

LA RENAISSANCE : PLATON SE MONTRE LE BOUT DU NEZ

... ARISTOTE FRÉMIT

3.1 La trajectoire d'un projectile¹

3.1.1 Rappels sur la mécanique aristotélicienne

L'explication aristotélicienne du fait qu'un projectile lancé continue sa course même après que la main a cessé de le pousser par contact pose problème. D'une part, l'air est l'agent principal qui, par son mouvement, assure qu'une force est imprimée par contact au mobile. D'autre part, ce même air résiste avec succès à ce mouvement et ralentit effectivement le mobile. Il n'est donc pas surprenant que plusieurs se soient montrés réfractaires aux explications d'Aristote.

3.1.2 La théorie de l'impetus de Buridan (1300, 1385) : une autre théorie "naturelle".

Pourtant professeur à l'Université de Paris, Buridan s'est montré particulièrement critique par rapport à la théorie d'Aristote. Il lui opposa plusieurs arguments:

1. Une roue continue à tourner après avoir cessé d'être poussée. Comment l'air peut-il pousser la roue? Il n'y a aucun vide qui se forme.
2. Une flèche pointue aux deux bouts devrait aller plus lentement qu'une flèche ayant le bout arrière plat. On n'a jamais remarqué une réelle différence de vitesse entre ces deux types de flèches.
3. Lorsque l'on pousse une barque, une personne tournée vers l'avant dans la barque ne sent pas dans son dos la poussée de l'air qu'Aristote dit devoir s'y appliquer. Au contraire, elle sent plutôt l'air qui vient vers sa figure.
4. L'air étant tellement fluide, il semble difficile de croire que l'air peut seul, par lui-même, pousser des boulets.
5. Une plume devrait aller plus loin qu'un objet très lourd. En effet, l'action de l'air devrait avoir plus d'effet sur un corps léger que sur un corps lourd.

Buridan propose une autre théorie du mouvement, dite théorie de l'impetus. L'impetus est un genre de fluide qui, lorsqu'il est présent dans un corps, lui imprime un mouvement. Des impetus différents correspondent à des mouvements différents. À un mouvement vers le haut correspond un impetus vers le haut. À un mouvement circulaire correspond un impetus circulaire. L'impetus accumulé dans un corps poussé continue à l'imprégner lorsque la poussée a cessé. C'est pourquoi

¹ Voir l'article de McCloskey, Michael, *La physique intuitive*.

le corps continue son mouvement même si une force ne lui est plus appliquée par contact. Selon Buridan, l'impetus se dissipe en combattant la résistance de l'air.²

L'existence de l'impetus a plusieurs conséquences. La question de la combinaison des mouvements demeure ambivalente. Si un fluide domine un autre, l'action du second peut ne pas se faire sentir. Ainsi, l'impetus latéral peut dominer pendant un temps avant que l'impulsion naturelle vers le bas puisse agir. La trajectoire d'un projectile peut alors être composée de portions dans lesquelles seul un impetus agit sur le corps, les autres étant latents. Buridan et, plus tard, Léonard de Vinci (1452-1519) croient que le mouvement des corps célestes provient de l'action d'un impetus circulaire. Il s'ensuit que la physique céleste et la physique sublunaire partageraient certains principes, contrairement à ce qu'affirme la physique d'Aristote.

Il est intéressant de comparer brièvement, comme le fait McCloskey, la théorie de l'impetus à la mécanique newtonienne.

- Dans le cadre de la théorie de l'impetus, le mouvement est absolu. Il indique la présence de l'impetus dans le mobile. Cette approche du mouvement se démarque radicalement de l'approche newtonienne dans laquelle le mouvement n'a rien d'absolu. Au contraire, pour Newton, le mouvement est relatif à un système de référence. Ainsi, dans un ascenseur, vu de l'intérieur rien ne bouge, mais vu de l'extérieur, au contraire, tout bouge.
- Dans la théorie de l'impetus, le mouvement s'arrête nécessairement au bout d'un certain temps. Que l'on en attribue la cause à la dissipation de l'impetus, d'elle-même ou à cause de la résistance de l'air³, ou du fait que les corps ont une tendance au repos, le résultat est le même. Pour Newton, le mouvement rectiligne dans le vide se continuera indéfiniment.
- Dans la théorie de l'impetus, les mouvements circulaires et rectilignes sont de nature fondamentalement différente puisqu'ils résultent de la présence de deux impetus différents. Pour Newton, le mouvement rectiligne est le mouvement fondamental, celui d'un corps laissé à lui-même. Par ailleurs, le mouvement circulaire découle de l'application constante d'une force qui infléchit continuellement la direction du mouvement.
- Dans la théorie de l'impetus, l'influence entre divers types d'impetus est limitée sinon inexistante. Habituellement, un impetus domine un autre ou domine le mouvement naturel. Chez Newton, les forces qui agissent sur un corps agissent de façon indépendante de sorte qu'il y a une combinaison des forces et donc des mouvements qu'elles produisent.

² Oresme (1325-1382), un collègue de Buridan, pensera que les projectiles s'arrêtent étant donné que les corps ont une tendance au repos. D'autres penseront que l'impetus s'évapore d'elle-même, comme l'eau qui s'échappe d'une serviette humide.

³ Le fait que, dans la physique aristotélicienne, le vide ne peut exister implique qu'on ne peut concevoir un mouvement qui n'est pas soumis à une certaine résistance.

La comparaison succincte que nous venons de faire nous montre bien le chemin qui reste à franchir pour se débarrasser des principes mécaniques aristotéliens. Avant d'y arriver, il faudra modifier complètement les habitudes de penser tributaires de la vision aristotélienne et ce, non seulement dans la physique terrestre, mais aussi dans la cosmologie.

3.2 À bas le système géocentrique

3.2.1 Copernic (1473, 1543)

3.2.1.a L'homme ⁴

Né dans une famille aisée de marchands de Torun,⁵ Copernic perd son père alors qu'il a dix ans à peine. Heureusement, son oncle, un ecclésiastique qui peu après deviendra évêque et gouverneur d'Ermland, le prend sous sa protection. En 1496, juste après avoir été nommé par son oncle chanoine de la cathédrale de Frauenbourg, il entreprend un voyage en Italie pour y étudier la médecine et le droit canon. Il y restera jusqu'en 1505. C'est au cours de cette période qu'il entre en contact avec l'astronomie, entre autres par la lecture de Regiomontanus.⁶ Il constate que les tables alors en usage sont imprécises et insatisfaisantes. En 1507, il prend conscience que les calculs des tables seraient grandement simplifiés en plaçant le Soleil au centre de l'univers. Il sait alors qu'Aristarque avait proposé un tel système et que Nicolas de Cuse (1401-1464) avait lui-même repris cette hypothèse quelques décennies plus tôt sans lui associer un système géométrique permettant de calculer des tables. Mais l'idée de déplacer la Terre du centre de l'univers posait problème. En effet, Aristote soutenait, arguments à l'appui, que la Terre est immobile. De plus, placer la Terre parmi les autres planètes contrevenait la division de l'univers en deux mondes, l'un céleste et parfait et l'autre terrestre et imparfait. De plus, la théorie de la potentialité à la base de la mécanique aristotélienne ne pouvait plus s'appliquer. Si l'élément terre cherche à réaliser sa potentialité en se déplaçant vers le centre de l'univers, comment expliquer, maintenant que la Terre n'est plus au centre de l'univers, que les objets tombent sur la Terre?

En 1506, Copernic revient chez son oncle au château d'Heilsberg. Il y restera 6 ans, y devenant médecin de l'évêque et y remplissant principalement des tâches diplomatiques. Lorsque son oncle meurt subitement en 1512, il quitte ses fonctions et va à Frauenbourg. Il y habitera jusqu'à sa mort. À l'époque de son déplacement à Frauenbourg, il écrit un premier texte sur son système et commence à faire des calculs pour ajuster son système aux observations. Ce premier texte ne sera pas publié et ne circulera que dans des cercles très restreints. Déjà, il se rend compte que, pour

⁴ Inspiré essentiellement du livre de Asimov *Biographical Encyclopedia of Science and Technology*, no. 114, et de Koestler, *Les Somnambules*, chapitre I de la troisième partie.

⁵ La nationalité de Copernic a fait l'objet de nombreuses controverses. La ville de Torun (Thorn en allemand) se trouve dans une région qui appartient alternativement à la Pologne et à l'Allemagne. Aussi, l'on peut facilement imaginer les tiraillements qui accompagnèrent les célébrations, en 1943, du quadri-centenaire de la publication de son livre *De la révolution des orbés célestes*.

⁶ Régiomontanus a écrit le premier livre de trigonométrie du triangle, indépendamment d'un livre d'astronomie.

que son système soit un modèle fidèle de l'univers, il faut que les étoiles soient à une très grande distance de la Terre. Du coup l'univers copernicien grandit. Il se différencie des univers cosmologiques grecs et chrétiens qui tous étaient limités.⁷

À l'été 1539, un jeune mathématicien arrive à Frauenbourg pour rencontrer Copernic. Copernic n'avait encore rien publié sur son système. Il craignait que ses idées, à bien des égards contraires aux idées de l'Église et d'Aristote, qu'il respectait, fussent mal reçues. Son caractère effacé le portait à se faire tout petit. Rhéticus, le jeune mathématicien, décida que les idées de Copernic devaient être connues. Aussi, usant de persuasion, il convainc Copernic de le laisser publier un livre dans lequel lui, Rhéticus, décrirait le système de Copernic. Copernic y consent. Ainsi paraît au début de 1540 le *Narratio Prima ...*, un petit livre de 76 pages. Ce n'est qu'alors que Copernic se met à l'oeuvre pour publier lui-même un livre décrivant en détail son système. En août 1541, le manuscrit de 424 pages destiné à l'imprimeur est terminé. Rhéticus s'occupera de l'impression. Il faudra malgré tout attendre sept mois avant que l'impression commence. Ce ne sera qu'en 1543, sur son lit de mort, que Copernic pourra voir et toucher un premier exemplaire de son *De la révolution des orbés célestes*.

3.2.1.b Son système

i- Description du système

Le système de Copernic repose, comme celui de Ptolémée, sur le système des deux sphères. Il y a deux différences essentielles toutefois.

D'abord, ce n'est plus la Terre qui est immobile au centre, mais le Soleil. Toutes les planètes, sauf la Lune, mais y compris la Terre, tournent autour du Soleil. La Terre a trois mouvements:

- i) mouvement diurne : rotation autour de son axe en une journée,
- ii) translation: mouvement annuel autour du Soleil,
- iii) mouvement annuel de rotation de l'axe de la Terre (voir la figure 31 b).

Le mouvement de rotation de l'axe de la Terre vise à assurer que cet axe conserve toujours la même orientation. Copernic croyait, en homme de son temps, que la Terre se comportait, en tournant autour du Soleil, comme si elle était reliée au Soleil par une tige de sorte que l'orientation de l'axe de la Terre était toujours la même par rapport au Soleil (voir la figure 31a). Dès lors, l'axe de la Terre doit tourner en un mouvement annuel de façon à ce que l'axe soit toujours dans la même direction absolue. Ce n'est qu'à ce prix que les variations des mouvements apparents du Soleil selon les saisons sont reproduites par le système.

Deuxième différence, la sphère céleste est immobile et très grande.

ii- Explication des mouvements apparents.

⁷ Pour une histoire fascinante du passage, à l'époque de Copernic, d'un univers aux dimensions humaines à un univers très grand, voyez le livre d'Alexandre Koyré, *Du monde clos à l'univers infini*.

Le mouvement diurne du soleil et des étoiles

La rotation journalière de la Terre sur son axe produit, pour un observateur terrestre, un mouvement apparent de rotation sur la sphère des étoiles. (Voir la figure 28)

Les changements du mouvement diurne du Soleil selon les saisons.

En assurant, par l'ajout du mouvement annuel de rotation de l'axe de la Terre, que cet axe pointe toujours dans la même direction absolue, le mouvement diurne du Soleil change selon les saisons étant donné que, par rapport au Soleil, l'axe change d'orientation. (Voir la figure 29.) Il est à noter que, la Terre se déplaçant autour du Soleil, la position des étoiles à un moment de l'année devrait être affectée par la position de la Terre. Ce phénomène s'appelle la parallaxe. (Voir la figure 30)⁸ Ainsi, l'étoile polaire, que l'on voit toute l'année, ne serait pas à la même hauteur angulaire toute l'année. Or de tels changements, pour quelque étoile que ce soit, n'ont jamais été observés. Il s'ensuit que les étoiles doivent être très éloignées de la Terre.

Les orbites des planètes sont toutes approximativement dans le même plan

De manière similaire à ce qui était fait dans le système de Ptolémée, il suffit de placer le plan de l'orbite de chacune des planètes de façon à ce qu'il soit incliné à peu près comme celui de l'orbite de la Terre.

Les temps de translation varient, mais sont en moyenne constants

Le temps mis par la Terre pour faire un tour complet du Soleil et celui mis par une planète pour faire elle aussi un tel tour sont différents. On peut voir, figure 33, que si on suppose qu'alors que la planète fait un tour complet, la Terre fait un tour et un quart, la planète peut prendre trois positions apparentes différentes alors qu'elle revient à la même position absolue. Le temps entre les retours à une même position apparente varie donc. La moyenne de ces temps est égale au temps pris par la planète pour revenir à la même position absolue.

Les planètes inférieures: Mercure et Vénus

Vues de la Terre, les planètes inférieures tournant autour du Soleil ne s'en éloignent jamais. Le système reproduit donc naturellement ce mouvement apparent.

Le mouvement de rétrogradation des planètes

a) Intervalle entre les rétrogradations

Comme pour le système de Ptolémée, le système de Copernic reproduit par lui-même le phénomène de rétrogradation. Toutefois, alors que Ptolémée avait dû introduire un élément particulier, les épicycles, pour que le système génère les rétrogradations, Copernic n'a qu'à laisser fonctionner son système pour que les rétrogradations se produisent. (Voir la figure 32) Qu'en est-il du temps prévu entre chaque rétrogradation ? Est-il rigoureusement le même ? Oui.

⁸ La confirmation de l'existence de la parallaxe n'a été faite qu'en 1838.

- b) Particularités pour les planètes Mars, Jupiter et Saturne:
 - i) Dans le système, la rétrogradation se produit nécessairement au moment où la Terre et la planète sont le plus proche. Puisque les orbites sont des cercles concentriques, la distance minimum entre deux points de ces cercles est celle qui correspond au segment du rayon du cercle extérieur qui se trouve entre les deux cercles. [C'est le moment où les directions instantanées des deux planètes sont parallèles.] (Voir la figure 32)
 - ii) On a indiqué, en i), que la rétrogradation se produisait précisément lorsque la Terre se trouvait le plus près de la planète. La planète apparaît alors, vue de la Terre, plus lumineuse qu'en tout autre temps.

iii- Mouvements non décrits par le système copernicien

- a) Les intervalles de temps entre les rétrogradations devraient être égaux selon le système de Copernic. Ce n'est pas le cas en réalité. Par rapport à cette irrégularité, le système de Copernic n'est donc pas supérieur à celui de Ptolémée.
- b) Selon le système de Copernic, les planètes inférieures devraient toujours atteindre leur déviation maximale par rapport au Soleil. Encore là, en réalité, les planètes n'atteignent pas toujours leur déviation maximale.
- c) Le temps pris par le Soleil pour aller de l'équinoxe d'automne à l'équinoxe du printemps est moins long que celui pris pour aller de l'équinoxe du printemps à l'équinoxe d'automne. La Terre tournant sur un cercle centré au Soleil, le système ne reproduit pas cette inégalité.

iv- Mécanismes correctifs.

Les mêmes que ceux utilisés par Ptolémée. (Voir les figures 34 et 8b)

v- Système de Copernic versus système de Ptolémée

Le système de Copernic reproduit avec beaucoup d'économie les phénomènes de rétrogradation et ses caractéristiques (luminosité, opposition avec le Soleil). Le fait que les planètes Mercure et Vénus soient toujours en apparence près du Soleil découle aussi de la configuration du système. Par ailleurs, la translation de Vénus autour du Soleil a pour conséquence que Vénus devrait avoir, comme la Lune, des phases lorsque vue de la Terre.

Dans le système copernicien, le temps entre deux rétrogradations permet de calculer l'année planétaire.

Dans le système de Copernic, il est possible de calculer la distance entre une planète et le Soleil. (Voir la figure 36.) Dans le système de Ptolémée, il n'y a pas moyen de faire un tel type de calcul.

Ce sont là des avantages du système copernicien. Mais ces avantages sont plus qualitatifs que quantitatifs. Lorsqu'il s'agit d'ajuster les prédictions du système aux observations, les mêmes

problèmes que ceux rencontrés par Ptolémée se manifestent. Copernic n'a alors pas d'autres choix que d'utiliser les artifices mis au point par Ptolémée (comme de petits épicycles additionnels). De fait, le système complet de Copernic comporte 48 cercles alors que celui de Ptolémée n'en comporte que 40. Au niveau des principes, le système héliocentrique est nettement plus simple que le système géocentrique. Au niveau des calculs toutefois, cette économie s'évapore dans les tentatives d'ajuster le système aux observations.

N'oublions pas une différence majeure entre les deux systèmes. Alors que dans le système de Ptolémée la sphère des étoiles occupe un espace relativement limité, dans celui de Copernic elle est nécessairement très grande par rapport à l'orbite de la Terre.

3.2.1.c Les a priori philosophiques

Nous avons signalé, au début de cette section 3.2.1, quelques difficultés qu'engendre la cosmologie copernicienne pour les tenants de la cosmologie d'Aristote. Copernic montre donc une certaine indépendance d'esprit. Toutefois, il ne peut renier complètement l'époque dans laquelle il vit. De fait, des influences aristotéliennes et néoplatoniciennes sont nettement décelables chez lui.

Ainsi, pour contrer Aristote, Copernic argumente de façon aristotélienne.

- a) Les objets tombent sur la Terre (et non au centre de l'univers où est le Soleil) parce que les objets ont par nature tendance à former des corps parfaits.
- b) Les objets lancés vers le haut retombent à la même place que celle d'où ils ont été lancés parce que la rotation est un mouvement naturel. Un objet lancé continue donc, une fois laissé à lui-même, à se mouvoir suivant le mouvement naturel de rotation de la Terre. De plus, les vents que prévoit Aristote dans l'éventualité d'un mouvement de rotation de la Terre ne sauraient se produire car l'air qui entoure la Terre contient aussi de la terre et de l'eau. L'air est donc mis en mouvement par le mouvement naturel de la terre. Le mouvement circulaire naturel de la Terre devient donc un mouvement naturel pour l'air.

Par ailleurs, nous pouvons percevoir une référence directe au mouvement néoplatonicien dans un texte de Copernic. (Voir le texte) De fait, la référence à Trimegiste suggère aussi un public auquel le livre s'adresse. Tout ce texte est d'inspiration néoplatonicienne. Certes Platon lui-même avait placé la Terre au centre de l'univers et avait attribué à celle-ci une nature différente de celle des astres célestes. Mais les néoplatoniciens de la Renaissance retiennent principalement, dans la foulée des pères de l'Église, que le monde céleste, monde divin, agit sur nous. L'action du Soleil est primordiale à la vie sur la Terre. Le Soleil joue un rôle unique pour les planètes: 1) les planètes inférieures ne s'en éloignent en apparence jamais, 2) lors de leurs rétrogradations, les planètes supérieures sont en opposition avec le Soleil. Comment alors ne pas lui donner une place spéciale, centrale, dans l'univers?

Le nouveau système intrigue les contemporains de Copernic. Sur le plan qualitatif, il est plus économique que celui de Ptolémée. Mais, sur le plan des calculs, il n'est pas plus efficace, ni plus

conforme aux observations. Toutefois, il plaît aux néoplatoniciens et en particulier à celui qui est le plus néoplatonicien de tous, Kepler.

3.2.2 Kepler (1571, 1630)

3.2.2.a

Johann Kepler naît dans une famille de notables de l'état allemand de Württemberg. À trois ans, il contracte la varicelle qui le laisse avec une main plus ou moins inutile et des yeux nettement affaiblis. Il termine une maîtrise en théologie en 1591 à l'université de Tübingen. Mais, au cours de ses études, il se découvre un grand talent pour les mathématiques qu'il étudie par lui-même et hors de l'université. Il s'intéresse au système de Copernic qu'il décide de défendre dans les milieux universitaires. Ses capacités sont vite reconnues et, en 1594, il enseigne les sciences à l'université de Gratz, aujourd'hui une ville d'Autriche. Ses intérêts sont variés mais ils présentent une caractéristique commune, un mysticisme sous-jacent. Sa réputation comme astrologue s'étend rapidement. Il calcule la date de la création du monde : 3992 av. J.-C. Au cours de l'un de ses cours, il a une inspiration qui le conduit à expliquer pourquoi il n'y a que 6 planètes tournant autour du Soleil. En 1596, il publie ses idées dans son premier livre, *Mysterium cosmographicum*.. Les savants de l'époque, y compris Galilée, réagissent avec un grand scepticisme. Heureusement, Tycho Brahé, le plus grand astronome de la fin du XVI^e siècle, décèle les qualités exceptionnelles de Kepler à travers les incongruités des idées exprimées dans le livre. Lorsqu'en 1597 la situation à Gatz devient difficile par suite de conflits religieux, Kepler décide de quitter la ville. Il part pour Prague afin de travailler chez Tycho Brahé (1546-1601) qui l'a engagé comme assistant. Tycho Brahé est un homme extrêmement secret. Il demande à Kepler de travailler sur la planète Mars. C'est une chance car la planète Mars est celle qui présente le plus de difficultés.⁹ Kepler n'a toutefois pas accès à toutes les données d'observations faites par Tycho Brahé. Il devra attendre la mort de celui-ci, en 1601, pour pouvoir consulter à sa guise les tables, riches et précises, de son défunt maître. Il devient alors l'astrologue de l'empereur Rudolff II.

En 1609, il publie un second livre, *Astronomia Nova*, dans lequel il énonce ses deux premières lois sur les orbites des planètes. À la même époque, il apprend avec enthousiasme les découvertes faites par Galilée au moyen de la lunette. Il entreprend alors une étude géométrique de la dioptrique qui lui permet de donner un premier fondement théorique à la fabrication des lunettes.

En 1612, l'empereur Rudolff II meurt. Heureusement, son successeur le confirme dans son titre d'astrologue de l'empereur. Il fait paraître en 1619 un livre qui a un caractère nettement pythagoricien, *Harmonices Mundi*, dans lequel il cherche à mettre en évidence les analogies qui unissent différents phénomènes en apparence sans liens. Sa vie devient difficile. Tout en gardant le titre d'astrologue de l'empereur, il doit vivre à Linz en Autriche. Il connaît de nombreux déboires. Néanmoins, il continue ses travaux et, en 1627, il publie de nouvelles tables astronomiques, les *Tables Rudolphines*.

⁹ La planète Mars suit l'orbite la plus elliptique parmi les orbites des planètes. Elle a donc causé des soucis aussi bien à Ptolémée qu'à Copernic et Tycho Brahé. Ce dernier a proposé un système dans lequel la Terre est au centre de l'univers mais seuls la Lune et le Soleil tournent autour d'elle. Toutes les autres planètes tournent autour du Soleil.

3.2.2.b L'archétype du savant néoplatonicien (mystique, magique) : *Mysterium cosmographicum* (1596)

Voir le texte. La tentative d'explication mystique du nombre et de la position des planètes se butte à la comparaison des prédictions avec les tables astronomiques. Toutefois notons que Kepler s'intéresse à trouver une relation numérique entre les temps de translation des planètes et leurs distances au Soleil. Il émet pour la première fois l'idée que l'âme du Soleil pousse les planètes d'autant plus vigoureusement que la planète est plus proche de celui-ci.

3.2.2.c *Astronomia Nova* (1609), *Harmonices Mundi* (1619) ¹⁰

L'*Astronomia Nova* est consacré principalement à l'étude de la planète Mars. Ce livre est extrêmement riche en nouvelles idées et directions de recherches. Mentionnons d'abord deux idées.

- 1) Kepler, bon néoplatonicien, réagit au fait que, dans le système de Copernic, le Soleil n'est pas placé véritablement au centre des orbites des planètes. Il y voit la manifestation du fait que les planètes sont soumises à une double influence. D'une part il y a bien sûr l'influence du Soleil. D'autre part, il y a une force intrinsèque dans chacune des planètes, un genre de tendance au repos.¹¹ La trajectoire d'une planète découle de la combinaison de ces deux forces. Aussi, Kepler décide-t-il de baser ses calculs sur la distance à chaque instant entre le Soleil et une planète. Il s'éloigne ainsi doublement de ce qu'avaient fait Copernic et Ptolémée. En effet, le Soleil agit physiquement sur les planètes. Le système n'est plus simplement un modèle géométrique, il est avant tout un modèle physique. De plus, le centre de l'univers devient un centre physique, différent du centre géométrique. Le Soleil, ce centre physique, retrouve la place qui lui convient. Dans les modèles géométriques, il avait été détrôné par les centres géométriques des différents systèmes de cercles correspondant à chaque planète. (Voir le texte de Kepler)
- 2) En se focalisant sur le centre physique du système, Kepler se permet, ou peut-être devrait-on dire s'oblige, à délaisser le cercle comme figure de base du système. Pour lui, il n'y a plus d'a priori géométrique. L'harmonie qu'il privilégie est une harmonie physique qui émane de la place physique primordiale du Soleil.

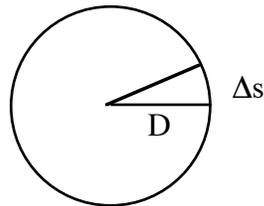
Cette attention portée à la nature physique du système s'accompagne d'une nouvelle exigence quant à l'adéquation entre les observations et les prédictions du système. Kepler s'astreint à avoir des prédictions théoriques qui sont en deçà de 8' des observations. Ptolémée et Copernic se satisfaisaient d'une marge d'erreur de 10°.

¹⁰ Koestler, *Les Somnambules*, p. 331-370.

¹¹ Aujourd'hui, l'on parle de la gravitation et de l'inertie.

Kepler est doté d'une intuition remarquable. Il sait souvent là où il faut arriver. Toutefois, le chemin suivi nous surprend parfois. Ainsi, il montre sa première loi en faisant deux erreurs qui, par bonheur, s'annulent mutuellement.

La seconde loi dit que le segment de droite reliant le Soleil à une planète balaie des aires égales en des temps égaux. Pour le montrer, Kepler part de l'hypothèse, que l'on sait maintenant fausse, que la vitesse d'une planète est inversement proportionnelle à la distance qui la sépare du Soleil, ou en langage symbolique moderne $v = \text{Erreur} ! \frac{1}{kD}$ à un temps t donné. Il fait ensuite une autre hypothèse, elle aussi fausse. L'aire balayée en un temps Δt par le rayon réunissant le Soleil à la planète correspond à l'aire du triangle dont la base est la distance D du Soleil à la planète et la hauteur est la distance Δs parcourue par la planète dans un temps Δt . (Les notations employées ici sont modernes et ne sont en aucune façon utilisées par Kepler.) Ce genre d'hypothèses avait été utilisé par Archimède à diverses reprises, dans le calcul de l'aire du cercle. Mais Archimède prenait toutes sortes de précautions. Kepler sait qu'il navigue en terrain dangereux. Néanmoins, il continue, sans doute guidé par un objectif que son intuition lui a révélé. Il conclut par un calcul que nous pouvons résumer ainsi, en notation moderne:

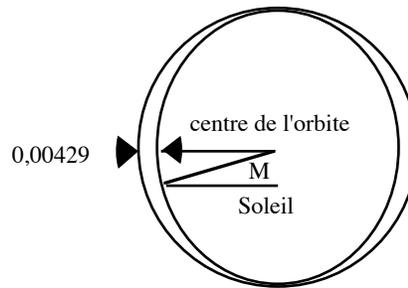


$$\begin{aligned} \Delta s \cdot D &= v \cdot \Delta t \cdot D \\ \text{d'où} \quad \Delta s \cdot D &= \frac{1}{kD} \cdot \Delta t \cdot D, \\ \text{et donc} \quad \Delta s \cdot D &= \frac{1}{k} \cdot \Delta t \end{aligned}$$

L'aire du «triangle» ne dépend que du temps écoulé depuis le début du balayage.

Notons la référence à Archimède. Archimède avait indiqué dans certains de ses livres comment les Grecs découvraient de nouveaux résultats en mathématiques. Oublié depuis plus d'un millénaire, son enseignement refait surface. Même si parfois il donne lieu, comme ici chez Kepler, à des raisonnements essentiellement faux, il ouvre de nouvelles voies pour la mise en place d'un lien entre les mathématiques et des modèles physiques.

Disons aussi quelques mots sur la découverte de la première loi, de fait postérieure à la découverte de la seconde loi. Cette loi dit que toute planète se déplace sur une orbite elliptique dont le Soleil occupe l'un des foyers. Après avoir trouvé sa première loi, Kepler a mis plus de 2 ans pour arriver à caractériser géométriquement l'orbite de Mars. À partir des observations disponibles, il tente dans un premier temps de trouver un ovale qui se conformerait aux observations. La tâche est difficile d'autant plus que la géométrie des ovales est essentiellement à faire. Kepler se plaint que son étude aurait été beaucoup plus facile si l'orbite avait été une ellipse, puisque les Archimède et Apollonius avaient bien étudié ces courbes. Après des mois de travail acharné, il doit admettre son échec. Il recalcule alors avec un soin extrême 20 positions de Mars. Il constate à nouveau qu'elle prend la forme d'un genre de cercle aplati.



Il constate que l'écart le plus grand entre l'orbite telle que déterminée par les observations et le cercle qui la circonscrit est 0,00429 du rayon du cercle. Il étudie alors l'angle, angle appelé «équation optique», que feraient, pour un observateur sur Mars, la position du Soleil et celle du centre de l'orbite de la planète, l'angle M sur la figure,. Tout à coup, il voit clair. ¹²

... Je me demande pourquoi et comment il se produisait un croissant précisément de cette épaisseur [0,00429 rayon]. Cette pensée me tourmentait et je songeais sans cesse... que mon apparente victoire sur Mars avait été vaine, quand je tombai tout à fait par hasard sur la sécante de l'angle $5^{\circ}18'$, ce qui est la mesure de la plus grande équation optique. Quand je vis cette sécante égale à 1,00429, il me sembla que je me réveillais...

Il pense alors qu'il y a un rapport fixe, indépendant de la position de la planète sur son orbite, entre l'angle M et la distance entre le Soleil et la planète Mars. Partant de là, il en arrive à caractériser géométriquement l'orbite. Cette caractérisation correspond en langage moderne à $R = I + e \cos \beta$, où R est la distance au Soleil, β est l'angle que fait la planète par rapport au grand axe de l'orbite et I, le petit axe. Malheureusement pour Kepler, il n'y voit que du feu. Il tente de tracer la courbe ainsi caractérisée. Il fait une erreur et obtient un genre d'ovale nettement gonflé au centre. Pourtant, la caractérisation est juste. Il s'agit de celle de l'ellipse. Kepler ne le sait pas. Désespéré, il démarre à nouveau en prenant comme hypothèses que l'orbite est une ellipse. «Enfin!» A-t-on envie de dire. En peu de temps, il montre non seulement que l'ellipse s'accorde avec les données d'observations mais que la caractérisation qu'il avait trouvée précédemment correspond en fait à une ellipse. La victoire est finalement complète.

Dans son *Harmonices Mundi* (1619), Kepler tente de regarder l'univers par la lunette des analogies musicales. Ses champs d'études vont de la politique à l'architecture, à l'astrologie et enfin à la cosmologie (astronomie). Dans ce dernier domaine, il tente, un peu comme il l'avait fait dans son *Mysterium cosmographicum*, d'établir des liens mystiques entre les caractéristiques des planètes. Pour y arriver, sont-ce les rapports des distances au Soleil qu'il faut considérer? Ou encore les rapports des distances extrêmes? Ou les rapports des vitesses extrêmes? Non. Ce seront finalement les rapports des vitesses angulaires, vus du Soleil, de chaque planète à son aphélie (distance maximale du Soleil) et à son périhélie (distance minimale du Soleil). Autrement dit, pour chaque planète, il considère le rapport de la plus petite vitesse angulaire, par rapport au Soleil, à la plus grande vitesse angulaire de la même planète. Ainsi, pour Saturne, ce rapport est

¹² Cité de l'*Astronomia Nova*, IV, chap. 55, dans Koestler, *Les Somnambules*, p. 350.

de 4 à 5, soit le rapport correspondant à une tierce majeure. Pour Jupiter, c'est une tierce mineure et, pour Mars, une quinte. Kepler a découvert le secret de la musique des sphères de Pythagore. (Voir la musique des planètes avec les textes)

Dans sa recherche des harmonies célestes, Kepler énonce une loi qui passera inaperçue pour ainsi dire jusqu'à Newton. Elle est appelée aujourd'hui la troisième loi de Kepler : le carré de la période de révolution d'une planète est proportionnel au cube du grand axe de son orbite. Cette loi sera un élément déclencheur chez Newton. À partir d'elle, il construira sa mécanique.

3.2.3 Un monde unifié : comètes et supernova

Les systèmes cosmologiques de Copernic et de Kepler se différencient complètement de la cosmologie aristotélicienne. Au-delà du fait de placer le Soleil au centre de l'univers, elles prennent un biais physique tout nouveau, léger chez Copernic, mais beaucoup actif chez Kepler. Les différents corps célestes, la Terre comprise, suivent les mêmes lois. Les néo-aristotéliens s'opposent vivement à une telle unification de l'univers. On avait écrit tant de choses sur la nature parfaite des corps célestes, au-delà de la Lune.

Différents événements viendront soutenir la vision nouvelle. Dans la première décennie du XVII^e siècle, il y aura les observations faites par Galilée à l'aide de sa lunette. Mais, trente ans auparavant, les corps célestes eux-mêmes avaient fait entendre leur voix.

En 1572, une supernova apparaît dans le ciel. Elle brille pendant 18 mois. Au cours de la période pendant laquelle elle est la plus brillante, on la voit même en plein jour. C'est la consternation. Se pose alors une question cruciale. La nouvelle «étoile» est-elle un corps céleste ou avons-nous affaire à un phénomène sublunaire? Pour les tenants d'Aristote, la réponse est claire. Il s'agit nécessairement d'un phénomène sublunaire. En effet, la nouvelle «étoile» est imparfaite. Elle est apparue et puis elle est disparue. Elle ne participe donc pas à la nature parfaite des corps célestes. Cependant, les plus sceptiques demandent plus qu'une telle preuve a priori. Un critère semble toutefois acceptable pour tous. Les étoiles ne bougent pas les unes par rapport aux autres. Si on réussit à montrer que la nouvelle «étoile» ne bouge pas, on aura montré qu'elle appartient au monde céleste. Tycho Brahé, à l'aide de ses instruments sophistiqués, montre sans équivoque que la nouvelle «étoile» ne bouge pas. La cosmologie officielle de l'époque est ébranlée. Comble de malheur pour elle, quelques années plus tard, en 1577, une comète fait son apparition. La comète se déplaçant clairement parmi les étoiles, il ne pouvait être question d'employer le critère utilisé pour la supernova de 1572. C'est donc par un calcul de la parallaxe que Tycho montre que la comète est au moins six fois plus éloignée de la Terre que ne l'est la Lune. La comète est donc elle aussi un corps céleste. La cosmologie aristotélicienne, dans laquelle les comètes étaient perçues comme des phénomènes atmosphériques, prend un autre coup.

3.3 La tradition magique (néoplatonicienne)

3.3.1 Le traditionalisme des universités

Les universités, fondées au XIII^e siècle dans la foulée de la redécouverte d'Aristote, sont devenues les piliers de la doctrine scolastique. Le poids de la tradition s'y fait particulièrement

sentir. Mais la clientèle des universités devient plus jeune. Il faut alors songer à préparer adéquatement ces jeunes de 16 ou 17 ans qui n'ont pas encore tout à fait la maturité intellectuelle pour entrer directement dans les trois facultés traditionnelles, la Faculté de théologie, la Faculté de droit et la Faculté de médecine. On fonde pour ce faire la Faculté des Arts. Les exigences de l'enseignement amènent les professeurs à s'intéresser à la structure des connaissances auxquelles ils doivent introduire leurs étudiants. Peu à peu, ils remettent en cause les interprétations traditionnelles. L'enseignement de la philosophie dans la Faculté des Arts provoque la séparation de la philosophie d'avec la théologie. Ainsi se relâche peu à peu l'identification du système aristotélicien à la philosophie religieuse catholique, un des éléments qui accentuait la résistance au changement et à la contestation. L'indépendance croissante de la philosophie permet le développement d'une autonomie retrouvée et d'une vitalité nouvelle.

Malgré ces développements, l'université demeure globalement réfractaire aux sciences. Certes, au XVI^e siècle, des chaires scientifiques sont fondées dans certaines universités, surtout celle où la Faculté de médecine est influente. Toutefois, l'enseignement des sciences est marginal et encore profondément influencé par les sciences aristotéliciennes. Les mouvements intellectuels où germe la Révolution scientifique évolueront à l'extérieur des universités. Les académies dont nous parlerons plus loin seront un terrain beaucoup plus fertile pour l'éclosion de nouvelles idées.

3.3.2 Redécouverte des textes originaux

La prise de Constantinople par les Turcs en 1453 provoque l'émigration des intellectuels byzantins vers l'Italie. Certains emportent avec eux des manuscrits qu'ils vendront à des mécènes italiens. La bibliothèque du Vatican possède encore nombre de ces manuscrits. L'influx de manuscrits grecs, qui ne sont pas issus de traductions successives, permet aux Européens d'avoir maintenant accès à des textes d'auteurs grecs qui n'ont jamais été traduits. Il est de la sorte possible de comparer ces textes aux textes arrivés antérieurement en Europe par la filière arabe et ayant fait l'objet de plusieurs traductions. Ce travail de comparaison développe chez les scolastiques de nouvelles habiletés comme celle de regarder un texte non pas comme l'expression d'une vérité incontestable mais plutôt comme la manifestation de l'état de la pensée à une époque donnée. Savoir s'éloigner d'un texte pour mieux l'analyser, pour en regarder non seulement le contenu mais aussi la structure, voilà une habileté qui caractérisera les humanistes. Bientôt, ils voudront eux-mêmes imiter les anciens aussi bien dans leur langue parlée que dans leurs écrits. Le moment où ils dépasseront les Grecs est proche.

Un autre phénomène, technologique celui-là, vient aussi bouleverser le monde intellectuel. L'invention¹³ de l'imprimerie par Gutenberg, vers 1440, révolutionne la façon dont les connaissances se diffusent. Les conséquences de l'imprimerie sont multiples et très importantes. D'une part, le livre devient accessible à un beaucoup plus grand nombre, même si, de fait, il reste un objet de luxe. Toutefois, comparativement au prix des manuscrits, le prix des livres les rend abordables à une bonne partie de l'élite. D'autre part, la facilité relative avec laquelle il est possible de publier un livre permet la diffusion rapide d'idées nouvelles. L'uniformité entre les

¹³ Les Chinois connaissaient l'imprimerie plusieurs siècles avant que Gutenberg ne l'invente à nouveau. Voir Needham, Joseph, *La science chinoise et l'Occident*, Collection Points (S9), Paris, 1973, au début de la section III du chapitre 2, p. 61 note 4.

textes assure que les différentes copies d'un même livre renferment toutes le même contenu. L'accès à des textes uniformes permet un niveau de discussion plus élevé qu'auparavant. Même au niveau de l'enseignement, le livre, accessible à certains étudiants, oblige les maîtres à plus de rigueurs.

L'Europe connaît après 1500 une explosion dans tous les domaines intellectuels. Le livre imprimé participe grandement à la création d'un environnement favorable à une telle effervescence.

3.3.3 Les académies¹⁴

Platon fondait en 387 av. J.C. son école qu'il appelait l'Académie. Aux XV^e et XVI^e siècles, dans les milieux italiens qui remettent à l'honneur une philosophie néoplatonicienne, des groupes de discussion se forment. Pour bien marquer leur filiation intellectuelle, ils se donnent le nom d'Académie.

Le nombre d'académies augmente rapidement. Même si, dès le début, les sujets qui intéressent les membres des académies sont très diversifiés, on ne considère pas particulièrement importantes les sciences. Léonard de Vinci est un bon exemple d'un homme de sciences qui fréquente les premières académies. Intéressé à toutes les branches du savoir et en particulier aux techniques, il dépense son énergie et développe ses talents aussi bien en peinture que dans les techniques de construction de machines et même en architecture. Un peu secret, il n'exhibe pas toutes ses connaissances. Ses cahiers de notes sont écrits d'une écriture qu'il faut déchiffrer à l'aide d'un miroir. Comme les pythagoriciens, il y a chez lui un désir d'embrasser l'univers dans son entier.

Les académies sont importantes dans l'évolution du paysage intellectuel de la Renaissance. On y discute d'idées qui ne sauraient l'être dans le cadre aristotélien des universités. C'est dans les académies que les humanistes commencent à réfléchir sur les textes anciens et la façon de les traiter, et de les imiter. Au cours du XVI^e siècle, une partie des connaissances et des habiletés intellectuelles développées dans les académies sera intégrée à l'enseignement universitaire, surtout dans la Faculté des Arts. Les sciences n'en feront toutefois pas partie.

Après 1600, certaines académies deviennent de véritables centres de recherche et de discussion en sciences. Ainsi, à Rome, l'*Academia dei Lincei*, dont Galilée devient membre en 1611, acquiert une réputation et un statut qui se compare à ceux des universités.

Les académies profitent aussi de leur place particulière dans le paysage politique italien de l'époque. Le pape est à la fois un chef spirituel et un chef d'état. Les autres pouvoirs politiques de l'Italie ne sont pas mécontents de voir se développer un contre-pouvoir à la philosophie religieuse de l'Église et donc, par voie de conséquences, au pape. Il ne faut pas interpréter cette opposition comme une opposition religieuse comme telle. Au XVI^e siècle, les hommes sont profondément chrétiens. Les académies sont, dans le contexte de la lutte politique pour la

¹⁴ Voir Ben David, Joseph, *The Scientist's role in Society*, Englewood Cliffs, N.J: Prentice-Hall, 1971, chapitre 4.

division du pouvoir en Italie, une carte parmi d'autres. Toutefois, elles profitent de la conjoncture. La multiplication de ces centres intellectuels assure dans un premier temps la survie et la diffusion des idées néoplatoniciennes de la Renaissance.

3.3.4 La Réforme

Le XVI^e siècle n'est pas seulement le siècle des académies. Il est aussi le siècle de la Réforme. Dans les années 1520 et 1530, Martin Luther, en Allemagne, puis Jean Calvin, dans les pays francophones, s'opposent à un certain nombre de points de la doctrine catholique. Entre autres, ils rejettent la prétention de la hiérarchie catholique, et donc du pape, d'être l'unique autorité qui puisse interpréter la Bible. Les protestants soutiennent que chacun peut lire la Bible pour y trouver, selon sa propre lecture, le message que Dieu y a placé.

Avec la Réforme, la religion donne une place importante à l'homme en tant qu'individu, contrairement à la religion du Moyen Âge qui voyait le fidèle davantage comme un élément intégré dans le grand corps de l'Église. La pensée et les actions des croyants s'orientaient alors vers l'atteinte du mieux-être de l'ensemble et en fin de compte vers la réalisation du plan de Dieu. Nous sommes à l'époque où les peintres, les sculpteurs, les architectes et les artistes signent leurs oeuvres.

La Réforme affaiblit aussi le pouvoir temporel de l'Église. Les différentes églises protestantes s'allient, surtout dans le Nord de l'Europe, à un pouvoir politique qui les soutient. Les idées contraires à l'orthodoxie catholique pourront survivre là où l'Église catholique n'a plus les faveurs des pouvoirs politiques. Les idées contraires aux différentes orthodoxies protestantes pourront survivre là où les états restent dans le giron de l'Église. De ce fait, la pensée néoplatonicienne profite de la Réforme, même si les autorités protestantes n'ont guère de sympathie pour elle.

3.3.5 Paracelse (1493, 1541) : "L'oeuvre au Noir"¹⁵

Paracelse est un nouveau type de médecin. Il est un exemple de ce que furent certains de ces néoplatoniciens. Son souci d'établir la médecine sur une base expérimentale s'associe chez lui à des envolées mystiques. Autant il s'oppose à des traitements pour lesquels aucune justification de leur effet thérapeutique ne peut être apportée, autant il croit au succès éventuel de l'alchimie dans sa recherche de la pierre philosophale et de l'élixir de vie (fontaine de Jouvence).

Paracelse, de son vrai nom Théophrastus Bombastus von Hohenheim, naît dans la famille d'un médecin et alchimiste renommé. Au cours de ses études de médecine à l'université de Bâle, il change de nom pour prendre celui de Paracelse, nom qui veut dire «meilleur que Celsus», un

¹⁵ Je fais référence ici à *L'oeuvre au noir* de Margerite Yourcenar, dont le personnage principal, Zénon, ressemble un peu au héros de cette section.

médecin romain (vers -10) qui était associé alors à la tradition de Galien et qu'on disait être le Cicéron de la médecine. À la suite de ses études, il travaille dans des mines où il se familiarise avec les propriétés des substances minérales. En 1516, il entreprend un long voyage qui le mène d'abord à Paris, auprès du célèbre chirurgien Ambroise Paré, puis à Montpellier, Bologne, Padoue, en Espagne, au Portugal, en Angleterre, à Constantinople, en Égypte et en Tartarie. Tout au long de son long périple, il accumule des connaissances à la fois très riches et diversifiées sur les traitements de nombreuses maladies. Sa réputation grandit et, finalement, il revient à Bâle où il pratique la médecine qu'il enseigne aussi à l'université. Il n'y passe pas inaperçu. Contraire à la pratique d'alors, il enseigne en allemand et non en Latin, provoquant ainsi la fureur de ses confrères professeurs. La coupe déborde en 1627, lorsque Paracelse organise un autodafé public des livres de Galien et de son grand disciple arabe, Avicenne. Peu après, on le chasse de la ville. Il reprend alors le chemin de l'étranger. Il erre en Europe, menant une vie en général difficile et pleine de danger, jusqu'à sa mort en 1541, à l'âge de 48 ans.

Pour Paracelse, le but premier de l'alchimie n'est pas de trouver la pierre philosophale mais plutôt de mettre au point des médicaments véritablement efficaces. Considérant la vie comme un processus chimique et le corps comme un genre de laboratoire, il croit, et c'est là une nouveauté importante, que les substances minérales peuvent avoir un effet curatif. Ainsi, il développe toutes sortes de médicament à partir de substances minérales telles des sels de mercures, du plomb, des sels de zinc et de cuivre, du soufre, etc. Avec lui, l'alchimie commence à se métamorphoser. Elle deviendra la chimie un siècle et demi plus tard.

Nous avons mentionné l'opposition de Paracelse aux doctrines médicales alors en vigueur. Il condamne la théorie des humeurs d'Hippocrate et la théorie des humeurs telle que modifiée par Galien. Il rejette comme farfelue la théorie des signatures (l'analogie entre, d'une part, le nom et la forme d'une plante et, d'autre part, un organe ou le nom d'une maladie indique que cette plante a des qualités thérapeutiques pour cette maladie ou pour les maladies de ou des organes auxquels la plante ressemble) et la théorie de la sympathie (il existe un lien entre une blessure et l'objet qui l'a provoquée; ainsi pour assurer la guérison complète d'une blessure infligée par une épée, il faut enduire celle-ci d'une substance particulière et la garder en lieu sûr jusqu'à ce que la blessure soit guérie).