

Johannes KEPLER 1571-1630 *

K. MIZAR,

13, rue du Jura - 75013 Paris.

« La lecture des grands auteurs n'est pas toujours facile. Celle des œuvres de KEPLER présente des difficultés particulières : absence de bonnes traductions françaises, texte souvent confus où se mêlent les grandes idées du savant et ce que A. KOESTLER appelle ses « chimères ». Le recours aux analyses de lecteurs attentifs et compétents est donc indispensable pour les non spécialistes que sont beaucoup d'enseignants et l'auteur de cet article en particulier.

L'idée de l'article est venue d'une question posée par un animateur de club astronomique, en écho d'une question d'un membre du club. La rédaction des *Cahiers Clairaut* s'est efforcée d'y répondre compte tenu du volume réduit de cette publication trimestrielle et de la nécessité d'équilibrer les sommaires. Ce qui a conduit à découper l'étude en trois feuillets qui correspondent assez bien aux grandes étapes de la pensée de KEPLER. Cependant, l'étude étant centrée sur la découverte des trois lois, l'œuvre de KEPLER en optique est citée trop rapidement.

Il s'agit donc d'un article de vulgarisation. Rien n'est tant souhaité par l'auteur qu'inciter ses collègues à s'intéresser autant à la genèse des découvertes qu'à ces découvertes elles-mêmes. Apprendre ainsi comment la recherche passe par des phases diverses, comment il faut tirer parti des idées fausses puisque celles-ci ont la malicieuse habileté de se faire passer pour vraies... »

1. LE « MYSTERE COSMOGRAPHIQUE ».

Nicolas DUPONT, animateur du cercle Orion (à Laxou) de la Société Lorraine d'Astronomie, nous transmet une question « peut-être naïve posée par un jeune membre du cercle : *comment KEPLER a-t-il découvert et démontré sa première loi ?* »

Cette question n'est pas naïve du tout. Surtout pour nous, enseignants. Connaître, faire connaître les lois physiques et leurs applications, c'est important. Mais faire comprendre comment on a pu les découvrir, ne l'est-ce pas autant ? Vieux débat : enseigner

(*) Cet article est paru dans les Cahiers CLAIRAUT nos 10, 11 et 12.

de bonnes recettes avec la meilleure manière de s'en servir ou (pas forcément exclusif) apprendre à réfléchir en essayant de comprendre comment d'autres ont cherché, échoué souvent, réussi parfois... En tout cas, s'il est un sujet vraiment indiqué pour fertiliser l'enseignement par l'histoire des sciences, c'est bien celui de KEPLER. Essayons donc de le présenter dans cette perspective.

Comme le dit fort justement Pierre COSTABEL dans son excellente notice de l'*Encyclopaedia Universalis* (tome 9, p. 647), KEPLER « confia au livre imprimé les méandres de ses démarches. Il fut, et il est, presque illisible. » Ayons donc recours, pour le connaître et le comprendre, à des médiateurs en qui nous puissions avoir confiance. Par exemple, cette courte notice de COSTABEL qui, en deux pages situe l'homme et son œuvre. Le livre classique d'Alexandre KOYRÉ, « La Révolution astronomique. COPERNIC, KEPLER, BORELLI » (éd. Hermann, 1961) consacre 360 pages sur les 524 du livre à KEPLER, analysant ses démarches successives en détail ; pour moi, c'est l'ouvrage de référence. Mais je joins, pour mieux saisir certains aspects étranges de la pensée de KEPLER, le livre de Gérard SIMON, « KEPLER, astronome astrologue » (éd. Galilimard, 1979, 488 p) dont l'intérêt a déjà été signalé ici (cf. C.C. n° 4).

La Société Astronomique de France a édité, pour le quatrième centenaire de KEPLER une brochure de 132 pages contenant, entre autres, des articles de P. COSTABEL et de Gérard SIMON ainsi que « La genèse des lois de KEPLER » par P. RUSSO et « La méthode de KEPLER est-elle une non-méthode ? » par J.-C. PECKER. Il faut aussi citer les histoires de l'astronomie, celle de PANNEKOEK en particulier ainsi que l'*Histoire Générale des Sciences* (tome 2).

Enfin, le livre de Arthur KOESTLER, « Les Somnambules » (éd. Calmann-Lévy, 1960, 582 p) est à lire, même s'il faut faire des réserves sur certains excès du style baroque de l'auteur. Mais la lecture est facile et spécialement sur KEPLER assez passionnante.

Encore n'ai-je rien dit d'une foule d'ouvrages en anglais ou en allemand sur un sujet qui a intéressé astronomes, historiens et philosophes de tous les pays. Essayons pourtant de ne pas crouler sous la documentation pour dégager l'essentiel d'une œuvre qui marque la naissance de l'astronomie moderne.

Avant Kepler.

KEPLER est né en 1571 à Weil, dans le Wurtemberg. Se destinant au pastorat, il vient étudier la théologie à l'université de Tübingen. Il y suit l'enseignement de Michael MASTLIN qui l'initie aux conceptions de COPERNIC. KEPLER les compare à celles de

PTOLÉMÉE et il est aussitôt acquis à l'héliocentrisme. On peut même dire : « KEPLER est le premier grand esprit pour qui l'héliocentrisme est une affaire réglée. De terme de la recherche comme il l'était pour COPERNIC, il est devenu point de départ ; et de ce fait, des questions jusqu'alors à peine évoquées, se trouvent posées en toute clarté. » (G. SIMON, op. cité p. 238).

Reportons-nous donc un moment, pour mieux apprécier l'originalité de la pensée de KEPLER, sur les idées de ses prédécesseurs. Chez tous, il y a le respect d'un *a priori* qui leur paraît nécessaire : les mouvements célestes sont circulaires et uniformes. Chez PTOLÉMÉE, aussi bien que chez HIPPARQUE avant lui, ces mouvements ont lieu autour de la Terre. Chez COPERNIC, autour du Soleil. Faisons-nous à cette idée que la façon d'argumenter en 1543 n'est pas la nôtre : « Tout d'abord il nous faut remarquer que le monde est sphérique, soit parce que cette forme est la plus parfaite de toutes, totalité n'ayant besoin d'aucune jointure ; soit parce qu'elle est la forme ayant la capacité la plus grande, qui convient le mieux à tout contenir et tout embrasser ; soit aussi parce que toutes les parties séparées du monde, je veux dire le soleil, la lune et les étoiles, sont vues sous cette forme ; soit parce que toutes choses tendent à se limiter ainsi comme il apparaît dans les gouttes d'eau et d'autres corps liquides, lorsqu'ils tendent à se limiter par eux-mêmes. C'est pourquoi personne ne mettra en doute que cette forme n'appartienne aux corps divins. » (COPERNIC, « Des révolutions des orbes célestes », chapitre 1). Et plus loin : « Nous allons rappeler maintenant que le mouvement des corps célestes est circulaire. En effet, la mobilité de la sphère est de tourner en rond ; par cet acte même, tandis qu'elle se meut uniformément en elle-même, elle exprime sa forme, celle du corps le plus simple où l'on ne peut trouver ni commencement ni fin, ni distinguer l'un de l'autre. » (COPERNIC, chapitre 4).

Ce beau principe du mouvement circulaire et uniforme posé, il faut dépenser des trésors d'imagination pour rendre compte des phénomènes qui ont l'audace de ne pas obéir aux contraintes qu'on leur impose. La circularité n'est pas mise en doute, l'observation n'en fournit pas les moyens. Mais la non uniformité des mouvements est constatée. Alors, HIPPARQUE a imaginé d'excentrer les orbites : le Soleil décrit un cercle autour de la Terre qui n'en occupe pas le centre ; l'excentricité est le rapport des distances au centre de la Terre et du Soleil. PTOLÉMÉE perfectionne : le rayon qui tourne uniformément joint le Soleil au *point équant*, symétrique de la Terre par rapport au centre du cercle orbite.

Si COPERNIC inverse les rôles en faisant décrire les orbites des planètes autour du Soleil, en plaçant donc la Terre à sa modeste place de troisième planète du Système, il respecte toujours le principe des orbites circulaires décrites uniformément, ce

qui l'amène à reprendre à PTOLÉMÉE, avec l'excentricité, l'idée des épicycles. Tel est le système du monde encore bien compliqué que KEPLER apprend de MASTLIN à Tübingen et dont il comprendra bien les avantages comme nous le verrons plus loin.

Pour compléter ce rapide tableau de l'astronomie avant KEPLER, il faut encore citer, en contraste, les noms de RHETICUS et de Tycho BRAHÉ. Georg Joachim von LAUCHEN (1514-1576), le jeune mathématicien de Wittenberg surnommé RHETICUS, est célèbre pour avoir publié « Narratio prima » peu après sa rencontre avec COPERNIC dont les idées l'avaient enthousiasmé ; ce qui décida enfin COPERNIC à rendre publiques ses conceptions et son grand ouvrage cité précédemment. Ajoutons à la gloire de RHETICUS cette idée qui devait plaire à KEPLER : il y a six planètes et six est le premier entier *parfait* (égal à la somme de ses diviseurs propres $6 = 1 + 2 + 3$). On doit aussi à RHETICUS une table des sinus de $10''$ en $10''$ à quinze décimales et la notion de cosinus (1551). Bref, RHETICUS est un théoricien.

Tycho BRAHÉ (1546-1601) se méfie au contraire de toute théorie. Mais c'est un observateur hors pair dont la rencontre avec KEPLER fut providentielle. Tycho bénéficia longtemps de la protection très effective et de l'aide matérielle du roi FRÉDÉRIC de Danemark. Grâce à quoi il put construire un grand observatoire, Uraniborg, et accumuler pendant plus de vingt-cinq ans des données précieuses sur les mouvements des planètes. Il repéra en particulier dix oppositions de Mars qui furent plus tard fort utiles à KEPLER. Tycho inventa de multiples appareils de mesure, tous, évidemment, à alidades, ce qui ne l'empêche pas d'atteindre la précision de la minute d'angle. Le 11 novembre 1572, il observe une « étoile nouvelle », une nova, dans Cassiopée, qu'il note plus brillante que Vénus. Le roi FRÉDÉRIC étant mort, ses héritiers coupent les vivres à Tycho qui se réfugie auprès de l'Empereur RODOLPHE à Prague où il rencontrera KEPLER.

Le mystère cosmographique.

Revenons à KEPLER lui-même, un peu en arrière dans le temps. En 1594, KEPLER est nommé mathématicien des Etats de Styrie et professeur à l'école protestante de Graz. Charges qui, heureusement pour nous, lui laissent beaucoup de temps libre pour méditer sur la structure du monde. Il écrit alors le *Mysterium Cosmographicum* (MC) qui paraît en 1596 grâce à MASTLIN.

L'ouvrage débute par un exposé des mérites du système de COPERNIC. 1° Il explique simplement les particularités des mouvements planétaires, — stations, rétrogradations —, par un facteur unique, le mouvement de la Terre et les positions de celle-ci par rapport aux autres planètes ; 2° pourquoi les planètes inférieures,

Mercure et Vénus, accompagnent toujours le Soleil et ne sont jamais en opposition ; 3° pourquoi, pour les planètes supérieures, il y a coïncidence entre apogée et conjonction, périégée et opposition ; 4° pourquoi enfin et surtout, le Soleil joue un si grand rôle dans le système (chez PTOLÉMÉE, ce rôle n'est fondé sur rien alors que chez COPERNIC il l'est dans la structure même du système).

KEPLER examine longuement ces avantages en soulignant les imperfections du système de PTOLÉMÉE. En passant, tout pythagoricien qu'il soit, il réfute l'idée de RHETICUS : « Qu'il n'y a pas de nombre d'une perfection telle que l'on puisse en déduire que le nombre des planètes soit justement tel ou non un autre, ou qu'elles ne soient pas infiniment nombreuses. Car si RHETICUS, dans sa Narratio, déduit le nombre des orbes du caractère sacré du nombre six, cette conclusion me paraît peu probable. En effet, lorsqu'on parle de la structure de l'Univers, on ne doit pas appuyer sa démonstration sur des nombres qui n'ont reçu une valeur particulière que de choses engendrées après la création du monde. » (cité par KOYRÉ, op. cité p. 139).

Pour expliquer les mouvements, KEPLER cherche une relation entre distances au Soleil et forces motrices. Mais il ne connaît (et encore approximativement) que les distances relatives et, sur les forces, il n'a que des idées *a priori*. KEPLER se lance avec hardiesse dans des recherches infructueuses mais il ne s'en lasse pas. Simplement, il écrit : « Je n'en finirais pas si je voulais tout raconter en détail. » Ne nous attardons donc pas sur ce sujet pour l'instant, il faudra y revenir quand nous parlerons précisément de la genèse de la deuxième loi.

Par contre, dans le MC, il faut s'attarder sur l'idée géniale qui consiste à faire intervenir les cinq polyèdres réguliers, encore dits platoniciens, dans l'architecture du système du monde. Pour KEPLER, Dieu a voulu créer le monde le plus beau. L'atteste la « perfection » de la sphère et de la ligne droite (et du plan). Or, ces êtres géométriques se trouvent heureusement combinés dans les polyèdres réguliers inscriptibles dans la sphère et circonscriptibles à elle. De plus leur nombre, cinq, ce qui a été démontré par EUCLIDE, convient d'après KEPLER à l'arrangement des six sphères ou orbes portant les orbites des planètes. Relisons plutôt ce que KEPLER recommande à son lecteur :

« L'orbe de la Terre est la mesure des autres orbes. Circonscrib-lui un Dodécaèdre : la sphère qui l'entoure est celle de Mars ; circonscris à l'orbe de Mars un Tétraèdre : la sphère qui l'entoure est celle de Jupiter. A l'orbe de Jupiter circonscris un cube : la sphère qui l'entoure est Saturne. Place maintenant dans l'orbe de la Terre un Icosaèdre : la sphère qui lui est inscrite est Vénus. Place dans l'orbe de Vénus un Octaèdre : la sphère qui lui est inscrite est Mercure.

Tu as là la raison du nombre des planètes. » (cité par KOYRÉ, op. cité p. 146).

KEPLER reconnaît que la correspondance entre sa construction et les données de l'observation n'est pas parfaite, même si chaque orbe est d'une certaine épaisseur, celle-ci devant être suffisante pour tenir compte des excentricités (l'orbite excentrique reste à l'intérieur de l'orbe). Mais la correspondance paraît à KEPLER trop significative pour être accidentelle. Remarquons aussi que, pour KEPLER, cette construction des polyèdres ne contredit pas l'objection qu'il adressait à RHETICUS sur le nombre six, car ici il s'agit d'une description de ce monde créé parfait par Dieu en utilisant des objets également créés par le même. Il semble que dans la circonstance, KEPLER ait été plus platonicien que pythagoricien. Admirons, en tout cas l'ingéniosité de KEPLER et retenons l'importance qu'il accorde dès 1596 au calcul des distances des planètes au Soleil, ce qui sera l'essentiel de sa troisième loi, trouvée plus de vingt ans plus tard.

Dans le MC, KEPLER s'intéresse aussi à l'action animatrice du Soleil. Alors que COPERNIC se contentait de *constater*, le Soleil est au centre du monde, KEPLER veut trouver une explication, une loi qui rende compte du fait d'observation, cette ronde des planètes autour du Soleil. Il doit y avoir une raison si les planètes vont d'autant moins vite qu'elles sont plus éloignées du Soleil. Il pense par analogie à l'action de la lumière qui s'atténue proportionnellement au carré de la distance. Mais, sans doute parce que toutes les planètes se meuvent sensiblement dans le plan de l'écliptique, au lieu de penser à une telle propagation de l'action animatrice du Soleil dans l'espace, il l'imagine dans un plan et en déduit que son atténuation est proportionnelle à la distance. Nous verrons que c'est en partie grâce à cette affirmation erronée qu'il découvrira la deuxième loi.

Vers les lois.

Ces longs préliminaires devraient donc nous aider à comprendre les démarches qui vont conduire KEPLER à ses grandes découvertes. Ils ont aussi l'avantage de nous faire connaître tout de suite les traits qui sont propres à son génie. Peu d'hommes ont été comme lui imprégnés de tradition, nourris de culture classique et sans doute y a-t-il encore moins de savants qui ont su comme lui bousculer les idées reçues. Esprit à contrastes : sa volonté, par exemple, d'épurer l'astrologie de ce que la tradition y avait accumulé de sornettes (cf. le livre de G. SIMON) ; et, en même temps, son goût pour la grande synthèse scientifique. KEPLER a vingt-cinq ans quand il publie MC, quelle maîtrise, quelle audace et, à bien des égards, quelle intuition

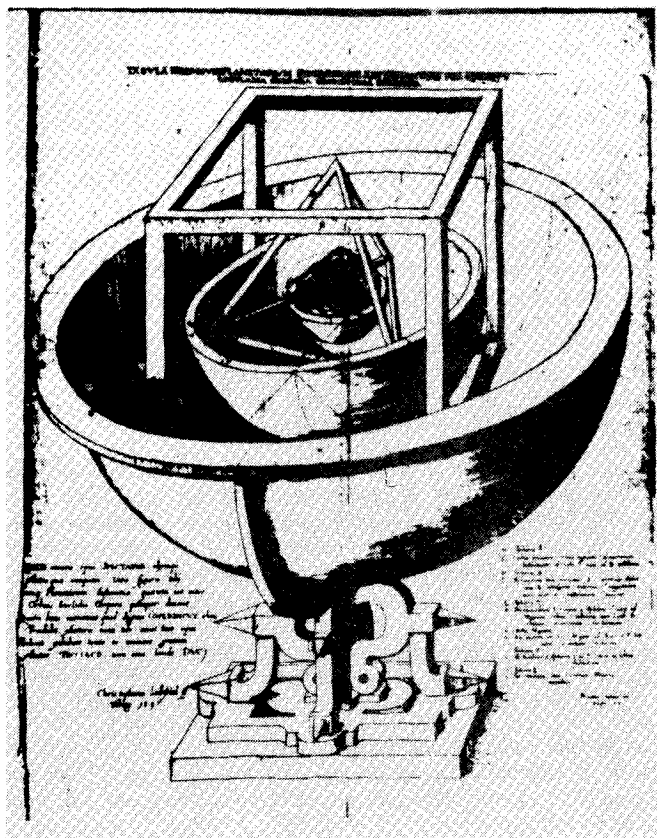


Figure extraite du MC.

Rien de tout cela ne lui aurait été possible sans deux richesses qui manquèrent à Tycho : une forte culture mathématique, une imagination fertile mais toujours dominée par le souci de tenir compte des faits d'observation. Faut-il alors en conclure déjà que KEPLER est un représentant typique de l'esprit scientifique moderne ?

2. L' « ASTRONOMIE NOUVELLE ».

L'année 1600 représente une coupure dans la vie et dans l'œuvre de KEPLER. Avant 1600, années de formation déjà pro-

metteuses ; après 1600, la maturité et les grandes découvertes. En 1600, des circonstances humainement malheureuses qui seront scientifiquement favorables.

Persécutions.

Le 17 février 1600, Giordano BRUNO est excommunié et brûlé vif à Rome, après 16 années de captivité pour avoir proclamé que l'Univers est infini et que les orbites des planètes sont centrées sur le Soleil.

Jusqu'en 1596, Tycho BRAHÉ a bénéficié de la protection et des subsides du roi FRÉDÉRIC de Danemark. Le successeur de ce dernier, CHRISTIAN IV, est moins tolérant et moins généreux. Tycho doit quitter Uraniborg en 1597 et en juin 1599, il se réfugie à Prague où l'Empereur RODOLPHE II le nomme mathématicien impérial aux appointements fabuleux de 3 000 florins (KEPLER en gagnait 200 à Grez) et lui prête le château de Benatek, à 35 km de Prague pour poursuivre ses observations.

En 1598, KEPLER qui a déjà échangé une correspondance avec Tycho, doit quitter Graz où les Protestants ne sont plus tolérés. Le 4 février 1600, invité par Tycho, il arrive à Benatek. Voir le récit de son séjour et des relations difficiles entre KEPLER et Tycho dans « Les Somnambules » par A. KOESTLER. Le conflit entre les deux hommes était inévitable, deux tempéraments différents, l'un de théoricien, l'autre d'observateur et des conceptions opposées : KEPLER, copernicien convaincu, ne pouvait accepter la solution adoptée par Tycho (orbites de la Lune et du Soleil centrées sur la Terre, orbites des planètes centrées sur le Soleil).

Mais Tycho meurt d'une indigestion le 13 octobre 1601. KEPLER est nommé mathématicien impérial. Surtout, il dispose des observations recueillies par Tycho pendant toute sa vie. La grande recherche va commencer .

[Si nous avons insisté sur ces circonstances extérieures à la science, ce n'est pas pour justifier *a posteriori* les persécutions religieuses ou les restrictions de crédit pour la recherche. Mais pour souligner que la grande « révolution astronomique » s'est produite dans un climat social et politique de crise et que le rapprochement avec Relativité et Quanta dans la période des deux guerres mondiales nous paraît s'imposer.]

Le plan de l'orbite de Mars.

Le problème qui intéresse KEPLER est celui de l'orbite de Mars. La théorie élaborée par Tycho BRAHÉ et LONGOMONTANUS, basée sur les mesures effectuées lors de dix oppositions de la planète fournissait la longitude de Mars à 2' près mais échouait pour les latitudes. KEPLER reprend cette théorie et montre qu'en

rapportant les mesures au Soleil vrai (et non au centre de l'orbite terrestre comme le faisait COPERNIC) :

- 1) le plan de l'orbite de Mars est incliné de $1^{\circ}50'$ sur le plan de l'écliptique ;
- 2) ce plan passe par le Soleil vrai ;
- 3) cette inclinaison est constante.

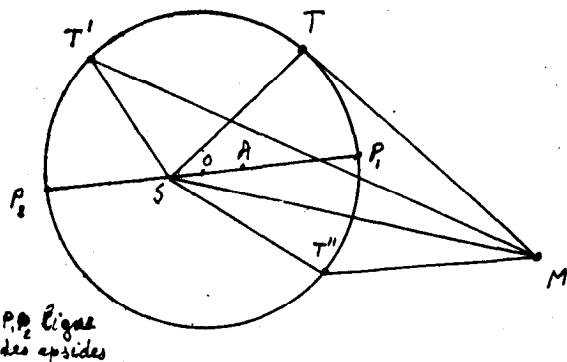
Si cette inclinaison avait paru variable à Tycho c'est que le plan était supposé passer par le centre de l'orbite terrestre. KEPLER met donc en évidence un des avantages de l'héliocentrisme.

Dans le même travail, toujours préoccupé par le mouvement de la planète, KEPLER reprend, sous le nom d'*hypothèse suppléante*, l'idée du *point équant* inventée par PTOLÉMÉE. En plaçant ce point équant A symétrique du Soleil par rapport au centre de l'orbite, le rayon vecteur AM du point équant à la planète tourne presque uniformément. Calculs longs et pénibles (15 pages in-folio), mais que le lecteur ne se plaigne pas si cela lui paraît fastidieux ; lui, KEPLER, a dû refaire soixante-dix fois le même travail avant de parvenir à un résultat presque satisfaisant.

L'orbite de la Terre.

L'hypothèse suppléante fournit à KEPLER un instrument de travail pour reprendre à la base la théorie de Mars. Ce qui devait commencer par la révision de l'orbite de la Terre.

Pour cela, KEPLER range les observations de Mars effectuées par Tycho en classes : dans une même classe, les mesures faites à 687 jours d'intervalle (la période de Mars autour du Soleil). Ces mesures correspondent donc à une même position de Mars. Autrement dit, pour ces observations, le segment Soleil-Mars peut y être considéré comme une base fixe. KEPLER connaît le rapport ST/SM des distances au Soleil de la Terre et de Mars. Les mesures de Tycho lui fournissent les angles STM (différence des longitudes du Soleil et de Mars). Il peut, à partir de cette base SM construire par points l'orbite circulaire de la Terre (fig. 1).



« Je vais chercher dans les journaux d'observation de Tycho BRAHÉ trois ou n'importe quel nombre d'observations pour lesquelles la planète se trouvait au même endroit de son excentrique, et à partir de là, au moyen de la loi des triangles (la trigonométrie), déterminer les distances au point équant d'un nombre égal de points de l'épicycle ou de l'orbe de la Terre. Et comme le cercle se détermine par trois points, je vais déterminer à partir de chaque classe trois de ces observations la position du cercle et de ses apsides que j'ai provisoirement admis comme connus, ainsi que l'excentricité par rapport au point équant. S'il y avait encore une quatrième observation, elle pourrait servir de moyen de contrôle. » (*Astronomia Nova*, chap. XXIV ; cité par KOYRÉ p. 182 qui ajoute : les observations choisies par KEPLER sont celles du 1590 03 05, 1592 01 21, 1593 12 08, 1595 10 15).

Résultat important pour KEPLER : l'hypothèse suppléante se trouve vérifiée pour l'orbite de la Terre (aux erreurs d'observation près). De plus, l'excentricité de l'orbite terrestre est corrigée : 0,018 au lieu de 0,35840 donnée par Tycho. Enfin et surtout, la méthode imaginée par KEPLER pourra être reprise en utilisant les positions de la Terre pour préciser l'orbite de Mars.

La loi du mouvement.

Cependant KEPLER s'intéresse d'abord au mouvement de la Terre sur l'orbite circulaire précisée comme il vient d'être dit. Sur l'action animatrice, KEPLER fait l'hypothèse suivante : l'action animatrice s'exerce tangentiellement à la trajectoire et elle est inversement proportionnelle à la distance du Soleil à la Terre, de même que la vitesse de celle-ci sur son orbite.

La première hypothèse s'explique : pour KEPLER, pas de mouvement sans moteur ; celui-ci c'est le Soleil qui tourne sur lui-même et entraîne de ce fait les planètes sur leurs orbites. Par conséquent, action tangentielle. Celle-ci est inversement proportionnelle à la distance par analogie avec la lumière se propageant dans un plan : « la vertu motrice du Soleil et la lumière s'accordent entièrement dans tous leurs attributs ».

Pour la vitesse, KEPLER n'a pas la notion de vitesse instantanée mais de vitesse moyenne durant un petit intervalle de temps. Nous savons que la vitesse de la planète sur son orbite n'est pas inversement proportionnelle à la distance au Soleil mais inversement proportionnelle à la distance du Soleil à la tangente à l'orbite (fig. 2). Mais KEPLER vérifie son hypothèse lorsque SH et

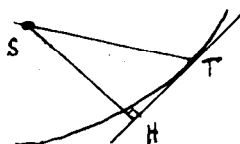


Fig. 2

ST sont confondues, lors des passages de la Terre au périhélie et à l'aphélie.

KEPLER entreprend alors de calculer l'aire balayée par le rayon vecteur ST : « Comme je me rendais compte que, sur l'excentrique, il y avait une infinité de points, et donc une infinité de distances, il me vint à l'esprit que la surface de l'excentrique les comprenait toutes. Car je me souviens que, jadis, ARCHIMÈDE, lorsqu'il cherchait le rapport de la circonférence au diamètre, avait de la même façon, découpé le cercle en une infinité de triangles. » (*Astr. Nova*, chap. XL). A ceci près, ajouterons-nous, que pour ARCHIMÈDE il s'agissait de rapports de longueurs et que KEPLER se propose d'ajouter des longueurs pour calculer une aire.

Pourtant, le résultat est correct. C'est la loi des aires : le rayon vecteur ST balaie des aires proportionnellement aux temps de parcours. La loi que l'on énonce généralement en second et qui fut, en réalité découverte la première.

Etablie, disons tant bien que mal, pour une orbite terrestre circulaire dès 1603, la loi des aires ne se vérifiera complètement que pour les orbites elliptiques.

L'ellipse.

KEPLER reprend alors l'étude de l'orbite de Mars en lui appliquant la loi des aires (ce qui est vrai pour la Terre l'est pour les planètes, à ses yeux). Il réunit cette fois dans une même classe les observations de Mars faites à 365 jours d'intervalle : le rayon vecteur ST sert alors de base pour construire l'orbite de Mars. Sa recherche est très laborieuse car la construction d'une orbite circulaire lui paraît finalement impossible. Alors, un ovale ? Mais lequel ? KEPLER, bon mathématicien, essaie l'ellipse. Il vérifie enfin que la loi des aires s'y applique parfaitement.

Pourquoi fut-ce si laborieux ? Rendons-nous compte que KEPLER devait rompre ici avec une longue tradition, celle des mouvements circulaires uniformes. C'est pourquoi, dans le chapitre LIX de *Astronomia Nova*, il lie les deux lois, celle des mouvements elliptiques et celle des aires. Malheureusement, son exposé touffu est particulièrement confus. Mathématiquement, il ne disposait pas de l'analyse infinitésimale pour justifier la loi des aires. Par contre, astronomiquement, pour découvrir l'ellipticité de l'orbite de Mars, il a bénéficié de la relativement grande excentricité de celle-ci 0,09 et du fait que la précision des mesures de Tycho était assez grande pour révéler l'ellipse et pas trop grande pour que les effets des perturbations (celles dues à Jupiter en particulier) soient inapercevables.

Astronomia Nova.

L'Astronomie nouvelle paraît en avril 1609. Une étape considérable dans l'histoire de l'astronomie et de la mécanique céleste. Nous l'avons déjà dit : KEPLER, imbu des traditions et les respectant, sait aussi passer outre devant l'épreuve des faits d'observation. KEPLER, savant moderne, découvre la loi des aires sur le mouvement de la Terre mais il le généralise aussitôt pour toutes les planètes, ce qui lui fait découvrir la loi des ellipses.

« Pour dire les choses en un mot, ce n'est qu'avec KEPLER que l'astronomie atteint le concept moderne d'*orbite* comme trajectoire résultant du jeu des forces qui s'exerce sur un astre. » (G. SIMON, p. 390).

3. L'HARMONIE DU MONDE.

L'Astronomie nouvelle ayant paru, KEPLER poursuit sa vieille idée de l'harmonie céleste qu'illustrait la construction des orbes et des polyèdres platoniciens. Il conçoit l'idée d'un ouvrage qui, au lieu d'être la présentation de ses découvertes dans leur hasardeuse gestation, aura les qualités solides d'un traité. Ce sera *l'Epitome Astronomiae Copernicae* qui ne parut qu'en 1620 et 1621 expose le plus complètement ses conceptions astronomiques. Mais, entre temps, il y aura une autre grande découverte et un remarquable échange de lettres avec GALILÉE.

Le Messenger céleste.

GALILÉE publie *Le Messenger céleste* en mars 1610. Il en adresse un exemplaire à KEPLER qui le reçoit le 8 avril. Celui-ci répond par une longue lettre, le 19 avril, lettre qui, pour notre chance, a fait l'objet d'une magnifique édition critique (en anglais) par Edward ROSEN : « KEPLER'S Conversation with GALILEO's Sidereal Messenger » (Johnson Reprint Corporation, 164 pages). Le texte de KEPLER représente trente pages ; les commentaires et les notes éclairaient ce document capital. Résumons-le.

Sur la lunette : lui, KEPLER, avait pensé qu'on ne ferait jamais mieux à l'œil nu que Tycho BRAHÉ, observateur exceptionnel ; la lunette ouvre une ère nouvelle à l'exploration du ciel (notons que KEPLER ne dit rien de l'utilisation de la lunette pour améliorer les mesures de position ; la lunette à oculaire divergent se prête mal à cet usage, même si deux auteurs DRAKE et KOWAL, dans *Pour la Science* de février 1981 parlent d'un pseudo-réticule que GALILÉE aurait utilisé,... et qu'il aurait ainsi découvert Neptune !) Sur la Lune, les planètes et les étoiles, sur la Voie lactée, KEPLER trouve dans *Le Messenger céleste* des raisons de plus de rejoindre Giordano BRUNO dans l'idée que les étoiles sont des soleils loin-

tains ; mais il maintient, à l'encontre de BRUNO, que l'Univers n'est pas infini.

Ce qui retient le plus son attention, c'est le passage sur les astres médicés. Oui, ce sont des satellites de Jupiter. Et si des astres gravitent autour de Jupiter, la Terre et la Lune ne sont pas les objets les plus nobles de la création. Pour expliquer le mouvement des planètes, il s'en tient à son idée : le Soleil tourne sur lui-même et cette rotation entraîne le mouvement des planètes ; de même Jupiter tourne sur lui-même et entraîne le mouvement de ses satellites.

Enfin, KEPLER maintient son idée des polyèdres réguliers, alors que la loi des orbites elliptiques n'est pas compatible avec celle des orbes sphériques (comment tracer une ellipse non circulaire sur une sphère ? Mais quand on a une idée *a priori*, on y tient !) L'orbe de la Terre occupe d'ailleurs une position remarquable, entre le dodécaèdre (douze faces) et l'icosaèdre (douze sommets) ; alors, la Terre n'est-elle pas l'objet le plus noble du système ? Les observations de Tycho révèlent, pour les orbes de Mars et de Vénus des écarts avec le schéma des polyèdres ; n'est-ce pas pour laisser place aux satellites de Mars et de Vénus quand on les aura découverts. Car si Jupiter a des satellites, pourquoi Mars et Vénus n'en auraient-ils pas ?

Au contraire des textes théoriques de KEPLER, cette lettre est d'une lecture facile et captivante. On y sent le frémissement du savant devant les travaux d'un de ses pairs. Les échanges entre FERMAT et PASCAL n'ont pas, me semble-t-il, cette chaleur mais il y a quelque chose du même ordre dans les lettres entre EINSTEIN et Elie CARTAN.

L'harmonie du monde.

KEPLER a l'ambition de couvrir tous les domaines de la physique. Il consacre un ouvrage à l'optique : sa *Dioptrice* date de 1611. Sa vie se complique matériellement, l'Empereur RODOLPHE abdique, KEPLER perd son emploi, il doit quitter Prague et s'installer d'abord à Linz (1612) puis à Ulm. Tout en travaillant à l'*Epitome*, il poursuit son idée sur l'harmonie du monde. A chaque planète il fait correspondre un ton déterminé par sa vitesse angulaire. Mais laissons-lui la parole pour l'essentiel :

« A l'époque du *Mysterium*, je ne voyais pas clairement ma voie... Mais après que j'eus, par un travail incessant et qui m'occupa pendant une longue période de temps, et ce en utilisant des observations de BRAHÉ, déterminé les vraies distances des orbites, enfin le rapport vrai des temps périodiques des orbites m'est apparu, et si vous me demandez le moment exact de cette découverte, le voilà : Je la conçus le 8 mars de cette année 1618, mais le calcul n'ayant pas été couronné de succès, j'ai de ce fait

rejeté la solution comme fausse. Mais l'idée, retournant à mon esprit le 15 mai, par un nouvel assaut surmonta les ténèbres de ma raison, avec une telle plénitude et un tel accord entre mes dix-sept ans de travail sur les observations de BRAHÉ et cette mienne présente étude, que tout d'abord je pensais que je rêvais et que j'assumais comme un principe admis ce qui était encore un sujet d'investigation. Mais le principe est incontestablement vrai et tout à fait exact : *les temps périodiques de deux planètes quelconques sont entre eux en proportion exactement sesquialtère de leurs distances moyennes, c'est-à-dire de leurs orbites.* »

Quel beau texte ! (cité par KOYRÉ, p. 340). KEPLER était persuadé qu'il existait une relation simple. Suivons-le et proposons à nos élèves munis de leurs calculettes et des données (périodes P et distances moyennes a) pour les six planètes coperniciennes. Calculons d'abord les rapports P/a et P/a^2 ; le premier est croissant de Mercure à Saturne, le second décroissant. N'est-il pas légitime d'essayer P^2/a^3 ? Nous redécouvrons la troisième loi ; on comprend l'émotion de KEPLER.

Kepler.

Notre propos, dans ce texte, était d'expliquer sommairement la genèse des trois lois. Il serait évidemment injuste de limiter à celles-ci l'œuvre de KEPLER. Son optique a préparé celles de DESCARTES. Il a vérifié, en particulier, que la réfraction atmosphérique dépend de la position des astres par rapport à l'horizon, non de leur nature, étoile ou planète. En 1618, il observa une comète et reconnut sa nature céleste.

En 1627, alors que ce perpétuel vagabond était réfugié à Ulm, il publia les *Tables rudolphines* ainsi nommées en hommage à son ancien protecteur. Il les dédia à la mémoire de John NAPIER, car l'utilisation des logarithmes avait grandement facilité sa tâche. Ces éphémérides, les premières calculées en tenant compte des trois lois, lui permettent d'annoncer dès 1629 que Mercure passera devant le Soleil le 7 novembre 1631 : l'observation sera faite par GASSENDI mais KEPLER est mort un an auparavant.

Je rapproche trois dates : 1596, *le Mystère cosmographique* et la naissance de DESCARTES, 1627 les *Tables rudolphines*, 1630, mort de KEPLER : dès son premier tiers, un grand siècle, ce XVII^e !

Après Kepler.

Pour nous qui connaissons un peu de calcul différentiel, nous pouvons retrouver les lois de KEPLER à partir d'hypothèses simples. Nous supposons que l'action du Soleil est prédominante et que sont négligeables (en première approximation) les actions perturbatrices des autres planètes. Nous considérons donc le problème

des deux corps, le Soleil et Mars par exemple. Dans le plan de l'orbite de Mars, repérage à partir du Soleil en coordonnées polaires $\vec{SM} = r \vec{i}$ ($\vec{i}$ vecteur unitaire). Dérivations par rapport au temps :

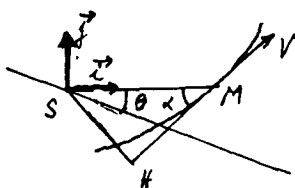


Fig. 3

Vitesse de M : $\vec{MV} = r' \vec{i} + r \theta' \vec{j}$

accélération :

$$\vec{M}\ddot{\Gamma} = (r'' - r\theta'^2) \vec{i} + (2r'\theta' + r\theta'') \vec{j}$$

Les résultats s'ensuivent :

1) L'accélération est centrale si et seulement si le mouvement obéit à la loi des aires ; $2r'\theta' + r\theta'' = 0$ signifie $r^2\theta' = C$; de plus, la vitesse angulaire est inversement proportionnelle au carré de la distance, ce que savait KEPLER.

2) Calcul de la distance de S à la tangente à l'orbite : $SH = r \sin \alpha = C/V$; autrement dit, la norme de la vitesse de Mars sur son orbite est inversement proportionnelle à la distance du Soleil à la tangente à l'orbite. KEPLER l'avait vérifié dans les cas particuliers des passages au périhélie et à l'aphélie.

3) Sachant que l'orbite est une ellipse de foyer S, trouver la loi d'attraction :

$$\vec{M}\ddot{\Gamma} = (r'' - r\theta'^2) \vec{i} \quad \text{avec} \quad \theta' = C/r^2$$

et : $1/r = (1 + e \cos \theta)/p$; soit $\vec{M}\ddot{\Gamma} = -C^2/pr^2$,

l'attraction (signe —) est inversement proportionnelle au carré de la distance du Soleil ; $C^2/p = k M_{\odot}$ constante héliocentrique de gravitation. Ça, c'est NEWTON qui l'a montré, pas KEPLER.

4) Calcul de la période P (ne pas confondre avec p paramètre de l'ellipse) $1/2 \int_0^P C dt = CP/2 = \pi a^2 \sqrt{1-e^2}$. On en déduit $a^3/P^2 = k M_{\odot}/4$, c'est la troisième loi ; d'où le calcul de la masse du Soleil : $M_{\odot} = 2 \times 10^{30} \text{ kg}$.

Au terme de cette étude schématique sur les lois de KEPLER, je risquerai, en guise de conclusion, cette citation de KOESTLER : « L'importance *objective* de la troisième loi est d'avoir procuré à NEWTON les plus sérieux indices : elle recèle l'essence de la Loi de la Gravitation. Mais son importance *subjective* fut, pour KEPLER, de servir ses chimères, et rien de plus. » (Les Somnambules, chap. IX).

Providentielles chimères...

RAPPEL BIBLIOGRAPHIQUE

Alexandre KOYRÉ : *La révolution astronomique* (éd. Hermann, 1961).

Gérard SIMON : *Kepler, astronome astrologue* (éd. Gallimard, 1979).

Arthur KOESTLER : *Les somnambules* (éd. Calmann-Lévy, 1960).

Quatrième centenaire de la naissance de Kepler, recueil collectif édité par la Société Astronomique de France, 1973.

Kepler's Conversation with Galileo's Sidereal Messenger, traduction en anglais et notes par Edward ROSEN (éd. Johnson Reprint Corporation, 1965).
