

Séance du 13 mai 2019

La Révolution Copernicienne : une vision nouvelle du monde. Une nouvelle manière de penser

Pierre LOUIS

Académie des Sciences et Lettres de Montpellier

MOTS-CLÉS

Ptolémée, Copernic, Révolution Copernicienne, géocentrisme, héliocentrisme.

RÉSUMÉ

Après une courte biographie de Nicolas Copernic, la nouvelle vision du monde que représente la Révolution Copernicienne est présentée en faisant ressortir l'apport de Copernic lui-même ainsi que celui de ses successeurs, en particulier Newton. On examinera ensuite l'incidence religieuse de l'héliocentrisme et on tentera de comprendre pourquoi Copernic a été l'auteur de cette Révolution. Pour terminer on montrera que la Révolution Copernicienne représente une nouvelle manière de penser.

1. Biographie sommaire de Nicolas Copernic (1473-1543).

Copernic est un polonais né à Thorn, ville du Nord de la Pologne, située sur la Vistule. Il était orphelin à l'âge de dix ans et fut élevé par son oncle, l'évêque de l'Ermland qui était un des plus puissants notables de la Prusse. Nicolas eut donc une enfance bien protégée dans un milieu plus qu'aisé. Il fit des études à Cracovie puis son oncle l'envoya parfaire sa formation en Italie, mais avant son départ il le fit élire chanoine au chapitre de la cathédrale de Frauenburg ce qui lui assura une confortable prébende à vie. En Italie il étudiera le droit canon et la médecine mais, surtout, il s'intéressera à l'astronomie puisqu'il sera un temps assistant à Bologne d'un astronome à la compétence reconnue Domenico Maria Novara. De retour en Pologne, à l'âge de 30 ans, parallèlement à ses fonctions de chanoine, il continuera ses recherches en astronomie et réalisera même quelques observations. Mais c'est surtout son travail de réflexion en astronomie qui lui a valu sa renommée et a conduit à parler de véritable Révolution Copernicienne.

2. La Révolution Copernicienne : vision nouvelle du monde.

2.1. L'apport personnel de Copernic.

Quel est l'état de l'astronomie dans cette fin du XV^{ème} siècle ? C'est le règne de Ptolémée et de sa « Grande Syntaxe mathématique » qui nous est parvenue par les Arabes sous le nom « d'Almageste ». Cette véritable somme de l'astronomie antique date de 140 après J. C. Claude Ptolémée d'Alexandrie, qui en est l'auteur, est le dernier représentant de l'astronomie grecque. Il expose dans son ouvrage son système du monde : un modèle mathématique qui rend compte des observations astronomiques. Ce

modèle amélioré en particulier par des astronomes arabes dominait toujours l'astronomie à l'époque de Copernic, soit depuis plus de treize siècles.

2.1.1. L'Almageste de Ptolémée

Dans l'Almageste se mêlent trois composantes bien distinctes. D'abord une vision globale du monde : une cosmologie. Ensuite un outil mathématique, essentiellement la trigonométrie, au service de la résolution des triangles plans et sphériques. Enfin une astronomie pratique présentant un ensemble de modèles géométriques, de tableaux de nombres et de méthodes de calcul, véritables « recettes de cuisine » permettant de localiser à un instant donné les astres vagabonds (les planètes, la lune et le soleil) sur le quadrillage immuable des étoiles fixes. Si la trigonométrie et la pratique astronomique sont des disciplines innocentes ; il n'en est pas de même de la cosmologie. Une cosmologie suppose une physique. C'est plus précisément par la théorie du mouvement que cosmologie et physique sont intimement liées.

Or la cosmologie de Ptolémée est tributaire d'une physique qui l'a précédée de cinq siècles, celle d'Aristote : physique fautive bien sûr, et en particulier dynamique fautive où les vitesses sont directement proportionnelles aux forces (il faudra attendre Galilée et Newton pour savoir que ce sont les accélérations qui sont proportionnelles aux forces). Pour Aristote, plus généralement le mouvement n'est qu'un processus fini dont la fonction se borne à assurer la translation d'un objet concret d'un point A à un point B. Le mouvement ne saurait être étudié pour lui-même, indépendamment de l'objet considéré. L'abstraction isolant l'objet du mouvement n'existe pas pour lui. Il en découle, concernant l'astronomie, un certain nombre d'axiomes qui seront autant de verrous pour les astronomes. Le premier verrou : le géocentrisme qui veut que la terre soit au centre de l'univers et le seul centre de tous les mouvements célestes. Un deuxième verrou : l'existence d'une dichotomie dans le monde : le monde terrestre (terre et lune) d'une part- c'est le monde du changement- c'est le monde du mouvement rectiligne (vers le haut pour les corps légers : l'air, le feu. Vers le bas pour les corps lourds : la terre, l'eau). Le cosmos d'autre part, au-delà du monde terrestre : c'est le monde de l'immuable, du permanent, dans ce domaine seul est possible le mouvement circulaire uniforme qui ramène les objets à leur emplacement initial.

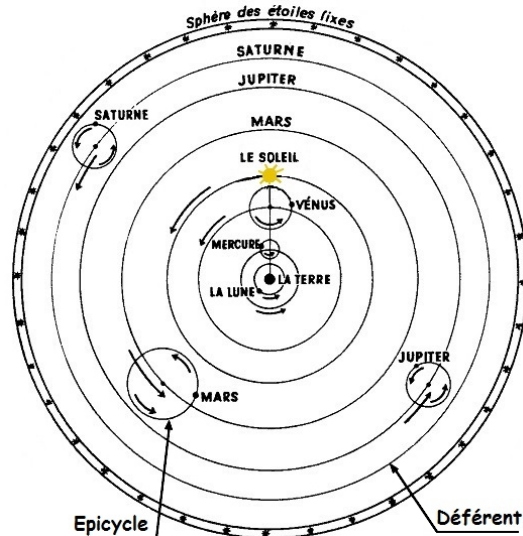


Figure 1 : système géocentrique de Ptolémée et ses épicycles

Dans son système Ptolémée veut satisfaire les axiomes d'Aristote qui apparaissent comme des évidences et arriver à rendre compte également des observations faites sur les mouvements des planètes. Cette double contrainte le conduit, lui et ses successeurs, en particulier arabes, à construire un système compliqué mais très ingénieux faisant appel à des cercles déférents combinés à des cercles plus petits ou épicycles (voir fig. 1) puis à des cercles excentriques et enfin à l'introduction de ce que l'on appelle le point « équant Q » : un point par rapport auquel le mouvement de la planète considérée reste uniforme mais qui n'est plus le centre du cercle déférent sur lequel se déplace cette planète.

2.1.2. Le Système de Copernic.

Trois documents permettent de connaître la pensée de Copernic. Deux sont de sa main : le *Commentariolus* (1514) et essentiellement sa grande œuvre, le *De Revolutionibus* (1543) publié l'année de sa mort. Le troisième : la *Narratio Prima* (1540) a été écrit par Rheticus, son seul élève. Le *Commentariolus* est en fait une présentation claire de sa pensée sans démonstration appuyée sur des calculs.

Il commence par dire à ses lecteurs que la façon dont les Anciens concevaient la course des astres n'était pas satisfaisante. Il pose ensuite ses hypothèses en sept brefs chapitres : dans le premier, il affirme que tous les corps célestes ne se déplacent pas autour du même centre. Dans le second, que la Terre n'est pas le centre de l'Univers, mais seulement de l'orbite de la Lune. Dans le troisième, que le Soleil est le centre de l'Univers. Dans le quatrième, que la sphère immobile des étoiles fixes, l'ultime sphère, est bien plus éloignée de nous que Ptolémée le pensait. Dans le cinquième, que la Terre tourne sur elle-même, sur son axe, en un jour ce qui donne l'illusion d'une course diurne du Soleil, des planètes et des étoiles fixes. Ainsi le ciel ne roule pas, mais la Terre se mouvant, chaque astre donne l'impression de fuir. Dans le sixième, que la Terre fait en un an le tour du Soleil en gardant son axe fixe. Dans le septième, enfin, que si les planètes semblent parfois s'arrêter ou retourner en arrière, c'est parce qu'elles aussi tournent autour du Soleil. Il terminait cet exposé proprement révolutionnaire en affirmant qu'il remettait à plus tard les preuves mathématiques de ses sept hypothèses. À plus tard, c'est-à-dire dans son « Grand Œuvre » ... En latin la formule était banale. Mais qui la traduirait en arabe lirait « Almageste ». Copernic se présentait donc comme le nouveau Ptolémée ! Mais prudemment il présentait son mémoire sous forme d'hypothèses et il ne le publia pas. Il fut adressé à une vingtaine de correspondants choisis pour leur compétence. Comme ceux-ci à leur tour le diffusèrent autour d'eux, rapidement se répandit la rumeur qu'au fond de la Pologne un certain Copernic avait osé mettre le Soleil au centre de l'Univers et réduire la Terre à une simple planète. Certains d'entre eux y avaient pensé. Aucun n'avait eu le courage de le dire. Désormais on attendait de lui son anti-Almageste.

Mais Copernic, probablement bien plus par rigueur scientifique que par conscience des dangers d'une telle publication, en reportait constamment l'achèvement. Car, en se livrant aux calculs qui devaient confirmer son Système, il rencontrait des difficultés insurmontables. En effet, il avait conservé l'idée d'Aristote et de Ptolémée de mouvement circulaire uniforme pour les planètes. Or leur mouvement est elliptique et n'est pas uniforme comme le montrera Kepler près d'un siècle plus tard (1609). Il en résultait qu'il était, à son tour, contraint de compliquer son Système par la mise en place d'épicycles et il se décourageait. Heureusement pour lui, un jeune professeur de mathématique très brillant de Wittenberg, Georg Joachim Rheticus, enthousiasmé par les idées du *Commentariolus* qu'il venait de découvrir, s'est rendu en 1539 à Frauenburg pour travailler avec lui. Émerveillé à la lecture du manuscrit du « *De Revolutionibus orbium coelestium* » il décida enfin Copernic à le publier, il s'occupera d'ailleurs lui-même de la publication. Celle-ci aura lieu à Nuremberg car la complexité du mémoire

nécessitait un imprimeur qualifié. Les exemplaires sortiront en 1543. On dit que Copernic en aurait pris connaissance juste avant sa mort. Mais déjà Rheticus avec l'accord du « Maître », avait publié sa *Narratio Prima* en 1540 qui sera considérée et l'est encore de nos jours comme un excellent exposé des idées de Copernic, laissant de côté les précisions de détail et en faisant bien apparaître les idées maîtresses.

2.1.3. Mise en parallèle des systèmes de Ptolémée et de Copernic.

Chez Ptolémée au centre du monde siège la Terre, puis vient la Lune qui tourne autour de la Terre en un mois ; puis Mercure, Vénus et le Soleil qui bouclent tous les trois leurs révolutions en un an ; puis Mars en deux ans ; puis Jupiter, en douze, et Saturne en trente ; enfin, enfermant l'ensemble du système dans une sphère de dimension modeste, viennent les étoiles fixes qui font leur révolution en un jour ! (fig1) C'est ce que l'on appelle la cosmologie de l'univers des deux sphères, composé d'une sphère intérieure pour l'homme et d'une sphère extérieure pour les étoiles. Ce cadre avait déjà été utilisé par Platon dans son *Timée*. Cet univers des deux sphères rend compte des observations astronomiques tant qu'on ne s'intéresse pas aux planètes. La preuve en est qu'actuellement encore dans des traités de navigation maritime ou aérienne on peut lire : « Pour notre présent propos, nous supposons que la Terre est une petite sphère immobile de même centre qu'une sphère stellaire plus grande et animée d'un mouvement de rotation ». L'univers des deux sphères reste en effet une théorie très heureuse même si elle est fautive pour conduire certains calculs sur les étoiles. Mais comme nous l'avons vu, pour que ce système permette d'expliquer les observations concernant les mouvements des planètes ou du Soleil il faut ajouter aux orbites des séries d'épicycles et d'excentriques puis le fameux point équant. C'est très compliqué mais, moyennant cela on obtient un modèle qui peut être considéré comme satisfaisant et permet des calculs astronomiques adaptés à la précision des observations de l'époque.

Pour Copernic, l'univers s'harmonise. Au centre, le Soleil, puis viennent Mercure, Vénus, la Terre qui prend rang de simple planète et qui tourne sur elle-même en un jour, Mars, Jupiter et Saturne, enfin la sphère des fixes dont Copernic n'ose pas dire qu'elle est infinie, mais en tout cas beaucoup plus vaste que celle du cosmos de l'Antiquité, comme l'atteste l'absence de parallaxe annuelle mesurable pour l'orbite terrestre. Dans ce système, pas de rupture, il y a un lien simple entre les distances des planètes au Soleil et les durées des révolutions : de celle de Mercure, 88 jours, à celle de Saturne 30 ans pour finir par l'immobilité de la sphère des étoiles. La mise en lumière de cette simplification fut de toute évidence déterminante dans la découverte de l'héliocentrisme par Copernic.

Dans ce système une autre simplification importante concerne les rétrogradations dans le mouvement des planètes. Elles s'expliquent sans difficulté par le jeu de leurs mouvements relativement à celui de la Terre. Toutes les planètes ont le même statut cosmologique : si le comportement de Mercure et de Vénus diffère de celui de Mars, Jupiter et Saturne, c'est à cause de leur position entre la Terre et le Soleil. Dans une première approche, le ciel se déchiffre sans l'intervention d'épicycle, les cercles déferents suffisent. Pour affiner la précision des prévisions Copernic introduira un premier épicycle mais de dimension modeste. Nous le savons maintenant cet épicycle est rendu nécessaire pour rendre compte des écarts entre le mouvement circulaire imposé aux astres pour des raisons philosophiques par Aristote et le mouvement réel qui est elliptique. Car Copernic maintient dans son Système le principe du mouvement circulaire uniforme et une de ses fiertés, outre le sentiment de donner aux hommes une cosmologie nouvelle plus harmonieuse que l'ancienne, est l'abolition de l'équant qu'il estime être une inadmissible entorse faite par Ptolémée au principe du mouvement circulaire uniforme. Il est plus aristotélicien que Ptolémée. Il ne fera donc pas sauter, loin de là, le

verrou du mouvement circulaire, il faudra attendre Kepler pour cela. Compte tenu de ce refus il faut reconnaître que si le Système de Copernic est infiniment plus simple au niveau cosmologique que celui de Ptolémée il ne permet pas d'obtenir une meilleure précision. Cela expliquera qu'un certain nombre d'astronomes ne verront pas l'intérêt de ce nouveau Système.

2.1.4. Un exemple de l'avantage de l'héliocentrisme : interprétation des rétrogradations de Mars.

La rétrogradation ou mouvement rétrograde d'une planète, c'est un déplacement que semble effectuer une planète dans le sens inverse de son déplacement habituel, une sorte de recul et ceci par rapport au référentiel constitué par les étoiles lointaines (ce que Ptolémée et Copernic appelaient la sphère des fixes). La rétrogradation de Mars est un exemple célèbre de ces bizarreries planétaires : tous les deux ans pendant 72 jours, Mars fait un aller-retour dans le ciel. Ce mouvement rétrograde a été constaté depuis longtemps et c'est lui en particulier qui a contraint Ptolémée à compliquer son Système en introduisant épicycle, excentrique et enfin point équant.

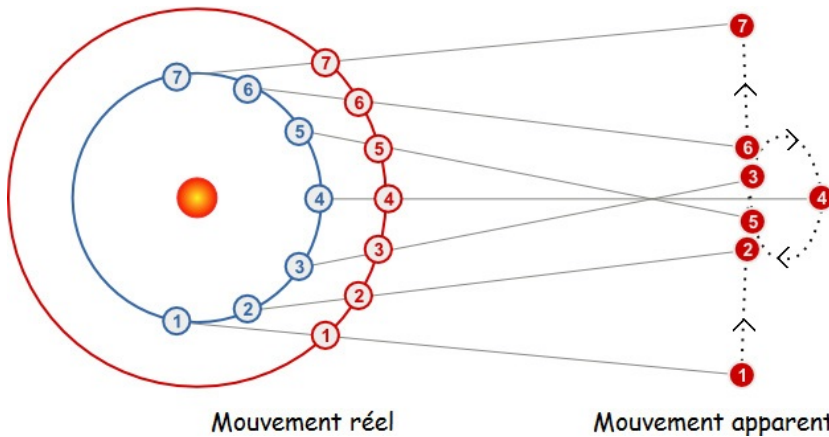


Figure 2 : Explication du mouvement rétrograde de Mars, montrant les positions de la Terre (en bleu) et de Mars (en rouge) à sept instants de leurs trajectoires, et les directions suivant lesquelles Mars est vue à partir de la Terre.

Avec l'héliocentrisme, le mouvement de chaque planète est d'une parfaite régularité. Le Soleil est au centre de l'Univers, la Terre tourne autour de lui dans le même sens que les autres planètes mais à une vitesse différente. Alors toutes les rétrogradations s'expliquent par un simple effet de perspective. En effet, en réalité, la Terre s'approche au point 1 de la planète Mars, elle la dépasse en 4 parce qu'elle va plus vite, ensuite elle s'en éloigne jusqu'en 7, et ainsi de suite (fig2). On constate alors que, projeté sur la sphère fixe des étoiles, dans l'écliptique, le mouvement apparent de Mars forme bien la boucle aplatie observée. L'explication du phénomène devient très simple et très claire avec l'héliocentrisme.

2.1.5. Les éléments du Système de Copernic qui restent ptoléméens.

D'une manière générale, il faut bien voir que mis à part les mouvements de la Terre, le *De Revolutionibus* semble à tous les points de vue plus étroitement apparenté aux ouvrages des astronomes et des cosmologistes de l'Antiquité et du Moyen Âge qu'à ceux des générations suivantes, qui fondèrent leurs travaux sur ceux de Copernic. C'est eux qui rendirent explicites les conséquences radicales que même leur auteur n'avait pas vues dans son œuvre. Son livre donna naissance à une révolution qu'il avait à peine

énoncée. Examinons en particulier trois points essentiels sur lesquels la vision de Copernic ne diffère pas de celle de Ptolémée : le mécanisme d'entraînement des planètes, leur mouvement circulaire uniforme, un monde clos par la sphère des étoiles.

a) Cause du mouvement d'entraînement des planètes.

À l'époque de Copernic, tout le monde pensait, comme au temps de Ptolémée, que la sphère des étoiles animée de son mouvement diurne entraînait par frottement des sphères solides dans lesquelles les planètes étaient enchâssées. Copernic reprend ce schéma et pourtant dans son Système le moteur de l'entraînement des sphères n'existe plus puisque pour lui la sphère des étoiles est fixe. Le modèle n'est donc plus cohérent. Malgré tout il le conserve et pour lui la sphère des étoiles devenue immobile n'a plus qu'une utilité géométrique. Cette sphère stellaire « qui embrasse et contient tout » comme il l'écrit tient le monde ensemble et lui permet de définir un centre où il place le Soleil. Mais il ne se préoccupe pas du mécanisme par lequel les sphères contenant les planètes pourraient être entraînées. Ce n'est pas un problème important pour lui qui s'intéresse essentiellement à la détermination mathématique de la position des corps célestes.

b) Le mouvement circulaire uniforme des planètes.

Copernic reprend à son compte le mouvement circulaire uniforme imposé aux planètes par Aristote et logiquement le retiendra pour la Terre lorsqu'il en fera une planète. En effet, seul un mouvement circulaire uniforme ou une combinaison de tels mouvements (cas des déférents, épicycles et excentriques) peut, pense-t-il, expliquer le retour régulier de tous les phénomènes célestes à des intervalles de temps fixés. Sur ce plan tous ses raisonnements sont aristotéliens et l'on ne peut distinguer son univers de celui de la cosmologie traditionnelle. Il est même plus aristotélien que nombre de ses prédécesseurs. Il ne veut pas en particulier, comme nous l'avons vu, admettre la violation avec l'utilisation du point équinoxial, du mouvement uniforme.

c) Un monde clos.

Copernic, comme tous les astronomes de son temps, admet que le monde est limité par la sphère des étoiles. Celle-ci a une dimension finie, caractéristique d'un monde clos. Simplement il montre que ce monde visible est « immensum », qu'il est si grand que non seulement la Terre, comparée aux cieux, est comme un point (cela a déjà été affirmé par Ptolémée) mais qu'il en est de même pour toute l'orbite de la Terre autour du Soleil. Cette contrainte est, en effet, indispensable dans son Système. Il montre qu'une Terre en rotation n'a pas besoin d'être au centre du monde. Il suffit qu'elle reste assez près du centre et tant qu'elle reste assez près du centre, elle peut se déplacer à volonté sans affecter le mouvement apparent des étoiles. En particulier elle peut être animée d'un mouvement orbital autour du Soleil pourvu que son orbite ne l'emporte jamais « trop loin du centre » où trop loin signifie trop loin par rapport au rayon de la sphère extérieure. En utilisant le rayon de l'orbite terrestre tel qu'il a pu l'estimer et connaissant la précision des observations astronomiques de l'époque (moins de 0, 1 degré) Copernic a trouvé pour la dimension minimale de la sphère des étoiles un rayon de 1. 500. 000 rayons terrestres. C'est évidemment beaucoup plus que les évaluations de la cosmologie traditionnelle. Al-Farghani, par exemple avait évalué le rayon de la sphère des étoiles à 20. 000 rayons terrestres soit 75 fois moins que l'évaluation de Copernic. L'univers copernicien doit donc être considérablement plus vaste que celui de ses prédécesseurs. Son volume est au moins 400. 000 fois plus grand. Il apparaît donc un espace immense entre la sphère de Saturne, la planète la plus éloignée dont la distance est connue et la sphère des étoiles. La cohérence dans les dimensions des enveloppes sphériques successives de l'univers traditionnel n'est pas respectée. C'est ce qui conduira Tycho

Brahé à refuser le mouvement de la Terre. Mais Copernic ne s'inquiète pas de cette rupture et ne retient que l'existence d'un univers clos.

2.1.6. Bilan de l'apport de Copernic.

Le *De Revolutionibus* fut écrit, comme nous l'avons vu, pour résoudre le problème des planètes, dont Copernic pensait qu'il avait été laissé irrésolu par Ptolémée et ses successeurs. Dans l'œuvre de Copernic, la conception révolutionnaire d'une Terre en mouvement est un sous-produit de la tentative par un astronome confirmé de réformer les techniques employées pour calculer les positions des planètes. Bien que, comme nous le verrons, la pensée occidentale a été profondément affectée par les conséquences de l'ouvrage de Copernic, l'ouvrage lui-même était très technique. C'était l'astronomie planétaire mathématique léguée par Ptolémée, remaniée par les Arabes et non la cosmologie ou la conception philosophique du monde que Copernic traitait dans sa préface de « monstre ». Ce fut la réforme de cette astronomie mathématique qui, seule, le contraignit à mettre la Terre en mouvement. Ce mouvement de la Terre était un concept qui n'était pas sans précédent.

Déjà au III^{ème} siècle avant notre ère, Aristarque de Samos avait émis la même hypothèse qui lui a valu d'être considéré comme le « Copernic de l'Antiquité ». Pour lui, le Soleil était au centre d'une sphère des étoiles de dimension considérable. Autour de lui, la Terre décrivait une orbite circulaire. Mais cette hypothèse n'était pas soutenue par des arguments solides et elle allait à l'encontre des notions apparemment évidentes que donne le bon sens sur la structure de l'univers. Elle fut donc rejetée par presque tous les astronomes du monde antique et le Moyen Age la tournait en ridicule ou l'ignorait. La nouveauté introduite par Copernic, qui était sans précédent, réside dans les développements mathématiques qu'il a élaborés à partir du mouvement de la Terre. Il fut le premier à exposer et à calculer dans le détail les conséquences de ce mouvement. Les mathématiques de Copernic le distinguent de tous ses prédécesseurs et c'est en grande partie à cause de leur rigueur que l'hypothèse d'une Terre en mouvement s'est vu confortée et a pu être prise en considération par ses successeurs. Ce sont eux qui dépassant son travail vont dans le siècle suivant mettre définitivement fin au Système de Ptolémée. Ces astronomes dont les noms doivent être associés à ceux de Copernic sont : Tycho-Brahé, Kepler, Galilée, Newton.

2.2. L'apport des Successeurs.

Dans les années qui suivirent la publication en 1543 du *De Revolutionibus* il ne semble pas que beaucoup de praticiens aient estimé que le Système de Copernic délivrait l'astronomie de toutes ses difficultés. Il faut bien dire que l'utilisation de ce traité n'était pas à la portée des astronomes moyens. C'est en 1551, soit huit ans après, qu'un astronome renommé pour sa grande habileté à calculer, Reinhold, publiera des tables astronomiques établies à partir du Système de Copernic et des meilleures données disponibles : les tables prussiennes. Ces tables jouirent rapidement d'une grande renommée et firent beaucoup pour la réputation de Copernic. Mais elles n'apportaient aucun élément cosmologique nouveau. Il en sera très différemment pour les travaux des personnalités dont nous allons parler maintenant.

2.2.1. Tycho-Brahé. (1546-1601).

Ce remarquable observateur apporta deux éléments majeurs pour faire avancer les idées nouvelles. D'abord il réalisa un ensemble d'observations précises, nombreuses qui sortirent l'astronomie de sa dépendance à l'égard des données anciennes. À partir de ses observations, le problème des planètes fut mieux posé. C'était une condition préalable à sa solution. Aucune théorie planétaire n'aurait pu rendre compte des données

qu'utilisait Copernic. Ce sera grâce aux observations de Tycho-Brahé que Kepler, son secrétaire, pourra découvrir expérimentalement les fameuses lois auxquelles il a donné son nom. Ensuite, il apporta un élément novateur important pour la cosmologie lorsqu'en 1588 à la suite de ses observations sur les comètes il écrivit : « Je montrerai à la fin de mon ouvrage, principalement à partir du mouvement des comètes, que la machine du ciel n'est pas un corps dur et impénétrable rempli de sphères réelles comme cela a été cru jusqu'à présent par la plupart des gens. Je prouverai que le ciel s'étend dans toutes les directions, parfaitement fluide et simple sans présenter nulle part le moindre obstacle, les planètes circulant librement dans ce milieu, gouvernées par une loi divine en ignorant la peine et l'entraînement des sphères porteuses. » En fait la loi divine sera la loi de la gravitation qui sera établie et publiée par Newton un siècle plus tard. Mais en faisant disparaître les sphères porteuses du ciel, Tycho – Brahé ouvre la porte au travail de Kepler.

2.2.2. Kepler (1571-1630).

Kepler fut copernicien toute sa vie. Son premier livre important le « *Mysterium Cosmographicum* » publié en 1596 s'ouvrait sur une longue défense du système copernicien. Mais Kepler insistait sur le fait que Copernic, après avoir franchi avec hardiesse le premier pas de la transposition du Soleil et de la Terre, était resté trop près de Ptolémée en développant les détails de son Système. Kepler était conscient de façon précise des résidus archaïques du *De Revolutionibus* et il décida de les éliminer en tirant toutes les conséquences du nouveau statut de la Terre. Il aborda le problème des planètes en étudiant le mouvement de Mars. Ce fut un travail immense qui l'occupa pendant près de 10 ans. Deux orbites devaient être calculées : l'orbite de Mars bien sûr mais également l'orbite de la Terre d'où Mars était observée. Une longue série d'essais infructueux contraignit Kepler à conclure qu'aucun système d'orbites circulaires ne permettait d'éliminer les désaccords entre ses calculs et les observations faites par Tycho Brahé. Il constata, par contre, que l'on pouvait réconcilier prévisions et observations en admettant des orbites elliptiques sur lesquelles se déplaçaient les planètes avec une vitesse variable régie par une loi simple qu'il précisa. Le problème des planètes était enfin résolu et résolu dans un univers copernicien. Ce sont les lois qui régissent ces mouvements qui sont toujours connues sous le nom de lois de Kepler. Le système astronomique concernant les planètes dont a hérité la science moderne est donc le fruit de l'œuvre de Kepler et de Copernic. Kepler publiera d'ailleurs en 1627 ses tables rodolphiennes, dérivées de sa théorie et supérieures à toutes les tables alors en usage. L'histoire de la composante astronomique de la révolution copernicienne pourrait se terminer là si l'on se limitait au problème des planètes qui, ne l'oublions pas, était le seul problème que voulait résoudre Copernic. En fait cette histoire ne s'arrête pas là. C'est à ce stade qu'apparaît un nouveau personnage : Galilée.

2.2.3. Galilée (1564-1642).

Galilée, en 1609, regardait pour la première fois le ciel à l'aide d'un instrument nouveau : une lunette. Le résultat fut stupéfiant. Chaque observation fit découvrir des objets nouveaux. Dans toutes les directions, Galilée découvrait des étoiles nouvelles. L'extension considérable de l'univers, sa dimension infinie postulée par certains comme Giordano Bruno pour qui cet infini proclamait la créativité sans limite de Dieu, se changeait presque en une donnée sensible. Le grand nombre d'étoiles ne constituait pas le seul élément nouveau. Loin de là, la découverte des quatre satellites de Jupiter, l'existence de taches solaires qui évoluent au cours du temps étaient contraires au principe aristotélicien de l'immutabilité du ciel et d'un unique centre de rotation.

La lunette n'apportait pas de preuves directes des principes essentiels de la théorie de Copernic, c'est-à-dire de la position centrale du Soleil ou du mouvement des planètes autour de lui et en particulier de la Terre. Mais elle fut une arme extrêmement efficace pour la promotion du Système héliocentrique. Elle n'apportait pas une preuve mais c'était un instrument de propagande. Pour les initiés à l'astronomie, les ellipses de Kepler représentaient un bien meilleur argument. Mais ce n'était pas sur les astronomes que la lunette exerçait une influence immédiate, c'était sur les gens qui ne possédaient que des notions vagues d'astronomie. Ils regardaient dans une lunette et se persuadaient que l'univers ne correspondait pas aux conceptions naïves du sens commun. C'est en cela que réside la véritable importance de l'œuvre astronomique de Galilée qui a vulgarisé l'astronomie copernicienne.

Mais dans la mesure même où Galilée la vulgarisait elle cessait d'être ésotérique. Ce n'est pas un hasard si c'est après que Galilée eut fait connaître ses observations, en 1610, que l'opposition officielle de l'appareil ecclésiastique catholique s'est mise en marche. En effet, il n'était plus possible alors d'écarter le concept du mouvement de la Terre comme un simple système mathématique, utile mais sans réalité physique. Les observations à la lunette révélèrent le véritable enjeu pour la cosmologie bien plus nettement que ne le montraient des pages de calculs.

2.2.4. Newton (1642-1727)

Après Kepler et Galilée, la cinématique des planètes était bien établie, restait à comprendre les causes de ces mouvements. Ce fut l'œuvre de Newton qui en résolvant ce problème donna naissance à la mécanique céleste.

C'est Hooke, contemporain de Newton qui le premier publia des « suppositions » dans lesquelles il indiquait que l'inertie plus une seule force d'attraction régissaient à la fois les mouvements célestes et les mouvements terrestres. Mais Hooke n'était pas assez mathématicien pour déduire cette loi de l'attraction des lois expérimentales établies par Kepler. Ce fut le travail de Newton qui démontra en 1666 que la loi était en $1/r^2$. Il la publia dans les « *Principia Mathematica* » en 1685 après avoir montré qu'elle s'appliquait à toutes les masses dont était construit le monde. Le cosmos hiérarchisé aristotélicien était alors définitivement détruit et ce que l'on appelle aujourd'hui la mécanique rationnelle créée. Il a recherché en vain une explication mécanique pour cette force d'attraction. Il ne voulait pas reconnaître cette force comme une propriété intrinsèque de la matière agissant à distance. Il avait d'ailleurs raison puisque la science du XX^{ème} siècle a justifié ses pressentiments. Mais à la mort de Newton, la plupart des scientifiques concevaient l'univers comme un espace neutre infini rempli de corpuscules dont les mouvements étaient soumis à quelques lois passives, comme la loi d'inertie et à quelques forces actives, comme la gravitation. La construction de cet univers corpusculaire achevait la révolution que Copernic avait commencé un siècle et demi plus tôt. Il était possible de dire alors comme l'a écrit l'historien des sciences Thomas Kuhn que : « L'univers aristotélicien en ruine était enfin remplacé par une vision du monde à la fois vaste et cohérente. Un nouveau chapitre s'ouvrait dans l'histoire du développement des conceptions de la nature par l'homme » Les successeurs de Newton s'efforcèrent effectivement dans les siècles suivants de découvrir les lois gouvernant les autres forces qui expliquent les phénomènes naturels comme la lumière, la chaleur, l'électricité, le magnétisme, les combinaisons chimiques. Cette révolution avait bien été l'amorce de cette nouvelle ère de véritable explosion de découvertes scientifiques dans laquelle nous vivons actuellement.

2.3. Incidence religieuse de la Révolution Copernicienne.

Mais il est un autre domaine que l'astronomie où les travaux de Copernic ont eu d'importantes conséquences. C'est celui des idées religieuses. En effet, que la Terre ne soit que l'une des six planètes incite les chrétiens à comprendre autrement les Écritures et les oblige à renouveler les représentations dogmatiques traditionnelles pour les rendre compatibles avec l'héliocentrisme. De plus, des questions inédites se posent. Ainsi, peut-on considérer l'incarnation de Dieu en Jésus comme un événement unique si la Terre perd sa place au centre du Monde ? S'il existe d'autres corps célestes semblables à elle, ne seraient-ils pas habités et dans ce cas pourquoi Dieu ne se serait-il pas manifesté en s'y incarnant également. Secondairement, que devient la position intermédiaire mais centrale de l'homme entre les anges et les démons et où donc situer le trône de Dieu si les cieux ont perdu leur perfection. Des réponses furent trouvées progressivement à ces questions.

Mais tout le monde savait que retirer la Terre du centre de l'univers dans une Europe chrétienne risquait de constituer une véritable bombe, pourtant l'accueil fut calme dans un premier temps aussi bien chez les protestants que les catholiques. On ne peut pas dire d'ailleurs que la science nouvelle ait été mieux accueillie dans le milieu de la Réforme que dans celui de l'Église catholique. Nous sommes en effet avant le Concile de Trente, période où l'Église catholique n'a pas encore officialisé sa contre-réforme. Ce n'est qu'après ce concile (1563), Copernic sera alors mort depuis longtemps, que la remise en ordre de l'Église ira de pair avec un important durcissement.

Le *De Revolutionibus* n'est publié que l'année de la mort de Copernic. L'ouvrage est précédé d'une dédicace et d'une préface. La dédicace au Pape Paul III est très courageuse, Copernic se permet en effet d'écrire : « Si d'aventure de vains discoureurs, qui tout en étant totalement ignorants des mathématiques, prétendent néanmoins juger de ces matières et qui, en raison de quelque passage de l'Écriture malignement détourné dans le sens de leur opinion, osent blâmer et attaquer mon ouvrage, eh bien ! je ne me soucie aucunement d'eux ; mieux même je méprise leur jugement » On est loin là de l'image que l'on a parfois attribué à Copernic de chanoine craintif. La préface, par contre, anonyme mais que l'on a su être rédigée par un théologien luthérien : Andréas Osiander exprime l'interprétation qui deviendra courante que le système héliocentrique est une simple hypothèse parmi d'autres. Cet affadissement du message de Copernic était bien sûr une très bonne précaution diplomatique mais totalement contraire à la pensée de l'intéressé. En tout cas elle fut efficace et permit au *De revolutionibus* de se diffuser sans turbulence majeure. C'est en effet seulement 70 ans après sa parution, en 1616, que la Congrégation Romaine de l'Index définit la doctrine copernicienne comme « fausse et absolument contraire à l'Écriture sainte ». L'ouvrage fut donc mis à l'index et le Système de Copernic condamné. La condamnation prononcée, il était difficile de revenir en arrière. Ce n'est qu'en 1822 que l'Église autorisa l'impression de livres traitant du mouvement de la Terre comme d'une réalité physique. Son engagement officiel contre l'héliocentrisme donna une image très négative de l'Église catholique : on cite toujours et encore maintenant la pathétique abjuration du vieux Galilée, obtenue par la force en 1633 pour dénoncer un manque d'ouverture de la papauté aux idées nouvelles.

Dans le luthéranisme, il n'y a pas d'Église dotée d'une structure centralisée, il n'y a pas de « pape » capable d'imposer une orthodoxie doctrinale si bien que l'héliocentrisme n'a jamais été proscrit. La position générale semble avoir été, comme l'indique un bon connaisseur de cette question M. P. Lerner, « un rejet par les théologiens luthériens du fondement cosmologique du système de Copernic comme un paradoxe insoutenable au regard de la raison et comme une contre-vérité du point de vue de la

révélation. Ils admettent par contre l'aspect technique, mathématique du *De Revolutionibus* en tant qu'hypothèse pour le calcul des mouvements célestes. » Dans les milieux réformés, à côté d'un courant fondamentaliste opposé à l'héliocentrisme, un courant plus ouvert indique qu'il n'est pas illicite de défendre la thèse copernicienne, celle-ci étant une vision savante de ce que les Écritures exposent de manière simple, selon le principe calvinien de l'accommodation. Ce principe affirme que quand Dieu parle aux hommes, il « s'accommode » à leurs connaissances et à leur manière de penser. Le discours biblique n'est peut-être pas scientifiquement vrai mais il a néanmoins du sens du point de vue religieux.

2.4. Pourquoi Copernic est-il à l'origine de cette révolution ?

Dans son livre « *La structure des révolutions scientifiques* », Thomas Kuhn étudie l'histoire des sciences et introduit la notion de paradigme. Un paradigme est le cadre de réflexions et de pratiques d'une communauté scientifique donnée, par exemple celle des astronomes ou des médecins. C'est la façon de penser le monde à une certaine époque. S'appuyant sur un paradigme, les chercheurs de la discipline concernée pratiqueront ce que Kuhn appelle « la science normale », c'est-à-dire une science qui progresse de manière continue, sans rupture importante jusqu'à ce qu'un nouveau paradigme remplace le précédent en créant une véritable révolution scientifique. Mais les paradigmes se laissent difficilement bouleverser. Dans le domaine des sciences de l'univers, ils sont peu nombreux. Le premier est le paradigme aristotélicien qui aboutit au système de Ptolémée. Le second la Révolution Copernicienne qu'il serait plus juste d'appeler Copernico-Newtonienne car si Copernic en est l'initiateur avec l'héliocentrisme, c'est Newton qui en tire toutes les potentialités. Elle sera développée dans les siècles suivants dans le cadre de « la science normale » jusqu'à la double révolution relativiste du XX^{ième} siècle.

Mais pourquoi apparaissent-elles à un moment donné ? Pourquoi Copernic a-t-il été à l'origine de la révolution qui porte son nom, pourquoi aura-t-il fallu 14 siècles pour que ce nouveau paradigme, l'héliocentrisme, remplace le géocentrisme d'Aristote et de Ptolémée. Pourquoi la grande période d'ébullition savante du monde arabe, à Bagdad, à partir du IX^{ième} siècle n'a-t-elle pas vu ce changement de paradigme ? On peut essayer de le comprendre. À cette époque on découvrait et on traduisait en arabe les travaux d'Aristote et de Ptolémée. On était émerveillé par leur découverte. On était alors tout naturellement en pleine période de science normale puisqu'il s'agissait d'améliorer le système ptoléméen des épicycles pour rendre compte au mieux des nouvelles observations. On n'était donc pas à la recherche de nouveau paradigme. En particulier Abou Farag dit Bar Hebraeus, un chrétien jacobite, écrit en 1279 un cours d'astronomie dans lequel il approfondit le travail de Ptolémée mais où il n'est pas question de remettre en cause le géocentrisme.

Ensuite une nouvelle occasion est encore apparue, lors de la renaissance timouride à Samarcande, dans la première moitié du XV^{ième} siècle. L'astronome Ali Quashi (1403-1474) soutenu par le gouverneur de Samarcande Ulugh Beg, petit-fils de Tamerlan et astronome lui-même, avait ouvert la voie à l'héliocentrisme en contestant en particulier la dépendance de l'astronomie par rapport à la physique d'Aristote. Comme en outre, Samarcande regroupait des savants de grande qualité y compris en mathématiques, tout semblait pouvoir concourir au changement de paradigme dans cette partie du monde. Malheureusement en 1449, le fils d'Ulugh Bey à la tête de fondamentalistes musulmans décapitait son père, dispersait tous les savants et détruisait l'observatoire de Samarcande. C'était la fin de la renaissance timouride. Une occasion

était perdue. Ce ne fut donc pas là mais en Europe que le nouveau paradigme se mit en place.

Là, les conditions étaient favorables à la fin du XVI^{ème} siècle. Copernic a vécu en effet en pleine Renaissance et en pleine Réforme, période de fermentation générale qui facilitait l'innovation dans le domaine scientifique. C'est également l'époque des grandes découvertes. Le débarquement de Colomb en Amérique, Copernic avait alors 19 ans, montra que les anciennes descriptions de la Terre étaient fausses. On réalisa à quel point Ptolémée pouvait s'être trompé lui qui avait été le plus grand géographe de l'Antiquité en même temps que le plus grand astronome. La prise de conscience des erreurs de sa Géographie préparait à des changements dans son Almageste. En découvrant d'autre part au XVI^{ème} siècle des versions grecques de l'œuvre de Ptolémée, on constatait qu'elles n'apportaient pas d'amélioration par rapport à la version arabe. Certains astronomes prédécesseurs immédiats de Copernic commençaient à prendre conscience qu'il était temps d'opérer des changements fondamentaux si l'on voulait progresser. Les esprits y étaient préparés. Mais pourquoi ces changements ont-ils été l'œuvre de Copernic lui-même ? Copernic possédait deux caractéristiques qui le prédestinaient à ce rôle. Tout d'abord, il était reconnu comme un astronome très compétent avec une excellente culture mathématique. Or, penser la Terre en mouvement complique considérablement les calculs pour les faire coïncider avec les observations. En outre, Copernic se situait dans la mouvance néoplatonicienne, un courant de pensée important à son époque qui estimait que le monde devait être régi par des lois simples. Il en déduisait qu'aucun système aussi complexe que la théorie des planètes de Ptolémée ne pouvait représenter le véritable ordre mathématique de la nature. Il l'exprime explicitement dans la dédicace du *De Revolutionibus*. Ce néoplatonisme sera d'ailleurs encore plus net chez Kepler dans l'œuvre duquel la recherche de relations numériques simples est constante. La combinaison des caractéristiques de l'homme et de celles de son époque pourrait donc tenter d'expliquer pourquoi c'est avec Copernic que le changement de paradigme s'est produit.

3. La Révolution Copernicienne : une nouvelle manière de penser.

Nous venons d'examiner la Révolution Copernicienne en tant que nouvelle cosmologie. Nous avons vu qu'après Newton, non seulement la Terre était devenue une planète mais l'Univers était un espace neutre infini rempli de corpuscules soumis à des forces qu'il allait falloir découvrir au cours des siècles suivants. Nous avons vu également les conséquences théologiques du décentrement de la Terre et par suite de l'Homme. Mais pourquoi cet épisode de la Renaissance est-il considéré comme un tournant dans l'histoire du développement intellectuel de l'Occident, dans la manière même de penser ?

On peut avancer la réponse suivante. Copernic en introduisant l'héliocentrisme sape l'immense prestige de la tradition liée à la conviction que les anciens étaient plus sages, plus savants, plus habiles que nous et que c'est dans leurs écrits qu'il fallait chercher la connaissance. C'est un bouleversement complet dans la pensée. C'est la fin de la scolastique médiévale. Cette révolution a été, d'une certaine manière, non pas une révolution du savoir mais une révolution de la découverte de l'ignorance. En effet on découvrait que les hommes ne connaissent pas toutes les réponses aux questions qu'ils se posent et qu'il faut donc les rechercher par un effort personnel de réflexion. Il n'est plus possible de se contenter de s'en remettre aux Sages du passé, leur sagesse non seulement n'embrasse pas tout mais de plus ce qu'ils croyaient savoir pouvait se révéler faux. Copernic est l'initiateur de cette nouvelle démarche intellectuelle qui s'autorise à

remettre en cause les certitudes reçues ou les arguments d'autorité les moins discutés pour leur substituer expérience, calcul et raisonnement. Cette science moderne va véritablement exploser après lui. Nous avons vu Kepler, Galilée, Newton en astronomie. Il y aura Descartes avec son doute méthodique en philosophie, Pascal avec sa démonstration de l'existence du vide. En médecine ce sera Harley avec la circulation sanguine, Ambroise Paré et la ligature des artères. Kant enfin qui donnera toute sa place à l'activité dynamique de la raison humaine pour créer de l'ordre dans le chaos apparent du monde : c'est notre esprit qui façonne la connaissance tout autant qu'il la reçoit. Kant qui introduit d'ailleurs le premier l'expression de Révolution Copernicienne l'intégrera à sa théorie de la connaissance dans laquelle il donne la place centrale au sujet et non plus à l'objet. C'est bien le sujet qui élabore des concepts, procède à des expériences et ne se contente pas d'une simple observation passive du monde. Kant, en fait, reprend et formalise l'apport essentiel de la Révolution Copernicienne pour aboutir à une véritable définition de la démarche scientifique telle que nous la connaissons. Il est l'aboutissement épistémologique de cette Révolution.

4. Conclusion.

Copernic a ouvert la voie à tous ceux qui dans les siècles suivants renouvelleront complètement par leur inventivité notre vision du monde. Mais lui aura eu un grand mérite. Il aura été à l'origine de ce mouvement. Ce n'était pas facile d'être le premier à sortir des sentiers battus surtout dans un domaine aussi sensible que la place de la Terre dans l'Univers et par suite de l'Homme. La Révolution Copernicienne c'est cette audace d'un précurseur qui annonce les temps nouveaux de la connaissance. Il est donc juste que cette révolution dont il est l'initiateur, qui a bouleversé la pensée scientifique et d'une certaine manière toute la pensée occidentale, porte son nom, même s'il serait légitime d'y associer ce savant exceptionnel qu'a été Newton et de parler de Révolution Copernico-Newtonienne.

QUELQUES RÉFÉRENCES :

Thomas S. Kuhn, *La révolution copernicienne*, éd. Les Belles Lettres (2016).

Thomas S. Kuhn, *La structure des révolutions scientifiques*, éd. Flammarion (2018).

Alexandre Koyré, *Du monde clos à l'univers infini*, éd. Gallimard (2015).

Jean-Pierre Verdet, *Une histoire de l'astronomie*, éd. Le Seuil (1990).