

La « révolution copernicienne » a-t-elle eu lieu ?

« Les voies par lesquelles les hommes arrivent à comprendre les choses
me semblent aussi admirables que les choses elles-mêmes »

Kepler, *Astronomie nouvelle* (1609)

Je voudrais essayer de répondre à la question suivante : « la révolution copernicienne » a-t-elle eu lieu ? J'abats tout de suite mes cartes en annonçant que je vais répondre oui. Mais cela n'a pas en soi une grande importance. Ce qui compte c'est de dire *en quel sens* il y a eu « révolution copernicienne ». Cela compte d'autant plus que l'expression « révolution copernicienne » a fini par s'imposer, au point de devenir « tarte à la crème ». Elle est quasiment devenue le nom propre d'un événement, comme on parle de la Révolution française ou de la révolution industrielle. Or à mesure même que cette expression devient de moins en moins problématique, il est fort à craindre qu'elle se vide de son sens originel.

En effet, le sens du mot révolution s'est transformé au cours de l'histoire, et il continue sous nos yeux de changer. Contrairement à la Révolution française, la révolution copernicienne ne s'est pas donné à elle-même ce nom. Elle l'a reçu après-coup. Copernic parle de révolution, mais sous sa plume le mot a un sens purement astronomique. Il apparaît dans le titre de l'ouvrage, paru en 1543, où Copernic expose son système héliocentrique : *De revolutionibus orbium coelestium*, que l'on peut traduire par *Des révolutions des orbes célestes*. Le mot révolution ici, désigne la trajectoire circulaire des étoiles et des planètes. Ce sens apparaît en latin médiéval vers le XI^e siècle et il s'est conservé dans la langue technique des sciences. En mathématique, par exemple, on parle encore aujourd'hui de surface de révolution, pour désigner les surfaces engendrées par la rotation d'une ligne autour d'un axe fixe (le cône ou l'hyperboloïde de révolution par exemple). L'usage politique du mot révolution n'apparaît que dans le courant du XVIII^e avec la traduction en français de Polybe par Thuillier, où il signifie le passage plus ou moins violent d'un régime politique quelconque à un autre¹. Contrairement à ce qu'on pourrait croire, cet usage politique ne s'oppose pas au sens astronomique, car il implique lui aussi l'idée de cycle. La révolution comme changement de régime est toujours pensée au sein d'un *cycle* où les mêmes régimes se succèdent dans un ordre déterminé. Ce cycle, Polybe l'appelle l'*anacyclose* : le pouvoir d'un seul (la monarchie), puis sa forme dégénérée (la tyrannie), le passage au pouvoir de quelques-uns (l'aristocratie) et

¹ Cf. Milner Jean-Claude, *Relire la Révolution*, Verdier, 2016, p. 88-89.

à sa forme dégénérée (l'oligarchie), puis le passage au pouvoir de tous (la démocratie) et à sa forme dégénérée (l'ochlocratie, pouvoir de la foule) ; et enfin retour au pouvoir d'un seul. Le cycle repart, etc.

En réalité, il faut attendre la Révolution française pour que le sens du mot révolution s'émancipe de la notion de cycle qui venait de l'astronomie. A partir de la Révolution française, le mot « révolution » désigne non plus un changement de régime quelconque au sein d'un cycle, mais *l'avènement, conçu comme définitif ou devant l'être, du pouvoir de tous*. On passe d'un temps cyclique à un temps linéaire. « Révolution » désigne à présent une puissance de rupture qui ouvre une période nouvelle, où les changements s'opèrent non pas seulement dans un domaine restreint et limité, mais dans de nombreuses sphères de la pensée et de l'activité humaine (droit, économie, religion, littérature, etc.) *La Révolution française a donc révolutionné jusqu'au sens du mot révolution*².

En quel sens faut-il donc prendre le mot révolution dans l'expression « révolution copernicienne » ? La question se pose d'autant plus que le sens du mot révolution continue de se transformer sous nos yeux. Le mot est utilisé de plus en plus facilement, et pas seulement en politique, mais dans tous les domaines. On parle de la « révolution des œillets », de la « révolution violette », des « révolutions arabes ». Dans le domaine technologique, le mot de révolution finit par désigner n'importe quelle mutation, même insignifiante. Les publicitaires exploitent sans vergogne ce sens marchand. Peugeot remplace une pompe à huile sur un moteur de 206 et annonce une « révolution » (je caricature à peine). Vous avez un signe intéressant de cette tendance dans la notion qui est mise au programme de la question contemporaine du concours commun de Science-Po cette année : *révolutions*. Mis au pluriel et sans article défini, le mot perd le sens de rupture radicale que la Révolution française lui avait donné.

Dans ces conditions, il convient de s'arracher à l'expression « révolution copernicienne » pour retourner aux choses-mêmes, c'est-à-dire à l'événement historique que l'expression est censée nommer : l'avènement de l'astronomie héliocentrique. S'agit-il d'une simple réforme dans un champ limité du savoir, d'un changement de paradigme provisoire amené à disparaître au profit d'un autre ? Ou bien s'agit-il d'un bouleversement sans précédent dans l'histoire de la pensée humaine qui ouvre un champ radicalement nouveau de problèmes qui sont encore les nôtres ?

Vous allez voir que la réponse ne va pas de soi.

² On connaît l'échange célèbre entre Louis XVI et le duc de Laroche-foucauld-Liancourt la nuit qui suit la prise de la Bastille. Le Roi demande : « C'est une révolte ? ». Le duc répond : « Non, Sire, c'est une révolution ». Le mot nous paraît une anticipation géniale de l'avenir. Mais c'est une illusion. Car la réponse du duc est polybienne. Elle signifie que la prise de la Bastille n'est pas une simple émeute qui se contenterait de contester une décision du Roi (le renvoi de Necker par exemple, ou le maintien des troupes aux portes de Paris), mais qu'elle est le premier pas vers un nouveau régime où l'absolutisme sera aboli. Dans la bouche du duc, « révolution » désigne le passage de la tyrannie à l'aristocratie, et n'a donc pas le sens que nous lui prêtons nous, précisément parce que la Révolution française a eu lieu depuis. Cf., Milner, *op. cit.*, p. 23 *sqq.*

Je voudrais commencer par rappeler les points communs que l'astronomie héliocentrique de Copernic partage avec l'astronomie géocentrique de Ptolémée. Ptolémée vivait à Alexandrie au II^e siècle de notre ère. Il est l'auteur d'un ouvrage qui est considéré comme le chef d'œuvre de l'astronomie antique, et qui s'appelle la *Syntaxe mathématique*, *Mathematikè syntaxis* en grec. Le livre est davantage connu par son titre arabe : *L'Almageste* (qui signifie « la très grande »). *L'Almageste* a été traduit du grec en syriaque, puis du syriaque en arabe. Les musulmans arabo-perses ont assimilé et perfectionné l'astronomie ptoléméenne pendant plusieurs siècles alors que l'Europe chrétienne l'ignorait encore. *L'Almageste*, en effet, ne fut traduit en latin qu'au XII^e siècle par Gérard de Crémone, à partir de la version arabe. Ce fut d'ailleurs le premier texte traduit de l'arabe par l'école de traduction que Gérard de Crémone fonda à Tolède. Cela donne une idée de la haute estime dans laquelle ce texte était tenu. C'est sur cette version latine de *L'Almageste* que Copernic a travaillé toute sa vie. Car c'est moins en observant le Ciel qu'en étudiant *L'Almageste* que Copernic a élaboré son astronomie héliocentrique.

Copernic a observé bien sûr, mais finalement assez peu. Sur les 76 observations auxquelles se réfère son ouvrage, 26 seulement sont de son fait et aucune d'elle n'oblige à abandonner le géocentrisme³. Les autres observations sont empruntées à d'autres astronomes, et principalement à Ptolémée. De plus, pour faire ses observations, Copernic disposait exactement des mêmes instruments que ceux dont disposait Ptolémée (le gnomon, la sphère armillaire, le *triquetrum* ou règle parallactique, le quadrant astronomique). Il n'y a aucun véritable progrès technique dans l'observation du Ciel entre Ptolémée et Copernic. Les progrès viendront après, à partir de Galilée. Le Ciel dont Copernic cherche à rendre compte est le même que celui de Ptolémée. Il s'agit des mêmes phénomènes observables à l'œil nu depuis la Terre.

Quels sont-ils ces phénomènes ? Quand on regarde le Ciel, on y voit des astres, c'est-à-dire des corps lumineux qui se déplacent avec une certaine régularité, puisqu'ils font retour à la même place au bout d'un certain temps. Il y a bien sûr le Soleil et la Lune, qui sont les corps célestes les plus voyants : le « grand luminaire » et le « petit luminaire » comme dit la Bible (*Gn*, 1, 16), l'un qui « préside au jour », et l'autre à la nuit. Mais il y a aussi les étoiles qui constituent un tapis de petits points lumineux qui scintillent la nuit. Depuis la plus haute Antiquité, on appelle ces étoiles *les fixes*. Car elles sont fixes les unes par rapport aux autres : elles forment des Constellations repérables qui tournent dans le Ciel au-dessus de l'horizon. Les civilisations les plus anciennes (Egypte, Inde, Chine, Babylone) les ont nommées et décrites il y a des millénaires. Mais sur la voute céleste nocturne, il n'y a pas que les Constellations qui soient

³ Il faudra attendre l'observation des phases de Vénus par Galilée à l'aide de la lunette astronomique (1610), pour rendre caduc le système ptoléméen. Mais cette observation ne nécessite aucunement l'adoption de l'héliocentrisme, car le système géocentrique de Tycho-Brahé en rend également compte.

visibles. Si on regarde bien le Ciel sur une durée de plusieurs mois, on voit que certains points lumineux se déplacent sur le fond étoilé. Ce sont les planètes. Le mot planète vient d'un mot grec, *planétos*, qui veut dire « errant ». Les planètes sont des astres errants qui vagabondent sur le fond étoilé. Il y a cinq planètes visibles à l'œil nu et repérées depuis les Babyloniens : Mercure, Vénus, Mars, Jupiter et Saturne. Copernic n'a donc rien vu de plus que Ptolémée. Il a même vu moins. Car dans le Nord de la Pologne, les conditions d'observation n'étaient pas aussi bonnes qu'en Egypte : Copernic n'a jamais vu Mercure par exemple.

Un autre résultat dont hérite Copernic et qu'il partage avec Ptolémée, c'est la rotondité de la Terre. C'est un point acquis depuis très longtemps. On en trouve plusieurs démonstrations dans le chapitre 14 du livre II du *Traité du ciel* d'Aristote, au IV^e siècle avant notre ère. La plus célèbre est fondée sur une observation astronomique : lors d'une éclipse de Lune, on voit l'ombre portée de la Terre qui vient mordre sur la surface lunaire, et on constate qu'elle est circulaire⁴. La rotondité de la Terre est un fait établi scientifiquement par le raisonnement et l'observation depuis 2500 ans. Les chrétiens, les juifs et les musulmans du Moyen-âge ont hérité de ce savoir antiques. J'évoque encore (sans développer) deux résultats, que Copernic partage avec Ptolémée : *la circonférence de la Terre*, mesurée avec une très grande exactitude par Ératosthène au III^e siècle avant J.C. ; et *la distance Terre-Soleil*, déterminée exactement un siècle plus tard, par Hipparque.

Tous les points que je viens de rappeler constituent un héritage. Ni Copernic, ni Ptolémée n'en sont les inventeurs. Quel est donc l'apport de Ptolémée en astronomie ? Il est le suivant. Ptolémée a réussi à construire un modèle astronomique sans précédent dans l'histoire, capable pour la première fois de prédire exactement la position de toutes les planètes et de la Lune, et pas seulement du Soleil et des Constellations. Ptolémée était astrologue. Or pour faire des horoscopes, il faut connaître la position exacte des planètes⁶. *L'Almageste* est un traité complet d'astronomie qui a une efficacité prédictive immense. Grâce à lui, on peut, par exemple, calculer la position de Saturne cette nuit à deux heures du matin, dire quand aura lieu la prochaine phase de la Lune, si elle sera au premier quartier ou au dernier quartier, quand aura lieu la prochaine éclipse, à quelle heure se lèvera le Soleil ce jour-là, avec quelle

⁴ Aristote, *Traité du ciel*, II, 14, Paris, Flammarion, GF, 2004, p. 293.

⁵ Les astronomes musulmans n'ont jamais tenu compte des sourates « platistes » du Coran (2, 22 ; 15, 19). L'Église pour sa part a très tôt rejeté le sens littéral des versets bibliques qui suggéraient une cosmologie platiste, parce que la rotondité de la Terre était une vérité rationnellement établie. C'est la rotondité que Saint-Thomas d'Aquin donne en exemple pour illustrer ce qu'est une vérité de raison au début de la *Somme théologique*. Le docteur angélique renvoie à la démonstration fondée sur les éclipses de Lune (*Traité du ciel*, II, 14). Il veut distinguer les vérités démontrables par la raison des vérités de foi, inaccessibles à la raison humaine, révélées par Dieu et objets de la théologie. Cf. *Somme théologique*, Introduction, Qu. 1, art. 1, Paris, Cerf, 1984, t. I, p. 154.

⁶ On oublie souvent qu'un des buts principaux de l'astronomie, jusqu'à Copernic inclus, c'était de faire de l'astrologie. Ptolémée est d'ailleurs l'auteur d'un ouvrage qui fait référence aujourd'hui encore en astrologie : le *Tétrabible*.

planète et quelles étoiles il sera en conjonction, etc. C'est tellement prodigieux qu'on comprend le succès millénaire de ce modèle astronomique. Un schéma vous en donne une vision synoptique simplifiée⁷. Cf. schéma 2. La Terre est au centre ; les sphères concentriques qui portent les planètes sont animées d'un mouvement annuel vers l'Est ; la sphère des fixes clôture l'ensemble de ce Cosmos et l'emporte avec elle dans un mouvement diurne vers l'Ouest.

Ce n'est donc en aucun cas l'inefficacité pratique du système de Ptolémée qui va conduire Copernic à proposer un modèle héliocentrique. *Le système de Copernic non seulement ne prédit pas plus de phénomènes, mais il ne les prédit pas mieux*. De plus, il conserve la même structure d'ensemble. Le Soleil et la Terre permutent. Ce n'est pas le même corps qui est au centre, mais *c'est le même centre* : autour de lui sont enchâssées des sphères concentriques, qu'on appelle des orbes. Le titre de l'ouvrage de Copernic (*Des révolutions des orbes célestes*) est strictement ptoléméen. L'héliocentrisme copernicien est construit avec des mouvements circulaires et uniformes, comme l'astronomie géocentrique de Ptolémée. On ne peut même pas dire que le modèle copernicien simplifie les calculs, car en réalité il les rend plus difficiles encore : pour déterminer le lieu apparent d'une planète, il faut d'abord établir son lieu héliocentrique, puis le lieu héliocentrique de la Terre, en ayant préalablement calculé les distances respectives du Soleil à la Terre et du Soleil à la planète considérée. Un historien des sciences (Negebauer) estime qu'il faut, dans ces conditions, environ 40 minutes pour calculer une seule position de Jupiter.

L'héliocentrisme se présente donc au premier abord comme un simple changement de repère. Considérons pour mieux le comprendre le mouvement apparent du Soleil.

On voit le Soleil tourner chaque jour avec tous les corps célestes, et revenir à la même place en 24 heures. C'est le *mouvement diurne* du Soleil vers l'Ouest. Mais, au cours de l'année, on le voit se déplacer lentement par rapport aux étoiles vers l'Est, et traverser les Constellations dites du zodiaque avant de revenir au même point (c'est le *mouvement annuel*). Pour décrire ces deux mouvements, on peut choisir indifféremment comme point de repère immobile la Terre ou le Soleil. Si on choisit la Terre, on obtient le modèle donné par schéma 1. Le Soleil effectue une rotation diurne avec la sphère des fixes, et en même temps il parcourt en un an, d'Ouest en Est, un grand cercle qui est incliné de 23, 5 par rapport à l'équateur céleste. Ce grand cercle, dans l'astronomie géocentrique, est appelé l'*écliptique*. Si on choisit le Soleil comme point de repère immobile, on obtient le schéma 5. Il faut alors faire tourner la Terre en un an autour du Soleil, et en 24 heures sur elle-même. L'axe de rotation doit être incliné de 23, 5. Ainsi, dans chaque système, une même inclinaison de 23, 5

⁷ Les schémas en annexe sont tirés de *La Révolution copernicienne* de Thomas Kuhn (1957). Les légendes sont à lire attentivement. Elles apportent un complément précieux à la conférence.

rend compte des saisons. Mais elle affecte ou bien l'écliptique par rapport à l'équateur céleste (géocentrisme), ou bien l'axe de rotation de la Terre (héliocentrisme).

Par ailleurs, la trajectoire annuelle du Soleil présente une irrégularité. Le Soleil ne se déplace pas toujours à la même vitesse sur l'écliptique. Il va plus vite en hiver et plus lentement en été : l'hiver dure moins longtemps (c'est en tout cas ce qu'on observe dans l'hémisphère Nord au-dessus des tropiques)⁸. Pour rendre compte de cette inégalité apparente de vitesse, Copernic utilise le même dispositif que Ptolémée reprend à un de ses prédécesseur (Hipparque) et que l'on appelle l'*excentrique*. Chez Ptolémée, c'est le cercle où le Soleil se déplace qui est excentré (la Terre ne se trouve pas exactement au centre), et chez Copernic, c'est le cercle où la Terre se déplace (le Soleil ne se trouve pas exactement au centre). Par ce procédé, le mouvement uniforme apparaît comme non uniforme.

Henri Poincaré, dans *La Science et l'hypothèse*, présente le géocentrisme et l'héliocentrisme comme deux conventions fondamentalement équivalentes entre lesquelles on peut choisir par commodité en fonction des calculs qu'on souhaite effectuer⁹. Dans la navigation, aujourd'hui encore, on continue de raisonner dans un cadre géocentrique pour des raisons pratiques¹⁰. Rien, pour l'instant, ne nous permet de conclure au caractère révolutionnaire de l'avènement de l'héliocentrisme. Et ce d'autant plus que l'hypothèse héliocentrique elle-même n'est pas nouvelle. Aristarque de Samos, un astronome grec du III^e siècle avant notre ère, est le premier autant qu'on sache, à l'avoir formulée¹¹.

Cependant il faut faire une remarque, qui va nous obliger à dépasser notre point de vue. C'est que l'hypothèse héliocentrique n'a pas donné lieu avant le XVI^e siècle à la construction effective d'une géométrie permettant une théorie planétaire prédictive. C'est le mérite de Copernic d'avoir su l'élaborer. Or si on l'examine de près, dans le détail de son fonctionnement, on découvre qu'elle apporte quelque chose de nouveau, qui nous empêche de la tenir pour un simple équivalent du géocentrisme.

Le modèle de Copernic, on vient de le voir, n'a aucune supériorité pratique : il n'est ni plus prédictif, ni plus économique. Mais il a une supériorité théorique

⁸ J'insiste sur le fait que c'est bien l'*inclinaison* de la Terre par rapport au Soleil qui rend compte des saisons, et non la *distance* par rapport au Soleil. En hiver à Paris, la Terre est plus proche du Soleil qu'en été. S'il y fait plus froid, c'est parce que les rayons du Soleil y parviennent avec un angle très inférieur à 90 °, du fait de l'inclinaison de la Terre. Sous les tropiques (dont la position dépend du degré d'inclinaison), les rayons solaires arrivent au moins une fois dans l'année à la verticale : le taux de photons est plus grand. Il y fait plus chaud qu'ailleurs, et les journées y sont à peu près égales aux nuits. Pour une définition des tropiques et ses conséquences biologiques et anthropologiques, Cf. Hallé Francis, *Un monde sans hiver, Les tropiques : nature et sociétés*, Paris, Seuil, « Points Sciences », 2014.

⁹ Poincaré Henri, *La Science et l'hypothèse*, chap. VII, Paris, Flammarion, « Champs sciences », 2017.

¹⁰ Cf. par exemple le manuel de navigation de l'association *Les Glénans*.

¹¹ Il faut noter que l'hypothèse d'Aristarque ne fut connue en Europe qu'après la mort de Copernic, par la traduction latine de *L'Arénaire* d'Archimède publiée en 1544 pour la première fois.

indéniable, qu'il faut bien mesurer. On peut souligner *trois apports théoriques fondamentaux*.

Le premier apport théorique du modèle copernicien est *une simplification qualitative*. Pour pouvoir prédire avec exactitude la trajectoire des planètes, le système de Ptolémée composait deux dispositifs compliqués : le *déférent-avec-épicycle* et l'*équant*. Pour comprendre la fonction de ces deux dispositifs dans l'astronomie de Ptolémée, il faut encore une fois partir de l'observation. La trajectoire des planètes présente, en plus d'une variation de vitesse, une anomalie que l'*excentrique* ne permet pas d'expliquer. A certains moments de leur trajectoire sur l'écliptique, on voit les planètes s'arrêter, partir en sens inverse (vers l'Ouest), puis s'arrêter à nouveau avant de repartir dans le sens initial (vers l'Est). Cf. schéma 3. Cette irrégularité propre aux cinq planètes (Mercure, Venus, Mars, Jupiter et Saturne) dessine dans le Ciel ce qu'on appelle une *boucle de rétrogradation*. Elle s'accompagne d'une variation d'intensité lumineuse : la planète brille davantage quand elle rétrograde. Par ailleurs, l'astronomie géocentrique cherche à « sauver » le mouvement apparent des corps célestes uniquement avec des mouvements circulaires et uniformes. Car ce mouvement éternel, toujours identique à lui-même, n'ayant ni commencement ni fin, est le seul mouvement qui convient à la divinité sidérale des étoiles et des planètes. « Le but des hypothèses planétaires » selon Ptolémée (*Almageste*, IX, 2), est de « démontrer dans le cas des cinq planètes comme celui du Soleil et de la Lune, que toutes leurs apparentes irrégularités sont produites par le moyen de *mouvements réguliers et circulaires* (...), propres à la nature des choses divines, lesquelles sont étrangères aux disparités et aux désordres¹² ». Comment, dans ces conditions, rendre compte des *boucles de rétrogradation* ? C'est pour résoudre ce problème qu'Apollonius de Perge, à la fin du III^e siècle avant J.C., a inventé le dispositif du *déférent-avec-épicycle*. Il consiste à combiner deux cercles. La planète décrit un petit cercle, qu'on appelle épicycle, tandis que le centre de l'épicycle décrit un grand cercle autour de la Terre, qu'on appelle le déférent (c'est le cercle « porteur »). La composition de ces deux mouvements circulaires et uniformes engendre, pour l'observateur terrestre, des boucles de rétrogradation. L'intérêt d'un tel dispositif, c'est qu'il rend compte également de la variation d'intensité lumineuse. Cf. schéma 4.

Mais pour prédire avec exactitude la position des planètes, ce dispositif ne suffit pas. En effet, la boucle de rétrogradation de Mars, par exemple, est longue tantôt de 9 °, tantôt de 20 °. Si on introduit, pour rendre compte de la première, les constantes nécessaires (correspondant à la période de révolution de chacun des deux cercles), il devient impossible de rendre compte de la seconde, et inversement. Pour surmonter cette difficulté, Ptolémée se voit contraint

¹² C'est nous qui soulignons. Cité dans Mayaud Pierre-Noël, *Le conflit entre l'Astronomie Nouvelle et l'Ecriture Sainte aux XVI^e et XVII^e siècles. Un moment de l'histoire de idées. Autour de l'affaire Galilée*, Paris, H. Champion, « Bibliothèque littéraire de la Renaissance », 2005, vol. I, p. 173.

d'introduire un artifice supplémentaire dont il est l'inventeur, et qu'on appelle le point *équanti*¹³. Le principe en est le suivant. La planète se meut uniformément sur un épicycle, dont le centre tourne le long d'un cercle déférent excentrique (le centre est à côté de la Terre). Mais le centre de l'épicycle se meut uniformément par rapport à un point qui ne correspond ni à la Terre, ni au centre du déférent, et qui est le symétrique de la première par le second. C'est par rapport à ce point dit *équanti* que la vitesse angulaire du centre de l'épicycle est constante. Cet artifice géométrique permet de rendre compte avec précision de la trajectoire des planètes¹⁴. Un tel bénéfice, toutefois, n'est obtenu qu'en violant le principe cosmologique du mouvement uniforme¹⁵. L'immense avantage pratique du modèle ptoléméen se paye au détriment de sa portée théorique. Ptolémée savait que sa construction géométrique, même si elle permettait d'utiles prédictions, ne donnait pas à connaître le mouvement réel des planètes¹⁶. Elle ne pouvait rien faire de plus que de « sauver les apparences ».

Ces deux dispositifs disparaissent dans le modèle copernicien. Permuter le Soleil et la Terre déleste l'astronomie des cinq épicycles qui servaient, dans le système ptoléméen, à expliquer les boucles de rétrogradation. La Terre tourne en un an autour du Soleil, Mars en deux ans. Comme la Terre se déplace plus vite que Mars, elle ne manque pas de la doubler sur son orbite : l'observateur terrestre a alors l'impression que Mars s'arrête, rétrograde, pour s'arrêter à nouveau avant de repartir dans le sens initial. Cf. schéma 6. Les boucles de rétrogradation des planètes ne sont plus qu'une simple conséquence du mouvement orbital de la Terre autour du Soleil¹⁷. Le système astronomique s'en trouve considérablement simplifié. Pour sauver les irrégularités de vitesse, Copernic remplace les *équants* par des épicycles mineurs, qui respectent le principe du mouvement uniforme¹⁸.

¹³ *Almageste*, IX, 5.

¹⁴ Dans l'*Almageste*, ce dispositif combinant à la fois le déférent-avec-épicycle, l'excentrique et l'équant, sert à modéliser le mouvement de toutes les planètes, à l'exception de Mercure (où le centre excentrique du déférent se meut lui-même sur un cercle).

¹⁵ A propos de l'*équanti*, Copernic écrit : « le mouvement de l'épicycle, qui apparaît comme uniforme, est, en réalité, non-uniforme », Copernic Nicolas, *Des révolutions des orbés célestes*, IV, chap. 2, Paris, Les Belles Lettres, 2015, vol. II, p. 251. À un observateur qui serait situé au point équant, le mouvement de la planète paraîtrait régulier, alors qu'il est *réellement* irrégulier (car non uniforme par rapport au centre de l'épicycle).

¹⁶ A cause de l'*équanti*, mais également à cause de la théorie de la Lune qui, chez Ptolémée, n'a aucune pertinence physique, bien qu'elle soit parfaitement efficace pour le calcul des positions. D'après cette théorie, en effet, « le diamètre apparent de la Lune au périégée aurait dû être presque le double de son diamètre apparent à l'apogée », Lloyd Geoffrey E.R., *La science grecque après Aristote*, Paris, Éditions la découverte, « Textes à l'appui », 1990, p. 149.

¹⁷ « Tout cela, écrit Copernic, procède de la même cause, qui consiste dans le mouvement de la Terre », *Des révolutions des orbés célestes*, *op. cit.*, vol. II, p. 39.

¹⁸ Copernic est contraint d'introduire ces épicycles d'un nouveau type pour obtenir une capacité prédictive au mieux équivalente à celle de Ptolémée. Ils deviendront inutiles à leur tour lorsque Kepler, au début du XVII^e siècle, établira la trajectoire elliptique des planètes. Cf. schéma 7. Le système copernicien jouit d'une indéniable simplicité qualitative, bien qu'il ne soit pas plus économique que celui de Ptolémée, si l'on tient compte des calculs de position qu'il autorise. « Le nombre de cercles n'a rien à voir dans la complexité du monde, ce sont leurs fonctions qui importent », Verdet Jean-Pierre, *Une histoire de l'astronomie*, Paris, Seuil, « Points Sciences », 1990, p. 96.

Le deuxième apport théorique est une *plus grande cohérence de la cosmologie*. Pour la première fois, un lien est établi entre la distance qui sépare une planète du Soleil et sa période de révolution. Plus une planète est éloignée du Soleil, plus elle met du temps à tourner autour : Saturne met 30 ans, Mercure met 88 jours. La grandeur des orbes peut être calculée à partir du temps de révolution et l'ordre des planètes, qui restait sujet à discussion depuis l'Antiquité chez les astronomes, est maintenant déterminé univoquement de la manière suivante : Mercure, Vénus, Mars, Jupiter, Saturne. Bref, l'héliocentrisme permet de penser le Cosmos comme un tout ordonné, comme un véritable système : le *système solaire*.

Ce point est renforcé par le troisième apport théorique, qui est *l'explication du lien observable entre le Soleil et les planètes*. Dans le système géocentrique de Ptolémée, les planètes sont réparties en deux groupes selon leur position par rapport au Soleil. En-dessous du Soleil, plus proches de la Terre, se trouvent les planètes dites inférieures (Mercure et Vénus). Et au-dessus du Soleil, les planètes dites supérieures (Mars, Jupiter et Saturne). Les premières, comme le Soleil, parcourent l'écliptique en une année et rétrogradent quand elles sont en conjonction (c'est-à-dire quand elles sont le plus près du Soleil). Tandis que les secondes ont des périodes tropiques beaucoup plus longues. Elles rétrogradent quand elles sont en opposition (c'est-à-dire quand elles sont le plus loin possible du Soleil). Tout se passe comme si le Soleil contrôlait la rétrogradation des planètes. Cette connexion entre le mouvement des planètes et le Soleil apparaît comme une étrange coïncidence. L'astronomie ptoléméenne décrit avec précision cette connexion, mais elle est incapable de l'expliquer. Tout change avec Copernic : elle devient une conséquence naturelle du mouvement de la Terre autour du Soleil.

Tout se passe comme si le système de Ptolémée suggérait la position centrale qui devait revenir au Soleil, sans en tirer explicitement les conséquences. L'héliocentrisme, en mettant le Soleil au centre, actualise ce qui reste *impensé* dans l'astronomie de Ptolémée. Cette dernière refuse au Soleil la place qui correspond au statut qu'elle lui reconnaît par ailleurs. En effet, le Soleil y sert de référence privilégiée pour la description de la trajectoire des planètes. Et pourtant, il est traité comme l'une d'entre elles, étant rejeté sur l'une des sphères concentriques disposées autour de la Terre.

Copernic est le premier à comprendre que l'astronomie géocentrique indique le chemin vers une théorie qui la dépasse et qui serait capable d'expliquer les faits qu'elle se contente de décrire. En abandonnant le géocentrisme, Copernic permet à l'astronomie d'être pleinement fidèle au principe du mouvement circulaire et uniforme que Ptolémée invoquait tout en étant contraint de le trahir. Copernic se pense, avec raison, comme l'héritier de toute l'astronomie antique,

qu'il veut porter à sa perfection. L'héliocentrisme nous apparaît à présent comme une réforme qui achève le processus de géométrisation des mouvements planétaires inauguré par l'astronomie géocentrique. Une réforme astronomique, certes géniale, mais qui n'introduit pas de rupture révolutionnaire dans le savoir.

Dans les astronomies de Ptolémée et de Copernic, nous ne voyons donc plus, comme tout à l'heure, deux modèles strictement équivalents. Nous comprenons maintenant en quoi l'une est le perfectionnement de l'autre, qui la contenait virtuellement. Il nous reste encore un pas à accomplir pour comprendre que l'avènement de l'héliocentrisme est une authentique révolution.

Si l'héliocentrisme n'était qu'une simple réforme s'insérant dans un processus de développement continu du savoir, comment comprendre qu'il ait fallu attendre si longtemps avant qu'il advienne ? En effet, quatorze siècles séparent Copernic de Ptolémée. Cela est d'autant plus troublant qu'entre les deux, les musulmans arabo-perses ont eu le temps d'assimiler parfaitement l'astronomie ptoléméenne et de la perfectionner. Quelques-uns d'entre eux, avant Copernic, avaient même trouvé le moyen de se débarrasser de l'équant (Al-Tusi au XIII^e siècle et Ibn al-Shatir de Damas au XIV^e). Mais jamais ils ne remirent en question le géocentrisme. L'héliocentrisme de Copernic a quelque chose de profondément original. Dès le livre I du *De revolutionibus*, Copernic le présente non pas comme une simple hypothèse mathématique, mais comme « le vrai système du monde », pour parler comme son élève Rheticus (*Narratio prima*). Copernic soutient que la Terre est *réellement* en mouvement. Elle tourne. Autour du Soleil en un an, et autour de son axe en une journée. Or une telle affirmation est proprement révolutionnaire. Car elle est *impensable* pour Ptolémée et pas seulement impensée. S'il a fallu attendre quatorze siècles pour exhiber l'*impensé* héliocentrique de l'astronomie ptoléméenne, c'est parce qu'il *fallait penser quelque chose d'impensable*. Copernic est révolutionnaire, parce qu'il crée le possible, il ne se contente pas de l'actualiser. Il rend pensable ce qui ne l'était pas : le mouvement de la Terre.

Copernic ne se contente pas d'affirmer sans raisons que la Terre tourne. Il fournit un effort considérable pour se donner les moyens théoriques de fonder une telle affirmation. *L'argument principal est donné par la portée théorique de la construction elle-même*. Le modèle héliocentrique en effet possède intrinsèquement les critères qui lui donnent une valeur objective. Ces critères, nous les avons vus : la simplicité qualitative du système héliocentrique (les épicycles majeurs ont disparu), son harmonie (les équants, qui trahissaient le principe cosmologique fondamental, ont disparu également), sa cohérence (l'ordre des planètes est calculable), et enfin son pouvoir explicatif plus grand (le rapport du Soleil et des planètes est enfin compris). Ptolémée ne pouvait pas en faire autant, il devait se résigner à ne pas pouvoir faire davantage que de « sauver les apparences ». Son modèle planétaire permettait des prédictions

exactes, mais ne prétendait pas décrire le mouvement réel des planètes. Copernic au contraire affirme non pas seulement sauver mais *expliquer* les phénomènes. *C'est en cela qu'il est révolutionnaire : pour la première fois, une théorie planétaire construite à l'aide des mathématiques prétend à un sens physique absolument vrai.*

Ce geste bien compris nous interdit de concevoir l'héliocentrisme comme une autre manière de sauver les apparences. En réalité, c'est ce qu'il faut entendre par phénomène qui change du tout au tout. Dans le géocentrisme en effet, le phénomène céleste est conçu comme la manifestation à un sujet passif et immobile d'un mouvement réel extérieur à lui. Dans l'héliocentrisme, il en va tout autrement. *Car c'est le mouvement de l'observateur terrestre qui détermine ce qui est observé dans le Ciel.* Le sujet qui observe est impliqué dans la constitution même du phénomène. Mais il ne le sait pas. Tant qu'il l'ignore (et c'est le cas s'il part du principe que la Terre est immobile), il est condamné à chercher en vain derrière le phénomène la loi qui le régit objectivement : le mouvement réel lui reste inaccessible et il doit se contenter de construire un modèle prédictif des trajectoires apparentes. Copernic découvre qu'il faut chercher la loi du phénomène dans le mouvement dont dépend le sujet à qui le phénomène apparaît. Ce geste est celui de toute la philosophie moderne. On le trouve chez Descartes, Kant, Hegel et Marx. Je ne développe pas ce point. Je fais simplement remarquer que Kant est sans doute le premier à prendre une conscience parfaitement claire de la filiation copernicienne de la philosophie moderne. Dans la seconde préface à la *Critique de la raison pure*, il présente le projet transcendantal comme l'équivalent en métaphysique de la révolution accomplie par Copernic en astronomie.

Revenons au problème proprement cosmologique que Copernic essaie de résoudre, pour faire comprendre le caractère révolutionnaire de son geste. On peut le formuler de la manière suivante : comment expliquer que le mouvement de la Terre soit comme nul, puisqu'il n'est ni perçu en lui-même, ni manifesté par la chute des corps ? Cette question, Copernic est le premier à la poser. Pour Ptolémée, la Terre est immobile, et il ne peut pas en aller autrement. Le mouvement de la Terre est impossible. La cosmologie d'Aristote lui permet, dans le livre I de *L'Almageste*, de rappeler les raisons pour laquelle la Terre est immobile. Raisons qui expliquent en même temps pourquoi la Terre est ronde et au centre du monde. Les corps terrestres sont composés d'une matière dont l'élément principal (la terre) a pour lieu naturel le centre du Cosmos. Ils s'y agglomèrent en vertu d'une tendance spontanée qui dépend de leur constitution intrinsèque. Si par impossible, on parvenait à déplacer la Terre, elle retournerait immédiatement se loger au centre, à sa place. Copernic, lui, pose un problème radicalement nouveau : non plus pourquoi la Terre est immobile, mais pourquoi elle semble immobile alors qu'elle tourne. *Ce qui, pour la première fois, est*

constitué en phénomène à expliquer, c'est l'apparence de l'immobilité de la Terre. Copernic a parfaitement conscience que pour répondre à cette question, il faut changer de cosmologie. Il s'y essaie héroïquement dans le premier livre du *De revolutionibus*, en s'efforçant de penser autrement qu'Aristote, tout en utilisant son langage¹⁹. *Il échoue cependant. Il constitue le problème qui rend pensable le mouvement de la Terre, sans parvenir à penser effectivement ce mouvement.* Là est sa grandeur. Ce sont ses successeurs géniaux, Kepler, Galilée, Descartes et Newton, qui parviendront à penser le mouvement de la Terre et à fonder physiquement l'héliocentrisme. Pour ce faire, ils devront détruire le Cosmos fini antique et médiéval, pour lui substituer un Univers illimité, homogène et isotrope. Je me contenterai de donner quelques indications sur ce point.

La principale objection contre la rotation de la Terre s'appuyait sur l'observation de la chute des graves (les corps lourds). Si la Terre tournait, avançait-on, les corps devraient tomber sur le sol en un autre lieu que celui où ils tombent effectivement (c'est-à-dire à la verticale du point d'où, quelle que soit sa hauteur, on les lâche)²⁰. Galilée détruit définitivement l'objection. Le mouvement local doit être conçu comme un état indifférent au mobile. Il n'est que « le déplacement d'une chose par rapport à une autre²¹ » : un « changement de relation dans l'espace²² ». Dans ces conditions, un corps peut, sans aucune contradiction logique, être considéré à la fois comme immobile et en mouvement, par rapport à deux corps de référence distincts. Le repos devient un mouvement partagé. Dès lors, il est possible de concevoir un mouvement identique au repos, sans cause et qui perdure de lui-même : le *mouvement inertiel*. En identifiant la rotation uniforme à un tel mouvement, Galilée explique, contre les objections traditionnelles, comment la Terre peut se mouvoir sans qu'on s'en aperçoive²³.

Bref, c'est parce que Copernic ne disposait pas du *principe d'inertie* qu'il ne parvenait pas à penser le mouvement de la Terre. Or ce principe réduit l'être du mouvement à une pure relation géométrique. C'est seulement dans un espace homogène où tous les lieux sont absolument identiques que le mouvement de la Terre devient pleinement intelligible. Pour penser un tel espace, les successeurs de Copernic devront abandonner les principes cosmologiques auxquels il tenait encore : la perfection du mouvement circulaire, la forme sphérique du monde, la

¹⁹ Par exemple, il présente la gravité comme une attirance entre des corps de même nature.

²⁰ La circonférence terrestre étant connue depuis Ératosthène, on savait qu'une hauteur assez grande aurait dû suffire à mettre en évidence la rotation de la Terre.

²¹ Galilée, *Lettre au Père Castelli*, 1^{er} avril 1607.

²² Kant Emmanuel, *Premiers principes métaphysiques d'une science de la nature*, chap. IV, Définition, Remarque, *Œuvres philosophiques*, Gallimard, Bibliothèque de la Pléiade, t. II, p. 478.

²³ C'est Descartes qui, le premier, identifie le mouvement inertiel à un mouvement rectiligne à vitesse constante. Galilée le conçoit encore comme un mouvement circulaire. Il reste grec sur ce point. Mais cela ne change rien au principe de sa démonstration. Car le mouvement de rotation uniforme de la Terre est localement équivalent à un mouvement rectiligne. Cf. Koyré Alexandre, *Études galiléennes*, Paris, Hermann, 1986.

gravité conçue comme une condition du mouvement, etc. Pour faire tourner la Terre, ils détruiront le Cosmos fini, antique et médiéval, pour lui substituer l'Univers illimité et isotrope de la science moderne, où tous les phénomènes deviennent en droit mathématisables. L'astronomie ptoléméenne était fondée sur une cosmologie sphérique, où la Terre s'opposait au Ciel. En projetant la Terre dans le Ciel, Copernic a préparé la destruction du Cosmos. Il croyait changer de centre, mais il a provoqué sans le vouloir la suppression de tout centre. Dans l'Univers moderne, né du geste copernicien, il n'y a plus de monde terrestre opposable au monde céleste. Newton démontre qu'une même loi, dite pour cette raison universelle (la loi de gravitation), explique à la fois le mouvement des corps terrestres en chute libre et le mouvement orbital elliptique des planètes autour du Soleil. La physique terrestre et la physique céleste ne sont plus qu'une seule et même physique. Le peintre Matta a dit cette phrase très juste : « la révolution, c'est changer de ciel ». Copernic nous a obligé à changer de ciel. *La révolution copernicienne a bien eu lieu*. Mais elle ne s'est pas faite en un jour. La révolution que Copernic inaugure sans le savoir se déploie sur plus d'un siècle, jusqu'à Newton. La « révolution copernicienne » ne se réduit pas à la réforme astronomique dont Copernic est l'auteur. Elle désigne l'ensemble de la séquence historique qui permet à l'héliocentrisme de conquérir un fondement objectif dans et par la constitution d'une physique mathématique qui est encore la nôtre.

Au tout début de notre enquête, nous pensions que les points de vue géocentrique et héliocentrique étaient équivalents. Ils le sont, c'est vrai, au moins *géométriquement*. Mais *physiquement*, ils ne sont équivalents que *dans le cadre d'une physique mathématique* qui n'existait pas encore quand Copernic a construit son système, et pour cause, puisque qu'elle a été suscitée, sans qu'il le sache, par son geste révolutionnaire. *Autrement dit, c'est précisément parce que la révolution copernicienne a eu lieu que nous la méconnaissions, parce qu'elle s'oublie dans son résultat*²⁴. La révolution copernicienne a pour effet, parce qu'elle a réussi, d'effacer la faille irréductible qui sépare Copernic de Ptolémée. Notre enquête, en restaurant le tranchant oublié de la révolution dont procède la science moderne, nous a permis de comprendre notre erreur initiale et sa cause.

Il est toujours d'un grand intérêt philosophique d'étudier les textes originaux avec le souci de la précision historique. Nous avons pu retrouver le sens authentique d'une expression (« révolution copernicienne ») devenue tellement familière qu'elle avait fini par être vidée de sa substance. A cette occasion, nous avons découvert qu'il est possible de comprendre le passé mieux qu'il ne s'est

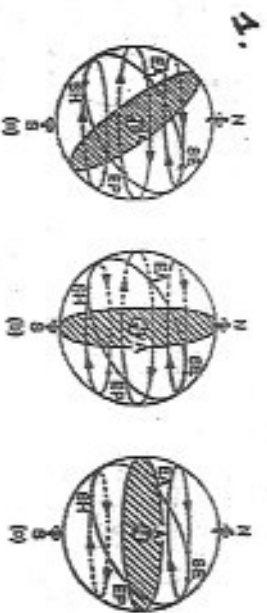
²⁴ Un exemple d'illusion rétrospective : traduire le titre du *De revolutionibus*, comme les premiers traducteurs l'ont fait, par « Des mouvements circulaires des corps célestes » au lieu de : « Des révolutions des orbes célestes », c'est lire Copernic comme s'il était déjà newtonien. Cf. Koyré Alexandre, « "Traduttore-Traditore". À propos de Copernic et de Galilée », in *Études d'histoire de la pensée scientifique*, Gallimard, « Tel », p. 272-274.

compris lui-même. Copernic ne savait pas aussi bien que nous à quel point il était révolutionnaire. Cela nous conduit à formuler un problème philosophique qui, autrement, resterait inaperçu. Car une fois restituée la coupure entre Ptolémée et Copernic, l'avènement de la science moderne devient éminemment problématique et mystérieux. *Quelle est donc l'origine de la révolution copernicienne ?* Pourquoi personne avant Copernic n'a su faire ce qu'il a fait ? Invoquer le génie indéniable de Copernic ne suffit pas, car il doit lui-même être expliqué. Il faudrait pour cela dégager les conditions qui rendent possible l'héliocentrisme. Nous ne le ferons pas ici.

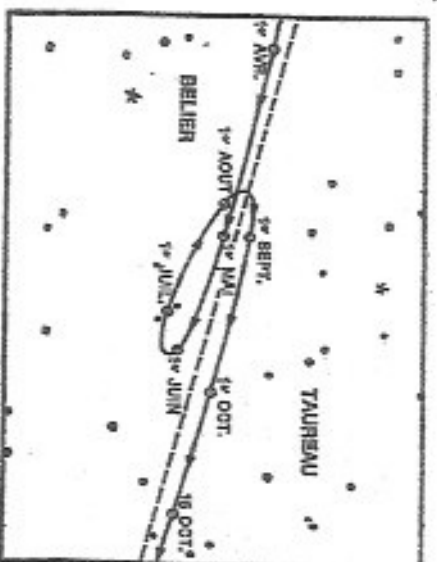
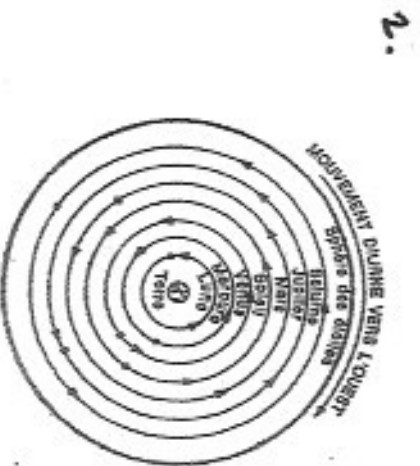
Disons donc pour conclure, que la philosophie est nécessaire si l'on souhaite comprendre la constitution de la science et en dégager la signification. Car la science n'a pas de mémoire. Elle oublie les péripéties dont elle est née. Et de toute façon, elle ne peut pas se prendre elle-même pour objet : il n'y a pas de science de la science. L'avènement de la science moderne ne rend pas du tout inutile la philosophie. Bien au contraire, il la rend absolument nécessaire, précisément parce qu'il est un événement révolutionnaire.

Avril 2020

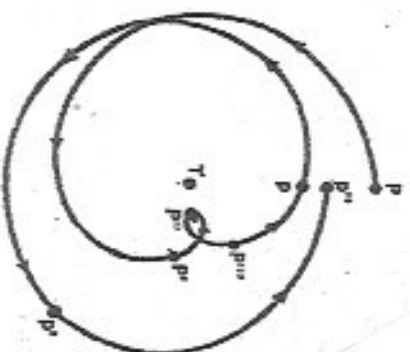
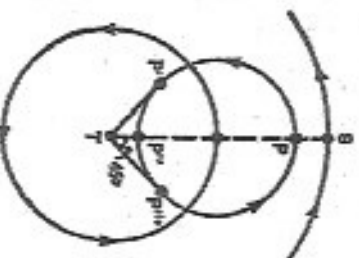
Julien COPIN
Lycée de Bellevue, Fort-de-France



Le mouvement du Soleil, observé de différents lieux sur la Terre, (a) Observateur se trouvant sous une latitudes boréales moyennes. Au solstice d'été, le Soleil s'élève selon une oblique, très au nord du point cardinal est; plus de la moitié de son cercle diurne est situé au-dessus de l'horizon, si bien que les jours sont plus longs que les nuits. Aux équinoxes, le Soleil se lève au point cardinal est, et la moitié seulement de son cercle diurne est visible. Au solstice d'hiver, le Soleil se lève loin au sud, et les jours sont plus courts que les nuits. L'élévation quotidienne maximale du Soleil au-dessus de l'horizon est plus grande en été, mais, quelle que soit la saison, les ombres, à midi, pointent vers le nord vrai. (b) Observateur se trouvant à l'équateur: quelle que soit la position du Soleil sur l'éclyptique, le plan de l'horizon divise le cercle diurne du Soleil en deux parties égales. Les jours et les nuits sont toujours d'égale durée, et il y a peu de variations saisonnières du climat. Pendant une moitié de l'année (de l'équinoxe de printemps à l'équinoxe d'automne), le Soleil se lève au nord du point cardinal est, et les ombres, à midi, pointent vers le sud. Pendant l'autre moitié de l'année, il se lève au sud du point cardinal est, et les ombres à midi pointent vers le nord. (c) Observateur se trouvant au pôle Nord terrestre: la moitié de l'éclyptique est toujours sous l'horizon, si bien que pendant la moitié de l'année (de l'équinoxe d'automne à l'équinoxe de printemps) le Soleil est complètement invisible. A l'équinoxe de printemps, le Soleil commence à monter sur l'horizon, autour duquel il a un mouvement journalier, qui le fait s'élever progressivement selon une spirale jusqu'au solstice d'été. Puis le Soleil redescend progressivement en spirale vers l'horizon, sous lequel il disparaît lentement à l'équinoxe d'automne. Entre l'équinoxe de printemps et l'équinoxe d'automne, le Soleil ne se couche pas.



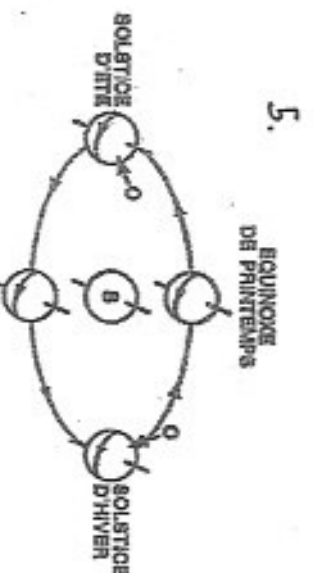
Mars, dans son mouvement rétrograde dans les constellations du Bélier et du Taureau. On voit sur cette figure la même partie du ciel que sur la figure 9 et que dans la fenêtre de la carte de la figure 8. La ligne en trait discontinu est l'éclyptique, et la ligne en trait plein représente bien que son mouvement général permit les diodes se fasse vers l'est. Il y a une période, de la mi-juin au début d'août, pendant laquelle ce mouvement se fait vers l'ouest. Les mouvements rétrogrades de Mars ont à peu près toujours la même forme et la même durée, mais ils ne se produisent pas toujours à la même date ni dans la même région du ciel.



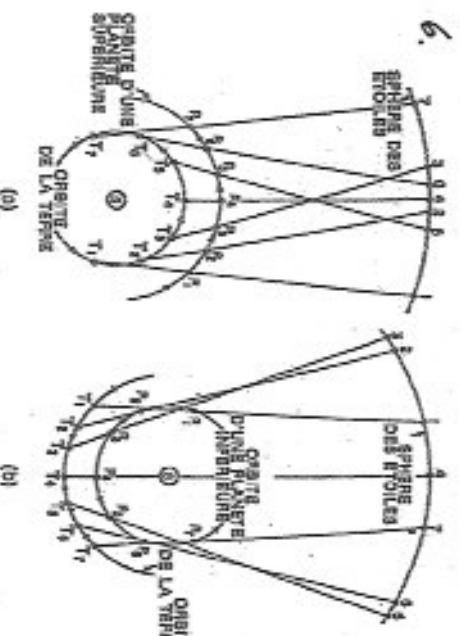
(a)

(b)

le mouvement qu'il engendre dans le plan de l'éclyptique.



Mouvement annuel de la Terre sur son orbite copernicienne. L'axe de la Terre demeure tout le temps parallèle à lui-même ou à la droite fixe qui traverse le Soleil. Il s'ensuit qu'un observateur O, si l'on trouve à midi sous des latitudes boréales moyennes, voit le Soleil beaucoup plus haut au solstice d'été qu'au solstice d'hiver.



L'explication copernicienne du mouvement rétrograde de planètes supérieures (a) et des planètes inférieures (b). Dans chacun de schémas, la Terre a, de T, à T', un mouvement uniforme sur son orbite; la planète se déplace vers l'est de P, à P'. Dans le même temps, la position apparente de la planète centre la sphère des étoiles passe de 1 à 7; mais quand la planète dépasse la Terre ou est dépassée par elle, il y a un bri mouvement rétrograde de 3 à 5.



Première loi de Kepler

Deuxième loi de Kepler