

## Chapitre 05 : La science dans la civilisation européenne

### 5-1 Introduction à la période de renaissance en Europe

La Renaissance en Europe (qui commença en Italie), fut une période qui se termina par une véritable révolution scientifique. Des théories tout à fait nouvelles sont apparues, remettant en cause la façon dont l'homme voyait le monde et sa place dans ce dernier.

En fait, ce que l'on appelle couramment la Renaissance commença beaucoup plus tôt en Italie et à Avignon, que dans le reste de l'Europe (ce mot commença seulement à se répandre), et surtout en France, qui resta longtemps affectée par les soubresauts de la guerre de Cent Ans. Dès le XIV<sup>e</sup> siècle (Trecento), on vit des foyers de Renaissance apparaître à Venise, Sienne, Florence, Rome et encore davantage au XV<sup>e</sup> siècle (Bruges et les cités flamandes, Rhénanie, Alsace, Bourgogne, Portugal, Castille, Bourges, etc.).

Les raisons de cette Renaissance sont multiples, comme :

- la redécouverte dès le XII<sup>e</sup> siècle des textes anciens (Aristote) conservés et enrichis par les Arabes (voir Renaissance du XII<sup>e</sup> siècle),
- l'invention du papier (importé de Chine),
- l'invention de l'imprimerie (1453) (également importée et améliorée par Gutenberg) qui permit de diffuser en plus grand nombre des livres (les copies sur manuscrit prenaient du temps) et surtout de publier des livres en langues vernaculaires à la place du latin, donc de propager la culture,
- les progrès en géographie et en cartographie (Pierre d'Ailly et l'*Imago mundi* de 1410, cartes de Fra Mauro en 1457),
- les progrès techniques autour de la navigation (caravelle) et du positionnement (boussole, sextant, etc.),
- l'expansion de l'exploration maritime autour du continent africain (Portugais), puis vers le nouveau monde,
- la naissance du protestantisme et de l'hermétisme qui força l'Église catholique romaine à se remettre en cause, amorçant ce qui sera une séparation de la science et de la religion.

Les progrès scientifiques et techniques de la Renaissance, ainsi que le renouveau dans les autres domaines (art) furent l'une des causes de l'extraordinaire période d'explorations par les navigateurs européens, d'abord portugais, et italiens, puis espagnols et français, qualifiée de grandes découvertes, qui permit à l'Europe de s'assurer la suprématie mondiale.

### 5-2 La révolution scientifique en Europe

Le terme révolution scientifique désigne l'ensemble des progrès scientifiques réalisés aux XVI<sup>e</sup> et XVII<sup>e</sup> siècles. C'est à cette époque que la science occidentale prit son envol et dépassa tout ce qui avait été accompli par les Grecs ou par d'autres civilisations. Nous ferons un survol de ces découvertes non pas de manière chronologique, mais thématique, en commençant par les mathématiques, puis l'astronomie et enfin la mécanique.

L'une des caractéristiques principales de cette révolution scientifique est l'utilisation croissante des mathématiques en physique et la certitude, la précision que les démonstrations mathématiques apportent. C'est l'origine de l'expression sciences exactes pour désigner les sciences physiques et mathématiques. Une autre caractéristique est la plus grande précision des observations, surtout en astronomie. Enfin, la méthode expérimentale y sera progressivement développée, quoiqu'elle n'y atteigne pas la maturité qu'elle aura aux siècles suivants.

#### 5.2.1. La révolution copernicienne

On considère généralement la publication des idées de Copernic, en 1543, comme un point tournant dans l'histoire des sciences. En fait, ce qu'on appelle la révolution copernicienne ne se fit pas en un jour et le système de Copernic, pris à part, n'aurait peut-être pas eu la vie longue s'il n'avait été suivi d'une autre révolution, plus profonde celle-là: l'invention de la mécanique. Dans cette section, nous décrivons sommairement les travaux purement astronomiques de quatre grandes figures de cette époque : Copernic, Tycho Brahé, Kepler et Galilée.

### 5.2.1 Copernic

Nicolas Copernic (1473/1543) vécut la majeure partie de sa vie en Pologne (son pays natal), bien qu'il étudia un temps en Italie (Padoue, Ferrare). Copernic se construisit un petit observatoire à l'aide duquel il mesura les positions des planètes et s'aperçut que la théorie des Ptolémée, décrite dans l'*Almageste*, ne donnait pas des résultats suffisamment précis. Il entreprit alors de construire son propre système du monde. Sa théorie fut publiée l'année de sa mort (on raconte qu'il reçut un exemplaire de son livre imprimé sur son lit de mort), avec le titre : *De revolutionibus orbium cœlestium libri sex* (Des révolutions des orbés célestes, en six livres). Copernic écrivit aussi, vers 1512, un court essai expliquant une version moins développée de sa théorie.

#### Le système de Copernic et ses avantages

Copernic affirme que la Terre est une planète comme les autres, qu'elle tourne autour du Soleil et sur elle-même. Les cercles des planètes autour du Soleil sont, dans l'ordre, ceux de Mercure, Vénus, la Terre, Mars, Jupiter et Saturne. Le Soleil est le centre de l'Univers. Le système de Copernic, dans sa forme simple énoncée ici, présente les avantages suivants par rapport au système de Ptolémée :

- Le mouvement rétrograde des planètes s'explique naturellement, à la fois pour les planètes intérieures (Mercure et Vénus) et les planètes extérieures.
- L'amplitude des rétrogradations des planètes est de plus en plus petite lorsqu'on passe de Mars à Jupiter et à Saturne. Ceci s'explique naturellement dans un schéma héliocentrique, car cette amplitude est reliée au rapport du rayon de l'orbite de la planète à celui de l'orbite terrestre.
- Le fait que Mercure et Vénus ne s'éloignent jamais du Soleil reçoit une explication naturelle. Plus généralement, les coïncidences propres au système géocentrique sont expliquées de manière naturelle.
- Les distances entre le Soleil et les planètes peuvent être calculées à partir des observations (en fonction de la distance Terre-Soleil).
- Les périodes orbitales croissent de manière uniforme quand on passe de l'orbite la plus petite (Mercure) à la plus grande (Saturne) et les étoiles. Ceci semble naturel à Copernic, car plus l'orbite est longue à parcourir, plus la période doit être longue.

### 5.2.2. Tycho Brahé

L'astronome danois Tycho Brahé (1546/1601) est l'une des figures les plus pittoresques de l'histoire de l'astronomie. La contribution essentielle de Tycho est l'utilisation d'instruments de mesures très précis dans l'observation des planètes, observations qui permirent à Kepler d'énoncer ses trois lois. Tycho avait reçu du roi du Danemark la souveraineté de l'île de Hveen pour y construire un observatoire qu'il appela *Uraniborg* (la ville des dieux). Tycho y fabriqua des appareils de mesure beaucoup plus précis que tout ce qui avait été fait auparavant : ses instruments en métal – toujours destinés à guider l'œil. Le but de Tycho était de construire des tables astronomiques (éphémérides) fiables, car il savait bien que celles dont il disposait auparavant (calculées d'après Ptolémée) ne l'étaient pas assez. Tycho procéda à des observations systématiques pendant environ vingt ans, d'une nuit à l'autre, continuité au moins aussi importante que la précision de ses mesures. On peut dire que Tycho est le pionnier de la précision des mesures. On doit à Tycho des observations importantes qui ont fait voler en éclats les conceptions de l'époque sur les "sphères célestes". En 1572, il observa systématiquement une nova, c'est-à-dire une étoile nouvelle qui apparut soudainement, surpassa en éclat Vénus même (l'astre le plus brillant du ciel après le Soleil et la Lune) et disparut progressivement en 1574. On sait aujourd'hui que les novas sont le résultat d'explosions d'étoiles parvenues, dans leur évolution, à un certain seuil d'instabilité

### 5.2.3. Kepler

Johannes Kepler (1571/1630) fut engagé par Tycho Brahé comme assistant en 1600, peu avant la mort de ce dernier. Il hérita des données de Tycho et obtint le titre (et la pension) de "mathématicien impérial" qui lui permit de poursuivre ses recherches.

Peu avant la mort de Tycho, Kepler se mit à étudier les observations de celui-ci sur le mouvement de Mars et cette étude se prolongea plusieurs années. Il trouva une différence de 8 degré entre les positions observées et les prédictions basées sur la théorie de Copernic améliorée, toujours basée sur des épicycles. Cette différence, ainsi que la confiance qu'il avait en les mesures de Tycho, le forcèrent, après quelques péripéties non exemptes d'erreurs se compensant mutuellement, à conclure que les planètes ne suivent pas des orbites circulaires avec épicycles, mais des orbites elliptiques. Il formula ses deux premières lois dans son *Astronomia Nova*, en 1609:

1. Les orbites des planètes sont des ellipses dont le Soleil occupe un des foyers.
2. Si on trace un segment de droite entre le Soleil et une planète, ce segment de droite balaye des aires égales en des temps égaux.

En 1618, Kepler publie sa troisième loi, qui stipule que le rapport du carré de la période  $T$  d'une planète sur le cube du demi grand axe  $R$  de son ellipse est une constante, la même pour toutes les planètes :

$$(T^2/R^3)=\text{Constante}$$

Il s'agit, comme pour les deux premières, d'une loi empirique, fondée uniquement sur l'observation. Les trois lois de Kepler seront plus tard démontrées théoriquement par Newton sur la base de la gravitation universelle et de la mécanique.

Vers la fin de sa vie, en 1627, Kepler publia les *tables rudolphines*, éphémérides basées sur ses trois lois et dédiées à John Napier, car l'usage des logarithmes en facilita grandement le calcul. Ces tables seront utilisées par les astronomes pendant un siècle. Kepler y prédit avec succès les passages de Mercure et de Vénus sur le Soleil : le caractère prédictif de la science commence à être plus assuré.

### 5.2.4 Galilée

Galileo Galilei (1564/1642) (ou Galilée) est, avec Newton, la plus grande figure de la révolution scientifique. Nous verrons dans la section suivante comment il a été l'initiateur de la mécanique classique. Pour le moment, c'est sa contribution en tant qu'astronome qui nous intéresse.

Galilée était professeur à l'Université de Padoue (dans la république de Venise) au moment de ses découvertes; le fait mérite mention car la plupart des scientifiques importants de cette époque n'étaient justement pas professeurs d'université!

En 1604, Galilée observa lui aussi une nova, comme Tycho en 1572, et parvint aux mêmes conclusions, c'est-à-dire que cette étoile nouvelle n'appartenait pas au monde sublunaire et que les cieux étaient donc sujets à changement. Sa plus grande contribution à l'astronomie survint en 1609, quand il construisit une lunette astronomique (télescope à lentilles) et qu'il la pointa vers les cieux. Galilée n'est pas l'inventeur de la lunette, mais il entendit parler de cet instrument mis au point indépendamment par plusieurs artisans dans les années qui précédaient et pu en construire un à partir des descriptions qu'il en reçut. Il décrivit ses observations dans *Sidereus Nuncius* (le messager des étoiles):

- Il observa des montagnes et des plages sombres sur la surface de la Lune. Il remarqua que les sommets de ces montagnes étaient éclairés même si leur base se trouvait dans la zone d'ombre de la Lune. Il conclut aussi que la lumière cendrée observée quand la Lune est un mince croissant est un éclairage causé par la lumière solaire réfléchiée sur la Terre (clair de Terre).
- Il découvrit un grand nombre d'étoiles nouvelles : 80 étoiles dans le baudrier d'Orion au lieu des 9 connues alors.
- Il découvrit que Vénus présente des phases, comme la Lune, ce qui prouve hors de tout doute possible qu'elle est éclairée par le Soleil, n'émet pas de lumière propre et qu'elle tourne autour du Soleil.
- Il découvrit 4 petites étoiles mobiles qui se tenaient à proximité de Jupiter et en conclut qu'il s'agissait de satellites de cette planète (Io, Callisto, Europe et Ganymède) comme la Lune est un satellite de la Terre.
- La vision de Saturne l'intrigua. Sa lunette n'ayant pas une résolution suffisante, il ne pu distinguer les anneaux de cette planète. Il eut l'impression que Saturne était divisée en trois parties : "J'ai observé la plus haute planète et je l'ai trouvée triple!"
- Il observa des taches sur la surface solaire, ce qui contredit la notion de perfection et de pureté qui entoure cet astre.

Pendant ce temps, l'église catholique (plus précisément, le Saint-office), déclara "impie" la doctrine qui place le Soleil au centre du monde. Galilée poursuivit ses recherches et publia *Il Saggiatore* (L'essayeur) (1623) dans lequel il soutient énergiquement ses idées coperniciennes. Malheureusement, il atteignit aussi la Sainte Inquisition, qui intenta un procès à Galilée. Après 21 jours de procès, un tribunal de sept cardinaux déclara :

Galilée du signer la formule d'abjuration et fut condamné à la réclusion perpétuelle dans sa maison d'Arcetri. Il y mourut le 8 janvier 1642. La légende raconte qu'immédiatement après avoir juré que le système de Copernic était faux et que la Terre était immobile, il dit tout bas : "et pourtant, elle tourne. . ."

## Les travaux de Galilée

### La chute des corps

Ainsi, Galilée montre, par expérimentation, que deux objets de masses différentes atteignent le sol pratiquement en même temps lorsque relâchés du haut d'une tour.

### Le mouvement uniformément accéléré

En pratiquant une expérience sur un plan incliné, Galilée arrive à la conclusion que les distances parcourues en des temps égaux augmentent linéairement, ce qui implique que la distance totale parcourue est proportionnelle au carré du temps écoulé : c'est la description d'un mouvement uniformément accéléré. De même, la vitesse finale est proportionnelle au temps de chute, résultat déjà obtenu par Nicole Oresme trois siècles plus tôt.

### Le principe d'inertie

Galilée imagine aussi qu'un corps en mouvement sur une surface plane garde une vitesse et une direction constantes si on néglige la résistance de l'air et le frottement. C'est là le principe d'inertie, aussi connu sous le nom de "principe de Galilée", mais Galilée ne l'énonça jamais dans toute sa généralité. En fait, Galilée ne pu imaginer un objet non soumis à la force de gravité, et ignorait la notion de force centripète.

### La composition du mouvement

Enfin, Galilée décrit correctement la composition du mouvement : sachant qu'un objet en roulement sur un plan se déplace à une vitesse constante et sachant qu'un objet relâché d'une certaine hauteur tombe avec une accélération uniforme, il conclut que le mouvement d'un objet qui, par exemple, roule sur une table jusqu'à son extrémité et tombe ensuite dans le vide suit une trajectoire parabolique : son mouvement peut être décomposé en mouvement horizontal, toujours uniforme en vitesse, et en mouvement vertical, uniformément accéléré. Les deux mouvements, "en se mélangeant, ni ne s'altèrent, ni ne se troublent, ni ne s'empêchent mutuellement".

#### 5.2.5. Descartes

L'héritage de René **Descartes** est mitigé. Ses travaux mathématiques et sa conception d'un Univers gouverné par des lois physiques rationnelles sont dignes d'admiration et ont eu une énorme influence jusqu'à ce jour. Par contre, ses travaux particuliers sur la mécanique et la physique sont décevants, en particulier si l'on songe à l'influence, plutôt mauvaise que bonne, qu'ils ont eue dans les décennies qui ont suivi leur publication.

La physique de Descartes La physique de Descartes, ainsi que son système du monde, est exposée dans *Principia philosophiae* (les principes de philosophie), publié en 1644. Les idées de Descartes à ce sujet sont plus anciennes, mais il jugea prudent d'en retarder la publication, suite au procès de Galilée.<sup>20</sup> Dans cette oeuvre, Descartes explique un système du monde complet. Comme mentionné plus haut, sa vision est essentiellement mécanique : l'univers est une gigantesque machine qui fonctionne d'elle-même, du seul fait des lois du mouvement des corps. Même les animaux et l'être humain sont, en quelque sorte, des automates. Nonobstant les intuitions souvent radicalement modernes de Descartes, ce dernier se trompe généralement quant vient le temps de décrire en détail

#### 5.2.6. Huygens

Christian Huygens (1629/1695) figure parmi les trois plus grands physiciens du XVIIe siècle, avec Galilée et Newton. Huygens, Hollandais, s'installa à Paris sous l'invitation de Colbert et y résida jusqu'à ce que la révocation de l'édit de Nantes (1685) le force à retourner en Hollande (il était protestant). Au départ, Huygens était partisan des idées de Descartes, mais il changea progressivement d'opinion. Ses principales contributions sont exposées dans *Horologium Oscillatorium* (Le pendule oscillant, 1673), dans son *Traité de la lumière* (1690) et dans *De motu corporum ex percussione* (lois du choc de corps, 1669).

Les principales contributions de Huygens sont :

- La théorie des collisions (choc des corps). La *Royal Society* de Londres ouvre un concours en 1666 pour la découverte des lois régissant les collisions. Huygens en donne la solution la plus complète. Il se concentre sur le cas de deux objets de même masse. Le point de départ de son analyse est : § Le principe d'inertie. § Le fait évident que deux corps de masses égales qui entrent en collision directe (frontale) rebondissent dans la direction opposée en conservant chacun sa vitesse. § Le principe de relativité : on peut examiner une collision à partir de plusieurs référentiels, sans que les lois qui

la régissent en soient modifiées. Ainsi, on peut toujours se déplacer dans le référentiel du centre de masse (ou centre d'inertie) des deux corps.

Les travaux de Huygens supplantent donc les conceptions erronées de Descartes. Il traite aussi du cas de corps de masses inégales dans *De motu corporum ex percussione*.

- La conservation de l'énergie mécanique. Ce qu'on appelle les *forces vives* à l'époque est en fait l'énergie cinétique (modulo un facteur 2 par rapport à la définition actuelle). Huygens montre que les forces vives sont conservées dans une collision élastique (sans altération des corps) et que le centre de masse d'un pendule, après une oscillation, remonte aussi haut qu'il était au départ, sauf pour l'effet de la résistance de l'air.
- La compréhension du mouvement circulaire et la notion de force centrifuge. Huygens est mené à ce concept par ses travaux sur les horloges et le pendule conique. Il se place dans un référentiel tournant et affirme que, de ce référentiel, la force centrifuge apparaît aussi réelle que la gravité.
- La théorie de la propagation des ondes, en particulier appliquée à la lumière. Nous reviendrons sur ce point ultérieurement.
- L'amélioration de la lunette, par l'utilisation de trois lentilles. La découverte des anneaux de Saturne et de son satellite Titan. La conception des étoiles comme des Soleils éloignés.
- La mise au point d'horloges à pendule précises, en particulier du pendule isochrone.

### 5.3.5 Newton

Isaac Newton (1642/1727) est placé très haut, sinon au plus haut rang, dans le temple de la renommée scientifique. Il a lui-même affirmé que s'il avait accompli beaucoup, c'est parce qu'il s'appuyait sur les épaules de géants. Newton attribue même à Galilée la paternité de ce qu'on appelle les "deux premières lois de Newton": le principe d'inertie et  $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$ . En fait, Newton est trop généreux sur ce dernier point, même s'il est incontestable que Galilée eut une énorme influence sur lui. Il fut même influencé par Descartes, quoiqu'il en fût plus tard.

#### Les lois du mouvement

Dès le premier chapitre, Newton énonce les trois lois suivantes :

1. Tout corps persévère dans l'état de repos ou de mouvement uniforme en ligne droite dans lequel il se trouve, à moins que quelque force n'agisse sur lui, & ne le contraigne à changer d'état.
2. Les changements qui arrivent dans le mouvement sont proportionnels à la force motrice, & le sont dans la ligne droite dans laquelle cette force a été imprimée [ $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$ , en langage moderne].
3. L'action est toujours égale et opposée à la réaction; c'est-à-dire, que les actions de deux corps l'un sur l'autre sont toujours égales, & dans des directions contraires.

Newton définit la masse comme quantité de matière et la quantité de mouvement comme le produit de la masse par la vitesse. Il considère à la fois l'espace et le temps comme absolus.

#### La gravitation universelle

La plus grande réussite des Principia est la théorie de la **gravitation universelle**, selon laquelle deux corps de masses  $m_1$  et  $m_2$  exercent l'un sur l'autre une force d'attraction dirigée le long de la droite qui joint les deux corps et proportionnelle au produit de leurs masses et inversement proportionnelle au carré de la distance qui les sépare :

$$F = G (m_1 m_2) / r^2$$

L'adjectif "universelle" signifie que la force de gravité s'applique à tous les corps, terrestres ou célestes. Il n'y a plus de distinction entre mécanique terrestre et mécanique céleste : les mêmes principes fondamentaux s'appliquent partout.