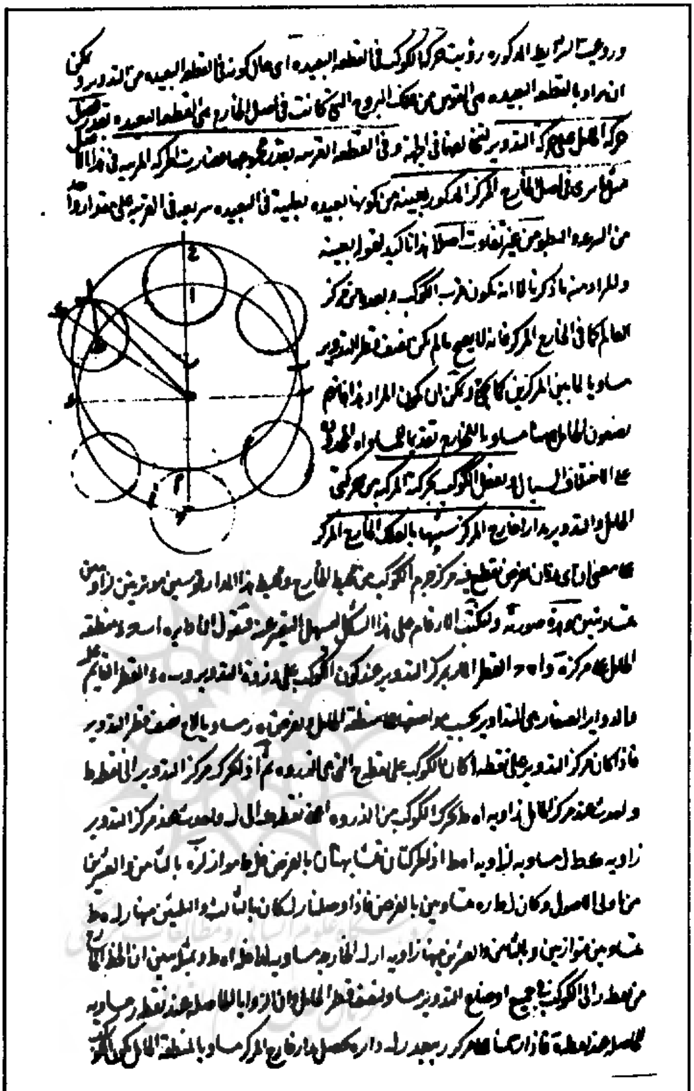


Figure 5

Nous concevons ainsi un système qui transforme un mouvement circulaire en mouvement rectiligne alternatif et inversement.[11]

---

11. Voir:
-G.Saliba, ≪Greek astronomy ...≫ *op.cit.* p.366.
-B.Carra de Vaux,≪Le sphères célestes selon Nasir Eddin Attusi≫,Appendix VI in P.Tannery,*Recherches sur l'histoire de l'astronomie ancienne*,Paris 1983,337-61,p.348.



شرح التذكرة النصيرية، نسخة شمارة ۷۷۹۹.

Fac-similé d'une page de commentaire de Tadhkira écrit par Birjandī, conservé à la Bibliothèque d'Ayatollah Marashi à Qom

Nous arrêtons ici la description générale de ce traité pour passer à la partie essentielle, c'est-à-dire la théorie planétaire de Tusi.[10]

10. Pour une description plus détaillée de ce traité voir: John W. Livingston ≪Nasir al-Din al-Tusi's al-Tadhkirah: A category of Islamic Astronomical Literature≫. *Centaurus*, XVII (1973), 260-75.

rédigeaient des traités astronomiques. Tusi, le maître de cet observatoire collaborait ardemment avec un groupe de savants venus de divers pays pour faire avancer la science des planètes et des astres. Ils voulaient ≪remettre à plat toutes les questions des modèles géométriques capables de rendre compte du mouvement des astres, de telle façon que puissent être élaborés d'autres modèles aptes à faire coïncider une astronomie mathématique et une astronomie physique, rendant possible, au terme du travail la réalisation d'une sorte de maquette de l'Univers. Les nouveaux modèles élaborés dans l'école ainsi constituée sont toujours géocentriques, mais ne correspondent plus à ceux de Ptolémée, il rendent compte du mouvement des astres de façon beaucoup plus satisfaisante, et il est possible de les inclure dans des corps dont le mouvement est circulaire uniforme, comme l'exige l'un des principes de base de l'astronomie ancienne≫[8]
Le *Tadhkira* (Mémoire de la science de l'astronomie) de Tusi est le premier résultat de Marāgha. Il est le fruit d'une synthèse de l'astronomie et de la physique. L'originalité de cette œuvre consiste dans la proposition d'une théorie qui diffère complètement de celle de Ptolémée. Tusi divise dans ce traité les principes en deux catégories différentes:

1) Les principes physiques et géométriques

2) Les principes astronomiques.

Il discute ensuite sur ≪Les mouvements des corps célestes pris un par un, et termine par la terre avec les distances de tous les astres à ce *centre du monde.* La partie consacrée à la terre représente environ les deux cinquièmes de l'ensemble de l'ouvrage. Cette structure d'un traité d'astronomie se place dans la tradition inaugurée dans la première moitié du IXème siècle à Bagdad avec le célèbre *Compendium d'astronome* d'al-Farghani, sauf pour l'ordre des descriptions de la terre, après les problèmes de chronologie et les principes astronomiques.≫[9]. Cet ouvrage de Tusi, grâce à son importance a été commenté par plusieurs astronomes islamiques, notamment par Jurjanî et Birjandī.

---

8. Régis Morelon ≪Deux éditions récentes de textes d'astronomie arabe≫ *Arabic Science and Philosophy* vol. 11 (2001), p. 298.
9. *Ibid.* p. 299.

fruit de longues années des réflexions philosophiques et de recherches astronomiques.
Il importe de signaler que ce grand savant a vécu dans une période particulièrement troublée de l'histoire de l'Iran. A cet époque l'Iran subissait les attaques sanglantes et dévastatrices des Mongols. Les villes et les villages étaient plongés dans une ère tragique de massacres, d'insécurité et de destruction. Chacun fuyait pour se mettre à l'abri en d'autres villes et contrées. C'est peut-être pour cette raison que Tusi se réfugia auprès des ismaélites à Alamute. Mais très rapidement il compris qu'il était étranger à cette secte mystérieuse mêlant dans le sang et le poison son mysticisme le plus ascétique. Il tenta alors d'échapper à cette citadelle et de se rendre à Bagdad. Mais il réalisa vite qu'il ne pouvait échapper à ces gens car la mort attendait celui qui s'aventurerait dans cette montagne au bord des abîmes et non pas la mort violente et loyale qui donne un combat même inégal, mais une mort imprévue et insidieuse qui lentrment flaire sa victime. Il ne lui restait alors d'autre choix que de supporter sa situation et de travailler pour les ismaélites. Par ailleurs, le chef des ismaélites connaissant la valeur de son invité lui demanda d'écrire des traités scientifiques et moraux, tout en mettant à sa disposition les moyens nécessaires. C'est dans ces conditions que Tusi a rédigé son livre célèbre sur la morale en langue persance. C'est aussi dans cette période qu'il a écrit son traité astronomique intitulé *Moiniyé,* toujours en langue persane. Dans ce traité, après une analyse critique de la théorie ptoléméenne il a mis au jour une nouvelle hypothèse planétaire. Il ne restait plus qu'à justifier cette hypothèse avec la réalité objective pour en faire une théorie scientifique. Cette justification a été faite plus tard à l'observatoire de Marãgha. En fait, à la suite de la destruction de la citadelle des ismaélites par Hūlagū, Tusi, grâce à sa connaissance politique est devenu son ministre. Il a fait de ce Mongol sanguinaire un admirateur des arts et des sciences, et surtout de la science des étoiles. Il l'a encouragé à construire l'observatoire de Marãgha. Cet observatoire était en réalité une institution grandiose dans laquelle les chercheurs observaient les étoiles, créaient les instruments indispensables à cette observation[7] et

7. Sur les instruments astronomiques de cet observatoire, voir: A. Jourdain, ≪Mém. sur les instruments employés à l'observatoire de Méragah≫ (*Mag. Encyclopédique ou Journal des Sciences,* T. VI, Paris 1809, pp. 43-101); voir aussi H.J. Seemann, "Die Instrumente der Sternwarte zu Marâgha nach den Mitteilungen von al 'Urdī" (*Sitzungsbericht d. Physik.-medizin. Sozietat zu Erlangen,* t. 60, 1928, pp. 15-126.

Les astronomes musulmans ont admiré et commenté ce livre excellent de l'astronomie ancienne. Cependant très vite ils l'ont trouvé complexe et insuffisant, non seulement du point de vue astronomique mais aussi et surtout au point de vue cosmologique. Car, fidèle à la cosmologie d'Aristote, ces astronomes pensaient que les mouvements planétaires devaient être reproduits exclusivement par la composition de mouvements circulaires uniformes. Ibn Haytham, célèbre mathématicien et astronome du XIème siècle, dans son traité intitulé *Doutes sur le systèm de Ptolémée*, critiqua sévèrement celui-ci.

D'aparès Ibn-Haytham ≪Les mouvements des astres correspondent à une véritable structure dans des corps existants que Ptolémée n'a pas comprise, et à laquelle il n'est pas arrivé. En effet, il n'est pas vrai qu'il puisse exister un mouvement sensible permanent et rigoureusement uniforme sans qu'il corresponde à une structure dans des corps existants. Voilà tout ce que nous disons sur ce qui est lié au livre de l'*Almageste.*≫[5]

Des critiques semblables ont été faites en Espagne musulmane, notamment par le philosophe Averroès, un aristotélicien convaincu. D'après celui-ci ≪Ce sont les astronomes postérieurs à Aristote, qui sous prétexte de simplification ont imaginé l'hypothèse des excentriques et des épicycles alléguant, comme le fait Ptolémée, que ce système est plus noble, puisqu'il peut se prévaloir d'une plus grande simplicité. Mais à supposer que cette prétention soit justifiée, la simplicité doit être subordonnée à la possibilité: c'est seulement entre deux ou plusieurs systèmes également possibles, également conformes aux principes généraux de la nature, c'est-à-dire de la physique aristotélicienne, que le principe de la simplicité des lois de la nature doit assurer la victoire au plus simple. Il faut donc en revenir au système d'Aristote et des Anciens.≫[6]

II- La théorie planétaire de Tusi

Malgré ces critiques et ces attaques la théorie de Ptolémée restait toujours l'unique représentation du mouvement planétaire. Il n'existait aucune théorie qui pouvait rivaliser avec elle. C'est seulement au XIIIème siècle qu'une théorie rivale est apparue. Nasir al-Din al-Tusi, auteur de cette théorie, était un philosophe et un astronome. Son œuvre était le

5. Régis Morelon, ≪Ibn al-Haytham et ses arguments cosmologiques≫ *Epistémologiques* vol. I (1-2) janvier-juin 2000, p. 107

6. L. Gauthier, ≪Une réforme du système astronomique de Ptolémée tentée par les philosophes arabes du XIIè siècle≫, *Journal Asiatique*, vol. 14, 10 série (1909), pp. 503-504.

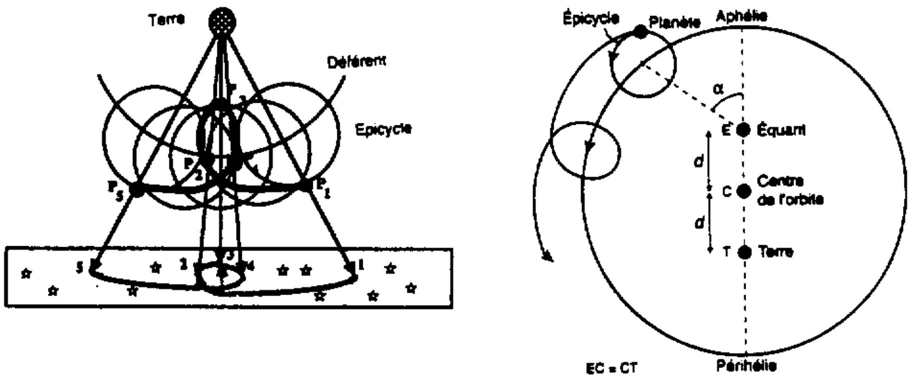


Figure 4

fameux système planétaire afin d'expliquer les mouvements de plusieurs planètes. Ptolémée en proposant son systèm voulait en effet mathématiser les phénomènes astronomiques. Autrement dit, il voulait montrer la nature sous un aspect uniforme et invariable. Cette mathématisation, certes était un grand progrès dans l'histoire de l'astronomie, mais ne s'accordait pas avec la physique d'Aristote. Elle était par ailleurs trop complexe pour déterminer les positions des planètes. Tout cela a déclenché la critique des philosophes et des astronomes. Déjà dans l'antiquité tardive Proclus voyait dans ce systèm une trahison de la pensée de Platon. «Il lui reprochait le caractère artificiel et compliqué de ses hypothèses et sa prétention d'expliquer les processus naturels en faisant appel aux réalités mathématiques.».[4] Cette critique est tout à fait justifié, car Ptolémée avait dérogé au principe fondamental qui selon Aristote devait commander tout explication du cours des planètes. De plus la théorie de Ptolémée est rendue très compliquée par la présence de multitudes de cercles excentriques déférents et épicycles dans lesquels l'esprit se perd faute d'une systématisation. Plus grave encore, on ne trouve pas d'explication du principe d'ordre qui régit le mouvement des planètes, à savoir la concordance de leurs distances à la Terre avec leurs périodes de révolution. Lorsqu'au IXème siècle *Almageste* de Ptolémée a été traduit en arabe, il est devenu la base de la recherche astronomique islamique.

4. F. Russo, «L'explication des mouvements des planètes des Grecs à Kepler», *Cahiers d'histoire et de philosophie des sciences*, nouvelle série N° 30-1990, p. 124.

Mais les planètes, outre l'inégalité zodiacale, présentent une autre inégalité qui produit le phénomène des stations et des rétrogrades. Le mouvement de Mars, par exemple, prend deux aspects remarquables. En premier lieu, la planète parcourt, en des intervalles de temps égaux, des distances différentes et sa vitesse comme nous pouvons l'observer varie continuellement. En second lieu, sa trajectoire n'est pas circulaire. Elle forme des boucles et la planète semble revenue sur ses pas. C'est le mouvement rétrograde.

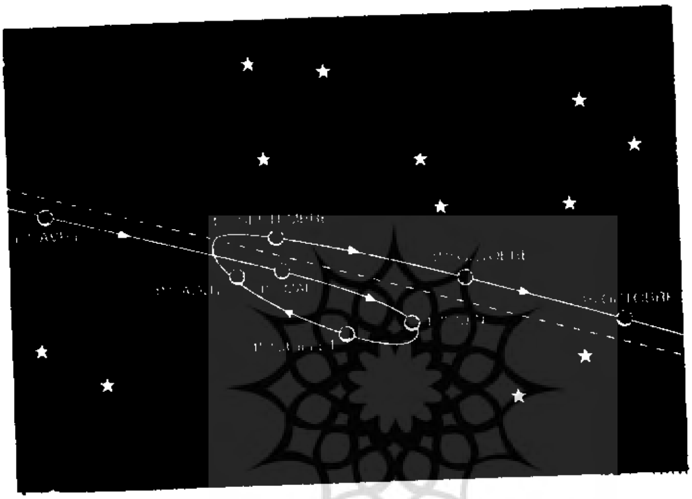


Figure 3

Comment peut-on interpréter cette inégalité avec la conception qui prévalait les mouvements circulaires et à vitesse constante? Pour sauver cette deuxième inégalité Appolonius, contemporain de Hipparque, a utilisé la méthode de l'épicycle. Cette méthode consiste à supposer qu'une planète se meut en cercle autour d'un centre qui se meut lui-même suivant un autre cercle dont le centre est stationnaire par rapport à la Terre, sans être nécessairement sur elle. Le cercle intérieur porte le nom de «déférent» et le cercle extérieur qui supporte la planète, est dénommé «épicycle».

Ptolémée qui a vécu au 100-170 JC a hérité des travaux d'Hipparque et d'Appolonius. A l'instar de ses prédécesseurs, il considérait que la tâche principale de l'astronome est de «sauver les apparences» en expliquant les mouvements apparemment irréguliers des corps célestes. Grâce aux méthodes de l'excentricité et de l'épicycle il a constitué son

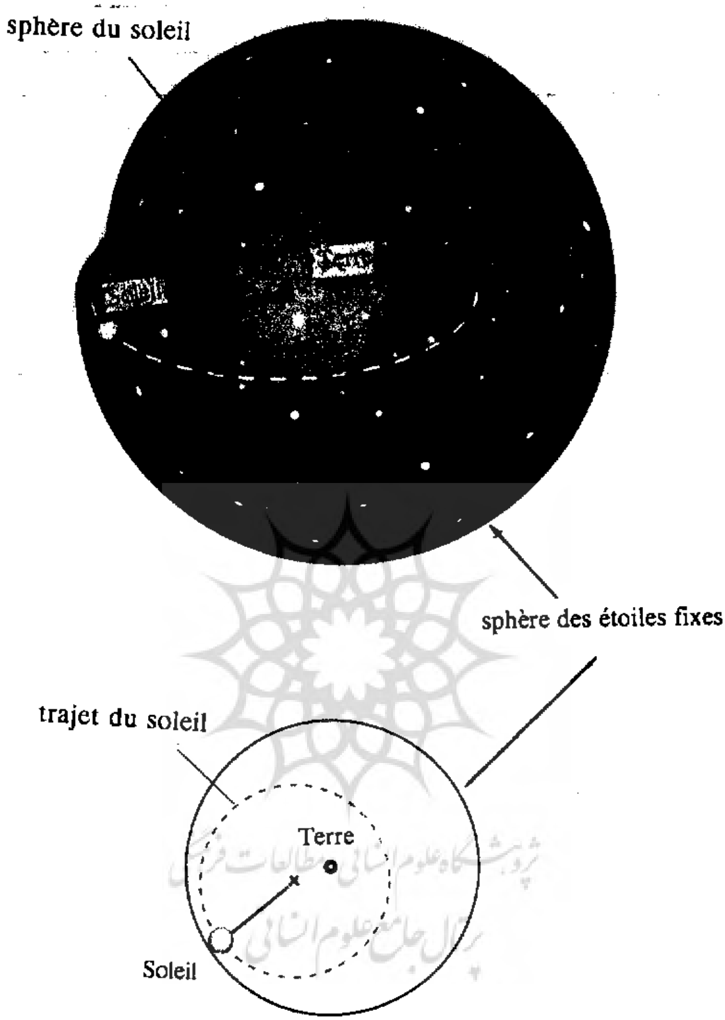

sphère du soleil
sphère des étoiles fixes
trajet du soleil
Terre
Soleil

Figure 2

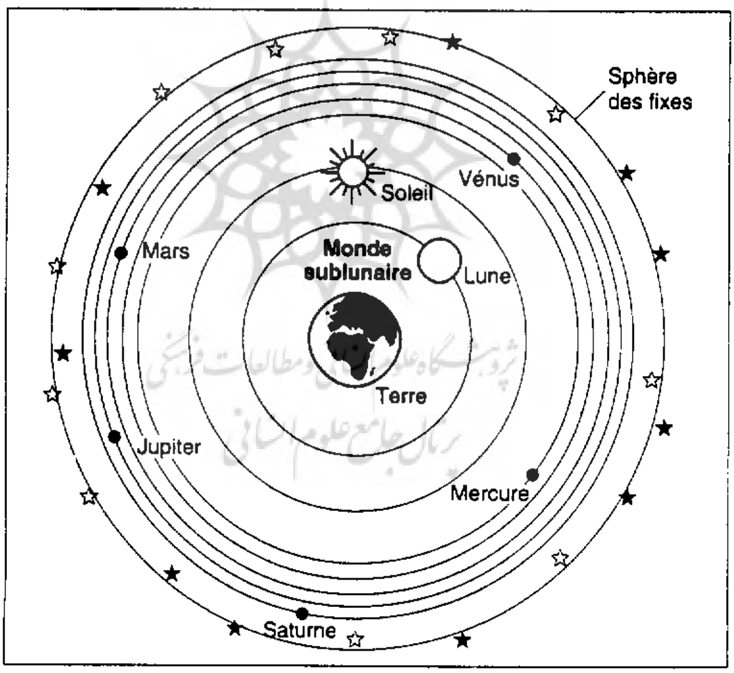
Aristote, à la suite de Platon, bien qu'il se soit inspiré de la cosmologie de celui-ci et de la théorie planétaire de Edoxe de Cnide proposa sa propre cosmologie. D'après lui, la Terre sphérique et immobile se situe au centre de l'Univers. Cet Univers est une sphère très grande mais limitée par la sphère des étoiles fixes. Les planètes se situent sur leurs sphères autour de la Terre selon l'ordre platonicien. La sphère de la lune divise l'Univers en deux régions nettement distinctes, terrestre et céteste. En effet, cette distinction fondamentale conditionne la validité de sa cosmologie. Seuls les objets célestes, dénués de gravité, possèdent un mouvement ≪naturel≫ éternel et circulaire. Tout mouvement naturel rectiligne et éternel ne pourrait s'accomplir dans un Univers fini: par contre, le mouvement éventuel de la Terre dépend de sa nature qui est celle des graves. Elle doit se mouvoir vers son lieu naturel où s'y maintenir si elle y est déjà. Or la Terre constituant, à cette échelle, la ≪grave≫ par excellence, elle occupe nécessairement le centre de l'Univers.[2]

Les astronomes qui étaient influencés par la cosmologie d'Aristote, commencèrent à donner une explication logique aux phénomènes observés afin qu'ils soient en accord avec cette cosmologie. Les différences de longueur des saisons contrariaient déjà la conception d'Aristote. Hipparque, l'un des grands astronomes de l'antiquité, a expliqué cette inégalité zodiacale par l'excentricité. Cette méthode consiste à supposer que le soleil se déplace en cercle autour d'un point, non pas situé au centre de la Terre, mais quelque part sur une ligne joignant le centre de celle-ci au soleil.[3]

2. Pour une information plus détaillée sur la cosmologie d'Aristote, consulter son livre intitulé *Traité du Ciel.*

3. G. Saliba, ≪Greek Astronomy and the Medieval Arabic Tradition≫, *American Scientist,* vol. 90 July-August 2002, p. 363.

Grèce Antique. Or, sans comprendre la cosmologie de ces philosophes nous ne pouvons mettre en évidence le probléme essentiel posé par ce systèm. Nous commençons par la cosmologie de Platon qui a joué un rôle important dans l'évolution des idées astronomiques. D'après ce grand philosophe: ≪L'univers est divisé en deux parties bien distinctes: **terrestre** et **céleste**. *Le monde Terrestre* (Sublunaire) où régne les apparences est formé de couches étagées, il y a d'abord la terre, puis l'Eau, l'Air et enfin le Feu se situant tout au-dessus, vers les limites du monde sublunaire. Ce monde dans lequel vivent les hommes est imparfait, corruptible. Le *monde céleste* (supra lunaire) qui est le siège des idées, est formé de l'Ether, le cinquième élément (ou quintessence). C'est là que se trouvent les astres qui sont des êtres éternels, parfaits divins et immuables. Parfaits, ils doivent aussi avoir un mouvement parfait autour de la Terre, c'est-à-dire un mouvement circulaire uniforme!≫[1]



L'univers d'après Platon

Figure 1

1. E. Lindemann, *Mécanique, une introduction pour l'histoire de l'astronomie*, Université Paris, Bruxelles 1999, pp. 43-44. Pour une information plus détaillée sur la cosmologie de Platon, voir son œuvre qui s'intitule *Timée*.

Etude sur les innovations astronomiques de Nasir al-Din al-Tusi*

Jafar Aghayani-Chavoshi
Epistémologue et historien des sciences
Université Technologique de Sharif
Téhéran, Iran

Introduction

Le système de Ptolémée fut, au Moyen-Age islamique, l'objet de critiques et d'attaques de la part des astronomes musulmans-notamment d'Ibn-Haytham-en raison de sa complexité et de son incompatibilité avec la physique d'Aristote. Ces astronomes ne sont cependant pas parvenus à résoudre le problème. C'est seulement au XIIIème siècle qu'une solution remarquable a été donnée par Nasir al-Din al-Tusi. En effet, celui-ci en alliant les principes physiques et les observations astronomiques a découvert une configuration plus exacte que celle de Ptolémée pour les mouvements planètaires. Cette innovation astronomique de Tusi a été l'objet de nombreuses recherches de la part des historiens de l'astronomie depuis quelques années. Dans cet article, tout en profitant des recherches précédentes, nous proposons une étude à la fois historique et astronomique sur cette innovation de Tusi. Mais afin de mieux comprendre l'originalité de ce grand astronome nous sommes obligés également d'étudier le système de Ptolémée. Après avoir exposé le problème que posait ce système astronomique de la Grèce ancienne, nous discutons en détail de la solution de Tusi et de son influence aussi bien en orient musulman qu'en occident chrétien.

I- Le Systeme De Ptolémée

Le système de Ptolémée était lié à la cosmologie des philosophes de la

* Je tiens à exprimer mes remerciements à Monsieur le Professeur Jean-Jacques Szezeciniarz qui a répondu avec gentillesse à mes questions pendant la rédaction de cet article.