

Histoire des sciences

Pierre Marage

Notes originales de Markus Lindström
Dactylographié par Kevin Salvesen

1 Introduction

L'histoire des sciences ne consiste pas à survoler le temps de victoires en victoires. Nous nous mettons dans la peau des savants d'époques pour mieux apprécier le contexte de leur découvertes ainsi que leurs idées fausses. Remarquons que la compréhension de quelque chose consiste à savoir réfuter une opinion contraire. Il est important de s'intéresser à ces dernières également.

Nous passerons par l'ère "grecque", le Moyen-Âge (qui verra apparaître les sciences déductives). Avec Galilée, on verra deux grands concepts émerger : les mathématiques et l'expérimentation. Expérimenter est l'art de poser des questions, d'interpeler la Nature sur des choses auxquelles elle peut répondre.

Après la déduction viendra l'art de l'induction, dont le porte-parole est F. Bacon (philosophe anglais), puis la méthode hypothético-déductive qui consiste à émettre des hypothèses, en déduire des conséquences, puis tester ces dernières par expérimentation, qui valide ou invalide l'hypothèse.

Karl Popper, du cercle de Vienne, a critiqué ce modèle car il ne permet pas de valider une théorie, et déplace la question en se demandant ce qu'est vraiment une théorie. Qu'est-ce qui fait que la science se distingue des autres savoirs ? (ex. théologie, astrologie) Il dira le falsificationnisme : on peut réfuter une théorie scientifique, ce qui n'est pas le cas des autres savoirs. Comment réfuter ? On pourrait dire par l'expérimentation, mais c'est une procédure relativement lourde.

L'idée de pouvoir falsifier une théorie est sympathique, mais insuffisante. On a ensuite eu à faire au mouvement de Thomas Kuhn "La structure des révolutions scientifiques"), qui a encore déplacé la question. Kuhn nous invite à regarder comment se fait la science, comment les scientifiques créent leurs objets. C'est dans cette optique que nous verrons ce cours. Kuhn voit deux périodes dans l'histoire des sciences : la science normale, et les périodes de révolution scientifiques qui donnent naissance à une nouvelle ère de science normale.

Un exposé d'histoire des sciences s'intéresse bien entendu qu'aux révolutions. Ces révolutions arrivent quand la science normale courante se retrouve en difficulté face à certaines choses. Kuhn voit une science normale basée sur un paradigme (ie. une "tradition") : **Kuhn dit qu'un paradigme ("vision du monde") et non seulement un ensemble de grandes théories, mais également des pratiques : les expériences fondatrices (ie. prisme de Newton, Darwin au Galapagos).**

La science a quelque chose de miraculeux en ce qu'elle permet de produire des résultats vérifiables dans la Nature.

Parfois, il suffit de quelques personnes qui se posent des questions apparemment anodines pour lancer une révolution. Par exemple, Einstein remet en question la vitesse infinie de la lumière de Newton, et abouti alors à la révolution de la relativité.

Le passage d'une révolution à la science normale passe par la notion de communauté scientifique, de consensus. Planck dit que les vieilles idées meurent avec ceux qui les défendent. Le passage d'un paradigme à l'autre est donc un phénomène entièrement sociologique.

L'histoire des sciences s'intéresse très fort aux aspects sociologiques, mais quelque part subsiste la nature. Le post-modernisme est l'école qui s'intéresse avant tout à l'aspect sociologique. Il y a aussi le relativisme : l'idée que la science n'est que relative.

2 La Grèce antique

Où commence notre épopée ? Nous allons commencer dans les environs de la Grèce antique, véritable berceau de la science. Nous allons aussi parler des 4 grands empires fluviaux : l’Égypte, la Chine, la Mésopotamie et les civilisations de l’Indus.

C’est probablement les **Sumériens en Mésopotamie qui ont inventé l’écriture**, alors cunéiforme sur des plaques d’argile. La langue sumérienne s’est perdue, mais l’écriture resta et fut reprise notamment par les Babyloniens. Une grande partie de ce qu’on sait des Sumériens est du domaine de l’astrologie et de la médecine (“tu t’es cassé le bras, alors implore tel dieu...”). Quelque part, leur volonté de pouvoir prédire et un signe de science.

Ils avaient des présages bizarre, du genre “si une femme a un fils, alors... si elle en a deux, alors...”, sur forme de listes. On retrouve ces listes dans un domaine plus scientifique : des résultats de mathématiques, de “recettes” dont des racines carrées, de choses qui ne sont parfois clairement sans aucun rapport aux besoins de la vie quotidienne. Les scribes ont donc l’aire de s’être amusés à faire des calculs supplémentaires pour l’amusement. Ces tablettes se retrouvaient chez les Babyloniens.

Les Babyloniens ont également accumulé des savoirs sur l’astronomie : elle leur permettait de faire des prédictions de type astrologique. **C’est une attitude active envers la Nature.**

Le point phare de la science occidentale est la Grèce antique. Notons que cette Grèce ne correspond pas à la Grèce moderne, mais contient l’Asie mineure et s’étend jusqu’au sud de l’Italie. Cette Grèce est structurée en cités indépendantes qui se donnent un pouvoir politique à caractères variés (royautés, oligarchies, démocraties...). Contrairement aux Perses, qui obéissent à leur Empereur, les Grecs avaient une dimension argumentative importante, puisque les citoyens discutaient ensemble de matières politiques.

L’aspect abstrait de l’alphabet grec et l’invention de la monnaie (au VII^{em}-VI^{em} siècle av. JC) marque un passage par **l’abstraction**.

Sur ce canevas apparaissent des penseurs en Asie mineure avec une **approche rationnelle de la Nature** (où les dieux ne se mêlent pas de celle-ci, les orages ne sont par exemple pas produits par ceux-ci). Parmi ceux-ci, on trouve notamment **Thalès de Milet** (725-650 av. JC, à peu près en même temps que Confucius et Zarathushtra). Thalès voulait décrire la nature selon un principe unique : le principe de l’eau. La Nature entière reposerait sur ce dernier. Héraclite parlera du principe du feu.

Cette première catégorie de penseurs sont appelées **physiologues ioniens**. Ils se demandaient ce qu’est l’être, le mouvement et le savoir. Ils vont développer une ontologie (*être*) et une épistémologie (*savoir*).

Pythagore, devant la simplicité de l’approche des physiologues ioniens voit le monde en termes de mathématiques. Il développera par exemple un lien entre ce qui est beau (*sacré*) et les mathématiques. Il créera une véritable mystique des nombres qui donnera naissance à une école / secte qui commencera à différencier nombres pairs et impairs, nombres carrés et triangulaires. Pythagore aura un problème : sa secte maniait les nombres rationnels, mais butera sur un nombre irrationnel tel que $\sqrt{2}$. Les nombres irrationnels causeront l’écroulement des mathématiques grecques.

Pythagore fera également une démonstration rigoureuse du théorème de Pythagore. C’est à partir de ce moment là que la science sera forcée à adopter **la méthode de la démonstration**.

La Mésopotamie, pour rappel, voit la naissance de l’agriculture et l’élevage. La différence entre les mathématiques mésopotamiennes et grecques est que ces dernières avaient introduit la rigueur par le biais de démonstrations. C’est en **Grèce que la pensée rationnelle apparaît**. Vers 500 av. JC, en Sicile, naît une nouvelle école de pensée avec Pythagore, qui étudiera notamment les sons harmonieux (il entend des marteaux au son agréables dans une écurie). Pythagore apporte la rigueur mathématique sous la forme de la démonstration. Mais les Dieux se vengent en montrant qu’il existe des nombres irrationnels, c’est ce qu’on peut appeler **la crise des irrationnels**.

Une autre école posera la question de l’être et du néant : l’école de **Parménide**, dont il ne reste plus d’écrits originaux. Il ne reste que des citations faites pas des philosophes ultérieurs comme Platon. Cette école étudie l’ontologie, et par extension le mouvement et sa diversité. Parménide définit l’être comme quelque-chose qui existe, et le non-être / néant n’existe pas.

Cette définition a plusieurs corollaires : l’être est éternel, il a toujours existé, et existera toujours. De plus, le mouvement est impossible, car si l’être bouge, il n’est plus à sa position initiale, et laisse derrière

lui le vide. Le modèle de Parménide lance une richesse de discussion, mais surtout il lance une question discutée encore aujourd'hui (L'être et le néant, J.P. Sartre).

Zénon d'Élée va illustrer les dires de Parménide, en démontrant que le monde, ou en tout cas le mouvement n'est qu'illusion. Supposons que le temps et l'espace soit infiniment divisibles, et qu'on jette une pierre au mur, elle doit parcourir la moitié, puis la moitié de la moitié... Idem avec Achille et la tortue. Zénon en déduit que le temps et l'espace ne sont pas infiniment divisibles, il y a des "blocs" élémentaires. Zénon dit que dans un tel cas, le mouvement est également impossible (*Paradoxe de la flèche*). Il démontre que le mouvement est illusion. A. Koyré, philosophe moderne, dit que c'est une des questions philosophiques encore non résolues.

Démocrite émet des pensées héroïques : il déclare que le non-être existe, le vide existe, dans lequel circulent des atomes qui composent des organismes complexes. La rencontre des atomes crée la diversité du monde et le mouvement. On appelle cette idée **l'atomisme**.

Les épicuriens veulent atteindre un état de non-souffrance, et n'ont pas peur de la mort. En effet, on n'est qu'atome, quand on meurt, on redevient atomes. Par conséquent, il n'ont pas peur des dieux. On voit donc émerger un **certain athéisme**.

Au IV^e siècle avant JC, il y aura une grande rupture, commençant avec **Socrate et les Sophistes**. au centre de leur pensée, il y a l'Homme. Les Sophistes sont les amis de la sagesse. Socrate n'écrivait pas, il manipulait des idées dans des carrefours, des banquets... Son disciple **Platon** par contre, a énormément écrit. Comment Platon résout-il la question des apories de Zénon ?

Platon introduit **le Réalisme des Idées**. Le triangle qu'on dessine n'existe pas, ce qui existe est l'idée du triangle, et ce qu'on voit ne sont que des reflets du concepts qu'on se fait. Les objets mathématiques sont dans un "autre" monde, ils ne sont pas une création de l'Homme. Sont-ils construits ou sont-ils préexistant en attendant que l'Homme les découvre ? Le monde "réel" selon Platon n'est qu'un reflet du monde des Idées. Dans sa "caverne", Platon dit que le philosophe peut par contemplation atteindre le monde supérieur, et doit régner sur le monde. Platon essaiera de se faire rendre conseiller chez des hommes politiques, manœuvre qui échouera.

Platon fera une académie qui portera un panneau : "*Nul n'entre ici s'il n'est géomètre*". La géométrie est selon Platon, la voie vers la sagesse. Socrate, lui se tue en -400 car il est accusé par Athènes de détourner la jeunesse avec ses idées. Il préfère se suicider plutôt que de s'exiler.

Aristote (-380 à -320) est le précepteur d'Alexandre le Grand. Une fresque de Raphaël dépeint Platon comme montrant le ciel, et Aristote montrant la terre. Aristote est la synthèse de toute la science grecque : il est biologiste, physicien, cosmologue, politicien, linguiste, il s'intéresse à la littérature... Mais il ne connaît pas les mathématiques. Aristote dit que **les mathématiques sont une abstraction du monde** qui nous entoure : on part du concret, et on dégage les principes généraux par abstraction. C'est la pensée qu'Aristote dispensera dans son lycée à Athènes.

Nous allons nous intéresser à **la cosmologie d'Aristote**. Pour lui, la Terre est sphérique et immobile au centre de l'Univers. Les savants grecs savaient depuis le V^e siècle av. JC que la Terre est sphérique, notamment après avoir observé des éclipses de lune. La Terre est immobile, puisqu'on ne sent pas son mouvement. Le monde céleste est immuable, il ne connaît que la mouvement parfait, circulaire et éternel. La Terre est le monde du changement, de la corruption. Il y a des mouvements naturels : vers le haut pour les corps légers, vers le bas pour les corps lourds. Les corps légers sont le monde extralunaire. Il y a des milieux naturels : l'eau pour les mouvements vers le haut, l'air vers bas, et le ciel pour les astres.

Le monde céleste a certaines caractéristiques. La voûte céleste contient les étoiles fixes, et tourne autour de la terre. Il y a d'autres mouvements que les circulaires : ceux des planètes, erratiques. L'astronomie devra expliquer ces mouvements. Aristote expliquera ceci via le modèle des sphères homocentriques d'Eudoxe. La sphère des étoiles fixe ferme l'univers. Ces sphères sont cristallines, matérielles : **le vide n'existe pas**, car cela engendrait des choses impossibles. En effet, dans la physique d'Aristote, les corps se meuvent vers leur lieu naturel. S'il y avait du vide, il n'y aurait pas de direction, pas de haut, pas de bas : le mouvement naturel serait impossible.

Il y a un autre type de mouvement : le mouvement forcé, ou violent. selon Aristote, la vitesse est proportionnelle à la force qui s'exerce sur le corps, c'est le contraire de la physique de l'inertie de Galilée. De même, la vitesse est inversement proportionnelle à la résistance du milieu. Le mouvement forcé dans

le vide est impossible, car dans le vide, il n’y a pas de résistance, le mouvement y serait donc infiniment rapide, ce qui est absurde.

Aristote aura du mal à expliquer pourquoi une pierre, une fois lancée, continue à avancer. Il dira que le vide se ferme derrière la pierre, que de l’air rentre pour empêcher l’existence du vide, ce qui pousse la pierre. On demandera également ce qui se passe si on “tend le bras” hors de la Terre, mais cela n’a pas de sens, car pour Aristote la terre est une sphère sans intérieur ni extérieur, uniquement une surface qui nous renferme.

Aristote, dans son traité de physique et de cosmologie, ne base pas son discours sur l’observation, mais sur des déductions logiques naissant de principes tels la perfection (proéminence de la sphère, du circulaire). Ce système a rencontré des problèmes. Aristote expliquera la variation de luminosité de Mars.

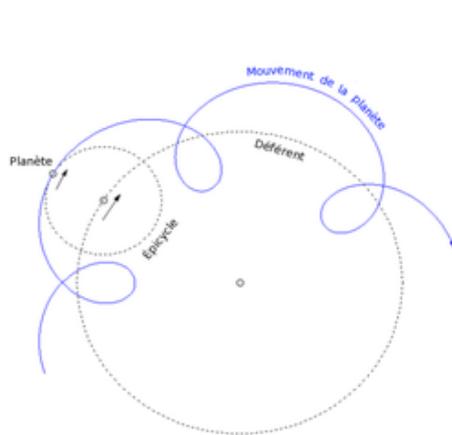


FIG. 1 – Le modèle d’Aristote

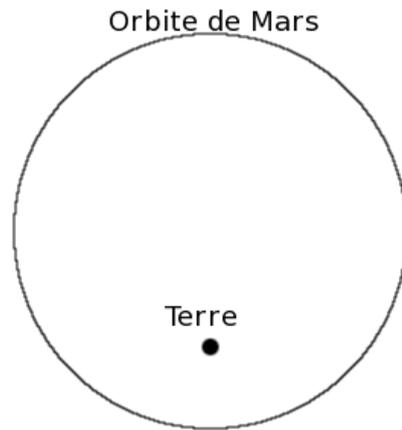


FIG. 2 – Le modèle d’Hipparque

Ptolémée, astronome égyptien (Ier siècle) rajoutera une complication supplémentaire pour expliquer la variation de vitesse angulaire des astres.

La science hellénistique (-III → IV-Vem siècle) née à Alexandrie marquera un revers à la science d’Aristote : elle devient moins matérielle et plus mathématiques : on peut décrire les observations, ce qu’on appelle “sauver les phénomènes”. Ptolémée, un des plus grands astronomes et astrologues de tous les temps, voulait prédire avec précision le mouvement des planètes, ce qui nécessitait une approche mathématique. Le général d’Alexandre, Ptolémée Ier, qui aura le pouvoir en Egypte, voudra trouver la gloire par la gloire scientifique. Il fera édifier la Bibliothèque, ainsi que le Musée, une sorte d’académie où les savants peuvent travailler. **Euclide** y rassemblera le travail mathématique grec, et les synthétisera dans ses “**Éléments**”. Le Musée verra également **Archimède**, mathématicien, physicien et ingénieur (il construira des machines de guerres pour défendre Syracuse des Romains). Selon Archimède, se limiter aux applications pratiques est un esclavage : seule la théorie est la science noble.

Alexandrie devient le centre de la civilisation grecque, même quand elle deviendra romaine. Avec **l’arrivée du christianisme**, on déplace les questions sur le monde vers des questions morales, et au Ve siècle se conclut le travail sur les mathématiques de la science hellénistique, le Musée sera fermé.

Les Romains contribueront peu à la science grecque, ce sont des bâtisseurs, mais pas des scientifiques. L’empire romain se porte de plus en plus sur les religions du salut individuel : les juifs chrétiens, la secte de Mithras... “L’âme, rien que l’âme.” Les catacombes de Rome sont dûes à des grands seigneurs donnant des terrains à cet effet.

La science va s’éteindre progressivement : à Alexandrie, elle prend fin en 140 avec la mort de la mathématicienne Hypathie : devenue la cible des moines chrétiens, elle est assassinée. En Orient, il reste la ville de Constantinople / Byzance, centre de l’empire romain oriental. Il y a peu de contributions scientifiques à Byzance, mais de grands débats en théologie. En 530, l’école de Platon est fermée : les philosophes fuient vers la Perse (approx. Iran / Irak actuels).

3 L'islam

Un ouragan survient dans l'histoire de l'humanité : la révélation de **Mahomet** (en 620) et sa mort (en 630). La prophétie porte sur une religion monothéiste (le christianisme a du mal à expliquer son statut monothéiste vis-à-vis la trinité), mais aussi sur des questions politiques et sociales (les dix commandements).

L'islam naît dans la péninsule arabique, endroit stratégique du commerce avec l'océan Indien et le monde occidental. Mahomet est d'ailleurs issu d'une famille de commerçants. Après sa mort, ses successeurs répandent sa parole à une vitesse fulgurante : **la prise d'Alexandrie en 640, et la 1ere attaque contre Constantinople en 670**. Tout le nord africain est pris avant la fin du VIIe siècle. L'Espagne sera prise plus tard. Les juifs et chrétiens peuvent pratiquer leur religion à condition de payer un impôt assez conséquent, qui mène à une accélération des conversions.

La communauté musulmane sera divisée en deux : les Sunnites et les Chiïtes (fidèle à Ali, beau fils de Mahomet). La dynastie des Ommeyyades va déplacer le centre de gravité de l'islam de la Mecque à Damas, au cœur du territoire conquis. Un coup d'état mettra **la dynastie des Abbassides en 750** au pouvoir, qui mettra la capitale à Bagdad (Babylone).

La civilisation est extrêmement brillante. Les Abbassides vont, en une dizaine d'années, complètement absorber la pensée grecque, la culture scientifique. À Bagdad sera d'abord créée une école de traducteur, **la Maison de la Sagesse**, sous l'égide du calife al-Mamoun.

Il y a un mouvement qui base sa philosophie sur la science. Qu'est-ce qu'il y a de malin avec cette traduction? Il faut noter qu'il n'y a pas de dictionnaire, pas les concepts en Arabes... Les traducteurs doivent comprendre la philosophie avant de la traduire, si le mot n'existe pas, on effectue une translittération. On remplacera des termes par de l'Arabe qui a un sens. Bref, la traduction est un travail colossal. Qui font les traductions? La plupart sont des chrétiens syriaques qui connaissent l'Arabe, le Grec, et la philosophie (car ils appartiennent à des sectes dissidentes cultivant la philosophie grecque). Bagdad est donc tolérante.

Deuxième chose : les botanistes grecs documentaient les plantes, et les Arabes n'avaient pas accès à celles-ci. Ils vont lancer des expéditions.

Notons que les Grecs savaient que la Terre est sphérique, et a une circonférence de 6000 *stade*. Les Arabes vont procéder à de l'expérimentation pour déterminer ce qu'est un *stade*.

Que va créer la civilisation Arabe ?

L'Astronomie : progrès énormes dans les instruments et les mesures, catalysés par la religion. Les 5 devoirs du croyant : l'attestation de foi, la prière, la Zakat, le jeûne du Ramadan et le pèlerinage à la Mecque. Le pèlerinage eut pour effet que l'empire arabe était en constant brassage de population, qui permettait une transmission du savoir. Déterminer le mois du Ramadan était d'importance capitale, notamment si la lune était masquée par des nuages.

La médecine arabo-musulmane restera la médecine de l'Antiquité (les quatre humeurs...) sur le plan théorique. Sur le plan pratique on verra des avancées en ophtalmologie, épidémiologie, etc. et on verra naître des hôpitaux très évolués financés par l'aumône.

Les mathématiques : la civilisation arabo-musulmane importe les chiffres indiens et le zéro. Ils inventent l'algèbre et la trigonométrie (→ astronomie). Il faut savoir que les Grecs travaillaient avec des cordes. Les Arabes travailleront plutôt avec des demi-cercles (→ sinus). Il y aura aussi des avancées en géométrie.

L'(al)chimie : distillation (alambic, alcool).

La physique : on reste sur la physique d'Aristote, malgré quelques tentatives.

Bagdad sera détruite par les Mongols, qui seront arrêtés en Egypte. Après cette destruction, l'empire musulman sera très affaibli, au bonheur des chrétiens. Les Mongols construisent un grand observatoire à Samarkand.

4 L'Occident médiéval

Que se passe-t-il en Occident ? L'empire romain est brisé en deux : Occident et Orient. Au IIIe siècle, des villes seront razzées par des brigands germaniques. On mettra des Germains à la tête des légions romaines : Clovis par exemple. Ces généraux auront envie de renverser l'empereur, et il sera remplacé par un général Visigoth. Les temps instables, le commerce déperit à cause de l'insécurité. Les familles puissantes vont quitter les villes pour partir à la campagne dans leurs villas, pendant que les villes diminuent, les familles vivent en autarcie.

Le mode de vie de l'Antiquité tardive va s'appauvrir : guerres, maladies... Au IXe siècle, des envahisseurs causeront d'énormes dégâts : les Vikings, qui assiègeront Paris entre autres, et le Roi est trop loin. Ceci mènera éventuellement à la féodalisation. **La science est presque inexistante.**

Il y aura un relancement avec un nouveau mode de production d'agriculture. **On passe de l'assolement biennal au triennal.** On découvre les avantages de l'avoine, les chariots, les moulins. Ces découvertes pourront être exploitées par l'industrie et principalement booster l'agriculture. Le redémarrage agricole permet le redémarrage urbain. Au XI-XII siècle, on voit apparaître le chantier urbain : ils lancent le commerce, la culture. C'est à cette époque qu'on voit apparaître les cathédrales.

Le peuple urbain a à manger, on s'intéresse au salut. On mettra des écoles près des cathédrales, la plus éminente étant l'école de Chartres. On y formera les curés, les évêques, les clercs... Remarquons que les paysans sont des païens et vont d'office en enfer. On les évangélisera plus tard.

“L'exile de l'Homme est l'ignorance, son foyer est la Science” : on a une orientation optimiste, on redécouvre la culture, on a soif de savoir. Avant l'an 1000, **l'astrolabe et les chiffres arabes** sont ramenés en Europe. Un flux impressionnant d'occidentaux vont partir dans l'empire arabe pour absorber leur science et la science antique. Au XIIe siècle essentiellement, l'Occident se livre à son tour à un travail de traduction en latin, passant parfois par le castillan (Espagne).

Les textes traduits seront une révélation pour l'Occident. Au XIIe, **Abélard** enseigne au quartier Latin de Paris, et crée **la scholastique** : “la science du oui et du non”. La science est toujours étudiée à titre religieux. La scholastique nécessite le concept d'esprit critique : développement d'une technique pour rétablir le sens vrai du texte traduit. La scholastique est vue en trois parties : syntaxe, logique et rhétorique (trivium) (différent du quadrivium géométrie, arithmétique, astronomie, acoustique).

Cette pensée se concrétisera dans **l'Université médiévale** dont les deux premiers représentants seront Paris et Oxford. (XIIem : Paris : arts et théologie ; Oxford : arts. XIIIem : Montpellier : médecine ; Bologne : droit.)

Rappelons qu'il y a, à cette époque, une effluence de la ville, et donc de la culture. Il y a un grand enthousiasme de la part des intellectuels de redécouvrir les *géants* d'antan, et l'Université médiévale sera le cœur de ces activités.

Il y a des réactions face à cette fascination de la philosophie, de peur d'un éventuel **conflit avec la foi**. Rejet pur et simple de la science pour certains (“Autant de docteurs, autant d'erreurs” ; “marchands de mots”), et on essayera aussi de **discrediter les enseignants** payés pour enseigner.

Thomas d'Aquin écrit en 1265 un ouvrage où il tente **d'unir la foi chrétienne et la pensée d'Aristote**, ce qui n'est pas fait sans mal. D'Aquin va rallier l'église à cette rationalisation de la foi : **la théologie rationaliste**.

Après la mort de Thomas en 1277, l'évêque de Paris va condamner 220 thèses attribuées à des dissidents de l'université, auxquels on reproche d'avoir la double vision des choses. La situation va être désamorcée par **la Papauté, qui va créer sa propre école**.

La science ne peut restreindre la toute puissance de Dieu, c'est une grande question théologique. On va limiter l'engouement pour la science antiques en appliquant le thomisme.

À Oxford, on décrit les phénomènes optiques par les mathématiques. C'est là qu'on comprendra et décrira les arcs-en-ciel. **L'approche mathématique évite les questions difficiles sur la nature du monde.**

Vers les années 1300-1400, l'Université s'encroûte, **la connaissance stagne**. Il y a des problèmes difficiles à la fin du XIVe siècle, notamment **la peste noire** qui va tuer un tiers de la population européenne. Il y a aussi guerre, famine...

5 La Renaissance

Après les années 1450 vient la Renaissance, avec des avancées technologiques comme le système de bielle - manivelle qui va faire exploser le nombre de moulins. C'est **le début de l'âge du métal en Occident**, les débuts de la métallurgie. Des découvertes importantes seront aussi faites dans le domaine maritime (→ commerce augmente à longue distance, découverte du Nouveau Monde, liaison avec l'océan Indien).

Les erreurs de traduction des textes arabes ont causé **une erreur dans la dimension supposée de la Terre**, ce qui était une motivation entre autre pour **l'expédition de Colomb en 1492**. On ramène de l'or depuis les Amériques : **cette monnaie** permet de commercer avec l'Orient sans devoir troquer. La monnaie a dynamisé le commerce très fort. Mais 1492 est aussi une année sombre : massacre des Indiens, chute du dernier royaume musulman en Espagne : la Grenade.

Grand évènement : la Réforme en 1517. Luther affiche ses 95 thèses sur perte d'une cathédrale, dénonçant la corruption de l'Église. **La Réforme de Luther sera propagée grâce à l'invention de l'imprimerie à caractères mobiles par Gutenberg** au milieu du XVe siècle. Ce nouveau moyen de diffusion du savoir va bénéficier non pas aux universitaires encroûtés, mais aux humanistes (Erasmus, de Vinci). Les humanistes manient le Grec, la Latin, l'Hébreu et vont rendre aux textes antiques leur véritable sens en corrigeant les erreurs des copistes. Leur critique philologique va restituer *le Corpus antique*.

Les humanistes vont redécouvrir Platon avec une toute nouvelle fraîcheur, par contraste à Aristote. Dans l'Éloge de la folie d'Erasmus, il critique avec ardeur les universitaires : "*quid si Dieu était une femme, un âne ou une citrouille*". **On rejette l'approche rationaliste dégénérée aristotélicienne, au profit de l'approche poétique platonicienne.**

La Renaissance est économique (ingénieurs, militaires). **De Vinci** est à la fois artiste, il s'intéresse au corps humain, inventeur et ingénieur de profession. Michelange est architecte. Les grands esprits se rencontrent sur les chantiers de la Renaissance, notamment en Italie.

La Renaissance est une **époque de libération, mais assez peu scientifique** (c'est un peu n'importe quoi : monstres, alchimie, astrologie... "Tout est possible", optimisme naïf).

6 La révolution copernico-galiléenne

1543, Année charnière. Deux livres mémorables imprimés :

Vésale sur la fabrique du corps humain, où il décrit ses dissections. Il est **le premier à faire des dissections sur le corps humain**.

Renversement brutal : livre de **Copernic** : Des révolutions des sphères célestes qui place **le soleil au centre de l'Univers**.

Copernic (polonais, 1473-1543). Dans sa jeunesse, il est **en Italie en plein dans la Renaissance**, et sera imprégné de ses valeurs. Il est un excellent astronome fiable. **Le Pape va lui demander de travailler sur un nouveau calendrier** (le calendrier Julien a des problèmes de décalage). **Copernic répond que c'est infaisable**, car les astronomes ne sont d'accord sur rien. **Le système n'est plus harmonieux**, il va le rejeter, et en proposer un nouveau : **le système héliocentrique**.

Le point de départ de Copernic est la complexité impraticable du système de Ptolémée. Il voudra trouver une description plus élégante, sans toucher à la physique d'Aristote.

Ce modèle expliquera notamment plus facilement la proximité de Mercure et Vénus du Soleil, et expliquera de manière naturelle la périodicité du mouvement des planètes : plus elles sont éloignées du Soleil, plus elles mettent longtemps à orbiter. Ceci dit, **le modèle n'est pas plus précis que le ptoléméen**. Copernic utilise encore des orbites parfaitement circulaires, et il sera **forcé à recourir à des épicycles** pour expliquer les mouvements erratiques dues aux orbites en réalité elliptiques. C'est pour cela qu'il attend très longtemps avant de publier sa théorie.

La culture de son temps est héliocentrique (*Roi-Soleil...*) et c'est probablement une influence culturelle qui a poussé Copernic à développer sa théorie.

Réactions à l'ouvrage de Copernic ? Très peu. Le livre en latin est bourré de formules indigestes. Ses idées passent relativement inaperçues. **Luther n'y prête pas attention, dit que Copernic est fou**.

Une préface sera ajoutée au livre de Copernic, non signée, qui sera attribuée de manière erronée à Copernic : *"il suffit que les calculs déduits du système s'accordent aux observations"*. Quelques astronomes utiliseront ce nouveau référentiel, mais il aura peu d'impact, car il est fondamentalement similaire à la problématique du système ptoléméen.

Giordano Bruno, esprit contestataire, très universel, aux positions théologiques inacceptables. Si **la Terre n'est pas le centre du monde, il doit exister d'autres astres avec d'autres Hommes**, qui eux n'ont pas eu le sauveur, le Christ. **L'Univers devient infini**. Bruno est un hérétique religieux, et trouve dans le système copernicien **des arguments pour casser le cosmos d'Aristote repris par l'Église**. L'Église ne va pas accepter cet affront.

Contre-Réforme (1548-1563), Concile de Trente. Elle mènera entre autre à la naissance des **Jésuites, qui vont réaffirmer l'Église catholique par opposition aux protestants**. Les questions de théologies sont réservées aux théologiens, on ne peut critiquer les pères. Le Soleil tourne autour de la Terre, c'est écrit dans la Bible, c'est donc irréfutable.

Bruno est brûlé vif à Rome en 1600 pour ses vues.

Tycho Brahe (1545-1601) fait des observations hallucinées à l'oeil nu depuis son observatoire d'Uraniburg au Danemark. Il est le premier à observer une nova (note : en 1006 les chinois répertorient une supernova, reniée par l'Occident médiéval). **Brahe n'est pas copernicien**. Il rejette Copernic pour des raisons astronomiques bien fondées (problèmes de parallaxe). Il va proposer un système indiscernable de Copernic, les mouvements apparents sont les mêmes : les planètes tournent autour du Soleil, qui lui-même tourne autour de la Terre immobile.

Johannes Kepler (1571-1630), astronome, assistant de Brahe, copernicien, voit le soleil comme l'endroit qui abrite les Dieux. Il est copernicien de manière privée. Kepler va utiliser les observations de Brahe et des nouvelles pour établir des lois.

Ier loi : déduit des observations de Tycho Brahe, **les orbites sont elliptiques !** Après des calculs, Kepler déduit qu'il est impossible d'avoir des orbites circulaires.

IIem loi : **la loi des aires**. Kepler croit en un souffle divin venant du soleil qui entraîne la Terre, une sorte de magnétisme.

III^{em} loi : $\frac{T^2}{R^3} = \text{constante}$. Kepler vit dans une mystique des nombres pythagoricienne. Les orbites des 5 planètes connues sont contenues dans les cinq solides réguliers.

Kepler est un des personnages les plus importants de l'Histoire, car **c'est par la redécouverte de ses lois que Newton créera sa théorie de la gravitation universelle.**

Galilée (1564-1642), homme de fin de la Renaissance, étudie la physique, l'astronomie et les maths. Il étudie en particulier **la physique du mouvement**. Il va construire une physique incompatible avec Aristote, il va découvrir **le principe d'inertie**.

En 1610, il entend parler **d'une longue-vue créée en Hollande**. Il entreprend, en tant qu'ingénieur, **de construire une lunette**. Il va regarder le ciel nocturne, personne avant lui n'avait fait cela. Il va faire des découvertes incroyables : **la lune est couverte de cratères et Jupiter a 3 satellites autour d'elle**. Opposition au système de d'Aristote : **tous les corps ne tournent pas autour de la Terre**. Le cosmos est faux, et Copernic a raison.

Galilée va vouloir convaincre l'Église de leur erreur avec une campagne de conversion. **Galilée devient universellement connu** en quelques semaines.

Les astronomes jésuites confirment les observations de Galilée. En 1616 il est convoqué par le Grand Inquisiteur, qui met à l'index les œuvres de Copernic. Il est interdit jusqu'en 1846 d'enseigner la doctrine de Copernic.

Galilée va écrire un livre : **“Dialogue sur les deux plus grands systèmes du monde, le copernicien et le ptoléméen”**. Il y fait parler trois personnages, où il va défendre le système copernicien. Le livre se lit comme un roman, mais déborde sur des domaines hors de la physique : Galilée applique le système copernicien au monde. Il est très cynique : “les défenseurs de l'inaltérable d'Aristote ont peur de la mort, et ne méritent d'exister. Aristote ne sait expliquer tous les phénomènes observés”. A la fin du livre, Galilée croit utile d'exprimer le point de vue du Pape, et l'Église scandalisée le convoque à Rome en 1632, où il est capturé par l'Inquisition. **Galilée est obligé d'abjurer**, il doit retirer ses avis coperniciens, et doit renier son livre. Il sera condamné à perpétuité, puis placé dans une résidence.

Cette condamnation aura **des effets hallucinants**. Galilée était **une célébrité dans les milieux cultivés**. Il y aura une grande césure entre les savants et l'Église, qui durera plusieurs siècles. **Descartes rangera son livre copernicien, et ne le publiera qu'après sa mort.**

7 La naissance de la science moderne

Galilée écrira un deuxième livre : Discours sur deux sciences nouvelles (1638) sur les lois du mouvement et la résistance des matériaux. Le livre est en latin et contient des maths.

L'apport le plus important de Galilée fut son inauguration de **la science expérimentale**. C'est une rupture avec l'ancienne science. **Avant, on se contentait de déduire** (le mouvement des astres est noble, donc circulaire).

Galilée étudie la chute des corps, sans chronomètre. Il va créer un "laboratoire" : un plan incliné soigneusement préparé. Il met en place un dispositif expérimental. Il ne se contente pas simplement de faire rouler la bille ; il va varier les paramètres : changer l'inclinaison du plan... **L'expérimentation pose activement des questions à la Nature**, on crée un dispositif artificiel afin de prendre des mesures.

Galilée emploie le langage des mathématiques pour décrire ses observations. Il dit que l'expérience n'a jamais tort, seul le raisonnement pour l'expliquer peut être erroné.

Il voudra également mesurer le temps que prend la bille pour descendre la plan. Il va utiliser un seau d'eau avec un petit trou, et peser l'eau. Il peut alors dégager un rapport : $\frac{t_1}{t_2} = \frac{m_1}{m_2}$. Avec ses expérimentation, Galilée démolit la physique aristotilicienne.

D'autres savants du XVIIe siècle correspondent avec Galilée. Le grand successeur de Galilée, son continuateur, est **Isaac Newton (1642-1727)**.

En 1666, Newton part de Cambridge à cause de la peste, et retourne à la campagne, où il fera des découvertes incroyables.

1. Prisme et décomposition de la lumière : bases de l'optique.

2. Gravitation : Newton va expérimentalement déterminer que la force de gravité est en $\frac{1}{r^2}$. Ceci va lui faire redécouvrir les lois de Kepler, ce qui est essentiel. Dans son verger il voit non seulement tomber la pomme, mais également la lune ! Il sait, par inertie de Galilée, qu'elle veut continuer tout droit, mais elle "tombe" sans cesse vers la terre. Il réalise l'unification de la mécanique, et donne le coup de grâce à Aristote.

3. Calcul différentiel et intégral.

Notons que Newton découvre $F_G \propto \frac{1}{r^2}$. Notons également que l'inertie de Galilée brise le concept de force à exercer constamment d'Aristote. Galilée va également jeter le concept de relativité : **le repos n'est pas fondamentalement différent du mouvement**, ça dépend juste de l'observateur. Les savants vont voir dans la Nature des relations mathématiques simples, comme en $\frac{1}{r^2}$ (Gravité, puis plus tard la loi de Coulomb).

Newton va aussi construire le premier télescope.

Newton : "**Hypotheses non fingo**" - Je n'imagine point d'hypothèses (sous-entendu "méta-physique" : au-delà de la Nature, de ce qu'on peut observer).

Newton publie Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica (Principes Mathématiques de la Philosophie Naturelle) en 1687, sous pression de concurrence : Hooke est sur la piste de $\frac{1}{r^2}$, et Leibniz du calcul différentiel et intégral. Pourquoi pas plus tôt ? Newton ne souhaite argumenter en public car très complexé. De plus, il a certains problème au niveau de la constante de gravitation.

Newton consacre le reste de sa vie à faire de l'achimie et de la numérologie, on suspecte qu'il faisait en fait partie d'une secte. La gravité était "quelque chose de simple" : après avoir découvert la loi de gravitation, il pouvait se concentrer sur ces autres disciplines plus importantes à ses yeux.

8 La révolution scientifique

René Descartes (1596-1650) est un grand apport dans l'histoire de la science, avec son travail sur la géométrie analytique. Il subordonne la géométrie à l'algèbre, mais c'est tout ce qu'il a vraiment apporté à la science. Il a fait des apports très grand en **philosophie**, notamment dans le Discours de la Méthode (1637), où il prétend exposer **la méthode scientifique**, dont le premier point est le doute systématique (rejet de l'autorité). "*Je doute, donc je pense ; je pense, donc je suis ; je suis, donc le Monde existe*". Le discours est une démonstration de l'existence de Dieu.

Newton lui se restreint à la philosophie naturelle, contrairement à Descartes, il comprend ses limites.

Un autre nom important est une référence en Angleterre : **Francis Bacon (1561-1626)**, contemporain de Shakespears, qui dira : "le développement de la science est utile à l'État". Il est **fondateur de l'école d'empirisme** : on part de l'expérience / l'observation, et on en tire des lois scientifiques par induction. Ceci contraste avec la déduction d'Aristote.

On assistera à une **véritable révolution scientifique, et la naissance de la science moderne**, qui se base sur l'expérimentation et l'instrumentation. Au XVIIe siècle, on découvre de nouveaux mondes grâce au **microscope**. On invente le **thermomètre** : on se rend compte que des blocs de bric et de marbre ont la même température. Autre invention essentielle : **la pompe à vide**.

Au XVIIe siècle, le **vide change de sens**. À l'époque de la rébellion de Galilée, il y a un semblant d'assemblée scientifique en Italie : *l'Accademia dei Lincei* en 1610. Entre 1600 et 1650, il y a une correspondance colossale entre les grands esprits occidentaux. Il y a également des salons scientifiques à Paris et à Cambridge (Newton).

On voudra structurer les choses, et on fonde **les Académies Royales**. En 1666, l'Académie royale des Sciences de Paris (Louis XIV) ; En 1660, La Royal Society de Londres. On structure de manière à ce que l'État puisse garder le contrôle. On voit ensuite naître **les premiers journaux scientifiques** : "*Philosophical Transactions*" et "*Comptes-rendus de la Royal Society et de l'Académie des Sciences*".

On verra de plus en plus d'Académies naître en Europe, mais elles sont distinctes des Universités. Les académies comprennent des chercheurs, des artisans et la bonne société, des ecclésiastiques et des nobles. La science se professionnalise au XVIIe siècle.

Revenons à la question du vide. Jusqu'alors, le vide n'existe pas, de par Parménide. Les atomistes croyaient en l'existence du vide. Au Moyen-Âge apparaît un principe de la Nature : l'horreur du vide, plus forte que les lois de la Nature. Si l'eau s'écoulerait d'un vase rempli, il y aurait un vide, donc l'eau ne s'écoule pas. De même, en hiver les vases éclatent car l'eau se contracte, ce qui donne un vide, et la Nature casse le vase.

Galilée va vouloir mesurer l'horreur du vide. **Toricelli, disciple de Galilée**, va expérimenter avec un tube de mercure. Le père de **Blaise Pascal** effectuera des expériences similaires, ce qui passionnera ce dernier. Il fera souffler des tubes gigantesques aux verriers de Rouen. D'autre vont faire l'expérience de Torricelli à diverses altitudes, et on aura des résultats différents. Pascal effectuera l'expérience du vide dans le vide.

Otto van Guericke (1602-1686) crée la pompe à vide, et découvre l'élasticité de l'air. On effectuera l'expérience des deux hémisphères. En Hollande, **Huygens** améliore la pompe de Guericke. Le premier à utiliser **la pompe comme instrument scientifique est Robert Boyle (1627-1691)**, contemporain de Newton, membre de la Royal Society. Il va effectuer toute une série d'expérience avec des clochettes, des bougies, des animaux... Boyle fait ses expériences en présence de témoins de la bonne société. On ne discute pas de philosophie ou de politique autout de la cloche, on exclut cette discussion. **Le vide n'est plus philosophique, c'est un vide opérationnel / expérimental.**

Newton évite la polémique philosophique : "*mes lois sont valables dans le vide de monsieur Boyle*". Il s'intéresse aux principes naturels, fonctionnels, expérimentaux uniquement.

La philosophie de Newton sera concrétisée au XVIIIe siècle avec la pensée mécaniste dont fait partie Descartes. Ce dernier voit **les animaux comme des machines**, composés de cordes, de moteurs, de poulies... Cette pensée rend également la science très autonome, indépendante des autorités politiques comme religieuses. Les Académies sont autonomes, permettent aux scientifiques de discuter entre eux.

La science au XVIIe siècle venait de conquérir la notion de phénomène ; en renonçant d'aller chercher les causes profondes et en se limitant aux principes mathématiques, elle s'allège d'un grand poids. La nou-

velle science donne un nouveau niveau d'intelligibilité. L'ancienne science allant au-delà des apparences. L'objet de la science est de rédiger des lois décrivant les phénomènes observés : *la cause* ne l'intéresse pas, c'est du ressort des métaphysiciens.

Au XVIIIe siècle, pour rappel, la science s'est professionnalisée. Les Académies apparaissent à la 2e moitié du XVII. Louis XIV donnera à l'Académie comme mission d'examiner toutes les machines qui lui sont proposées. L'Académie et la science seront assez avancés pour refuser d'examiner les machines se basant sur le mouvement perpétuel.

Le XVIIIe siècle est difficile, il débouchera sur la Révolution française et industrielle. Il y a des régressions au niveau politique et social : les nobles s'acharnent à garder leur revenu. **La science va devenir objet de passion mondain** dans les salons. De riches bourgeois hollandais récoltent des curiosités datant d'avant le déluge (dents de requin, générateur d'électricité statique...). En dehors de cette vogue mondaine, cette période est très féminine. **Les femmes s'intéressent à la science**, et écrivent des *traités pour les femmes*. Fontenelle écrit ses éloges, qui sont des traités de vulgarisation scientifique sous forme d'entretien. Autre point pivot : **l'Encyclopédie de Diderot** et, parallèlement, **l'Encyclopédie Britannica** en Angleterre.

9 La chimie : de l'alchimie à l'atomisme

Une science va apparaître : la chimie. Quid de l'alchimie? **La chimie est née de la pratique** (métallurgie, poterie...) qui mène à **des tentatives de théorie**, notamment les 4 éléments de la Grèce antique. Celle-ci va former la base de l'alchimie, qui verra essentiellement le jour à Alexandrie au début de notre ère. Pour rappel, Alexandrie set alors la capitale commerciale de l'Occident.

L'alchimie a à la fois **des objectifs matériels (fabrication de l'or) et spirituels**. Les deux sont intimement liés. L'or est l'essence même de l'éternité, car il est inaltérable. Les métaux mûrissent dans la Terre même, on voit une évolution des métaux du fer à l'or. L'alchimie veut hâter cette transformation en étant en communion avec les forces cosmiques. L'activité de l'alchimite est liée à ce fait. L'alchimiste est pessimiste : le monde se dégrade.

À l'époque, on connaît 7 métaux avec les 7 astres (or avec soleil, argent avec lune, fer avec mars...). Ces connaissances seront recueillies par les Arabes. Au IXe siècle, le grand alchimistes arabe Geber. L'alchimiste travaille dans le secret pour l'ésotérisme de leur pratique, et seront souvent persécutés. **Les Arabes étudieront les alcools, les alcalins...** Ce mélange de chimie et d'alchimie prend son envol au XV-XVI, **la métallurgie prend son importance**.

Paracelse (1493-1541), grand savant médecin et alchimiste, utilisera des poudres minérales pour soigner. Il fonde **la iatrochimie : la chimie médicale**. Il étend les 4 éléments antiques par 2 principes : le mercure et le soufre. Les deux derniers sont alors plus que les éléments moderne, ils sont porteurs du **principe passif (féminin) et actif (masculin)** respectivement. L'alchimiste ne pense pas en terme de réactions, mais en relations entre principe. **Paracelse introduit aussi la notion de sel**.

Au courant du XVIIIe, on trouve de nouveaux corps simples et les gaz. **La chimie des gaz se développe autour du progrès technologique de la pompe à vide**. On découvre ce que nous appellons l'oxygène, l'hydrogène, l'azote, le gaz carbonique, le chlore et le fluor. **L'allemand Stahl (1660-1734) propose une théorie sur la combustion** : il pense qu'un gaz qui s'appelle le phlogistique s'en échappe. Le corps qui doit brûler contient le phlogistique qui s'échappe quand il brûle : c'est de *l'antioxygène*. L'azote est le gaz sans vie. Pour Stahl, l'oxygène est appelé "air déphlogistique".

C'est dans ce contexte que vient **Lavoisier (1743-1794)**. Il travaille à la Ferme Générale : banque qui prête de l'argent au Roi, puis qui lève les impôts. Entre 5h et 8h du matin, Lavoisier fait de la chimie. **Il sent que la combustion est dû à la fixation de l'oxygène**. Il à des échanges avec **Priestley** à ce sujet.

Le cœur du travail de Lavoisier est **la balance**, qui est son instrument par excellence. Il va étudier la combustion avec précision, de manière quantitative. Il étudiera la combustion de l'hydrogène, et fera de la propagande devant le Roi de France avec une démonstration : il fait flamber de l'hydrogène et se retrouve avec de l'eau entre les mains : **l'eau n'est pas un élément fondamental!** Il rassemble un réseau de collaborateurs qui approuvent de sa méthodologie et ses thèmes. Lavoisier, à l'aide de ce réseau, **va lancer une révolution scientifique, grâce à sa méthodologie nouvelle**.

Lavoisier donnera une vraie structure à son école, et donnera à la chimie un programme de recherche. Il proposera **une nouvelle nomenclature**, ce qui sera extrêmement important. Il se met en opposition avec l'ancienne; par extension, il oppose les chimistes aux droguistes. Les anciens noms seront utilisés encore aujourd'hui dans le cadre commercial. Il a un lien entre adhérer à la nomenclature et adhérer à la théorie, et par analogie à la Novlangue d'Orwell, **la nouvelle nomenclature va progressivement épurer les idées**.

Lavoisier écrit un manuel : un traité élémentaire de chimie pour les débutants, il s'adresse au grand public, un peu comme Galilée. Il n'invente pas la notion d'élément chimique, mais il la redéfinit. Il fait de l'analyse chimique : un élément est le dernier terme obtenue par l'analyse. Pour lui et ses collaborateurs, toutes les substances qu'ils n'ont su analyser sont des éléments. **Ils ne considèrent des corps considérés simples comme étant composés que si l'expérience leur en fournit la preuve**, c'est une preuve / définition opératoire, pratique.

On obtien une nouvelle science normale au sens de Kuhn : **on a un nouveau paradigme!**

Le XIXe siècle découvrira toute une série de corps simples, notamment par électrolyse, grâce à la pile de Volta, fin du XVIII.

Sur base du programme de chimie minérale de Lavoisier, **cette chimie académique travaillera de près avec l'industrie**, notamment avec la découverte du precessus Leblanc pour fabriquer de la soude.

Une autre révolution intellectuelle est la chimie organique de synthèse. On synthétise de l'urée, de l'acétylène... en laboratoire, alors qu'on le trouve que dans le vivant. **La barrière entre le vivant et le non-vivant s'effondre**, il n'y a plus de propriétés intrinsèque au vivant. La chimie organique aura des liens très forts avec l'industrie.

On aura une nouvelle image de l'Université : on assiste à la naissance de grands laboratoires en Allemagne au XIXe siècle (Liebig et Baeyer) pour enseigner la chimie pratique. **C'est l'Université Humboldtienne : alliant recherche et enseignement.**

En 1805, Dalton émet sa théorie atomique, et va lancer un débat enflammé dans le monde de la chimie. Le point de départ est **la loi de Proust** : la loi des proportions définies. Une réaction chimique se passe toujours en impliquant les mêmes proportions. En 1808, Gay-Lussac émet une loi sur le volume du gaz, ce qui mènera **Avogadro en 1811** à émettre l'hypothèse qu'un volume donné de gaz contient un nombre donné d'atomes (on ne fait pas encore la différence entre atomes et molécules). **En 1819, Dulong et Petit** montrent que la capacité calorifique d'un atome est constante, ce qui renforce la théorie atomiste. **En 1833, Faraday met en évidence des isotopes.**

L'opposition féroce à la théorie atomique est surtout basée sur le fait qu'on va au-delà de l'observable. Cependant, les progrès de la chimie organique, en particulier, remettent l'atomisme au premier plan : il ont une nécessité de clarifier la nomenclature (par exemple, il existe 19 formules possible pour l'acide acétique).

Le Congrès de Karlsruhe en 1860, le premier congrès scientifique moderne, verra l'avènement d'un jeune professeur russe : **Mendeleïev**, qui fera une classification des éléments. On verra également la **naissance de la thermodynamique.**

Maxwell et Boltzmann vont introduire la mécanique statistique pour étudier la thermodynamique au niveau microscopique. On a réversibilité au niveau microscopique, mais irréversibilité au niveau macroscopique (ex : encre dans de l'eau). L'explication que donne Boltzmann est que le système évolue spontanément vers l'état donnant le plus de microconfigurations. Indépendamment de la chimie, **l'atomisme joue donc un rôle en physique.**

Ce qui va rallier les scientifiques à la cause atomistes est la synthèse faite par Jean Perrin en 1911 : *Les Atomes*. En 1905, Einstein écrit 4 papiers : $E = mc^2$, quanta ; relativité et **mouvement brownien**. Perrin s'intéresse à ces mouvements browniens et **va déduire le nombre d'Avogadro en expérimentant**. Il tient aussi compte des rotations, et trouve un nombre d'Avogadro similaire. Dans sa synthèse, il expose 13 manières de déterminer ce nombre d'Avogadro, toutes en accord. Les scientifiques seront enfin d'accord, la Nature leur livre une vérité. Ces 13 manières sont très avancées et utilisent parfois des théories quantique non approuvées (Planck) et des mécanismes statistiques inhabituels (Einstein).

Ses mesures nécessitent donc de croire en des théories très avancées. La convergence des résultats vers le même nombre conforte ces théories. Il y a **une grande part de croyance**, de confiance en la science. Il faut avoir un esprit critique, mais positif néanmoins. En 1911, la communauté est devenue atomiste. On a donc beaucoup de découvertes en peu de temps : électron, radioactivité, noyau atomique...

10 Histoire de la biologie et de la géologie

On remarque, de manière générale, que plus un homme s'intéresse à un domaine, au plus tard il rentre dans la science moderne. L'homme s'intéresse au vivant depuis ses débuts : chasseurs, cueilleurs... La révolution néolithique (il y a +/- 10000 ans) amène la domestication et la sédentarisation, qui résultent en une sélection artificielle d'espèces. **Le champ des connaissances biologiques s'étend par des connaissances pratiques.** Idem pour la médecine.

Les débuts de l'approche scientifique moderne sont nés par **Aristote**. Il a un grand intérêt pour l'étude du vivant. Il aura deux contributions : **la systématique**, où il définit les espèces en fonction de interfécondité et fait une classification des animaux (à sang rouge ou dépourvus de sang rouge), et **la biologie fonctionnelle**, qui est la mise en rapport des organes avec leur fonction : "*les organes sont comme ils sont car ils doivent remplir un but, dans le but de remplir une fonction*". Tout dans la Nature a une raison rationnelle : la forme de la tête des oiseaux, le pouce opposable... Aristote se pose la question de savoir les causes d'un objet (les quatre causes).

Quelle est la cause d'une statue ?

-**cause matérielle** : marbre (d'où sort-elle ?).

-**cause formelle** : qu'est-ce qui donne la forme de la statue ? Le sculpteur a en tête ce qu'il doit sculpter, c'est cette cause.

-**cause agissante** : celui qui agit : le sculpteur. Aujourd'hui c'est cette cause qu'on étudie le plus souvent, c'est la *cause moderne*.

-**cause finale** : le but à atteindre. Dans le cas de la statue, c'est de célébrer la déité sculptée.

Problème : dans une statue, il y a une conscience derrière la cause finale. En biologie on obtient une approche animiste de la Nature, on croit en une volonté intelligente. La finalité marque très fort la biologie.

Aristote s'intéresse à la zoologie ; Théophraste à la botanique. Il ne faut pas oublier les écoles de médecine de la Grèce Antique. L'école d'Hippocrate (-IVe siècle) est très spécifique, porte beaucoup d'importance sur l'observation, avec des expériences cruelles sur les prisonniers (vivisection...). On procède à la dissection humaine.

Galien (IIe siècle) procède à des dissections sur des animaux et va synthétiser les connaissances. La santé se définit comme l'équilibre des humeurs. Il y en a 4 : sang phlegme, bile noire et bile verte. La maladie est un déséquilibre de ces humeurs.

Des médecins comme Avicenne (Perse) vont faire énormément avancer le savoir : introductions de nouvelles espèces, nouveaux systèmes d'irrigation...

La deuxième naissance de la biologie est à la Renaissance. On a une explosion de l'intérêt pour la Nature, en contraste avec la rigueur de l'Université médiévale. On s'intéresse aux poissons, aux insectes... **C'est l'ère des premiers jardins botaniques** (Pise, 1543).

Vésale, médecin bruxellois, publie en 1543 *La structure du corps humain*. Il reprend pour la 1er fois des dissections et fait réaliser des planches anatomiques, chef-d'œuvre de dessin. Vésale découvre toute une série d'erreurs chez Galien.

Au XVIIe, on découvre la circulation sanguine. De nouveaux mondes s'ouvrent à la Renaissance : on découvre de nouvelles plantes et animaux dans les nouveaux mondes (Amérique, Afrique...). Découverte fondamentale : microscope à la 2e moitié du XVIIe. Observations réalisées par Hooke, membre de la Royal Society. Il regarde des bouchons de liège au microscope, et découvre la cellule, c'est un nouveau monde. Autres observations : celle de Leeuwenhoek. Il va découvrir les protozoaires et les spermatozoïdes. On découvre aussi les mécanismes sexuels des plantes, on dissèque des insectes.

Un 3e monde s'ouvre aussi : le passé. On s'intéresse aux fossiles et à l'évolution.

Il y a de très nombreux mouvements philosophiques sur l'évolution. Une série de savants vont continuer la systématique d'Aristote au XVIIIe siècle, classant plantes essentiellement et animaux. Qu'est-ce qu'on veut classer, selon quels critères ?

1ere attitude : le classement est une activité artificielle. Au fond, les espèces n'existent pas, seuls les individus. L'homme crée artificiellement les espèces. C'est **le nominalisme** : les espèces sont juste un nom et n'ont aucune valeur réelle. Mouvement inspiré par le scholastique anglais Ockham. On classe par commodité.

2em attitude : l'espèce a une existence naturelle à découvrir, elle correspond à l'ordre du monde. On demande à la Nature.

Il faut dégager la brique élémentaire : la définition d'une espèce. Buffon va la définir sur l'interfécondité et la capacité d'avoir une descendance fertile. On va rompre le mythe de fécondation universelle, qui sera exclu de la science.

Comment regrouper les espèces ?

1ere approche : classer de sorte à reconnaître et distinguer. **Carl von Linné (suédois, 1707-1778)** sera le grand de cette méthode. Il introduit le classement binaire genre-espèce. L'espèce a une existence réelle, les niveaux supérieurs sont nominalistes (sauf le genre).

2em approche : familles naturelle. Buffon prend en compte l'ensemble de caractères, pas seulement la sexualité. On regarde la localisation géographique, le comportement sociologique avec d'autres animaux... En gros, on se base sur les paramètres écologiques.

Qu'est-ce qui caractérise une espèce ? Deux idées.

-**L'essence**, qui est immuable. L'Homme est Homme parce qu'il est Homme. Il y a une unité entre individu.

-**Frontières floues**, donne une plus grande flexibilité, et permet des transformations.

Remarque : on peu croire en les espèces et être essentialiste, car Dieu a pu créer les espèces, et l'homme invente le niveaux supérieurs. Linné pouvait être religieux ou non, mais il était essentialiste. Il faut éviter de top recourir à l'image de Dieu pour décrire la méthode scientifique.

On Occident, la Terre a 6000 ans. On sait par la Bible qu'a eu lieu le Déluge. La géologie a, comme la biologie, deux pendants : **l'affection** (déesse mère...) et l'application pratique (les mines).

À la Renaissance, on découvrira qu'il y a deux types de terrains : sédimentaires et volcaniques, liés à deux type de roches. On découvre aussi les fossiles : on trouve au sommet des montagnes des preuves du Déluge, les fossiles en sont la preuve.

Au XVIIe siècle, avec **Sténon (1638-1686)** on a une approche assez scientifique. Il est resté dans les annales pour son concepts de couches géologiques : les débuts de **la stratigraphie**. Selon lui, les terrains sont dûs à deux facteurs : sédimentation et catastrophes (effondrement...). Les couche les plus anciennes sont les plus profondes, il y a une chronologie, tout en 6000 ans.

Au XVIIIe siècle, on admet que les strates recouvrent de grandes regions, même avec des ruptures. Certaines couches sont riches en fossiles. On retrouve Lavoisier qui décide de faire des cartes géologiques, ce qui présuppose une continuité des régions.

On va voire s'opposer deux courants :

-**Le catastrophiste de Werner (1750-1817)** : il y a dominance neptunienne : c'est une géologie orienté vers la sédimentation et les catastrophes (reprise systématique de Sténon)..

-**L'uniformitarisme de Hutton (1726-1797)** : il y a dominance plutonienne (dieu des enfers) : c'est la théorie *volcaniste*. Pour Hutton, les causes actuelles sont celles à invoquer pour le passé : le monde est toujours soumis aux mêmes lois (contraste avec l'importance donné au Déluge). Le centre de la Terre est chaud, et cette chaleur sort sous forme de volcans, la Terre se ride. (Remarque : le volcanisme n'est pas une catastrophe). Cette approche est en contradiction avec l'histoire courte biblique.

Buffon est uniformitariste. Il part d'observations et d'hypothèses et en tire que la Terre a au moins 75000 ans.

Le grand nom de la géologie est **Lyell (1797-1875)**. Il va tirer au clair le fait que des roches sédimentaires peuvent se métamorphoser en roches volcaniques. **Il donne naissance à l'actualisme** : les causes de maintenant sont celles du passé.

Une nouvelle science, entre biologie et géologie, va naître : **la paléontologie**, la science des êtres anciens.

La paléontologie se base sur les fossiles. La géologie va donner une datation des terrains, et donc une datation relatives des fossiles.

Cuvier (1769-1832) connaît admirablement bien l'anatomie comparative. Il met en avant deux principes : la corrélation des formes et la subordination des caractères. Il essaye de mettre de l'ordre dans

l'anatomie des espèces. C'est un puzzle où la liberté doit obéir à des contraintes. Métaphoriquement, il reconstruit des squelettes à partir d'une seule dent. En réalité, il sait corréler une patte avant et une patte arrière et dire qu'elles viennent du même animal. Il étudie le mammouth.

Qu'est-il arrivé aux espèces qui ont disparu ? **Cuvier est essentialiste** : les espèces ont disparu lors de catastrophes. Ceci s'oppose aux visions de Lamarck ou Darwin plus tard, qui sont transformistes. L'essentialisme de Cuvier était nécessaire, car sinon il n'aurait pu faire son travail à cause des frontières floues entre espèces, alors qu'il a une vision discète des choses. D'où viennent les autres espèces ? Cuvier dit vaguement "*d'autres continents*". Une autre vue qui se répand au XIXe siècle est le fait que Dieu recrée des espèces à chaque catastrophe.

À la fin du XVIIIe siècle, il y a opposition entre catastrophisme et transformisme / actualisme.

Au début du XIXe, Cuvier crée la paléontologie, qui est une science essentialiste : les individus d'une même espèce partagent la même essence., **il n'y a pas d'évolution, c'est du fixisme.**

En face de Cuvier, on trouve **Lamarck (1744-1829), défenseur du transformisme.** Lamarck naît bien avant la Révolution de 1789, et travaille au Muséum après cette dernière. Il découvre que les mollusques qui ressemblent le plus à celles du présent sont dans les couches géologiques les plus récentes. Selon lui, il y a donc évolution. Il publiera un livre à ce sujet : *Philosophie zoologique* en 1809.

Dans l'évolution lamarckienne, la fonction donne l'organe. Le milieu provoque l'adaptation de l'individu, qui selon Lamarck provoque l'adaptation de l'espèce. Le climat est le principal facteur d'évolution. Chez Lamarck, l'évolution est orientée vers la complexité. **Les espèces ne disparaissent pas, elles se transforment** dans le sens du progrès. **L'approche lamarckienne est déterministe** : le milieu détermine les adaptations nécessaires, et les espèces les adoptent.

Cuvier s'opposera violemment à Lamarck. On reproche surtout à ce dernier le manque de fossiles des espèces intermédiaires. Lamarck répond que les archives géologiques sont incomplètes.

La véritable percée de l'évolution viendra avec **Darwin (1809-1882)**. Darwin était naturaliste de terrain, il connaît les animaux. Il sera engagé sur le Beagle pendant son voyage autour du monde. Les observations de Darwin sur ce voyage vont poser les fondations de sa théorie future de l'évolution. Darwin observe avec le point de vue de Lyell, c'est à dire que les causes de maintenant sont celles du passé. Aux Galapagos, Darwin attribue les différences entre espèces terrestres à la séparation géographique, c'est l'idée de **la biogéographie**. Exemple : les faunes d'Amérique et d'Afrique sont différentes, malgré le climat similaire : séparation progressive des espèces par isolement géographique.

Darwin parle de variabilité individuelle et de sélection naturelle, ses deux ingrédients pour la divergence des espèces.

Variabilité individuelle : Darwin observe des variations entre individus. Il parle avec les éleveurs effectuant de la sélection artificielle et étudiera des pigeons.

La sélection naturelle est le cœur de la théorie darwinienne. Remarquons que Darwin pensait, comme Lamarck, à la transmission des caractères acquis. Seulement, ce n'est pas le moteur de son système, pas de contraste à Lamarck. Darwin fut inspiré par l'économiste **Malthus**. Le malthusianisme jouait sur l'éparpillement des ressources et la croissance exponentielle de la population : laisser mourir les pauvres.

Darwin publie en 1859 son ouvrage **L'origine des espèces**. Pourquoi si longtemps après le Beagle ? Il va passer 30 ans à faire de la systématique et à peaufiner sa théorie. **Wallace** écrit à Darwin pour lui parler de sa propre théorie, qui lui a été étudiée la variabilité des espèces sur les îles des Amazones. Darwin et Wallace arrivent aux mêmes conclusions, et présentent ensemble leurs travaux à la même conférence. Wallace publie *La descendance de l'homme* en 1871.

La théorie darwinienne sera très rapidement acceptée grâce à la pléthore d'exemples concrets de l'*Origine des Espèces*, et Darwin aura nombre de disciples. **On voit l'émergence d'un paradigme.**

Néanmoins, il y aura une opposition violente : la théorie darwinienne enlève la place privilégiée de l'Homme, qui devient une espèce animale comme les autres. Les institutions conservatrices et religieuses repoussent violemment la théorie : si Adam n'a pas existé, alors il n'y a pas de péché primordial, ce qui cause un problème théologique. "*Darwin n'est pas prêt d'être réhabilité, en tout cas pas sous Benoît XVI*". Le darwinisme social apparaît aux côtés de l'eugénisme.

À partir de 1859, on a donc une théorie de l'évolution qui est néanmoins loin de la théorie moderne. En effet, depuis lors, on a découvert les mécanismes de l'hérédité.

11 Génétique, biochimie et biologie moléculaire

La première question qui va diviser les savants : **la générations spontanée**. On croit à cette dernière très longtemps. Les anguilles apparaissent spontanément, les souris... Plusieurs expériences contrediront cette théorie : quand on chauffe un système, on tue les organismes, qui ne reviennent plus. Ceci aurait dû tuer cette théorie, mais non, “en chauffant, on a détruit le principe vital”. Finalement, **en 1861, Pasteur démontre la préexistence des microbes** grâce à une expérimentation soignée. Il avait un concurrent, Pouchet, qui à l’aide d’expérience soigneuses, arrivait à la conclusion inverse. Grâce à Pasteur, il y eut d’énormes conséquences en santé : les médecins se désinfectent les mains, les outils...

La deuxième question est sur **la reproduction**. Il y a plusieurs positions. Les spermatozoïdes sont essentiels (expérience des crapauds avec calçons). En 1819, on découvre l’ovule. La question est de dire quel est le rôle de chaque : l’ovule est actif, le spermatozoïde vient juste le secouer (**ovisme**), ou bien l’ovule est passif, il est un réceptacle pour le spermatozoïde (**spermisme**).

La troisième question est comment se forme la physionomie de l’embryon ? Deux solutions. **La préformation** : l’embryon est déjà “moulé” et n’a qu’à grandir. Le vivant préexiste dans le spermatozoïde, le vivant ressemble au vivant. La préformation est une théorie mécaniste. **L’épigenèse** : les formes se développent, elles ne sont pas préfabriquées. Il y a un principe vital qui génère, qui divise les formes.

Au XIXe siècle, les choses vont vraiment se mettre ensemble. Une nouvelle science apparaît : **la cytologie**. Le microscope est amélioré, et la théorie cellulaire émerge en 1840. L’unité de base du vivant est la cellule, qui a un noyau. **Grace au microscope, on découvre la division cellulaire**, ou mitose. Le microscope permet aussi d’observer la fécondation de l’ovule par le spermatozoïde, on sait maintenant que l’ovule et le spermatozoïde sont nécessaires.

Le grand pas sera franchi par **un Belge, Van Beneden**, qui utilise le microscope avec des colorants. **Il découvre le chromosome**. Au moment de la mitose, le matériel nucléaire se fragmente en un certain nombre de chromosomes **propres à l’espèce**. De plus, il découvre **la méiose**, et il voit que l’ovule et le spermatozoïde sont haploïdes (ils n’ont que la moitié des chromosomes).

Weismann crée le néodarwinisme vers 1890 : les caractères transmis par l’hérédité (le génotype) est fondamentalement différent des caractères de l’individu (le phénotype). Il n’y a pas d’hérédité des caractères acquis, elle est impossible, car il n’existe pas de mécanisme qui permet au phénotype de modifier le génotype, selon Weismann.

Entretemps, il restait la question de l’hérédité, **dont Mendel va s’occuper, en 1865**. Il va faire des expériences de croisement sur le pois. Il travaille sur des lignées pures, et sélectionne génération après génération des lignées pures. Il effectue ensuite des croisements de manière extrêmement méticuleuse, en empêchant l’autofécondation. Il va minutieusement établir des lois mathématiques à partir de deux caractères qui, par chance, sont sur des chromosomes différents. **Les lois de Mendel ne font aucun impact immédiat : il n’explique pas le mécanisme**, ses lois restent une curiosité de la Nature.

Vers 1900, De Vries et d’autres redécouvrent les lois de Mendel, qui prennent leur importance. En effet, maintenant on connaît les chromosomes qui sont le support de l’hérédité. On a donc le mécanisme que Mendel ne pouvait découvrir. On retrouve les lois de Mendel à partir d’études statistiques sur les chromosomes. **De Vries introduit la notion de gène, ainsi que celle de mutation**. Cette dernière peut être très massive et violente, et toucher à un grand nombre de caractères. **Ceci contraste avec le gradualisme de Darwin, chez De Vries, il y a des “sauts”**. En 1927, on cause une mutation artificielle par rayons X.

Autre pièce essentielle : **les travaux de Morgan sur les drosophiles**. Il montre que les modifications de caractères sont liées aux chromosomes. Il corrèle les caractères, il voit qu’il y a des mutations qui viennent toujours ensemble : hypothèse de *linkage*, et propose aussi l’hypothèse du crossing-over. Il va également établir une carte des chromosomes pour décrire l’ensemble.

L’ensemble de ces connaissances va être réunies avec une nouvelle science du XXe siècle : la biochimie. La biologie moléculaire naît aussi. Après la première guerre mondiale, on découvre que **le chromosome est composé d’ADN**, qui est en double-hélice. Avec ces découvertes, on a résolu la question de préformation / épigenèse. En effet, qu’est-ce qui permet fondamentalement l’hérédité ? L’idée de code. On comprend que l’ADN est une sorte de code, sous forme de séquence de bases ATGC. **Ce paradigme**

apparaît dans les années 1950.

En sciences naturelles, on n'observe pas seulement, on tente de comprendre (les lois de Mendel n'ont pas d'impact sans connaissance du support du matériel génétique). La théorie de l'emboîtement (mécaniste) ne tien pas la route, l'épigénèse fut plus populaires. Néanmoins, la notion de *souffle vital* heurte nos sensibilités scientifiques modernes.

Au XXe siècle, on comprend les mécanismes d'évolution et d'hérédité, on peut enfin lancer un programme de recherche de biologie moléculaire. On a les ingrédients pour un nouveau paradigme, au sens de Kuhn. En effet, **la biologie moléculaire est globalisante, car elle permet de comprendre l'ensemble du monde vivant sans recourir à d'autre théories**. La biologie moléculaire est appliquée en médecine, en traçage moléculaire... Outre ces aspects pratique, la biologie moléculaire récesit les populations : les espèces peuvent être regroupées de manière naturelle. On a un code, un programme de recherche, un paradigme, et un consensus scientifique (regroupement européen des biologistes moléculaires dans les années 60). Autour de la biologie moléculaire, il y a maintenant des réseaux énormes, un tissu social : revues, laboratoires, bourses de recherche...

Le nouveau paradigme de biologie a un impact fort les autres domaines et dans la pensée. Ce paradigme n'est pas apparu sur base d'anomalies, comme les précédentes. La biologie moléculaire est plutôt née de la convergence de plusieurs disciplines, avec des apports externes sous la forme d'instrumentation.

Ce nouveau paradigme est-il celui de la biologie ? La biologie moléculaire ne prend pas compte de la biologie des population par exemple. On commence à se trouver loin des concepts de départ (un caractère = un gène) : redondances, gènes inactifs... On se retrouve dans une situation comme à l'époque de Copernic avec le système d'épicycles. On sera probablement menés, d'ici 20-30 ans, à réévaluer la situation, à modifier le modèle.

Le réductionnisme : concept à mauvaise réputation, signifie péjorativement "*atrocement simplificateur*". On qualifie la biologie moléculaire de réductionniste : le vivant est composé de petits blocs (ie. le cellules). Les phénomènes biologiques sont des phénomènes physico-chimiques, c'est un cadre matérialiste. Toutefois, l'approche des molécules est très riche en informations. La question de réductionnisme vient du fait que les modèles physico-chimiques ne suffisent pas pour expliquer la biologie, comme les populations. On ne peut se réduire aux phénomènes physico-chimiques. L'influence de la théologie est grande sur ce point.

L'épistémologie : la biologie amène des concepts absents de la physique et la chimie. Qu'est-ce qui les différencie ? "*On ne travaille pas sur les mêmes objets, mais on utilise les mêmes instruments, méthodes...*"; "*On travaille sur des objets beaucoup plus complexes*". La différence vivant / inerte est-elle fondamentale ? Il y a plus fort : le temps, l'aléatoire, la bifurcation.

En physique, le temps est passif. En biologie, le temps sculpte les faits, il est actif : on trouve des formes différentes, nées de multiples bifurcations aléatoires. **La multiplication des formes est un concept nouveau qui n'existe pas en physique.** Autre grande différence : les mathématiques, qui sont intrinsèque à la physique, alors qu'elle est absente en biologie, elle ne sert qu'à titre descriptif. En physique, elle est au cœur même de la science.

12 Histoire des mathématiques

Les maths ne sont pas une science naturelle dans notre compréhension actuelle. On a des critères de réalité et de vérité distincts. Dans le monde des maths, il n'y a pas de critère de réalité : on travaille sur des objets construits par l'homme. La vérité des maths vient de la logique sous-jacente.

Y a-t-il des paradigmes en mathématiques ? Il n'y a pratiquement pas d'instrumentation et l'influence de l'extérieur est très faible (la logique interne est beaucoup plus importante). On ne trouve pas de paradigmes et de révolutions, mais il a des ruptures qui chamboulent tout (ex : la géométrie non-euclidienne).

12.1 Les nombres

Qu'est-ce qu'un nombre ? La notion vient du dénombrement, et les nombres sont **au début des entiers strictement positifs**, c'est une démarche naturelle. Très vite, on élargit ce concept de nombre pour inclure **les fractions entières** (1 au numérateur). On vient ensuite **aux rationnels**. Les "*anciens*" s'arrêtent là (Égyptiens, Sumériens...).

En Grèce, Pythagore répond aux physiologues ioniens (*Qu'est-ce que le monde autour de nous ?*) : tout est nombre, tout chose a son nombre. Ces nombres sont importants, car **ils sont liés au divin** de par leurs propriétés miraculeuses, mise en évidence par les pythagoriciens.

Puis vient **la crise des irrationnels** : $\sqrt{2} \neq \frac{p}{q}$ (Importance de la démonstration). Pour toucher à ces "*nombres*", ils se rabattent sur la géométrie. Comprendre $\sqrt{2}$ devra attendre 2500 ans.

Les Arabes vont amener les chiffres, le 0 et l'algèbre. Les chiffres *arabes* sont en fait indiens. Il y avait 10 chiffres : les 9 attendues et un chiffre "*vide*" permettant d'exprimer des nombres grands en numérotation de position. C'est différent d'admettre zéro comme un nombre, et ce n'est pas fait par les mathématiciens arabe. Cette révolution vient plus tard. **Le 0 n'est ici pas un objet mathématique.**

L'algèbre d'Al-Khwarizmi, de la maison de la Sagesse de Bagdad au IXe siècle, est nouvelle branche des mathématiques. Il travaille sur les équations du 2em degré, et donne des méthodes de résolution de telles équations, appelés *algorithmes*. Il va d'abord classes les équations du 2em degré. Remarque : $ax^2 + bx + c = 0$ **n'est pas du tout** ce qu'Al-Khwarizmi voyait quand il pensait a des équations du 2em degré. Pour lui, un telle équation est par exemple : "*le carré et sept fois sa racine font 8*". La notation moderne est bourrée d'abstraction, fruits d'une très longue évolution. De plus, les coefficients sont réels. Al-Khwarizmi utilise des coefficients entiers positifs, et ne prend que les racines rationnelles positives.

C'est le manque de notations abstraites qui va le pousser à classer. Il va former 6 catégories :

$$\begin{aligned} ax^2 &= bx; ax^2 = c; bx = c \\ ax^2 + bx &= 0; ax^2 + c = bx; bx + c = ax^2 \end{aligned}$$

Notons que les Sumériens savent résoudre des équations du 2em degré sans savoir qu'ils en font, tandis qu'Al-Khwarizmi, lui, le sait, et propose des algorithmes de résolution pour chaque classe d'équation. **Le simple fait de classer nécessite la compréhension du concept d'équations.** Si il a l'équation $2x^2 + 100 - 20x = 58$, Al-Khwarizmi emplie sa méthodologie nouvelle, l'algèbre, pour la remener à une de ses six classes.

Il démontre la validité de ses algorithmes en forme de textes. **Il en fait une démonstration géométrique.** Il n'accepte que les racines positives. Il rejette les racines négatives, car un côté de carré de longueur négative n'a pas de sens, pas plus que le zéro, le néant, qui n'existe pas de toutes façons. Néanmoins, les Arabes parviennent à fournir une folle quantité de résultats malgré ces limitations.

Omar Khayyam s'attaque aux équations du 3em degré : $x^3 + ax^2 + bx + c = 0$. Il substitue $x^2 = 2py$, et voit l'équation comme l'intersection entre cette parabole et une hyperbole $2pxy + 2apy + b^2x + c^3$.

Saut ensuite vers **la Renaissance italienne**, où on a progressé dans les notations. L'algèbre s'est développé en dehors des universités italiennes. **Dans les années 1300-1400, il y a une explosion de banques.** qui dit banques, dit calcul. Les comptables vont inventer la comptabilité à entrées doubles et s'inventent des notations : +, =. De plus, on travaille avec les nombres négatifs (*perte = moins un bénéfice*). Le milieu bancaire est séparé du milieu intellectuel, on voit surgir cette mathématique pratique.

À cette époque sont lancés des défis mathématiques. **Tartaglia** découvre une manière de résoudre la racine de l'équation du 3^{em} degré, la confie à Cardano. Là où ça devient intéressant, est que son algorithme donne des résultats parfois incroyables, où on se trouve avec des racines de négatifs.

Bombelli a une pensée sauvage : il va traiter $\sqrt{-1}$ comme un vrai nombre, ce qui est contre toute rigueur, c'est scandaleux. Néanmoins, son système marche ! Dès lors, on utilise et on admet $\sqrt{-1}$, du moins lors des calculs intermédiaire. **La pratique oblige à reconnaître de nouveaux types de nombres.** Le nombre dit imaginaire $\sqrt{-1}$ n'a donc pas été inventé par les mathématiciens, il a été reconnu pour sa présence dans la pratique.

Les nombres négatifs viennent donc avec les banques, à la même période que $\sqrt{-1}$ qui conforte le concept de nombre négatif. **Dès lors, le zéro entre en jeu comme la charnière entre positifs et négatifs.**

Un des plus grands efforts du XVIII^e siècle est le classement des fonctions par Euler. **Au XVIII^e naît l'analyse.** Les choses se passent de manière très empirique. On travaille sur l'intuition : il y a une *continuité* dans les solutions d'équations ;

Le XIX^e siècle met de la rigueur. On se pose la question de la définition des nombres entiers, des rationnels, des réels. Qu'est-ce que $\sqrt{2}$? Au XVII-XVIII, l'intuition règne en math, on accepte les choses sans les donner. **Le XIX^e est marqué par un gigantesque effort d'axiomatisation des maths,** notamment de **Dedekind et Cantor.** Ils vont adopter la notion de coupure, grâce à laquelle ils vont définir les réels à partir des rationnels. On tente donc de définir ce qui est admis dans la pratique parfois depuis des siècles.

12.2 L'infini

Démocrite dit que le cône n'existe pas, parce que si on le coupe en tranches, c'est soit un cylindre, soit un cône si il n'a pas des tranches de même diamètre. Les paradoxes de Zénon sont une autre illustration de l'infiniment petit.

Qu'est-ce qu'une vitesse instantanée ? Un corps qui tombe passe-t-il par "tous les degrés de vitesse" ? Galilée affirme que c'est le cas, sans aucun fondement réel, c'est un postulat. **Cavalieri** va innover : il va introduire le concept d'indivisible au XVII^e siècle. Il démontre que la diagonale d'un parallélogramme le coupe en deux triangles égaux en utilisant les indivisibles. Chaque triangle traversé par un segment a le même dans l'autre, donc ils sont égaux. Il prend bien soin de ne pas dire que $triangle = \sum segments$ car ils ont une épaisseur nulle.

Il y a deux approches métaphysiques aux objets mathématiques : **l'approche platonicienne**, où l'homme découvre les mathématiques qui n'attendent qu'à être décelées, et **l'approche constructive**, où la société construit les objets mathématiques pour s'attaquer à des problèmes.

Parlons du calcul infinitésimal, alias l'analyse. Son histoire a été marquée par la maîtrise de l'infiniment petit qui forme une réussite colossale. Pour rappel, Cavalieri parle d'indivisibles : il peut faire une bijection entre les segments d'un triangle sur l'autre. Le calcul de $0 * \infty$ n'a pas de sens à l'époque, car empiler des segments d'épaisseurs nulle donne une surface nulle, or, les résultats plus tard montreront que $0 * \infty$ est indéterminé.

Un concept important émerge : **la dérivation**, inventée par Newton et Leibniz. Newton invente le calcul différentiel et intégrale se basant sur ce qui existait déjà lors de son *Annus Mirabilis*. Il va s'intéresser à la mesure de surfaces, et va découvrir des règles sur le calcul d'intégrales définies. Une question va beaucoup le tracasser : on somme des indivisibles au sens de Cavalieri.

Leibniz est un esprit remarquable. En voyage à Paris, il découvre des travaux de Pascal sur les dérivées, et va lancer des recherches dans ce domaine. En 1685, Leibniz publie ses résultats, et ce sera une raison pour la publication anticipée des principes de Newton. Leibniz introduit la notation intégrale et différentielle ainsi que des règles de dérivation : $\int, \sum, dx...$ La notation simple de Leibniz fait succès. **Bernoulli** aidera à la répandre. Newton utilisait des notations qui ne faisaient pas apparaître les éléments infinitésimaux. Euler utilisera plus tard ces outils pour étudier les fonctions.

En Angleterre, Newton a une telle emprise, même après sa mort, que les mathématiciens anglais restent dans sa trace sans élargir leurs horizons. Ceci se traduit par un blocage au niveau de la notion d'infinitésimale d'indivisible. Newton eut du mal avec ceci. Pour contourner le problème, il parle de *fluxions et fluentes*. Les fluentes sont des fonctions de variables indépendantes, et les fluxions sont les "vitesse instantanées" des variables par rapport au temps.

Cette difficulté de Newton sera sévèrement critiquée, notamment par le philosophe Berkeley, qui dit que les mathématiciens ne savent même pas définir la vitesse instantanée, et qu'ils ne peuvent alors discuter de théologie, "*science tellement plus compliquée*".

Newton introduit la méthode des dernières raisons (raisons = rapport) des quantités évanouissantes (qui tendent vers zéro). **Cette approche est proche de la moderne.**

Augustin Cauchy (1789-1857) étudie notamment les fonctions à variables complexes. **Il va rigoureusement définir la dérivée** : c'est la limite d'un rapport. On ne fait plus intervenir d'infiniments petits, et la notion de limite est intuitive.

Weierstrass (1815-1897) tente de définir l'analyse à partir de l'arithmétique, c'est l'arithmétisation, où on travaille à partir des nombres réels, où il n'y a pas d'infiniment petit. L'idée de Weierstrass est qu'on ne fait rien tendre vers zéro, mais si on lui donne un nombre, il peut toujours en construire un plus petit.

Les nombres sont construits à partir de la théorie des ensembles. Les nombres sont la base même de l'arithmétique. La théorie des ensembles permet de construire de manière abstraite les naturels. **On axiomatise l'arithmétique** : à partir des ensembles, on peut construire toutes les mathématiques.

Hilbert (1862-1943) veut redéfinir la géométrie de manière axiomatique tout à fait abstraite pour se débarrasser de l'intuition. **L'axiomatisation veut rendre les maths les plus abstraites possible.** L'axiomatisation causera des bagarres violentes entre nations (époque nationaliste), où les Anglais, Français et Allemand s'attaqueront mutuellement. Les axiomatistes ne parlent que d'objet qu'ils savent construire.

Et pour l'infini grand ? Remontons à la Grèce antique. Les apories de Zénon butaient sur l'infiniment divisible. Les Grecs voient l'infiniment grand comme contradictoire. Prenons une droite infinie, si on en retire un bout, elle devient soit fini, soit infinie. Un segment de 10cm et un de 20cm ont une infinité de points, pourtant ils n'ont pas la même longueur, c'est paradoxale. Les Grecs n'utilisent jamais l'infini dans leur démonstration. Un cercle n'est pas un polygone à nombre infini de côtés.

Comment Aristote répond-t-il aux apories de Zénon ? À l'impossibilité du mouvement ? Il le fait de manière subtile : **il y a deux façons d'être : être en acte (actuellement, en réalité) et être en puissance (ce qui peut devenir, le potentiel).** L'infini existe de manière potentielle, car on y arrive jamais, mais néanmoins, il pourrait exister car on peut toujours augmenter une quantité. L'infini n'existe pas en acte, car un polygone à nombre infini de côtés n'est pas possible.

L'espace non plus n'est pas infini. Le cosmos a un centre du monde, et un univers infini n'a pas de centre. Néanmoins, l'espace est infini dans le temps. Contradiction ? Non, dit Aristote, car le passé est passé et ne coexiste pas avec le présent. On n'est pas un infini en acte, car seul le présent existe. Passé et futur ne coexistent pas avec l'actuel.

Au Moyen-Âge, on a divers courants ; l'infinie sera valorisé notamment chez les Arabes. Cette valorisation sera liée à la toute-puissance de Dieu, et devient une caractéristique de ce dernier. Quelles sont les propriétés de Dieu ? Peut-on dénombrer ses qualités ? Dire que "Dieu est grand" le rend en deçà de ce monde, alors qu'il le transcende ; c'est trop limitatif : Dieu n'est pas fini, il est infini, et l'infini devient un attribut positif (opposé au négatif du non fini grec).

L'infini est-il plus grand que ses parties ? si le monde était infiniment ancien, on aurait un nombre infini de rotations du Soleil autour de la Terre, et la Lune tout autant. Pourtant, la lune tourne 12 fois plus autour de la Terre, d'où l'absurdité pour l'époque. Ceci est pris comme une preuve de la finitude du monde comme le dit la Bible. **C'est donc une solution théologique.** "*Comparer Soleil et Lune n'est pas correcte, c'est comme comparer pommes et poires*". C'est une des discussions menées à l'époque de Galilée. Autre problème : il y aurait une infinité d'âmes au Paradis, où mettre tout le monde au Jugement Dernier ? On réplique que le monde spirituel n'est pas dénombrable, n'est pas matériel. Si Dieu est infiniment bon, il a fait une infinité de monde avec une infinité d'humanités pour que tout le monde soit heureux.

Galilée constate quelque chose au sujet des nombres d'entiers : à chaque nombre correspond un pair (son double), et à chaque paire correspond un nombre (sa moitié). Il dit que *"notre façon de penser n'est peut-être pas applicable à l'infini"*. Ceci contient le germe de ce qui va se passer au XIXe siècle avec Cantor notamment.

Cantor retourne les paradoxes de Zénon : l'infini existe quand le tout est *"la même chose"* que sa partie, alors qu'avant, le tout devait être plus grand que sa partie. Il va construire une nouvelle notion en mathématique : **la puissance d'un ensemble infini**, par analogie au cardinal à un ensemble fini.

La puissance : deux ensembles infinis ont même puissance s'il existe une bijection entre eux. Cantor montre que \mathbb{N} et \mathbb{Q} ont même puissance, qu'il nommera *"puissance du dénombrable"*. Pour ce faire, il classe les rationnels $\frac{p}{q}$ par leur somme $p + q$.

Comment montre-t-il que $|R| \neq |N|$? Il emploie l'argument de la diagonale. supposons qu'une liste de réels successifs est possible. On peut construire un nombre qui diffère de chaque nombre de la liste, sans en faire partie : la liste est incomplète, et donc $|R| > |N|$

Y a-t-il des infinis entre les deux ? On a montré que c'est un problème indécidable. On en viendra à l'axiome du choix, qui est un gros problème de mathématiques du XXe siècle. Le plus petit nombre naturel r infini n'a pas de prédécesseur immédiat, tandis que $\forall n \in \mathbb{N}, n$ en a un. Il y a donc un *saut*.

Cantor insiste sur la fondation des réels sur la théorie des ensembles. Bertrand Russell regarde l'ensemble des ensembles qui ne se contiennent pas eux-mêmes. Ce dernier se contient-il lui-même ? autre paradoxe, si on fait un livre qui contient tous les livres des bibliothèques, dans quelle bibliothèque le placer ?

Quand on se donne un système d'axiomes, est-ce que ces axiomes de départ sont-ils cohérents, ou peuvent-ils mener à des contradictions. **Le mathématicien allemand Gödel** démontre qu'on ne peut démontrer au sein d'un système d'axiomes, que ce dernier est cohérent. On ne peut montrer la cohérence de la base des mathématiques : l'arithmétique. C'est une découverte fracassante du XXe siècle.

L'axiome du choix est indécidable : on doit choisir soit oui, soit non. Le XXe siècle donne donc un coup aux mathématiques, qui ne sont plus la base rigoureusement solide qu'on pensait, à cause de tous ces problèmes indécidables.

12.3 Géométries non-euclidiennes

La géométrie euclidienne repose sur une série d'axiomes et de postulats (énoncés pas évidents, une définition est un postulat d'existence). Un grand postulat d'Euclide est le fait qu'il ne passe qu'une droite et une seule parallèle en un point extérieur à une droite. Un postulat équivalent joue sur l'équivalence d'angles. Les Arabes ne vont pas l'accepter comme un postulat, ils vont tenter de le démontrer. Ils vont procéder par l'absurde : nier le postulat pour arriver à des contradictions. Ils n'y arrivent pas.

Au XVIIIe siècle, Saccheri et Lambert tentent à leur tour, mais ne parviennent pas à démontrer le postulat d'Euclide. On n'arrive pas à démontrer non plus qu'il est faux. Se développer donc une géométrie ne reposant pas sur le postulat, la géométrie *"anti-euclidienne"* qui cherche à démontrer Euclide.

Au XIXe siècle, 3 savants découvrent presque en même temps qu'il y a bien plus en jeu : **Gauss (1777-1855)** montre qu'en niant Euclide, il trouve une série de théorèmes et se rend compte que c'est une nouvelle géométrie tout aussi valable. Une conséquence de sa géométrie : la somme des angles d'un triangle ne valent plus deux angles droits. Gauss ne publie pas ces résultats. Il trouve une géométrie cohérente qui suffit à elle-même, mais qui est bizarre car par exemple, par un point extérieur à une droite ne passe aucune droite parallèle.

sur une sphère, une droite devient un grand cercle, et si un point est l'intersection entre deux droites, ça devient des *"bipoints"*. Dans cette sphère, le postulat d'Euclide est faux.

Labatcgevsy (1793-1856) fait une autre négation du postulat : il dit qu'il passe deux ou plusieurs droites parallèles par un point extérieur. Dès lors, la somme des angles d'un triangle est inférieure à deux angles droits.

Bolyai (1802-1860) définit aussi sa propre négation.

Ces trois savants ont donc inventé la géométrie non-euclidienne.

Le disciple de Gauss, *Riemann (1826-1866)* établira une vraie théorie de la géométrie non-euclidienne.

Le statut de *vérité* en mathématiques change, puisqu'on peut nier des postulats, ce qui mène à deux géométries *vraies*. Mais quelle géométrie correspond à la réalité du monde physique ? **On distingue dès lors vérité et réalité**, il y a une véritable séparation entre mathématiques (qui cherchent la cohérence et à éviter la contradiction) et la physique.

Les géométries non-euclidiennes ne sont pas facilement reçues. Frey, éminent logicien, dit que si Euclide est vrai, alors nécessairement Riemann est faux.

Hilbert continue le travail de Gauss et des autres, et va se retrouver confronté à Brouwer. Hilbert tente d'axiomatiser la géométrie. Il dit qu'on peut être cohérent et faux. Hilbert va démontrer une série de choses sur des objets abstraits mais qui sont vraies. Brouwer exige plutôt qu'il travaille sur du concret.

13 La science chinoise

Attention : ce chapitre peut changer d'année en année.

La civilisation chinoise est extrêmement ancienne. Elle date du néolithique, le long du Fleuve Jaune. L'écriture y naît vers -2000. Beaucoup de Chinois savent lire l'écriture sans savoir comment la prononcer localement, c'est une grande puissance de cette écriture.

Les différentes dynasties chinoises correspondent à des périodes successives d'unification et de féodalité. La civilisation est extraordinairement continue, la culture reste malgré les changements politiques (invasions mongoles...). Les Mongols détruisent Bagdad, mais en Chine s'inspirent plutôt de la culture.

La Chine est le pays le plus avancé techniquement jusqu'au XVII-XVIIIe. Qu'est-ce la technique ? Agriculture, transport, métallurgie, art de la guerre. En Occident, on oppose sciences et techniques, mais cette distinction n'existait pas en Chine. Comment se fait-il que les Chinois se font rattraper et dépasser aussi brutalement ? C'est lié à la révolution scientifique occidentale. Pourquoi ne s'est-elle pas produite en Chine ?

La science n'a pas le même statut en Occident et en Chine.

L'agriculture : le développement agricole va développer l'environnement urbain où se concentre la culture. Au I siècle avant JC : découverte du **harnais à collier**. La haute technique agricole permet de nourrir la population.

La métallurgie : IVe siècle avant JC : la fonte, le soufflet (permet d'avoir un souffle important et continue d'air). Le soufflet permet aux chinois de développer de l'acier. Ces entreprises appartiennent à l'Empereur.

Le transport : la brouette au I siècle avant JC. En Occident, elle n'apparaît qu'à l'époque des cathédrales. L'étrier arrive en occident bien plus tard. On verra aussi le gouvernail.

Découvertes critiques : la boussole, la poudre à canon (permettra aux monarchies occidentales de conserver la féodalité) et l'imprimerie. Les aimants apparaissent sous forme de cuillers, utilisés par les géomanciens. Ils sont utilisés en navigation maritime chinoise dès le VIIIe siècle.

Pour l'imprimerie, on a besoin de papier (IIe siècle avant JC), qui sera perfectionné au II-IIIe siècle de notre ère.

La société chinoise est historiquement très profonde. Au VI-Ve siècle avant JC, vient le personnage bizarre qu'est Confucius, mais d'autres aussi. On oppose deux écoles : réactives / interventionniste, l'autre voulant être en continuité du monde (**Taoïsme et Confucianisme**).

Parmi les interventionnistes, on parle souvent de Mo Di (*les mohistes*) qui prône les milices d'auto-défense pour préserver la paix. Il accompagnera ceci de la propagande de la connaissance par l'action. On aura un autre courant : **les légistes**. Ils vont tenter de réguler la société par des règles absolutistes.

En face, on a les courants confucianistes qui ont prôné par Confucius et son disciple Mencius. Leur but est de connaître l'homme et la société pour s'y adapter : culte des ancêtres, idéalisation du passé, respect de l'autorité, connaissance de l'homme. On met l'accent sur la sociologie, mais une sociologie qui se conforme avec le monde ("*ce n'est pas en tirant sur elles qu'on va faire pousser les plantes*"). On cherche le Tao, l'essence de l'homme. C'est une philosophie d'harmonies, très conservatrice.

L'empereur s'appuie sur une classe de fonctionnaires élevés par mérite, en contraste avec l'hérédité de la féodalité occidentale. Il y a un système de concours et d'examen. Il y a une classe bureaucratique / intellectuelle qui sera tout à fait ralliée au confucianisme. À certaines périodes, leur formation est même basée sur la connaissance des textes de Confucius. Les bureaucrates doivent être en harmonie pour aider la société.

Le confucianisme n'est pas une religion. Les jésuites et même Voltaire seront fascinés par la tradition chinoise. **La religion taoïste** est plus proche du peuple. L'histoire de la Chine est parsemée de révoltes et émeutes de paysans. Le taoïsme apportera aussi des développements en alchimie.

Les légistes vont au IIIe siècle brûler tous les livres, donc les textes confucéens. Ils vont imposer un totalitarisme qui sera rejeté par le peuple, qui reprendra la pensée de Confucius.

En Chine, on a 5 éléments : eau, feu, métal, terre et bois. On a les 5 directions : Nord, Sud, Est, Ouest et Centre. Les 5 couleurs et les astres correspondants : **c'est le tao de l'Univers.**

Différence avec l'Occident Oppositions : le rôle de la loi en Occident. Les lois scientifiques sont un concept central en Occident. Pourquoi utilise-t-on le terme *loi* ? Ça remonte à nos racines grecques et hébraïques, où Dieu était un législateur, il impose des lois. La science cherche à trouver les lois que Dieu a législé. Au Moyen-Âge, on poursuit et on exécute des animaux. Si un coq est soupçonné d'avoir pondu un œuf, il est contre la loi de Dieu, on lui fait un procès suivi d'une exécution publique.

En Chine, il n'y a pas de Dieu absolu. On ne recherche pas Dieu, mais l'Univers. Il n'y a pas de lois, mais des relations de sympathie entre éléments.

En Occident, l'action se fait par contact (loi des chocs de Galilée, collisions de Descartes...). En Chine, ce n'est pas le cas. Rien n'a de corps ; autrement dit, on aurait plus de chances de trouver les ondes avant les particules. **En Chine, il n'y a pas de classe marchande dynamique comme en Occident,** moteurs de l'explosion du développement scientifique.