

Évolution des trajectoires des planètes (2)

Véronique Hauguel, Rouen, Pierre Causeret, Esbarres

Voici la suite de l'histoire de l'évolution des conceptions du système solaire jusqu'à Kepler au début du XVII^e, en passant par Al-Tusi qui vient semer le doute dans les esprits en montrant qu'il est possible d'obtenir un mouvement rectiligne en combinant deux mouvements circulaires uniformes, Copernic qui fait perdre à la Terre sa position de centre du monde et Tycho Brahé qui défend un système hybride géo-héliocentrique.

Au II^e siècle de notre ère, Ptolémée écrit la composition mathématique, appelée aussi l'*Almageste*, œuvre géniale de 13 livres sur les connaissances astronomiques de l'époque. Elle comporte un catalogue de 1 022 étoiles et une explication des mouvements des planètes à partir de mouvements circulaires uniformes dans un système géocentrique¹.

On retrouve la trace de cet ouvrage par les traductions en arabe à partir du IX^e siècle et, au XII^e siècle, une traduction en latin par Gérard de Crémone permet à l'Europe occidentale d'en prendre connaissance.

Astronomes arabes et perses

Au IX^e siècle, le calife al-Ma'mūn rassemble de nombreux manuscrits et initie des rencontres entre savants de différentes croyances à Bagdad. À sa suite, l'astronomie arabe connaît un développement important. L'astronome al-Battānī² (Albatagnius) adopte le système de Ptolémée en le rectifiant. Al-Farghani (Alfraganus), astronome persan, écrit un abrégé de l'*Almageste* *Éléments d'astronomie*. C'est ce texte qui sera traduit en latin par Gérard de Crémone à Tolède.

Très rapidement, se développent les critiques sur l'ouvrage de Ptolémée : sur l'orbite des planètes³, sur le modèle des mouvements de la Lune qui fait varier son diamètre apparent du simple au double sur une lunaison ou encore sur le point équinoxial qui casse l'harmonie de combinaison de mouvements circulaires uniformes. Des astronomes de l'école de Maragha comme al-Tūsī ou Ibn al-Shatir au XIII^e et XIV^e siècle proposent des modèles alternatifs souvent complexes, cohérents d'un point de vue mathématique aussi bien que physique⁴.



Fig.1. Observatoire de Taqi Al-Din construit en 1577. Miniature anonyme.

Al-Tūsī montre qu'un mouvement rectiligne peut être obtenu en combinant 2 mouvements circulaires.

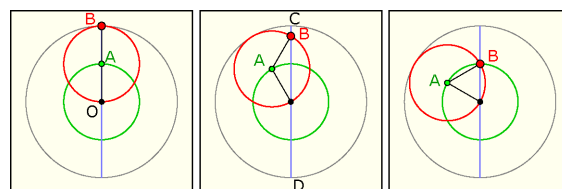


Fig.2. Hypocycloïde d'al-Tūsī. Si A (en vert) se déplace sur le cercle vert de centre O et si B (en rouge) se déplace sur le cercle rouge de même rayon et de centre A, à la même vitesse et dans le sens opposé, alors B décrit le segment [CD] (en bleu).

Cette propriété sème le trouble dans le dogme d'Aristote qui sépare le ciel en deux mondes opposés : le monde sublunaire, en-deçà de la Lune, soumis à la corruption et à l'imperfection, lié au mouvement rectiligne, et le monde supralunaire, au-delà de la Lune, éternel et harmonieux, lié à la sphère, forme parfaite, et au mouvement circulaire uniforme. Utilisée par Ibn al-Shatir, astronome de Damas, elle permet d'améliorer notablement les modèles de Ptolémée comme celui du mouvement de la Lune, modèle qui sera repris par Copernic.

¹ Voir article dans le numéro précédent.

² Copernic s'en inspire et le cite.

³ Voir figure 9.

⁴ Voir par exemple Histoire des sciences arabes, tome 1, Astronomie théorique et appliquée au Seuil.

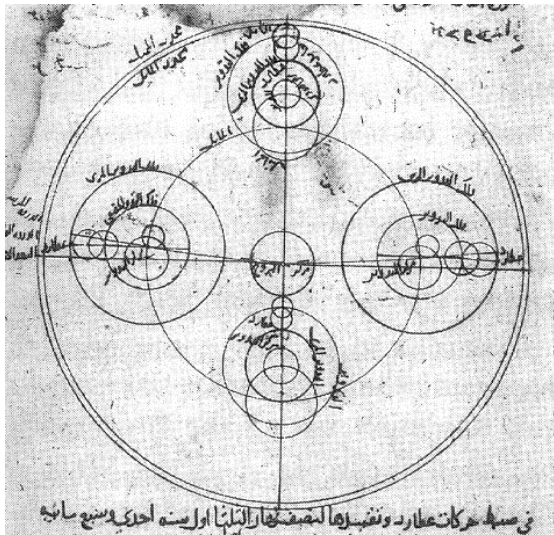


Fig.3. Mouvement de Mercure dans le modèle toujours géocentrique d'Ibn al-Shatir, avec les épicycles fondés sur l'hypocycloïde d'al-Tūsī.

Moyen Âge et Renaissance

On sait peu de chose de Jean de Sacrobosco, si ce n'est qu'il était professeur à l'Université de Paris⁵. Par contre, son *Traité de la sphère*, un ouvrage pédagogique d'astronomie élémentaire, écrit vers 1230 à partir du texte d'al-Farghani, a connu une longue et belle carrière puisqu'il y eut plus de 100 éditions imprimées de 1472 au XVII^e siècle.

Jusqu'au XV^e siècle, différents penseurs ont écrit sur le cosmos et commenté les textes des anciens.

Nicole Oresme, évêque de Lisieux, remet en cause l'immobilité de la Terre et sa place dans la sphère des fixes. Nicolas de Cues va plus loin en remettant en cause les deux mondes d'Aristote et en parlant d'univers *sans limite finie* (Copernic y fera allusion en parlant du système pythagoricien et du mouvement de la Terre).

Georges de Peurbach (1423-1461), astronome et mathématicien autrichien, qui rencontre de Cues en Italie, fait une nouvelle traduction de l'Almageste à partir de l'original grec. Il écrit l'*Épitomé de l'Almageste* qui est un résumé et une présentation très critique soulignant les invraisemblances du système de Ptolémée. Cet ouvrage sera terminé par son disciple et ami Regiomontanus (1436-1476) et sera publié 20 ans après sa mort, en 1496.

À ce moment, même si le système de Ptolémée a été remis en question par de nombreux scientifiques que ce soit dans le monde arabe ou en Europe occidentale, aucun n'a écrit une théorie des mouvements planétaires aussi technique, aussi complète

avec tables et calculs, qui soit l'équivalent de l'Almageste pour le détrôner.

Nicolas Copernic

Nicolas Copernic (1473-1543), chanoine, médecin et astronome polonais fait des études en Italie de 1496 à 1503, principalement à Bologne. En plus du droit civil, droit canonique et médecine, il y apprend le grec qui lui permettra d'accéder aux textes anciens, et l'astronomie avec un professeur très critique sur le système ptoléméen.

Après quelques années auprès de son oncle évêque, il rentre en 1510 définitivement à Frombork, ville de son canonat où il consacre une grande partie de sa vie à l'astronomie et à l'observation. Il fera construire trois instruments, instruments antiques utilisés par Hipparque : un triquetrum, composé de 3 baguettes, une sphère armillaire et un quadrant très simplifié –pas de nouveauté– pour des observations de qualité médiocre.

Par contre, autour de lui, il fait circuler un court texte manuscrit sans titre ni signature, qui prendra, plus tard, le nom de *Commentariolus* dans lequel Copernic donne les 7 axiomes, point de départ de l'héliocentrisme. Le troisième, par exemple, dit : « Tous les orbes entourent le Soleil qui se trouve pour ainsi dire au milieu de tous, et c'est pourquoi le centre du monde est au voisinage du Soleil »⁶.

Le Soleil est proche du centre du système mais ne joue aucun rôle moteur dans la mécanique céleste ; il n'a qu'un rôle optique, il éclaire le monde. Le centre des mouvements des planètes est le centre du « grand orbe », sphère supportant la Terre. La Terre perd sa position de centre du monde et sa qualité unique d'immobilité. Les mouvements sont circulaires uniformes et nécessitent de petits épicycles pour tenir compte des anomalies et respecter les observations⁷. Copernic fait disparaître l'équant créé par Ptolémée et très critiqué mais garde les sphères matérielles sur lesquelles sont fixées les planètes.

Pour lui, la Terre, fixée sur une sphère, a 3 mouvements : le mouvement diurne, le mouvement annuel autour du Soleil et un 3^e mouvement, mouvement de toupie de l'axe de la Terre, pour que cet axe reste dans la même direction tout au long de l'année (figure 4). Il veut un système plus harmonieux, plus simple, plus en concordance avec les observations, repousse la sphère des fixes très loin ce qui répond au problème de parallaxe des

⁶ Pour les 7 postulats de Copernic, voir page 28.

⁷ Les épicycles sont petits mais restent nombreux. Copernic utilise 34 cercles, au lieu de 40 chez Ptolémée : 7 pour Mercure, 5 pour Vénus, 3 pour la Terre, 4 pour la Lune et 5 pour chacune des autres planètes, Mars, Jupiter et Saturne.

⁵

Voir : dutarte.perso.neuf.fr/instruments/sacrobosco%20biographie.htm.

étoiles énoncé par les détracteurs⁸. Par ailleurs, il laisse les questions de monde limité ou infini au philosophe. Même s'il ne reprend pas la physique d'Aristote du mouvement des corps célestes en relation avec le divin, il reste dans le même esprit et il lie ce mouvement à leur sphéricité.

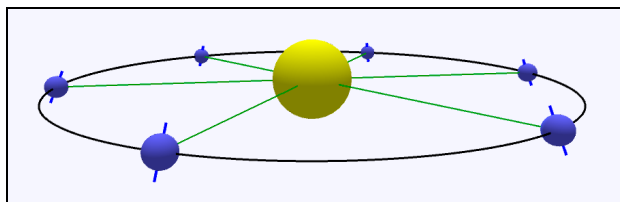


Fig.4. Pour Copernic, l'axe de la Terre est solidaire du segment Soleil-Terre comme dans une maquette mécanique. En l'absence de 3^e mouvement, il changerait continuellement de direction comme sur la figure. Ce 3^e mouvement permet qu'il garde une direction quasiment fixe, en tenant compte néanmoins de la précession des équinoxes.

Quand Copernic rencontre Rheticus, jeune professeur brillant de mathématique de l'université protestante de Wittenberg⁹, il a 66 ans ; le futur ouvrage qui deviendra *de Revolutionibus*¹⁰ est très avancé. Pour convaincre son maître d'éditer son œuvre, Rheticus écrit, en 1540, un ouvrage *Narratio prima* qui la présente. Il affirme que « les orbes de plus grande dimension accomplissent leurs révolutions plus lentement, comme il convient, tandis que les accomplissent plus rapidement les orbes les plus proches du soleil, dont on pourrait dire qu'il est au principe du mouvement et de la lumière » montrant la simplicité du système et donnant au Soleil un rôle plus important que celui donné par Copernic. Avec ce système, 6 planètes tournent autour du Soleil ; et 6, c'est le « le premier et le plus parfait des nombres¹¹ », rappelle Rheticus, « ce nombre est loué plus que tous, aussi bien dans les paroles sacrées de Dieu que chez les pythagoriciens et les autres philosophes ». Il montre très longuement que si les anciens revenaient avec les mesures actuelles, ils donneraient leur voix à son « Doctor Præceptor » (savant maître).

Cet ouvrage est très bien reçu et cela conforte Copernic dans l'idée de faire connaître son œuvre. Grâce à Rheticus, un luthérien, à Giese Tiedemann, un évêque et ami, au cardinal de Padoue, Nicolas Schönberg, et au soutien d'un pape, Paul III, Nicolas Copernic accepte de faire éditer son livre qui sera publié en 1543, année de sa mort.

⁸ Si le rayon de l'orbite de la Terre n'est pas négligeable par rapport à celui de la sphère des fixes, la parallaxe d'étoile serait mesurable avec les instruments.

⁹ Université de Luther et Mélanchton.

¹⁰ Osiander le renommerait *De revolutionibus orbium coelestium*.

¹¹ Un nombre parfait est un nombre égal à la somme de ses diviseurs autres que lui-même comme 6 car $6 = 1+2+3$.

Cet ouvrage qui se veut un nouvel Almageste, en reprend le plan dans ses 6 livres. Copernic essaie de d'améliorer les mouvements mis en place dans le *Commentariolus*, il sait que son œuvre est parfaite et il continuera ce travail même après le dépôt du manuscrit à l'édition.

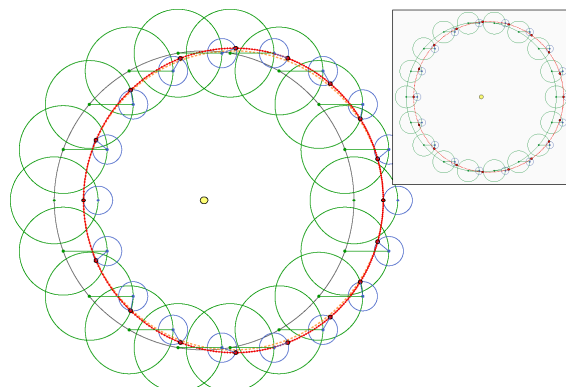


Fig.5. L'orbite de Mars pour Copernic. Avec les paramètres donnés dans *Commentariolus* et un système de déferent lié à 2 épicycles, l'orbite de Mars (en rouge) est un ovale¹². Pour que cet ovale soit bien visible, on a doublé le rayon des deux épicycles sur la figure principale et on a ajouté un cercle orange (pointillés), pour comparaison. L'encadré à droite montre le modèle de Copernic avec les bons paramètres. L'orbite de Mars est très proche d'un cercle excentré. Le système héliocentrique de Copernic n'est donc pas constitué d'orbites circulaires centrées sur le Soleil comme on le présente souvent. Cela fonctionnerait trop mal. Il est beaucoup plus complexe.

Même si Copernic ne remet pas en cause la physique d'Aristote ni la sphère des fixes qui devient immobile dans son système, il change de point de vue en plaçant le Soleil au centre. Il ouvre ainsi une brèche dans le système précédent, qui cette fois sera définitive.

Certains vont essayer de la refermer comme Andreas Osiander, qui supervise l'édition. Il écrit une préface, non signée, qui réduit l'héliocentrisme à un simple outil mathématique sans réalité physique ; « ces hypothèses¹³ n'ont pas besoin d'être vraies ni probables », dit-il, et le livre, d'après ce singulier préfacier, contient de « non moindres absurdités qu'il n'est pas nécessaire de faire ressortir ici » ! Ainsi, le système de Ptolémée, le système de Copernic et un peu plus tard le système de Tycho Brahe seront proposés comme hypothèses de modèle du cosmos pendant bien longtemps, par exemple dans l'atlas de Cellarius en 1660.

En 1543, il n'y a aucune réaction de la part de l'Église romaine à la parution du livre de Copernic. Le climat intellectuel change et, en 1616, le cardinal inquisiteur Robert Bellarmine, théologien jésuite,

¹² Dans *de Revolutionibus*, Copernic remplace ce système par un système excentrique-épicyclique.

¹³ Copernic utilise « hypothèse » au sens postulat.

joue un rôle de tout premier plan¹⁴ dans la procédure qui inscrit l'œuvre de Copernic à l'*Index librorum prohibitorum* (Catalogue des livres interdits). Cette interdiction est levée en 1757 mais il faut encore attendre 1822 pour que l'impression de cet ouvrage soit officiellement autorisée.

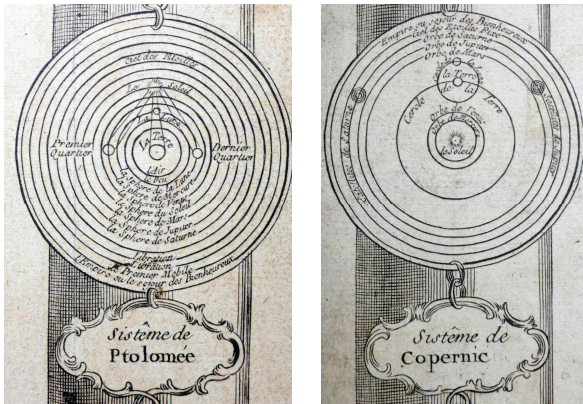


Fig.6. Les systèmes de Ptolémée et de Copernic présentés à égalité sur une carte de 1795, soit plus de 250 ans après la mort de Copernic (Musée Diderot, Langres).

Tycho Brahe

Tycho Brahe naît 3 ans après la mort de Copernic. Passionné d'astronomie, il a la chance d'observer différents phénomènes astronomiques dans sa jeunesse : éclipse, conjonction Jupiter-Saturne... qui remettent en cause la justesse des tables de prédiction. Il observe l'explosion d'une supernova¹⁵ plus brillante que Vénus à 26 ans et, cinq plus tard, la grande comète de 1577¹⁶. Ces observations remettent en cause l'immuabilité du monde supralunaire d'Aristote, car supernova et comète sont au-delà de la Lune, ainsi que les sphères matérielles, la comète pouvant toutes les traverser sans encombre. Cet astronome danois, installé sur l'île de Ven par le roi Frédéric II, fait construire deux palais dont Uraniborg où il fait fabriquer une douzaine d'instruments d'astronomie remarquables pour l'époque comme le quadrant mural d'un rayon de deux mètres permettant des mesures à moins d'une minute d'arc près¹⁷.

À la mort du roi, Tycho Brahe doit partir ; il devient le *mathématicien impérial* de la cour de l'empereur Rodolphe II et s'installe dans un château près de Prague. C'est là que Johannes Kepler viendra le rejoindre début 1600. Tycho Brahe défend un système géo-héliocentrique qui laisse la Terre immobile et autour de laquelle gravitent la Lune et

le Soleil. Les 5 autres planètes tournent autour du Soleil¹⁸.

Après les observations des phases de Vénus par Galilée en 1610, ce système, plus conforme aux observations que celui de Ptolémée, est soutenu par l'Église catholique.

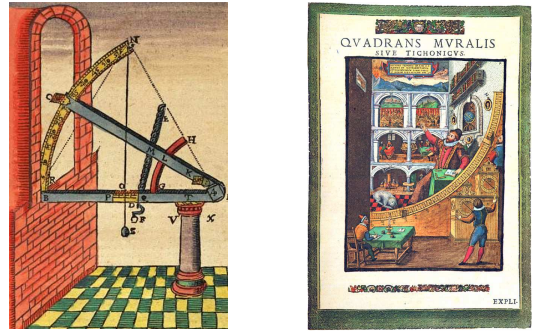


Fig.7. Sextant et quadrant mural d'Uraniborg. Gravure, *Astronomiae Instauratae Mechanica*.

Johannes Kepler

Après une enfance pauvre et difficile, Johannes Kepler (1571- 1630) entre en 1589 à l'université de Tübingen où il étudie entre autres, la physique, le grec, l'astronomie où seul le système de Ptolémée est enseigné. Son professeur de mathématiques, l'astronome Michael Maestlin, fait découvrir aux meilleurs étudiants le système de Copernic. Kepler devient un copernicien convaincu et restera très proche de son professeur qui l'aidera dans ses travaux. Il abandonne ses études de théologie pour prendre un poste de professeur de mathématique à l'école protestante de Graz.

En 1595, toujours dans une recherche d'harmonie et d'analogies entre la géométrie et l'astronomie, Kepler découvre que les 5 solides de Platon, les seuls polyèdres réguliers, s'emboîtent dans les orbites des planètes.

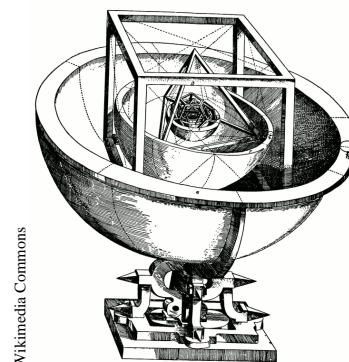


Fig.8. Modèle de Système solaire de Kepler avec solides réguliers emboîtés (image issue du *Mysterium Cosmographicum*, œuvre de jeunesse de Kepler, 1596). Chaque sphère de planète est inscrite et/ou circonscrite à un polyèdre ; en partant de l'orbite de Mercure, on trouve l'octaèdre puis l'icosaèdre, le dodécaèdre, le tétraèdre et pour finir le cube entre Jupiter et Saturne.

¹⁴ Ainsi que dans le procès de Giordano Bruno.

¹⁵ SN 1572, Nova de Tycho, supernova dans la constellation de Cassiopeée visible pendant plus d'un an à cette époque.

¹⁶ C/1577 V1.

¹⁷ La précision n'avait pas évolué depuis Ptolémée. Elle était de l'ordre de 10'. Tycho Brahe la divise au moins par 10.

¹⁸ Le système de Tycho Brahe est inspiré de l'astronome contemporain germanique Paul Wittich mais aussi extrapolé du système d'Héraclide du Pont. Il est mis en rivalité avec le système géo-héliocentrique d'Ursus qui admet la rotation de la Terre sur elle-même.

Pour la première fois, on recherche la raison et non plus seulement le comment. Dans son livre *Mysterium Cosmographicum* qui connaîtra un certain succès, Kepler se pose les questions suivantes : pourquoi existe-t-il 6 planètes ? Pourquoi sont-elles disposées à ces distances du Soleil ? Pourquoi se déplacent-elles à ces vitesses ? Pour lui, ces 3 questions sont d'égale importance.

Aux deux premières questions, une ébauche de réponse : « je joue moi aussi avec les symboles, (...) mais sans oublier que je joue. En effet, on ne démontre rien avec des symboles, on ne peut rien révéler à l'aide des symboles géométriques de la philosophie naturelle... ». La troisième question aboutira aux 2^e et 3^e lois de Kepler.

Grâce à ce livre et aussi à cause de la situation de plus en plus difficile pour les protestants à Graz, Johannes Kepler peut rencontrer Tycho Brahe.

Il arrive à Prague début 1600, bien décidé à prendre connaissance de ses observations et à les exploiter. Cette rencontre est orageuse et courte car Tycho meurt, 20 mois plus tard, en octobre 1601. Il parviendra difficilement à obtenir les tableaux de mesures. Pensant mettre quelques semaines à trouver l'orbite de Mars qui résistait à toute modélisation, Kepler y travaille 6 ans. Grâce à la précision des mesures et à sa pugnacité, il ira au bout de ses recherches.

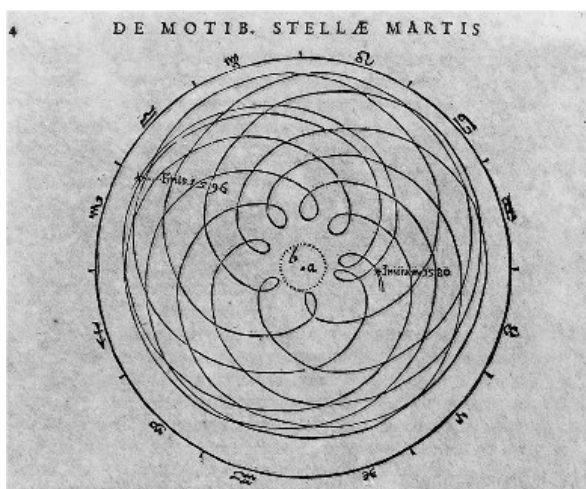


Fig.9. Esquisse de l'orbite de Mars de 1580 à 1596 dans le système géocentrique de Ptolémée, réalisée par Kepler dans *Astronomia nova* (Gallica BnF). Si les orbes sont matérielles, la place est limitée pour les autres planètes.

En plus de son génie et de son intuition, Kepler est tenace, moderne, cherchant à se libérer des idées préconçues sauf de celles de l'harmonie ou de l'ordre dans le cosmos. C'est tout cela qui permettra les découvertes des lois fondamentales.

Dans l'*astronomia nova*, tout en recherchant l'orbite de Mars, Kepler énonce les deux premières des trois lois :

1. Chaque planète décrit autour du Soleil une orbite elliptique, le Soleil occupant l'un des foyers de l'ellipse.
2. Le rayon vecteur qui joint la planète au Soleil balaie des aires égales en des durées égales.

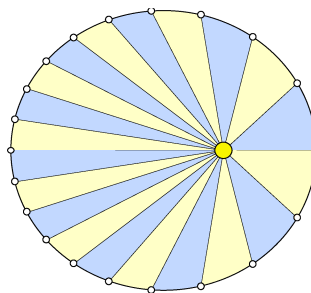


Fig.10. Deuxième loi de Kepler. La planète est représentée ici à des intervalles de temps égaux. Les aires colorées sont égales.

Recherchant toujours les analogies entre les 4 arts du Quadrivium vers une harmonie céleste, Kepler veut trouver un lien entre les proportions des distances dans le système héliocentrique et les proportions dans les intervalles musicaux consonants. Il transforme ainsi le modèle statique des solides de Platon en un système en mouvement dans le temps. Cette quête le mène à la 3^e loi dans *Harmonices Mundi* (1619) :

3. Le cube du demi grand axe de l'orbite sur le carré de la période est une constante pour l'ensemble des planètes.

Kepler généralise son modèle aux autres planètes dans son *Épitomé* en 1622 puis en 1627, les *Tables Rodolphines*, livre révolutionnaire pour la précision des mesures et sur les apports dans la correction des erreurs liées à la diffraction de la lumière.

Conclusion

Apollonius, le roi des coniques, a mis en place un jour un modèle basé sur les épicycles pour sauver les mouvements circulaires uniformes et ainsi l'harmonie des sphères ; c'est Kepler qui toujours avec cette même conviction d'harmonie mais aussi dans la recherche de la précision et de la vérité va revenir à une conique, l'ellipse.

Avec ses 3 lois, Johannes Kepler ouvre la voie à Isaac Newton qui exploitera les 3 lois pour découvrir la théorie de la gravitation publiée dans l'ouvrage connu sous le nom de *Principia* en 1687. Cette théorie de la gravitation universelle démontre les lois de Kepler et justifie la place centrale du Soleil de par sa masse.

Cette nouvelle découverte majeure rencontrera des difficultés pour être reconnue. Il faudra attendre presque 70 ans, époque où cartésiens¹⁹ et newtoniens s'affrontent, pour avoir une traduction française que l'on doit à la Marquise du Châtelet. ■

¹⁹ Descartes explique le mouvement des planètes par de grands tourbillons d'éther remplissant l'espace et exclut une action à distance du Soleil.