



Formation continue des
enseignants



La pluridisciplinarité dans les enseignements scientifiques

Actes de l'université d'été organisée du 16 au 20 juillet 2001 à l'Institut de recherche sur
l'enseignement des mathématiques de Poitiers dans le cadre du programme national de
pilottage de la direction de l'enseignement scolaire

Histoire des sciences Tome 1

Ces actes ont été publiés en collaboration avec le CRDP Basse-Normandie dans la collection «Les
Actes de la DESCO»

15 mai 2003

Sommaire

Ouverture des travaux <i>Évelyne Barbin</i>	3
--	---

La connaissance de la Terre et du Cosmos

Voyage à l'intérieur de la Terre : de la géographie antique à la géophysique actuelle, une histoire des idées	6
<i>Vincent Deparis</i>	

Les miroirs de Galilée	17
<i>Dominique Bénard</i>	

L'origine et l'évolution du vivant

Buffon et les théories de la génération au XVIII ^{ème} siècle	29
<i>Jean-Louis Fischer</i>	

Le rôle créateur des mathématiques en sciences de la vie.....	46
<i>Guy Rumelhard</i>	

La construction des concepts et des théories scientifiques

Le débat sur les atomes au XIX ^{ème} siècle	57
<i>Myriam Scheidecker-Chevallier</i>	

Regards croisés de l'histoire des sciences et de la didactique de la physique.....	73
sur le concept d'onde <i>Laurence Maurines et Arnaud Mayrargue</i>	

Les sciences et les arts

Les sciences des artistes : musique, couleur, et perspective chez Alberti	86
<i>Marie-Noëlle Racine, Patrick Guyot et Philippe Regnard</i>	

La musique au carrefour des mathématiques, des sciences et des arts.....	103
<i>Anne Boyé</i>	

Ouverture des travaux

Evelyne Barbin,

Maître de conférences, IUFM de Créteil ; IREM Paris VII

Responsable scientifique de l'université d'été

L'histoire des sciences est une nécessaire raison pour vouloir lier les disciplines enseignées les unes aux autres et un excellent terrain pour penser ces liaisons. En effet, la compréhension d'un texte ancien demande souvent de le situer dans le contexte scientifique, philosophique et culturel de son époque. Par ailleurs, les créations des différentes disciplines scientifiques sont des faits historiques. L'histoire des sciences montre que la séparation des disciplines est une manière d'explicitier des distinctions établies par les scientifiques dans l'analyse de problèmes. Mais elle indique aussi que l'établissement de ces distinctions n'interdit pas aux scientifiques d'établir des passerelles ou des analogies entre les disciplines dans la résolution de ces problèmes. Autrement dit, s'il est nécessaire de savoir écarter, il est aussi fécond de savoir rapprocher.

Pour aborder la situation complexe de l'enseignement scientifique et de ses disciplines, il est intéressant de comparer certains propos d'Aristote à d'autres de Descartes, en les situant vis-à-vis des intentions des auteurs. Dans son *Organon*, Aristote veut distinguer la science de l'opinion. Il appelle savoir scientifique une connaissance obtenue par le moyen d'une démonstration qui procède par syllogisme à partir de prémisses vraies. Ces prémisses sont les causes des conclusions, elles leur sont nécessairement appropriées et elles définissent ainsi des « genres », dont Aristote pose l'incommunicabilité. Dans ses *Règles pour la direction de l'esprit*, Descartes veut diriger celui qui désire acquérir la science. Il considère qu'il est beaucoup plus facile d'apprendre toutes les sciences ensemble que d'en séparer une seule des autres, car « elles sont toutes unies entre elles et dépendantes les unes des autres ». Ce sont des intentions bien différentes qui conduisent chez l'un et l'autre penseur à un cloisonnement et à un décroisonnement des disciplines. Mais ni l'une, ni l'autre, ne sauraient être laissées de côté aujourd'hui dans l'enseignement. D'une part, la distinction entre science et opinion n'est toujours pas une chose aisée, à laquelle font écran les opinions sur la science et les sciences de l'opinion. D'autre part, l'approche constructiviste de l'apprentissage scientifique demande de considérer la détermination de chaque discipline, non comme une donnée *a priori*, mais comme le résultat d'une élaboration révisable.

Il est donc nécessaire à la fois de garder des enseignements scientifiques cohérents et de proposer une approche pluridisciplinaire fructueuse. L'histoire des sciences peut ici jouer un rôle essentiel, si elle ne devient pas une discipline scolaire de plus, détachée de la pratique des sciences proprement dites. Il s'agit, plutôt et d'abord, de rassembler des enseignants autour de cette histoire. Il s'agit de répondre au souhait exprimé dans le rapport Lecourt, celui de « montrer aux élèves une réflexion commune de leurs enseignants sur les démarches, les perspectives et les enjeux des sciences qu'on leur enseigne ».

L'université d'été de Poitiers a rassemblé pendant une semaine plus de 120 participants, enseignants de collège et de lycée, universitaires, formateurs d'enseignants, dans les disciplines suivantes : mathématiques, sciences physiques, sciences de la vie et de la Terre, philosophie, lettres et histoire. Elle avait pour objectif de susciter une réflexion en profondeur sur les méthodes et les

contenus de l'enseignement scientifique, à partir d'une étude de la construction historique et épistémologique des savoirs scientifiques. Cette approche situait d'emblée l'enseignement dans une perspective pluridisciplinaire, en replaçant les sciences dans l'histoire des idées, des sociétés, des techniques. Elle avait aussi pour objectif d'apporter aux enseignants de nouvelles pistes pour réaliser des innovations, dans le cadre de la rénovation des programmes scientifiques. Les thèmes abordés concernaient particulièrement la mise en place des travaux croisés au collège et des TPE (travaux personnels encadrés) au lycée.

Les travaux se sont déroulés essentiellement en ateliers, et ils proposaient trois volets. D'abord, la construction historique de savoirs scientifiques dans le contexte technique, culturel, philosophique et social d'une époque. Ensuite, l'approche épistémologique et historique de l'activité scientifique : rôle des problèmes, des expériences, de la conjecture, de l'écriture, de la rigueur, de l'analogie, de la déduction, de la modélisation et de la preuve. Enfin, l'histoire des sciences comme ressource pour des activités pluridisciplinaires dans l'enseignement scientifique.

Les actes présentés dans ce volume sont réunis autour de quatre thèmes étudiés lors de l'université d'été : la connaissance de la Terre et du Cosmos, l'origine et l'évolution du vivant, la construction des concepts et des théories scientifiques, les sciences et les arts.

Qu'y a-t-il à l'intérieur de la Terre ? Qu'y a-t-il à l'extérieur de la Terre ? Deux disciplines correspondent aujourd'hui à ces deux questions, la géophysique et l'astrophysique. Vincent Deparis explique comment, au cours de l'histoire, l'intérieur de notre planète a été conçu, grâce à l'interprétation de phénomènes observés en surface, comme les tremblements de terre, les éruptions volcaniques, les mesures de température ou de gravité. Dominique Bénard montre que l'héliocentrisme s'oppose aux conceptions cosmologiques des Anciens autour de deux points majeurs. D'une part, il n'y a plus de différence de nature entre le Ciel et la Terre et, d'autre part, la Terre est animée de deux mouvements, un mouvement annuel autour du Soleil et un mouvement diurne sur elle-même. La lecture des textes de Galilée met en évidence les relations entre expérimentations et mathématiques dans la nouvelle physique.

Comment se produit et comment évolue le vivant ? Jean-Louis Fischer examine la théorie de la reproduction qu'élabore Buffon, en opposition aux théories de la génération du 18^{ème} siècle. À une époque où les naturalistes et les médecins ont le souci de donner un caractère scientifique à leurs systèmes par un recours aux mathématiques et à la physique, il montre comment Buffon fait appel à l'attraction newtonienne pour fonder sa théorie. Guy Rumelhard considère que les relations entre les mathématiques et les sciences de la vie ne doivent pas être perçues dans l'enseignement sur le mode de la discipline outil ou sur le mode de l'illustration. Il explique que la volonté de fournir une explication scientifique à partir d'observations ou d'expérimentations modifie la conception de ces relations, en obligeant à penser le rôle des modélisations et des simulations (dynamique d'une population, génétique des populations, modélisation des formes).

Deux exemples de construction de concepts scientifiques, présentés dans ce volume, concernent les atomes et les ondes. Myriam Scheidecker présente les débats autour de l'élaboration du concept d'atome entre scientifiques, chimistes et physiciens. Au début du 19^{ème} siècle, l'hypothèse atomique de Dalton permet aux chimistes de rationaliser un certain nombre de faits expérimentaux, mais, au milieu du siècle, l'incapacité d'harmoniser les valeurs des poids atomiques conduit certains chimistes à refuser les atomes. Tandis que, chez les physiciens, le débat sur l'existence des atomes fait rage entre les atomistes et les énergétistes. Laurence Maurines et Arnaud Mayrargue s'appuient sur des textes historiques et sur des recherches didactiques pour montrer qu'un parallèle peut-être fait entre les difficultés rencontrées autrefois par les scientifiques lors de l'élaboration du concept d'onde et celles rencontrées aujourd'hui par les élèves lors de l'apprentissage de ce concept.

Le dernier chapitre concerne un thème pluridisciplinaire qui mériterait d'être exploité dans l'enseignement, celui des relations entre arts et sciences. Marie-Noëlle Racine, Patrick Guyot et Philippe Regnard explorent ces relations à partir des travaux, au 15^{ème} siècle, d'Alberti sur la musique, la couleur et la peinture. Anne Boyé part d'un texte d'Euler pour montrer que sa théorie de la musique concerne plusieurs disciplines scientifiques, la physique, la biologie et les mathématiques.

Les contributions que rassemblent ce volume ne présentent que quatre thèmes, parmi d'autres thèmes étudiés lors de cette université d'été. Mais ces exemples illustrent bien les possibilités de ressources que des équipes interdisciplinaires d'enseignants peuvent trouver dans l'histoire des sciences. L'histoire des sciences peut permettre aux enseignants, et à leurs élèves, de relier d'emblée des disciplines entre elles, mais elle permet aussi, aux uns et aux autres, de penser chacune des disciplines dans sa spécificité.

Voyage à l'intérieur de la Terre : de la géographie antique à la géophysique actuelle, une histoire des idées

Vincent Deparis,

Ingénieur de recherche, Maison des sciences de l'Homme, Alpes (Grenoble)

Comment connaître l'intérieur de la Terre ? Les profondeurs du globe étant à jamais inaccessibles, ce n'est que par l'interprétation des phénomènes observés en surface, tels les tremblements de terre, les éruptions volcaniques, l'augmentation de température dans les mines ou la nature des roches, que l'homme a pu, au cours des temps, imaginer les conditions qui règnent au cœur de notre planète. Feux intérieurs, vastes cavités, gigantesque sphère aqueuse, et plus récemment réservoirs de magma en fusion et modèles multicouches les plus variés, l'histoire est riche de spéculations parfois audacieuses sur les profondeurs de la Terre. C'est cette histoire que nous allons maintenant parcourir.

I. La vision de nos lointains ancêtres

Tout commence au VI^e siècle avant Jésus-Christ, lorsque les premiers philosophes vivant sur le pourtour de la Méditerranée, tels Thalès (v.625-v.547 av. J.-C.), Anaximandre (v.610-v.547 av. J.-C.), Pythagore (v.570-v.480 av. J.-C.), puis Platon (428-348 av. J.-C.) et Aristote (384-322 av. J.-C.), s'interrogent sur le fonctionnement de la nature. Pour eux, la Terre est ronde et se maintient en équilibre, sans aucun support physique, au centre du Ciel lui aussi sphérique.

Pour Aristote, au IV^e siècle av. J.-C., la Terre est exclusivement formée de l'élément terre ; elle est entourée d'eau, puis d'air et enfin d'une couche de feu. Au-delà, c'est le monde des astres et de l'éternité. La partie superficielle du globe contient des cavités internes et des canaux. Le vent (ou souffle interne), sortant des cavités, provoque des tremblements de terre. Lorsqu'il est broyé en petites particules, il prend feu et donne des volcans. Cette vision de la Terre perdure pendant toute l'Antiquité et le Moyen Âge.

II. Les voyages de découverte

Au XIV^e siècle, le monde connu est encore très peu étendu. Il se limite à l'Europe, au nord de l'Afrique et à l'Asie, ne couvrant qu'un quart du globe. Que contiennent les autres quartiers de la Terre, ont-ils également des terres émergées ou sont-ils purement océaniques ?

Buridan (1300-1358) explique que la terre et l'eau forment deux sphères de centres distincts : la terre domine donc la mer sur un seul quartier et est entièrement recouverte dans les autres. La découverte de l'Amérique par Christophe Colomb (1450-1506) en 1492, puis les explorations maritimes de Vasco de Gama (1469-1524), de Vespucci (1454-1512) et de Magellan (1480-1521) montrent cependant que la thèse de Buridan est fautive : dans toutes les parties du globe, il existe des terres émergées et des habitants. Les océans ne font que combler les dépressions les plus profondes du relief terrestre.

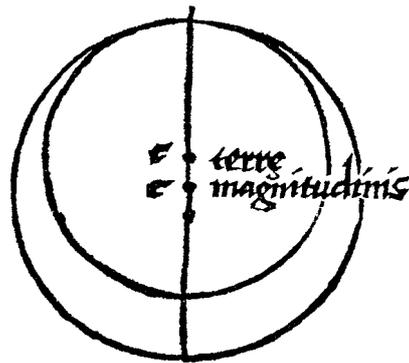


Figure 1 : Les sphères d'eau et de terre de Buridan de centres décalés

III. Les premières représentations des profondeurs

Avec la révolution astronomique de Copernic (1473-1543), les idées des Anciens sur la Terre sont rejetées. Une nouvelle représentation émerge.

Descartes (1596-1650), qui est philosophe, est le premier en 1644 à imaginer le monde souterrain. Pour lui, la Terre est un ancien Soleil qui a subi une évolution particulière. Au centre, on trouve un noyau de matière solaire, recouvert d'une couche compacte de la même matière que les taches solaires. Ensuite vient une couche de terre dense, une couche d'eau, une couche d'air et une nouvelle couche de terre plus légère qui se maintient au dessus du vide comme une voûte. La Terre de Descartes est donc creuse ! La couche externe est toutefois en équilibre instable. Séchée par le Soleil, elle se fendille, et finit par s'écrouler d'une manière inégale dans les couches internes, expulsant l'eau qui forme les océans. Descartes décrit ainsi à la fois la genèse de la Terre et sa structure interne. Il raconte comment les montagnes se sont formées, par effondrement, lors d'une immense catastrophe planétaire originelle.

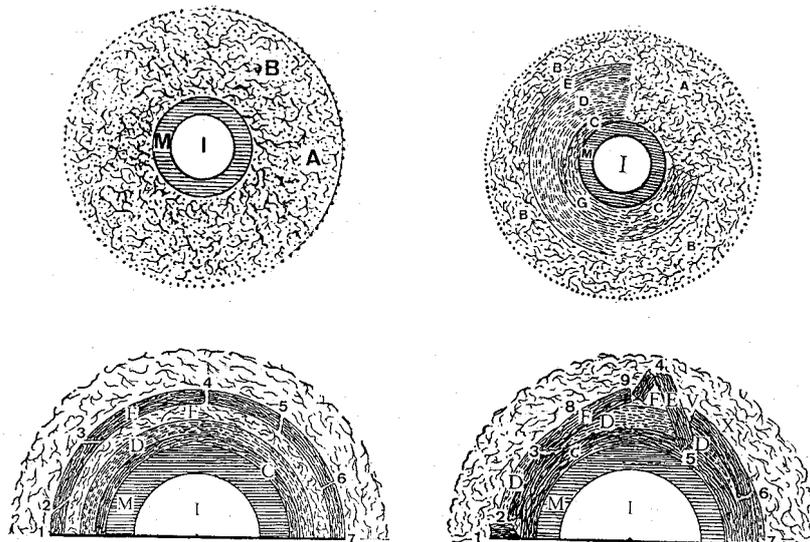


Figure 2 : Étapes de la formation de la Terre, selon Descartes

Kircher (1602-1680), un père jésuite, donne en 1665 une deuxième représentation de la Terre, tout à fait différente. Pour lui aussi le globe est un ancien Soleil refroidi, mais il cherche à expliquer les éruptions volcaniques. La Terre possède un foyer central impétueux, à peine dompté, relié aux volcans de la surface par des conduits de feu avec des réserves intermédiaires, les « pyrophylicies ». Les

volcans manifestent l'activité interne du globe, ce sont des soupiraux par lesquels s'échappe le feu intérieur.

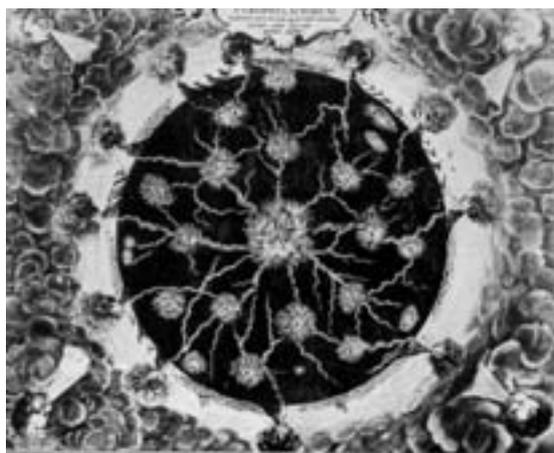


Figure 3 :Le monde souterrain de Kircher

IV. Peut-on expliquer le Déluge biblique ?

Après Descartes et Kircher, les visions du monde souterrain se multiplient rapidement, avec une grande liberté. Une des motivations est de raconter la formation de la Terre et de proposer une explication scientifique du Déluge biblique.

En 1681, Burnet (1635-1715), qui est un théologien réputé, pense que le globe était initialement un chaos fluide de tous les éléments qui s'est mis en ordre par l'effet de la gravité : les parties lourdes descendant vers le centre, les parties légères remontant vers la surface. La Terre est constituée d'une couche interne de terre, puis d'une couche fluide, puis d'une nouvelle couche de terre. Il ajoute au centre un noyau de feu. La couche externe, fissurée par la chaleur du Soleil, s'effondre, provoquant la sortie des eaux et le Déluge. C'est lors de cet épisode que la surface terrestre est façonnée avec ses montagnes et ses bassins océaniques.

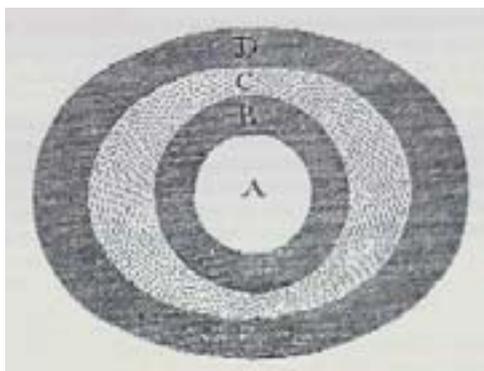


Figure 4 : L'intérieur de la Terre selon Burnet

Woodward (1665-1728), grand naturaliste de terrain, est marqué par la superposition des couches géologiques, qui forment souvent de véritables empilements. Il suppose en 1695 que toutes les roches ont été dissoutes dans l'eau du Déluge, puis se sont redéposées en couches concentriques par ordre de gravité. La Terre est formée d'une immense sphère aqueuse, recouverte des couches de terrain disposées par ordre des densités. Des fentes ou des ouvertures établissent une communication entre la sphère d'eau interne et le fond des océans.

Whiston (1667-1752), qui est chapelain, imagine en 1696 que la Terre est une ancienne comète. Elle possède un noyau solide chaud, une couche de fluide dense, puis une couche de terre en équilibre sur le fluide : le relief est créé par la différence de densité des parties de la croûte qui s'enfoncent différemment dans le fluide. Le Déluge survient lors du passage d'une nouvelle comète. Celle-ci

abandonne la vapeur d'eau de sa queue à la Terre, ce qui crée les pluies diluviennes, et fissure la couche externe du globe à cause des forces de marées qu'elle exerce, d'où l'irruption des eaux internes. Lorsque la comète s'éloigne, une partie de l'eau du Déluge s'évapore, une autre regagne les profondeurs et une dernière forme les mers : la Terre a acquis son aspect actuel.

V. Des modèles étonnants

D'autres modèles, qui peuvent paraître plus extravagants, sont proposés.

En 1693, Halley (1656-1743), astronome contemporain de Newton, est intrigué par la variation temporelle du champ magnétique de la Terre observée au cours du siècle. Pour l'expliquer, il suppose que la Terre est creuse et qu'elle contient un noyau aimanté en rotation libre. Plus tard, il émet des propos plus audacieux : la Terre serait formée de trois arches (ou coquilles) et d'un noyau aimantés tournant avec des vitesses différentielles. Les dimensions des sphères internes correspondent aux rayons de Mercure, Mars et Vénus ! Les arches se tiennent en équilibre grâce à une force magnétique qu'elles génèrent et qui s'oppose à la gravitation. Elles sont supposées habitées et séparées les unes des autres par des milieux raréfiés.

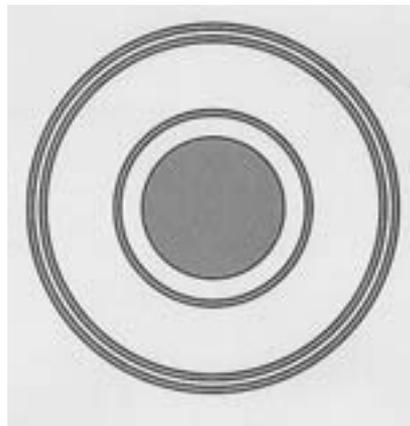


Figure 5 : Les trois arches et le noyau du modèle de Halley

En 1721, Gautier (1660-1737), un ingénieur des Ponts et Chaussées, pense lui que la Terre est entièrement creuse et qu'elle est comparable à un ballon ou à une vessie pleine d'air ! La mince couche externe, qui a moins de 5 km d'épaisseur en moyenne, est maintenue par deux forces opposées : la gravité et une force provenant de la rotation de la Terre. Les deux côtés de la croûte sont parfaitement symétriques et ainsi un monde est également possible sur la face interne avec ses mers et ses montagnes ! Le modèle curieux de Terre creuse de Gautier est fondé sur des intuitions géologiques pénétrantes. Gautier explique ainsi les soulèvements et les effondrements de la croûte, ce qu'il ne pouvait pas faire en supposant une Terre pleine.

En 1740, Moro (1667-1740), abbé à Venise, affirme que tous les reliefs ont une origine volcanique. Il a été impressionné par la surrection d'une île nouvelle dans l'archipel grec, près de Santorin et pense que les soulèvements de la croûte forment des cavités internes, soit remplies de substances ignées enflammées, soit moulées par un noyau igné déformable.

VI. De l'imagination aux investigations scientifiques

La panoplie des représentations du monde souterrain est donc impressionnante au milieu du XVIII^e siècle. Toutes sont judicieuses mais laquelle est juste ?

En 1778, Buffon (1707-1787), intendant au Jardin du Roi, se propose de développer une théorie de la Terre qui repose sur des arguments solides, durement éprouvés, acceptables pour tous. Il affirme que la Terre est pleine en s'appuyant sur la direction que prend un fil à plomb dans le voisinage d'une

montagne. Il avance également, en donnant trois arguments, que le globe a été entièrement fondu au début de son histoire. Le premier est la nature des roches des régions montagneuses qui sont le résultat d'une fusion. Le deuxième est la forme aplatie de la Terre qui n'a pu être acquise que si le globe a été à un moment de son histoire malléable, donc en fusion. Le troisième est les mesures de température dans les mines qui montrent que la Terre possède une chaleur propre.

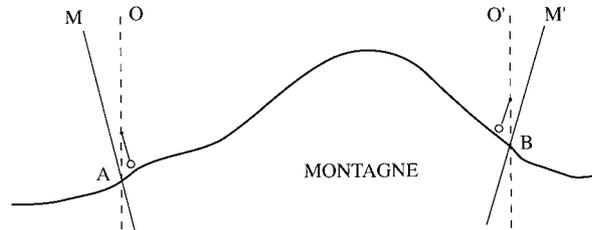


Figure 6

La déviation de la verticale : aux stations A et B, les verticales (direction du fil à plomb) sont données par les lignes pleines alors qu'en l'absence de la montagne (qui possède une capacité d'attraction), elles seraient données par les lignes pointillées. Si la Terre est creuse, la montagne représente une masse importante par rapport à la masse totale de la Terre et la déviation doit être grande. Si au contraire la Terre est pleine, la montagne ne représente plus qu'une masse insignifiante et la déviation engendrée est très faible. C'est ce qui est observé.

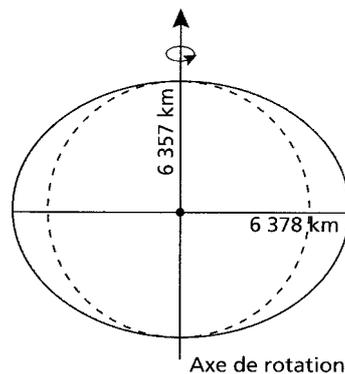


Figure 7

La forme aplatie de la Terre résulte de la force centrifuge développée par la rotation terrestre, qui chasse les particules vers l'équateur et qui augmente le rayon équatorial de 20 km par rapport au rayon polaire.

VII. « L'océan de magma » interne

Aux alentours de 1800, la géologie prend son essor et la vision de la Terre se modifie encore. Les savants qui s'interrogent sur la Terre ne sont plus des philosophes ou des théologiens mais des géologues de terrain.

Cordier (1777-1861) observe en 1827 que la température dans les mines augmente de un degré tous les 25 mètres de descente. Si la progression se poursuit, la température de 1600° C, température à laquelle toutes les roches de la surface sont fondues, est atteinte dès 50 km de profondeur. Le globe serait donc constitué d'une énorme masse en fusion, recouvert d'une mince écorce solide. L'idée est séduisante car elle permet d'expliquer les volcans (communications directes entre la surface et la

masse fondue sous-jacente), les tremblements de terre (conséquences des mouvements internes du fluide), mais aussi la formation des montagnes (la Terre en se refroidissant se contracte, ce qui crée des ruptures et des plissements).

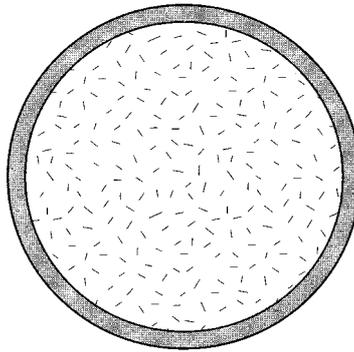


Figure 8 : La Terre en fusion de Cordier

VIII. La Terre, fluide ou solide ?

L'idée d'un globe en fusion satisfait la majorité des géologues mais certains physiciens restent dubitatifs et une polémique s'engage.

Hopkins (1793-1866) remarque en 1839 que la température de fusion des roches dépend de la pression. Si une roche fond à 1000°C en surface, il lui faut une température bien plus élevée pour entrer en fusion à 100 km de profondeur. Comme on ne peut pas savoir qui, de la température ou de la pression, a la plus grande influence, rien ne peut être conclu quant à la fluidité ou à la solidité du globe et Hopkins s'en tient à trois hypothèses.

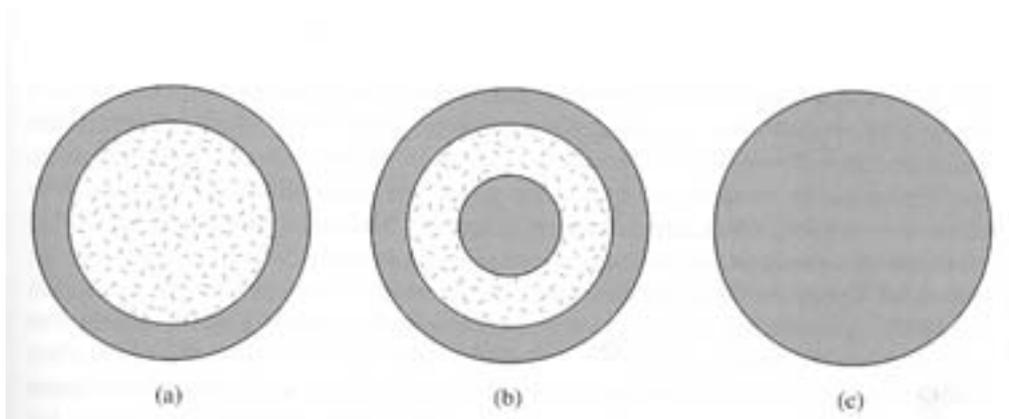


Figure 9

Les trois modèles proposés par Hopkins : (a) si la température s'accroît suffisamment avec la profondeur pour dépasser l'influence de la pression, le globe est en fusion sous une croûte dont on ne peut pas connaître directement l'épaisseur ; (b) si l'influence de la pression augmente plus rapidement que celle de la température, la solidification a commencé au centre, et comme en même temps le refroidissement créait une croûte en surface, le globe est formé d'une enveloppe solide, d'une couche intermédiaire en fusion et d'un noyau solide ; (c) si le refroidissement est complet, le globe est entièrement solide.

Lord Kelvin (1824-1907), en 1862, défend avec vigueur une Terre entièrement solide. Il argumente que si la Terre était en fusion, la masse fluide interne devrait subir des marées importantes, exactement comme les océans de la surface. Ces marées internes devraient déformer intensément le sol, le

soulever et l'abaisser alternativement, ce qui n'arrive pas. Lord Kelvin observe cependant que les marées océaniques sont légèrement réduites par rapport aux prédictions théoriques. Ceci montre que la Terre se comporte comme un solide élastique, dont les propriétés sont sensiblement les mêmes que celles de l'acier. Le globe est donc solide et les seules parties en fusion sont les réservoirs de magmas sous les volcans.

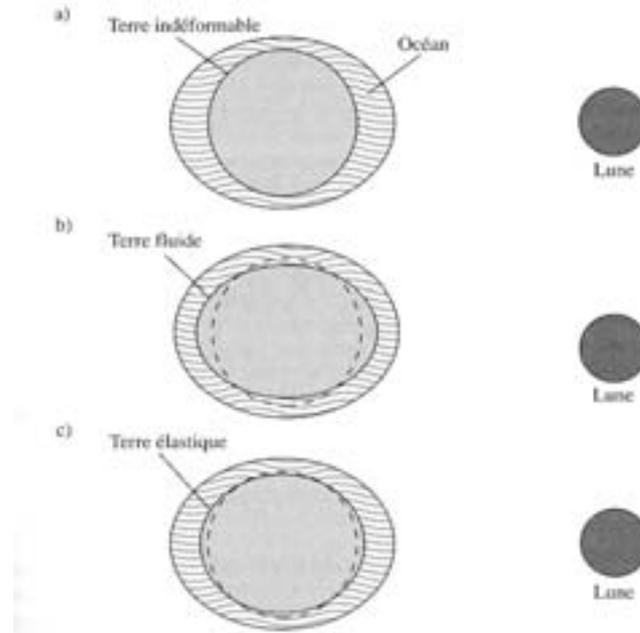


Figure 10

Déformation de la Terre sous l'influence des forces de marées. a) si la Terre est absolument indéformable, seule l'eau des océans est mise en mouvement par les forces de marées ; b) si la Terre est fluide, elle se déforme complètement sous l'influence des forces de marées et l'eau des océans ne fait que suivre les mouvements du sol : les marées océaniques n'existent plus ; c) si la Terre se comporte comme un solide élastique, les marées océaniques correspondent à la différence entre la déformation fluide des océans et la déformation élastique du sol.

Fisher, en 1881, cherche à réaliser un compromis entre le modèle entièrement en fusion des géologues et le modèle entièrement solide de lord Kelvin. Il suppose que la Terre est composée d'une croûte solide d'une faible épaisseur, d'une couche intermédiaire fluide également de faible épaisseur et d'un noyau solide. Ce modèle vérifie la condition de lord Kelvin d'un globe possédant en moyenne les propriétés élastiques de l'acier, tout en permettant de conserver les explications habituelles des phénomènes géologiques.

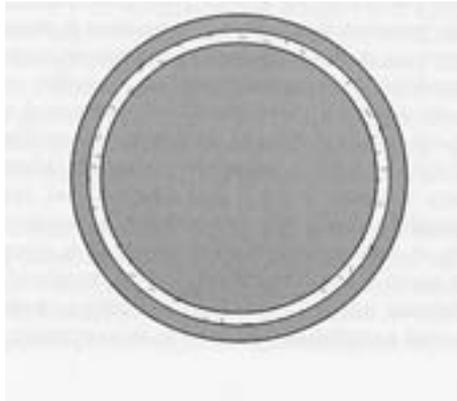


Figure 11 : Le modèle consensuel des années 1880

IX. Le noyau de fer

Parallèlement à la polémique sur l'état physique de l'intérieur du globe, des recherches sont effectuées sur la répartition interne des densités.

En s'appuyant sur l'observation des météorites, Roche (1820-1883) présente en 1881 un modèle de Terre à deux couches : un noyau ferreux dont la densité est voisine de 7, recouvert d'une couche pierreuse de densité 3, dont l'épaisseur n'atteint pas 1/6 du rayon entier. La densité de l'enveloppe est déterminée grâce aux relevés géologiques alors que la densité et la dimension du noyau sont déterminées par le calcul pour satisfaire deux conditions : la densité moyenne de la Terre égale à 5,5 et son aplatissement qui dépend de la répartition interne des densités. En 1897, Wiechert (1861-1928) propose un modèle semblable et en 1909, Suess (1831-1914) nomme le noyau *nife* (composé de fer et de nickel), l'enveloppe *sima* (essentiellement composé de silicium et de magnésium), et les continents *sial* (essentiellement composée de silicium et d'aluminium). Les valeurs numériques retenues ne sont pas exactes : en sous-estimant l'influence de la compressibilité, Roche et Wiechert obtiennent des valeurs de densités trop faibles et par compensation une dimension du noyau trop grande. Ces modèles sont toutefois cohérents et serviront de référence pour les premières interprétations des sismogrammes.

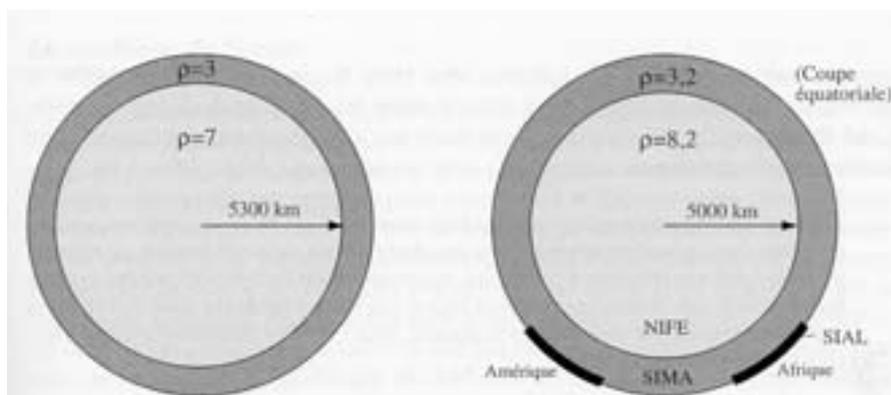


Figure 12 : Modèle de Terre en densité (ρ est la densité) calculé par Roche en 1881 (gauche) et Wiechert en 1897 (droite)

X. Un noyau de gaz ?

Ritter suppose en 1878 que la Terre est constituée d'un noyau de gaz et d'une croûte solide. Il observe en effet que la température à l'intérieur de la Terre doit dépasser la température critique des substances connues, température à partir de laquelle il n'y a plus de transition brutale entre le liquide

et le gaz mais une transition continue. De plus le dégazage des volcans ne montre-t-il pas la présence de gaz à l'intérieur du globe ?

Günther amplifie en 1884 les idées de Ritter et avance que la Terre est composée d'une croûte solide, d'une couche en fusion et d'un noyau de gaz. Le modèle devient populaire lorsqu'un scientifique de renom, Arrhenius (1859-1927), l'adopte en 1900. Il sera néanmoins éclipsé par le développement de la sismologie.

XI. Les grandes discontinuités sismologiques

L'auscultation sismologique permet à partir du début du XX^e siècle de renouveler entièrement les modèles de Terre. La détection des ondes de cisaillement (qui ne se propagent pas dans les liquides) montre que le globe se comporte comme un corps solide élastique, du moins dans toute sa partie supérieure. Les géologues doivent donc revoir leur copie et reprendre leurs explications des volcans et de la formations des montagnes ! Oldham (1858-1936) construit en 1906 un premier modèle de Terre sismologique. Sur les courbes temps-distances qu'il vient de tracer, il remarque que les ondes S subissent un retard d'une dizaine de minutes pour des distances épacentrales supérieures à 120-130°. Il l'explique en disant que ces ondes traversent une région centrale où la vitesse est sensiblement inférieure à celle existant dans l'enveloppe extérieure et il pense ainsi mettre en évidence une discontinuité sismologique majeure vers 3800 km de profondeur.

En 1909, Mohorovicic observe un accroissement des vitesses sismiques sous la Croatie à environ 54 km de profondeur. Cet accroissement est ensuite confirmé par d'autres sismologues dans différentes régions du monde ; il est interprété comme l'interface entre la croûte et le manteau. En 1912, Gutenberg (1889-1960) repositionne la discontinuité d'Oldham vers 2900 km de profondeur (qui est la valeur adoptée de nos jours). Il observe que les ondes P émises par un séisme sont enregistrées normalement jusqu'à la distance épacentrale de 105°. Entre 105 et 142°, les ondes P ne sont plus observées, puis à 142°, elles réapparaissent. C'est le phénomène de « zone d'ombre » que Gutenberg explique comme le résultat de la réfraction des ondes P à travers une discontinuité marquant une chute brutale de la vitesse des ondes. En 1923, il interprète cette discontinuité comme l'interface entre le noyau et l'enveloppe de Wiechert.

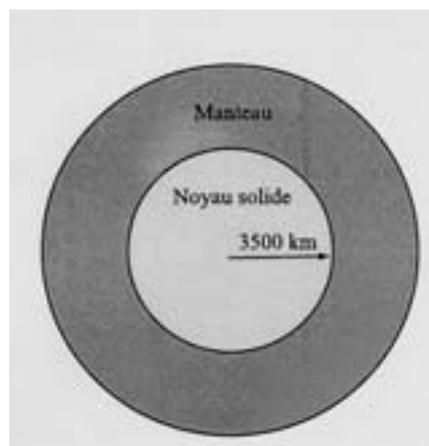


Figure 13 : La Terre solide de Gutenberg

Les dimensions du noyau de fer ont été considérablement réduites depuis les modèles de Roche et de Wiechert.

XII. Le noyau métallique de la Terre est-il fluide ou solide ?

Pour une grande majorité de sismologues du début du siècle, le globe est entièrement solide et le noyau possède même une rigidité supérieure à celle de l'enveloppe. Si les ondes S traversant le noyau

ne sont pas directement observées, c'est parce que la qualité des sismogrammes n'est pas encore suffisante pour les détecter mais leur existence n'est pas mise en doute.

En 1926 Jeffreys (1891-1989) prouve la fluidité du noyau métallique. Il ne s'appuie pas sur l'absence de transmission des ondes S (qui est aujourd'hui le critère habituel de la fluidité) mais sur un raisonnement indirect, en montrant que la rigidité déduite de la propagation des ondes dans l'enveloppe est supérieure à la rigidité déduite de l'étude de la déformation élastique de la Terre sous l'influence des marées. L'opinion de Jeffreys est rapidement adoptée par la communauté scientifique.

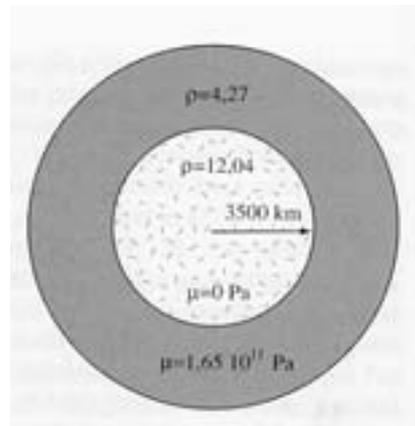


Figure 14 : Le modèle de Jeffreys avec un noyau fluide (ρ est la densité, μ la rigidité)

XIII. La découverte de la graine

En 1936, Lehmann (1888-1993) découvre que le noyau liquide de la Terre contient une partie centrale distincte : la graine. La « zone d'ombre » entre 105° et 142° n'est pas entièrement vide mais on y observe l'arrivée d'ondes P, interprétées comme des ondes diffractées à la frontière du noyau. Lehmann montre que ces ondes reçoivent une explication bien plus satisfaisante si l'on suppose qu'elles ont été réfléchies à la surface d'une partie centrale. L'interprétation est reçue avec enthousiasme et les dimensions de la graine sont fixées par Gutenberg en 1938 et par Jeffreys en 1939 entre 1200 et 1250 km (la détermination actuelle est de 1221 km). Birch affirme en 1940 que la graine est solide mais l'assertion n'est vraiment confirmée que dans les années 1960 par l'analyse des oscillations propres de la Terre.

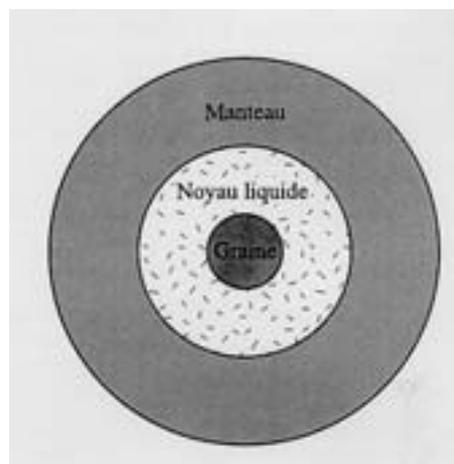


Figure 15 : La graine solide de la Terre découverte par Lehmann

XIV. Les premiers profils de densité

Pour déterminer la variation de la densité avec la profondeur à partir des vitesses sismiques, il est nécessaire de posséder une équation d'état reliant les différents paramètres élastiques entre eux. En 1923, Adams et Williamson franchissent l'étape essentielle en établissant leur équation, qui permet de calculer les variations de la densité due à la compression dans les régions homogènes du globe. En 1936, Bullen en fait la première application à la Terre et établit le premier profil de densité en supposant le globe constitué de différentes enveloppes concentriques homogènes. Il n'aura ensuite de cesse de le perfectionner. En 1952, Birch montre que l'équation d'Adams-Williamson est valable dans le manteau inférieur et le noyau mais qu'elle ne peut pas être appliquée dans la partie supérieure du manteau. Pour pallier ce défaut, il développe une équation d'état empirique reliant la vitesse des ondes P à la densité. L'équation d'Adams-Williamson et la loi de Birch sont à la base des calculs modernes du profil de densité.

XV. Les images tomographiques

Aujourd'hui, on ne cherche plus seulement à améliorer le modèle sphérique de Terre, avec des couches imbriquées les unes dans les autres, mais on effectue des images à trois dimensions du globe, exactement comme en tomographie médicale. On cherche ainsi à mettre en évidence les variations d'épaisseur de la croûte, et la topographie de la frontière noyau-manteau qui n'est pas parfaitement sphérique mais qui possède des ondulations. On cherche aussi à cartographier les zones rapides (zones où la vitesse des ondes sismiques est plus élevée que la moyenne) et les zones lentes du manteau. Et comme les zones rapides sont associées à du matériau froid et les zones lentes à du matériau chaud, on peut ainsi obtenir des informations précieuses sur la géométrie des mouvements de convection, avec la localisation des courants montants chauds et des courants descendants froids.

Dans les images produites, on distingue de grandes structures froides qui atteignent parfois la frontière noyau-manteau. Celles-ci correspondent aux plaques plongeantes qui s'enfoncent très profondément dans le manteau. Les plaques subductées semblent donc constituer le meilleur moyen pour refroidir la Terre en profondeur. Un des défis à venir est de détecter la trace des panaches mantelliques, qui sont des cheminées étroites de matériaux chauds, provenant du manteau profond et perçant, tels des chalumeaux, les plaques en surface. Ces panaches sont à l'origine du volcanisme dit de « point chaud », formant des alignements d'îles volcaniques. C'est donc une véritable « géographie des profondeurs » qu'on essaie aujourd'hui de dresser. Mais la tâche est loin d'être terminée, et les profondeurs du globe n'ont pas encore dévoilé tous leurs secrets...

Bibliographie

DEPARIS V. et LEGROS H., *Voyage à l'intérieur de la Terre. De la géographie antique à la géophysique actuelle. Une histoire des idées*, Paris, CNRS Éditions, 2000.

Les illustrations proviennent de l'ouvrage.

Textes étudiés

BURIDAN, *Questions sur le traité des Météores*, 1350.

DESCARTES, *Principes de la Philosophie*, 1644.

CLAIRAUT, *Théorie de la figure de la Terre*, 1743.

BOUGUER, *Observation sur la gravité*, 1749.

CORDIER, *Essai sur la température de l'intérieur de la Terre*, 1827.

WEGENER, *Les forces translatrices*, 1928.

Les miroirs de Galilée

Dominique Bénard,

Maître de conférences, université du Maine, Le Mans ; Irem Pays de Loire

L'opposition radicale aux conceptions cosmologiques héritées des anciens et qui prévalent encore au début du dix-septième siècle, se construit à partir de l'hypothèse héliocentrique développée par Nicolas Copernic en 1543, autour de deux points majeurs. D'une part, il n'y a pas de différence de nature entre le ciel et la terre, entre les corps célestes et les corps terrestres ; d'autre part, la terre elle-même est animée d'au moins deux mouvements, un mouvement annuel de révolution autour du soleil et un mouvement diurne de rotation autour de son axe.

Galilée (1564-1642) joue un rôle majeur dans le travail d'examen et de validation de ces deux aspects essentiels de la nouvelle astronomie. L'atelier proposait de suivre ce travail par la lecture d'extraits de ses textes s'y rapportant ; afin de les comprendre d'abord, de dégager ensuite les rôles respectifs qu'y jouent l'observation, l'expérience et le raisonnement ; enfin de mettre en évidence la nécessité corrélative à la nouvelle astronomie, de construire une physique nouvelle, tout à la fois expérimentale et mathématique. La lecture et l'étude des textes eux-mêmes permettent alors d'éprouver les difficultés d'un tel travail, déceler les obstacles qu'il doit surmonter, les objections possibles auxquelles il doit répondre. Difficultés, objections et obstacles qui ne sont plus aperçus de nous qui sommes les héritiers lointains de la science nouvelle qui se construit au dix-septième siècle. Notre culture scientifique a remplacé ces questions par des réponses, masquant le processus et la nécessité même de leur élaboration.

Retrouver la question derrière la réponse ; interroger les évidences ; apercevoir qu'elles se construisent ; c'est non seulement suivre et étudier le parcours historique d'une science déterminée, c'est aussi, à travers ce parcours, ré-interroger les enjeux et les méthodes de l'enseignement actuel de cette science.

Je commencerai par donner un aperçu relativement bref des conceptions cosmologiques héritées des anciens et qui, au début du dix-septième siècle, président encore aux spéculations et aux pratiques de la quasi totalité du monde savant.

I. Le cosmos hérité des anciens

« Cosmos », la polysémie de la langue grecque nous renvoie derrière ce mot à l'ordre, à la beauté, à la parure des femmes. La connaissance de ce bel ordre se trouve consignée dans deux ouvrages majeurs : le *Traité du Ciel* d'Aristote (deuxième moitié du quatrième siècle avant notre ère) et la *Composition Mathématique* ou *Almageste* de Claude Ptolémée (première moitié du second siècle de notre ère). Bien sûr, les époques et les civilisations qui s'intercalent entre le monde grec et l'occident chrétien de la Renaissance n'ont pas été inactives. Des améliorations, des simplifications ont été apportées, des critiques ont été formulées. Sur ces matières, on pourra consulter notamment [1] en ce qui concerne l'astronomie arabe, et [3] en ce qui concerne le travail critique médiéval. Quoiqu'il en soit, la structure fondamentale du cosmos grec, notamment en ce qui concerne les deux aspects qui nous intéressent ici, domine bien les conceptions astronomiques des savants de l'époque de Galilée.

A. Le géocentrisme physique hérité d'Aristote

L'organisation « physique » du cosmos est celle d'un emboîtement de sphères sur lesquelles sont fixés les différents corps célestes. Depuis la périphérie, où se trouve la sphère dite des *étoiles fixes*, ainsi nommées pour la permanence de leurs positions relatives (les constellations), nous rencontrons successivement les sphères de Saturne, Jupiter, Mars ; puis, en dessous de la sphère du Soleil, viennent

la sphère de Vénus et celle de Mercure ; enfin la sphère de la Lune, enclave du monde des *éléments* où repose, immobile, notre Terre, centre commun de toutes ces sphères, centre du cosmos.

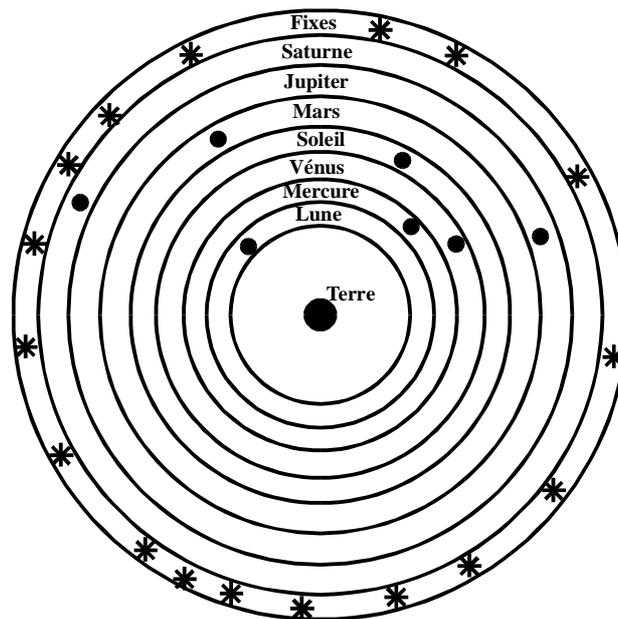


Figure 1

L'ensemble de ces huit sphères exécute en un jour un mouvement de rotation uniforme autour d'un axe commun, l'axe polaire : de là, la succession des jours et des nuits, la lente pérégrination nocturne de certaines constellations autour de l'étoile polaire, le lever, la culmination et le coucher de certains astres.

De plus, à l'exception de la sphère des Fixes, chacune des sept autres sphères possède un mouvement de rotation propre, beaucoup plus lent que le mouvement diurne commun, chacune à sa vitesse propre et autour de son axe propre : ainsi les sept corps célestes qu'elles portent changent de disposition, entre eux et relativement aux étoiles fixes ; de sorte que se trouvent expliqués, par exemple, les aspects changeants de la Lune (ses phases), qui dépendent de sa position relativement au Soleil et à la Terre ; les éclipses ; le fait que ces sept corps semblent se déplacer au fil des semaines et des mois sur le fond des étoiles fixes, tel le Soleil passant en une année devant les douze constellations du zodiaque.

Il s'agit ici d'un géocentrisme « physique » ou matériel. Les sphères ont une réalité concrète et si, reposant sur mon arpent de Terre, je vois les corps célestes se mouvoir la nuit au dessus des arbres, des maisons, des collines immobiles (ou plutôt si je constate chaque fois qu'ils se sont déplacés), c'est que les sphères qui les portent ont réellement tourné.

Cette description, qui est une version simplifiée de ce que l'on trouve exposé par Aristote dans son *Traité du Ciel*, se heurte très tôt à certaines difficultés au regard de la réalité des mouvements célestes, tels qu'ils nous apparaissent. Citons en deux.

D'abord, des observations très anciennes révèlent que la distance de la Terre au Soleil varie au cours de l'année, ce qui ne devrait pas être, étant donné que le Soleil est porté dans son mouvement annuel par une sphère en rotation autour d'un de ses diamètres, passant donc par le centre du cosmos où se trouve la Terre.

Ensuite, certains corps célestes ont au fil du temps un comportement erratique dans leur course sur le fond des étoiles fixes. Ainsi, Mars, exemplairement, semble aller d'abord (relativement aux fixes) d'ouest en est, puis un temps s'arrêter pour repartir d'est en ouest, s'arrêter à nouveau et reprendre enfin son mouvement d'ouest en est. Phénomène dit de *rétrogradation* de ces corps qui semblent « errer » au milieu des étoiles fixes, ce pourquoi ils furent nommés *planètes*, mot grec qui signifie

astres errants. Phénomène qui vient s'opposer à la belle régularité qui devrait découler du mouvement uniforme réellement attribué à chacune des sphères célestes.

En fait, le système complet qu'expose Aristote ne comporte pas moins de cinquante-cinq sphères. À chacune des planètes sont attachées plusieurs de ces sphères, chacune d'elle ayant son propre mouvement de rotation. Et c'est par la combinaison de ces mouvements différents que l'on tente de rendre compte des rétrogradations. Mais cette explication « physique » n'est en fait que qualitative ; on peut comprendre ainsi qu'il y ait rétrogradation, mais elle ne permet ni d'en retrouver l'ampleur spatiale et temporelle que montre l'observation, ni d'en prévoir le retour futur ; bref, elle n'a pas la portée quantitative nécessaire pour être utile à la pratique de l'observation et de la prévision astronomiques.

C'est ainsi que se développe, à côté de ce géocentrisme physique, un géocentrisme que l'on pourrait qualifier de mathématique et qui forme le contenu essentiel du célèbre ouvrage de Ptolémée déjà cité, l'*Almageste*.

B. Le géocentrisme mathématique de Claude Ptolémée

Il n'est pas question ici de faire un résumé même rapide de ce grand livre. Je me contenterai d'évoquer les réponses apportées aux deux problèmes précédemment évoqués. Disons d'abord que le qualificatif « mathématique » renvoie à la géométrie, non pas en tant que « mesure de la Terre », mais en tant que « contemplation » (en grec *theoria*) et étude des figures et de leurs propriétés, ce qui est sans doute la part proprement grecque de la première géométrie hellénistique.

Concernant donc la plus ou moins grande distance de la Terre au Soleil, on imagine que le centre du cercle décrit par le Soleil en un an est décalé par rapport au centre de la Terre qui d'ailleurs ne se trouve pas elle-même au centre de la sphère des fixes. C'est la théorie dite de l'*excentrique*.

Au sujet des phénomènes de rétrogradation, on imagine que la planète dans son mouvement propre, ne tourne pas vraiment sur un cercle dont le centre se situerait sur un axe passant par le centre du cosmos, mais sur un cercle dont le centre **C** décrit un cercle dont le centre **T** est situé sur cet axe.

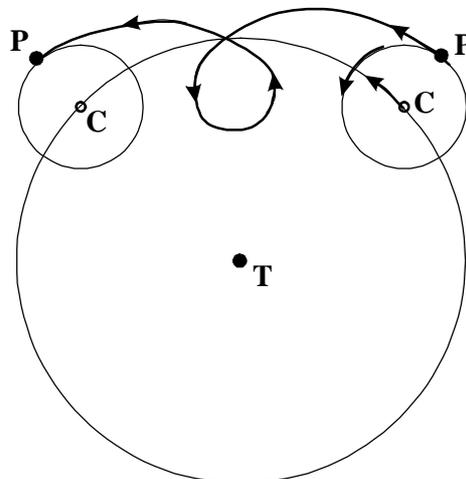


Figure 2

C'est la théorie des épicycles, richement développée par Ptolémée, utilisée par tous les astronomes, encore très présente dans l'œuvre même de Copernic. Car, il faut le noter au passage, si, conformément à l'hypothèse héliocentrique nous situons le Soleil en **T**, la Terre en **C** et la Lune en **P**, l'épicycle est donc la trajectoire décrite par la Lune dans son mouvement de révolution circulaire autour de la Terre, animée elle-même d'un mouvement de révolution circulaire autour du Soleil.

Mais dans le cadre du géocentrisme, cette théorie des épicycles ne laisse évidemment plus de place à une quelconque sphère matérielle que la planète devrait régulièrement traverser. Par ailleurs, le centre de sa rotation propre se trouve être non plus un corps, mais une position immatérielle, laquelle serait animée d'un mouvement de révolution autour d'un corps tout à fait matériel, la Terre. Il y a là,

dans cette juxtaposition de la description « physique » d'Aristote et des figures géométriques de Ptolémée, un hiatus qui fut très tôt reconnu, puisque Ptolémée avertit qu'il ne s'agit au mieux que de « sauver les apparences » (apparence = phénomène en grec), tout efficace que puisse être ce procédé pour l'observation, le calcul et la prévision. Si le mot « modèle » n'est pas prononcé, encore moins systématisé, on sait pratiquer la chose. Et l'on a déjà thématiqué ce « léger décalage » entre les choses et la connaissance qu'on en peut avoir.

C. La distinction sublunaire - supralunaire

À cette distinction problématique entre l'immobilité réelle de la Terre et la mobilité réelle des cieux, s'ajoute une distinction qualitative importante, une polarisation du cosmos, tout autant physique que morale et métaphysique, entre parfait et imparfait, éternel et éphémère, permanence et changement, être et devenir. Cela, nous le connaissons grâce encore à Aristote et son *Traité du Ciel*, mais aussi grâce aux critiques et aux réfutations que lui opposera la nouvelle astronomie.

La sphère de la Lune, au-delà d'être une réalité matérielle supportant un corps céleste, sépare le cosmos en deux mondes, qualitativement et hiérarchiquement différenciés. D'une part, le monde *supralunaire*, depuis la sphère de la Lune jusqu'à la sphère des Fixes, monde éternel, inengendré, qui ne connaît pas la corruption. S'il bouge, c'est sans changer ; il est ce qu'il a toujours été et toujours sera, jamais il ne devient. D'autre part, le monde *sublunaire*, l'intérieur de la sphère de la Lune, monde des *éléments* -le feu, l'air, l'eau, la terre - au centre duquel repose notre Terre ; monde de l'éphémère, où il y a naissance, vie et mort ; monde où toute chose est la proie d'un changement incessant, monde qui n'est jamais et qui toujours devient. Au supralunaire la perfection de l'ordre éternel, au sublunaire le chaos de l'imperfection ; au premier la puissance d'agir, au second le destin de pâtir, d'être agi.

À un tel cosmos, correspond une « physique » particulière. Chaque chose du monde a sa place, son lieu propre, l'ordre consiste en ce qu'elle y demeure et n'en bouge plus. Le *haut*, par exemple, se confond avec la périphérie du cosmos et le *bas* avec le centre ; un corps est lourd (grave) à mesure que son lieu naturel est proche du centre, qui est alors centre commun des graves ; il est léger à mesure que son lieu naturel est proche de la périphérie du monde sublunaire. Ainsi, la pierre qui, lancée dans les airs, retombe au sol, restaure l'ordre un instant perturbé par le geste qui la projeta vers les cieux ; au mouvement *violent*, contre nature, du jet, s'oppose le mouvement *naturel* de la chute, qui est retour de la pierre en son lieu. De même le feu, léger, monte-t-il, c'est-à-dire s'éloigne-t-il du centre. Les corps célestes quant à eux sont tout à fait indifférents à la gravité et à la légèreté.

Cette distinction qualitative des lieux du cosmos se redouble d'une distinction qualitative des matières et des formes. Aux corps célestes incorruptibles, éternels et parfaits, revient la forme parfaite de la sphère, conjugaison de la finitude et de l'éternité ; et la matière dont ils sont faits, le milieu dans lequel ils évoluent, doivent porter à la perfection cette inaltérabilité, cette puissance inentravée : c'est l'*éter*, « quintessence » ou cinquième élément caractéristique du monde supralunaire, qui complète et s'oppose aux quatre éléments du monde sublunaire, dont l'expérience quotidienne nous montre assez qu'ils changent, s'altèrent, et que les corps qui en sont formés naissent un jour, se dégradent ensuite pour disparaître enfin. Et si la Terre où nous sommes est elle-même sphérique, c'est de manière très imparfaite voire changeante, comme en témoignent les montagnes et les vallées, les mers agitées de tempêtes, les tremblements de terre. Alors que la surface des corps célestes doit être parfaitement sphérique, lisse et polie mieux que la surface du plus parfait miroir qui se puisse imaginer.

Retenons bien tout ceci.

Car, aussi curieuses que puissent nous paraître aujourd'hui de telles conceptions, il nous faut pourtant les prendre au sérieux. Historiquement d'abord, en ce qu'elles dominent la pratique et la culture scientifiques de la Renaissance. Mais aussi, pour ce qu'elles expriment encore une part de l'expérience sensible que chacun de nous peut avoir du monde qui l'entoure : le sol est immobile sur lequel nous marchons ; le Soleil, la Lune et d'autres astres, surgissent à l'est, s'élèvent et culminent plein sud, puis s'abaissent et disparaissent à l'ouest ; les phases de la Lune se répètent à intervalles réguliers ; le Soleil nous prodigue lumière, chaleur et vie ; l'éclat de la Lune et des étoiles nous fait

rêver et la tempête qui survient détrempe le rêve ; « tel qui rit vendredi, dimanche pleurera », la rose née ce matin, embaume à midi, sera fanée ce soir, empestera bientôt ; et nous-mêmes...

Et si la science vient affirmer par exemple que la course quotidienne du soleil, depuis son lever à l'est jusqu'à son coucher à l'ouest, n'est qu'apparence dont la cause est la rotation diurne de la Terre, il faut alors mettre en rapport cette affirmation et notre expérience sensible, concrète, quotidienne de la globale immobilité de notre environnement terrestre. Il y a là une nécessité scientifique et pédagogique. Nécessité scientifique inscrite au cœur de ce moment de l'histoire dont témoignent les travaux de Galilée : obligation de répondre aux difficultés qui surgissent, aux objections qui se formulent dans la confrontation de l'affirmation du mouvement diurne de la Terre avec les phénomènes terrestres eux-mêmes tels que nous les percevons ; obligation où s'articule la nécessité d'élaborer un physique nouvelle, une autre science du mouvement. Nécessité pédagogique inscrite encore dans l'actualité de notre métier d'enseignants, du moins tant que nous assignons à l'école le rôle d'instruire des outils fondamentaux pour la pensée, pour l'action.

C'est donc sur ces deux questions, de la séparation qualitative du cosmos d'abord, puis du mouvement diurne de la Terre que nous suivrons maintenant le travail galiléen.

II. Il en va au ciel comme sur la terre et réciproquement

En mars de l'année 1610, Galilée, alors titulaire de la chaire de mathématiques de l'université de Padoue, fait paraître le *Sidereus Nuncius* ou *Messenger des Étoiles* [4]. Il y rend compte des observations qu'il fit à la fin de l'année 1609, grâce à la lunette qu'il venait, sinon d'inventer, du moins semble-t-il de perfectionner et d'en concevoir l'usage astronomique, ce qui lui permet la découverte des satellites de Jupiter ainsi que de nombreuses étoiles inaperçues à l'œil nu. Mais aussi, l'observation de la Lune avec le « télescope » permet de « discerner avec certitude que la surface de la Lune n'est pas parfaitement polie, uniforme et très exactement sphérique comme une armée de philosophes l'ont cru, d'elle et des autres corps célestes, mais au contraire inégale, accidentée, constituée de cavités et de protubérances, pas autrement que la surface de la Terre elle-même, qui est marquée, de part et d'autre, par les crêtes des montagnes et les profondeurs des vallées » [4, p. 120]. L'observation donc nous montrerait la surface de la Lune toute semblable à celle de la Terre, ce qui signifie que ces deux corps ne diffèrent, ni dans leur forme, ni conséquemment par la matière qui les constitue.

Toutefois, à lire le texte de Galilée, on s'aperçoit que son observation ne lui permet pas formellement de « voir » des montagnes et des vallées à la surface de la Lune. Mais en fait de constater qu'au moment où la Lune se présente sous la forme d'un croissant, « la limite qui sépare sa partie obscure de sa partie lumineuse ne s'étend déjà plus uniformément selon une ligne ovale, comme il arriverait dans un solide parfaitement sphérique ; mais elle correspond à une ligne inégale, accidentée et tout à fait sinueuse. [4, p. 120] ». Des parties lumineuses s'avancent dans la zone obscure et des parties obscures dans la zone illuminée. Par ailleurs, d'innombrables petits points d'ombre parsèment la zone inondée de lumière et de nombreux points de lumière parsèment la zone d'ombre. Mieux, au fil des heures, les parties d'ombre de la zone lumineuse tendent à disparaître alors que les parties lumineuses de la zone obscure tendent à s'élargir et à se recoller à la zone lumineuse qui s'agrandit au fur et à mesure [4, pp. 120-121].

Ainsi la visée par le canon de la lunette n'offre au regard ni montagne, ni vallée, mais les « accidents » de l'ombre et de la lumière. Or, ajoute-t-il [4, p. 120], « nous avons une vue entièrement semblable sur la Terre, au moment du lever du Soleil, lorsque nous portons notre regard sur les vallées, qui ne sont pas encore baignées de lumière, et sur les montagnes qui les entourent du côté opposé au Soleil et qui, dans un instant, resplendiront d'un fulgurant éclat ; et, tout comme les ombres des cavités terrestres diminuent à mesure que le Soleil monte, de même ces taches lunaires perdent aussi de leurs ténèbres à mesure que la partie lumineuse s'accroît ». Et de même [4, p. 122] « n'est-il pas vrai que sur la Terre, avant le lever du Soleil, quand l'ombre occupe encore la plaine, les sommets

des monts les plus élevés sont illuminés par les rayons solaires ? Qu'après un court laps de temps la lumière se répand, tandis que les parties médianes, plus larges, de ces mêmes monts s'illuminent ? Enfin, lorsque le Soleil est déjà levé, les illuminations des plaines et des collines ne se rejoignent-elles pas ? ».

C'est donc par une analogie avec l'expérience terrestre que Galilée peut rapporter ce que la lunette lui montre à l'existence de montagnes, de vallées et de plaines sur la surface lunaire. Pour voir, il ne suffit pas de regarder par la lunette avec ses yeux de chair. Encore faut-il laisser leur part aux yeux de sa raison. Nous savons que Galilée était persuadé, avant même ces observations, de la justesse de l'hypothèse copernicienne, ainsi que de la non pertinence de la séparation qualitative entre supralunaire et sublunaire. L'utilisation qu'il fait de ses observations du sol lunaire en est une bonne illustration. Comment alors celui qui est persuadé de leur irréductible différence de nature, pourrait-il accepter sans discussion des analogies qui les mettent *a priori* sur le même plan ? Quelle est la force d'un argument scientifique, d'une analogie, d'une observation ? À lui seul, le témoignage des sens, surtout médiatisé par un instrument, n'impose aucune évidence nouvelle. Au mieux, il en trouble d'anciennes. Et si l'esprit retrouve par la suite pour s'y confier, de nouvelles évidences (ou d'anciennes un tant soit peu réaménagées), c'est au terme d'un processus de construction, de confrontation et de reconstruction, où l'expérience sensible n'occupe pas toujours la première place, en tout cas n'intervient jamais seule.

Cela est vrai de l'histoire des sciences (même contemporaine) ; cela est vrai aussi de leur pédagogie.

Galilée le savait, puisqu'il revint en 1632 sur cette question de l'inégalité du sol lunaire, dans la première journée de son *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde* [5]. Cet ouvrage qui lui valut sa condamnation en 1633 est consacré à une sorte d'étude comparative de l'héliocentrisme copernicien et du géocentrisme alors dominant hérité d'Aristote et de Ptolémée. Mais la comparaison tourne de façon évidente à l'avantage du nouveau système (d'où en partie la condamnation). En effet, la première journée examine et réfute la distinction entre monde céleste et monde terrestre ; la deuxième journée met à bas les arguments opposés par les savants aristotéliens au mouvement diurne de la Terre, d'où il ressort qu'il n'est nullement impossible que notre planète tourne en une journée autour de son axe ; après être revenu sur la question de l'inaltérabilité des cieux à propos de l'étoile nouvelle observée en 1572, la troisième journée opère un travail similaire concernant la révolution annuelle de la Terre autour du soleil ; enfin, la quatrième journée développe une théorie des marées, dans laquelle Galilée voyait la possibilité de proposer l'hypothèse copernicienne non plus seulement comme possible mais comme porteuse d'arguments positifs d'explication du phénomène des marées (à ce sujet et sur l'accueil négatif que cette théorie a constamment reçu des milieux scientifiques, on pourra consulter [7]).

À l'occasion donc de la première journée, Galilée revient sur la question de « savoir si, pour expliquer une réflexion de lumière comme celle qui nous vient de la Lune, la surface réfléchissante doit être aussi polie et lisse que celle d'un miroir, ou bien si une surface non polie, non lisse, mais pleine d'aspérités ne conviendrait pas mieux » [5, p. 174].

On pourra lire le magnifique dialogue qui s'engage sur ce sujet, entre les trois protagonistes, Salviati représentant Galilée, Sagredo l'honnête homme sans préjugés, désireux de comprendre et Simplicio tenant de la science officielle héritée des anciens, [5, pp. 174-181] dont voici la conclusion :

« Voici comment comprendre toute cette affaire : que la surface du mur soit rugueuse, cela revient à dire qu'elle est composée d'innombrables surfaces minuscules, inclinées d'innombrables façons différentes ; il y a forcément plusieurs de ces inclinaisons qui réfléchissent les rayons vers un endroit donné, et il y en a forcément beaucoup d'autres qui les renvoient ailleurs ; bref, à chaque endroit, arrivent de nombreux rayons réfléchis par de très nombreuses petites surfaces [*moltissime superficietti*] réparties sur toute la surface illuminée du corps rugueux ; par conséquent, en chaque endroit d'une surface opposée à celle qui reçoit la première les rayons incidents, parviennent des rayons réfléchis ; chaque endroit est donc éclairé. Autre conséquence : vu de n'importe où, le corps sur lequel arrivent

les rayons paraît clair et illuminé en sa totalité ; c'est pourquoi la Lune, avec sa surface non polie mais rugueuse, renvoie la lumière du Soleil dans toutes les directions, et paraît également lumineuse à tous ceux qui la regardent. Si sa surface, sphérique, était lisse comme un miroir, elle serait totalement invisible, car la minuscule partie de sa surface d'où pourrait venir l'image réfléchie du Soleil, serait, en raison de la distance, invisible à l'œil d'un observateur, comme je l'ai déjà dit. »

La conclusion est totalement paradoxale pour la culture scientifique dominante à l'époque de Galilée. En effet la perfection de la forme sphérique attribuée à la Lune la rendrait précisément invisible. Et c'est au contraire l'imperfection de sa surface telle qu'en produiraient montagnes et vallées qui permet de saisir que la totalité de sa surface éclairée qui se tourne vers la Terre nous paraisse brillante. Cet éclat de la Lune, elle le doit justement à l'imperfection de sa sphéricité, qui la rend semblable à la Terre.

Pour comprendre la difficulté qu'un savant traditionnel du XVII^e siècle comme Simplicio, tenant sincère du cosmos ancien, pouvait avoir à se rendre à une telle conclusion, il faut remarquer le déplacement qu'opère ce dialogue dans la nature des arguments avancés.

Ceux de Simplicio se réfèrent à une sorte de « physique qualitative » structurée d'ailleurs par la séparation du supralunaire d'avec le sublunaire : les corps illuminent leur environnement à la mesure de leur puissance d'éclairement, même si cette dernière n'est qu'indirectement activée. Ainsi la Lune, corps céleste et parfait, participe de cette puissance céleste de prodiguer de la lumière bien autrement que les corps terrestres ; et son hémisphère frappé par les rayons solaires se met à briller si vivement que la partie tournée vers la Terre est capable d'éclairer notre nuit. Pour les corps terrestres, ceux-là paraissent plus lumineux qu'ils reflètent plus « vivement » la lumière, le miroir plus que le mur. Mais il est absurde d'affirmer que la « réflexion du mur est aussi claire et lumineuse que celle de la Lune » puisqu'on ne peut douter, affirme Simplicio, « que les corps célestes aient une sphère d'activité bien plus grande que nos corps » terrestres et que le mur n'est finalement rien d'autre « qu'un peu de terre obscur et incapable d'éclairer ». La comparaison qualitative de la vivacité de la lumière réfléchie rapproche la Lune plutôt du miroir (même sphérique) que du mur. Ces arguments ont leur cohérence et tirent leur force d'une certaine expérience sensible, proche du quotidien. Essayez donc d'éblouir votre voisin en captant les rayons du soleil avec une motte de terre plutôt qu'un miroir.

Salviati, secondé par Sagredo, déplace l'argumentaire, de la comparaison qualitative des corps en termes de puissance vers la comparaison de leur forme en termes de géométrie. C'est abstraction faite de la nature des différents corps en jeu que la forme sphérique parfaite engendrerait l'invisibilité de la Lune. Et c'est en raisonnant en seul géomètre que l'on peut affirmer que c'est la rugosité même d'un corps qui, d'une part, rend visible pour l'observateur la totalité de sa partie éclairée qui se tourne vers lui, et qui, d'autre part, permet à ce dernier de changer de position par rapport au corps sans en voir altérer l'apparence.

Accepter un tel déplacement ne va pas de soi et il serait trop facile de ne voir dans la résistance de Simplicio que le symptôme d'une obstination bornée. Peut-on en effet transposer à un corps céleste tel que la Lune les résultats obtenus à partir d'une expérience faite dans le monde terrestre, sans avoir déjà décidé qu'il en allait de même au ciel et sur la terre ? Comme dans le cas de l'observation avec la lunette, ce n'est pas l'expérience sensible même raisonnée qui force seule à abandonner la distinction sublunaire-supralunaire ; mais c'est au contraire la décision préalable de l'inquiéter, voire de la rejeter, qui permet cette articulation de l'observation et du raisonnement, cette construction d'une expérience sensible concluante. L'évidence nouvelle ne saute pas aux yeux, elle ne s'impose à la raison que par une reconstruction du regard et par l'exposition de ce qu'elle permet de saisir, de comprendre, de relier.

Ainsi va la science, aujourd'hui encore. Elle est faite bien sûr d'observations et d'expériences, mais qui ne signifieraient pas grand chose si elle n'était également tissée de raisonnements, de calculs, et ponctuée de décisions.

III. La nécessité d'une nouvelle science du mouvement

La deuxième journée du *Dialogue* [5, p. 217 sq.] est essentiellement consacrée, nous l'avons déjà mentionné, à l'examen et à la réfutation des arguments traditionnellement opposés à la possibilité du mouvement diurne de la Terre, c'est-à-dire son mouvement de rotation en un jour autour de l'axe polaire. Ces arguments nombreux ont une structure commune : s'il était vrai que la Terre fût animée d'un tel mouvement de rotation, tel ou tel phénomène devrait s'en suivre, que l'on observe pas ; l'affirmation du mouvement étant contraire à l'observation doit être donc rejetée.

Je ne détaillerai ici qu'un seul argument, celui de la pierre lâchée du sommet d'une tour. Il est caractéristique de l'ensemble et illustre le lien nécessaire entre nouvelle astronomie et nouvelle science du mouvement.

Pour développer l'argument, nous utiliserons deux principes fondamentaux de la physique aristotélicienne : tout effet a une cause ; lorsque la cause cesse, l'effet cesse (du moins si tel n'est pas le cas, c'est qu'il se prolonge par quelque autre cause).

Si donc c'est le mouvement de rotation de la Terre qui nous fait voir le Soleil, la Lune et certains astres se lever à l'est puis se coucher à l'ouest, c'est que ce mouvement va d'ouest en est. Imaginons une tour, érigée verticalement sur le sol, au sommet de laquelle un physicien retienne dans sa main une pierre au dessus du vide, sur le versant ouest de la tour. Du fait de la rotation terrestre, la tour, le physicien et la pierre sont eux aussi emportés vers l'est.

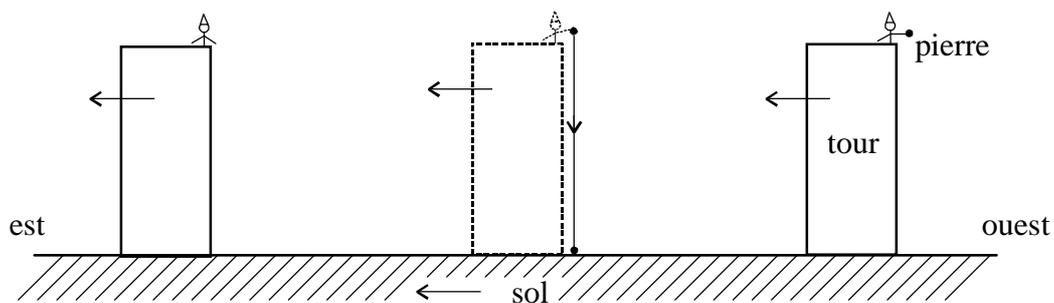


Figure 3

Que le physicien lâche la pierre, son mouvement d'est en ouest cessera, la cause de ce mouvement (la main qui le retenait) ayant cessée. Conformément à ce que l'expérience quotidienne nous montre, la pierre tombera verticalement. Mais pendant le temps de cette chute, le sol terrestre, et avec lui la tour et le physicien, auront continué leur mouvement vers l'est. Compte tenu de la vitesse considérable de ce mouvement, au moment de l'impact de la pierre sur le sol, la tour se sera éloigné vers l'est d'une distance tout à fait sensible. Or nous constatons que la pierre tombe verticalement en rasant la paroi ouest de la tour et touche le sol à une distance du pied égale à la distance dont elle était écartée du sommet de la tour. Attribuer le mouvement diurne à la Terre est donc en contradiction avec l'expérience sensible. Il faut alors rejeter cette hypothèse.

Ou bien, si nous voulons malgré tout la maintenir et expliquer ce que nous voyons, il nous faut alors découvrir quelle est la trajectoire réelle de la pierre qui tombe ; et expliquer pourquoi nous voyons la pierre tomber en ligne droite, et non selon cette autre trajectoire dite réelle (que signifie alors ce qualificatif ?).

On le voit, l'hypothèse copernicienne du mouvement diurne de la Terre s'articule ici à la double problématique de la chute naturelle des corps (pierre qu'on laisse tomber) et de la trajectoire des projectiles (pierre qu'on lance, qui d'abord s'élève pour retomber ensuite).

La physique héritée d'Aristote se trouvait en grande difficulté face à ces problèmes. En vertu du second principe évoqué plus haut - quand la cause cesse, l'effet cesse -, la pierre lancée devrait retomber verticalement aux pieds du lanceur dès qu'elle en quitte la main. La réponse apportée par les tenants de cette physique était encore plus problématique, puisque l'air devait prendre le relais de la

main, continuer à fournir à la pierre le mouvement que la main ne pouvait plus lui donner, et de milieu résistant se transformer en moteur tout en continuant à résister [5, pp. 271-sq].

Il n'est pas question dans le cadre de cet article de faire ne serait-ce qu'un résumé succinct de l'historique des problèmes de la chute des corps et de la trajectoire des projectiles. On en trouvera une étude détaillée dans [2]. Je signalerai simplement les caractéristiques principales des réponses que Galilée leur apporte.

En ce qui concerne la différence entre la trajectoire supposée réelle de la pierre et celle que notre vue nous montre, Galilée énonce un premier principe de relativité du mouvement, selon lequel « quel que soit le mouvement que nous attribuons à la Terre, pour nous, qui habitons cette Terre et donc participons à son mouvement, il doit rester totalement imperceptible et comme inexistant, du moins tant que nous considérons seulement les choses terrestres » [5, p. 226]. De plus, un mouvement étant une fois imprimé dans un corps, y demeure éternellement du moins aussi longtemps qu'aucune autre cause ne vienne l'empêcher ou l'altérer. De sorte que, en opposition radicale avec la physique ancienne, il n'est besoin d'aucune cause pour prolonger un mouvement une fois donné à un corps. Ces affirmations ont un caractère abstrait, en ce que l'expérience ne nous fournit aucun corps réel qui puisse leur correspondre. De sorte que leur mise en œuvre dans l'élaboration d'une nouvelle science du mouvement suppose de faire abstraction des multiples accidents dont un corps réel est sans cesse le sujet : résistance de l'air pour les projectiles et la pierre qui tombe, frottements irréguliers sur le sol pour la bille qui y roule, etc.

Il y a donc un prix à payer pour la construction d'une physique nouvelle qui concilie mouvement de la Terre et expériences sensibles des phénomènes terrestres. Ce qui permet d'abord d'entrevoir la difficulté historique de sa constitution même et de son adoption par le monde savant contemporain de Galilée. De reconsidérer ensuite la difficulté pédagogique qui nous échoit dans l'enseignement de cette science et que l'on pourrait condenser dans cette question : en quoi parle-t-elle des corps qui nous entourent, des événements qui nous atteignent, des phénomènes que nous percevons ?

Galilée a pleinement conscience de ces difficultés. En témoigne le soin avec lequel il réfute tout au long de la deuxième journée du *Dialogue* les arguments de ses adversaires, même ceux qui nous paraissent les plus fantaisistes. Mais c'est certainement dans les *Discours concernant deux sciences nouvelles*[6], édités en 1638, que Galilée affronte le plus explicitement la question, y apportant une réponse qui fonde une nouvelle méthode pour les sciences physiques. Cet ouvrage fut rédigé alors que Galilée se trouvait en résidence surveillée près de Florence, à la suite de sa condamnation en 1633. Les deux sciences nouvelles qu'annonce le titre sont, d'une part, la résistance des matériaux et, d'autre part, la science mathématique du mouvement qui seule nous intéresse ici.

La majeure partie des résultats importants de cette science est déjà connue de Galilée alors qu'il écrit le *Dialogue sur les deux grands systèmes du Monde*. Il y est fait plusieurs fois référence, notamment au cours de la seconde journée, précisément à propos des conséquences physiques de l'attribution du mouvement diurne à la Terre.

Mais c'est seulement dans les *Discours* qu'on les trouve systématiquement exposés, discutés et démontrés. Ainsi, à la Troisième Journée, sont établies les lois mathématiques du mouvement uniforme puis uniformément accéléré (les distances parcourues varient en proportion du carré des temps) et se trouve discutée la pertinence de remplacer par l'étude de ce dernier mouvement celle du mouvement « naturellement accéléré » c'est-à-dire tel qu'il se produit quand une pierre tombe en chute libre ou lorsqu'une bille descend librement sur un plan incliné [6, p. 130]. Ce travail lui permet alors de déduire, au cours de la quatrième journée, la trajectoire semi-parabolique que doit suivre un corps qui, d'abord animé d'un mouvement uniforme en ligne droite sur un plan horizontal, arrivé au bout de ce plan se met à tomber d'un mouvement uniformément accéléré :

« ... Théorème I - Proposition I

Un projectile qu'entraîne un mouvement composé d'un mouvement horizontal uniforme et d'un mouvement naturellement accéléré vers le bas, décrit au cours de son déplacement une trajectoire semi-parabolique.

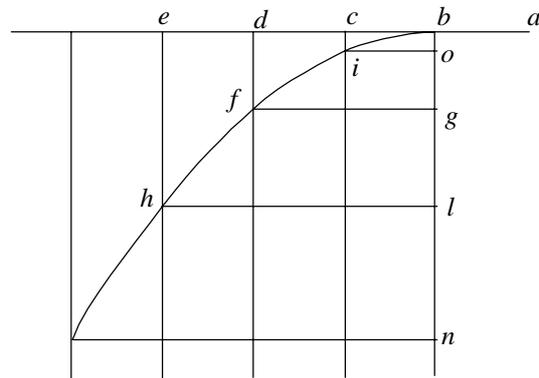


Figure 4

Soit une ligne horizontale ou un plan ab , situé en hauteur, et sur lequel un mobile se meut d'un mouvement uniforme de a vers b ; si le support que fournit le plan disparaît en b , le mobile acquerra en outre, du fait de sa gravité, un mouvement naturel vers le bas le long de la perpendiculaire bn . Prolongeons directement le plan ab par la ligne be , pour représenter l'écoulement ou la mesure du temps, et sur celle-ci marquons arbitrairement un nombre quelconque d'intervalles de temps égaux, bc, cd, de ; des points b, c, d, e , abaissons des lignes équidistantes de la perpendiculaire bn ; sur la première de celles-ci prenons une distance quelconque ci , puis sur la suivante une distance quadruple df , sur la troisième une distance neuf fois plus grande eh , et ainsi de suite sur les autres lignes en suivant la proportion des carrés de cb, db, eb , ou encore en raison double de ces mêmes lignes. Si nous supposons qu'un mobile entraîné d'un mouvement uniforme de b vers c subit en même temps une descente perpendiculaire égale à ci , à la fin de l'intervalle de temps bc il se trouvera en i . Le mouvement continuant, à la fin de l'intervalle de temps db , double de bc , la distance parcourue vers le bas sera le quadruple de la première distance ci ; on a en effet démontré, dans le traité précédent, que les espaces parcourus par un corps grave animé d'un mouvement accéléré, sont comme les carrés des temps ; par conséquent la distance eh , franchie pendant le temps be , sera comme 9, d'où il s'ensuit manifestement que les espaces eh, df, ci sont entre eux comme les carrés des lignes eb, db, cb . Menons maintenant des points i, f, h , les droites io, fg, hl , équidistantes de be : les lignes hl, fg, io , seront égales respectivement aux lignes eb, db, cb ; de leur côté les lignes bo, bg, bl seront égales aux lignes ci, df, eh ; le carré de hl sera au carré de fg comme la ligne lb à la ligne bg , et carré de fg sera au carré de io , comme gb est à bo : par conséquent les points i, f, h , sont situés sur une seule et même parabole. On démontrera de la même façon, en prenant un nombre quelconque d'intervalles de temps égaux et d'une grandeur arbitraire, que les points par lesquels passe un mobile animé d'un mouvement semblablement composé pendant ces mêmes intervalles de temps se trouvent sur une même ligne parabolique. D'où résulte notre proposition. [6, p.208] ».

Ainsi se trouve explicitée la trajectoire « réelle » suivie par la pierre tombant du sommet de la tour, dans l'hypothèse du mouvement diurne de la Terre.

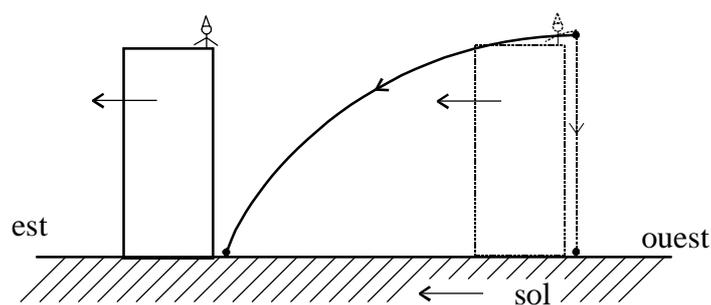


Figure 5

Mais pour se rendre à une telle résolution, il faut accepter d'abord de faire abstraction de la résistance de l'air (nécessité épistémologique du vide d'ailleurs discutée à la première journée des *Discours* [6, pp. 53-sq]) ; ensuite que le mouvement d'ouest en est se conserve dans la pierre une fois lâchée ; puis que chacun des deux mouvements attribués à la pierre, uniforme d'ouest en est et uniformément accéléré verticalement, se combinent dans ce corps sans altérer mutuellement leurs natures ; enfin qu'à l'échelle de cette expérience, le sol terrestre puisse être considéré comme plan et non sphérique, de sorte que le mouvement de la pierre vers l'est soit rectiligne. Toutes ces considérations nouvelles sont en opposition radicale avec la physique héritée d'Aristote. Et elles posent en elles-mêmes quelques questions, notamment sur le rapport qu'entretiennent ces mouvements étudiés pour ainsi dire « dans l'abstrait » et les mouvements « réels » tels qu'ils se produisent sous nos yeux.

L'examen de ce rapport est une nécessité tout à la fois pédagogique et scientifique.

Nécessité scientifique d'abord à laquelle Galilée ne se dérobe pas puisque il fait suivre son théorème sur la trajectoire semi-parabolique d'une discussion portant précisément sur l'adéquation d'un tel théorème avec le comportement réel des projectiles, examinant des objections possibles et notamment celle de la résistance de l'air à propos de laquelle il conclut ([6, G3 p. 212]: « c'est pourquoi, si l'on veut traiter scientifiquement ce problème, il convient d'en faire abstraction, et après avoir découvert et démontré les lois, en supprimant toute résistance, de les compléter au moment de les utiliser concrètement, par ces limitations que l'expérience nous enseignera. L'avantage de cette méthode n'est pas petit, car on peut choisir les matériaux et les formes les moins sensibles à la résistance du milieu, comme le sont les corps très pesants et de forme arrondie, et, d'autre part, les distances et les vitesses ne seront pas en général si grandes que l'on ne puisse corriger avec précision les différences ; d'ailleurs avec les projectiles que nous utilisons, qu'ils soient d'une matière pesante et de forme arrondie, ou d'une matière moins pesante et de forme cylindrique, comme les traits qu'on lance avec une fronde ou un arc, l'écart entre leur mouvement et la forme exactement parabolique sera tout à fait insignifiant ».)

Réponse qui porte en elle une nouvelle méthode de la science : pour étudier un phénomène naturel, il convient de le reconstruire en faisant abstraction de certaines réalités considérées alors comme accidentelles par rapport aux caractères principaux que l'on veut dégager du phénomène. Cela s'appelle la méthode expérimentale. La nature est muette, elle ne parle pas à moins qu'on l'interroge. La méthode de cette interrogation est l'expérience, soutenue par les mathématiques comme langue d'exposition de l'interrogation et d'interprétation de la réponse expérimentale.

Nécessité pédagogique encore actuelle d'instaurer pour nos élèves un rapport significatif et constructif entre les contenus scientifiques qu'on leur enseigne et la perception qu'ils peuvent avoir « spontanément » du monde des phénomènes.

Bibliographie

- [1] DJEBBAR A., *Une histoire de la science arabe*, Points Sciences, Le seuil, Paris, 2001.
- [2] KOYRÉ, A., *Études galiléennes*, Hermann, Paris, 1966.
- [3] GRANT E., *La Physique au Moyen Âge, VI^e-XIV^e siècle*, Bibliothèque d'Histoire des Sciences, PUF, Paris 1995.
- [4] GALILÉE, *Le Messager des Étoiles*, Traduction, Notes et Présentation de F. Hallyn, Sources du Savoir, Le Seuil, Paris 1992.
- [5] GALILÉE, *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde*, traduction R. Fréreau et F. de Gandt, Points Science, Le Seuil, Paris 1992.
- [6] GALILÉE, *Discours concernant deux sciences nouvelles*, traduction, notes et présentation de M. Clavelin, nouvelle édition PUF « Épiméthée », Paris 1995.
- [7] SOUFFRIN P., *La théorie des marées de Galilée n'est pas une théorie fausse*, *Épistémologiques*, 1-2, (2000), pp.113-139, également disponible sur le site :
<http://wwwrc.obs-azur.fr/cerga/hdsn/SFHST.html>

Buffon et les théories de la génération au 18^{ème} siècle

Jean-Louis Fischer

Chargé de recherche, Cnrs, Paris

Une nouvelle façon de concevoir la génération dans les années 1660-1670

C'est pendant ces années de la seconde moitié du 17^{ème} siècle que des découvertes importantes, dans le domaine des sciences de la vie, vont conduire les « savants » à travailler à l'élaboration de deux nouvelles structures théoriques expliquant la génération chez l'homme : l'ovisme et l'animalculisme. Pour ces nouvelles théories, cette manière dogmatique de penser le vivant se désigne par l'expression de la préexistence des germes et de leur emboîtement. C'est, par rapport aux théories anciennes de la génération, une nouveauté dans l'explication de la naissance des êtres vivants en général et de l'homme en particulier, dans la mesure où cette pensée « biologique » est fondée sur des faits scientifiques et expliquée dans le cadre d'une idéologie chrétienne et d'une politique du privilège, cette dernière correspondant à la toute puissance de la continuité familiale et du sang, particulière aux principes de l'Ancien régime, de la noblesse et de la royauté.

Il y a de nombreuses manières d'expliquer dans ce 17^{ème} siècle les raisons qui conduisent un homme et une femme à produire un enfant. Généralement le médecin théoricien se réfère aux Anciens : Hippocrate (v. 460- v. 377 av. J.C.), Aristote (v. 384- v. 322 av. J.C.), Galien (v. 131- v. 201) sont ceux-là même qui alimentent la discussion sur les origines et la puissance génératrice des semences, produites par l'homme et la femme et qui concourent à la formation du « fœtus ». Sans entrer ici dans les détails qui font la spécificité théorique des auteurs écrivant sur cette question, il est possible de dégager un cadre théorique général que nous pouvons ainsi résumer : l'homme et la femme produisent une semence seulement à partir de l'âge où ils peuvent concevoir un enfant, c'est la raison pour laquelle les savants d'alors nomment testicules féminins les ovaires qui ne prendront le nom que nous leur connaissons que dans les années de la fin du 17^{ème} siècle. Ces semences, appelées sperme, produites par l'homme et la femme sont secrétées par l'ensemble de l'individu : le corpus hippocratique dit « que le sperme se secrète à partir du corps entier, de ses parties solides, de ses parties molles et de toute l'humeur » [1]. Le sperme est une image ou une représentation des géniteurs : les caractères spécifiques (homme, chien, poulet) et individuels sont en puissance dans la semence masculine et féminine si nous considérons l'espèce humaine ; mâle et femelle si nous considérons les espèces animales. Comme ces semences sont observées pendant l'acte sexuel dans les éjaculats des organes génitaux qui servent à la génération, elles sont à l'évidence, pour les médecins qui dissertent sur cette question, à l'origine de la genèse du futur enfant : « Si, après le coït, la femme ne doit pas concevoir, d'habitude le sperme provenant des deux (partenaires) sort, quand la femme le veut ; si elle doit concevoir, la semence ne sort pas, mais reste dans la matrice. En effet, la matrice, après avoir reçu le sperme et s'être fermée, le garde en elle, puisque son orifice se resserre sous l'effet de l'humeur, et ce qui provient de l'homme et de la femme s'y mélange. Si la femme a l'expérience des enfantements et constate quand le sperme est resté au lieu de sortir, elle saura quel jour elle a conçu. » [2].

Enfin, parmi les textes qui vont jouer une influence dans les conceptions de la génération, nous ne pouvons ignorer Aristote et son système. Avec Aristote, la génération est conçue d'une façon différente. Son traité *De la génération des animaux* datant, d'après son traducteur le recteur Pierre Louis, des années -330 à -322, est beaucoup plus élaboré que le contenu du corpus hippocratique sur le même sujet. Dans la conception aristotélicienne, la femelle fournit la matière qui va nourrir l'embryon. Le mâle fournit le « mouvement » et « l'idée » qui sont responsables de la forme que prendra le fœtus. Le mouvement et l'idée se trouvent contenus dans le sperme : c'est donc le sperme seul qui est responsable de la continuité de l'espèce. Il possède la « figure » et « l'idée » de la

conformation de l'être futur. Le phénomène de la génération se ramène, pour Aristote, à celui que produit la présure sur le lait. Le sperme joue le rôle de la présure, et le sang des règles « contenu dans l'utérus » celui du lait. L'embryon va se former par une succession d'organes, à la suite du cœur qui est le premier formé, après que les membranes embryonnaires ont isolé « l'embryon » de l'environnement maternel. Alors que Démocrite (v. 460- v. 370 av. J.C.) et la théorie de la *pangenesis* proche de la théorie hippocratique considéraient que les semences sont issues de toutes les parties individuelles du corps de l'individu qui les produit, Aristote marque une originalité en définissant le sperme comme un résidu, c'est-à-dire comme un produit des déchets de nourriture utile. Les résidus naturels étant localisés dans des structures anatomiques remplissant des fonctions bien précises, le « bas de l'intestin » étant réservé à la nourriture solide, la vessie au liquide, et l'utérus, les parties sexuelles ainsi que les mamelles aux « excréments spermatiques. »

Reste que, pour le stagirite, le sperme est l'élément qui permet la fécondation. La femelle chez les poissons ovipares pond ses œufs sur lesquels le mâle dépose sa laitance : seuls les œufs atteints par la laitance deviennent féconds, les autres sont stériles. C'est bien la preuve, pour Aristote, que le sperme, sans ajouter de matière à l'embryon, donne la vie à celui-ci.

Dans ce (ou ces) système(s), puisqu'il existe des variantes pour expliquer la génération par le mélange des semences, nous comprenons la possible transmission des caractères physiques du père ou de la mère aux enfants. *A contrario*, de parents « estropiés » peuvent naître des enfants non estropiés, dans les cas où la partie malade ou estropiée n'est pas représentée dans la semence ou la matière ; ou si elle est représentée, est-elle trop faible pour s'exprimer chez l'enfant ou permettre son achèvement. Quant à la naissance d'un garçon ou d'une fille, elle s'explique, dans le cas du mélange des semences, par un effet de dominance d'une semence forte sur une faible (naissance d'un garçon) ou de la dominance d'une semence faible sur une forte (naissance d'une fille) : « En effet, si la semence faible est beaucoup plus abondante que la forte, celle-ci, dominée et mélangée à la faible, tourne à semence femelle ; mais si la semence forte est plus abondante que la faible, et que la faible est dominée, cette dernière tourne à semence mâle. » [3]. Ce sont là, parmi d'autres conceptions qui en sont inspirées, les grandes lignes qui expriment cette idée générale d'une explication possible de la génération de l'homme et des animaux par le mélange des semences, ou par un principe qui s'ajoute à une matière.

La découverte des œufs chez les mammifères

Le dogme de la préexistence des germes et de leur emboîtement est fondé sur une première démonstration expérimentale de la non-génération spontanée, sur la découverte des « œufs » chez les mammifères, sur la découverte du monde de l'infiniment petit par les études des micrographes, sur les études du calcul infinitésimal et surtout sur le texte biblique de la Genèse.

Jusque vers les années 1660 l'idée qu'une certaine catégorie d'animaux inférieurs, à l'exemple des insectes (les mouches, les moustiques) ou d'animaux « repoussants » à l'exemple des crapauds, des serpents, des souris, naissent par génération spontanée était de mise. Toutefois cette idée d'une génération d'une forme vivante à partir d'une matière inerte pouvait ne pas convenir à tous dans un discours philosophique et théologique qui prenait le texte biblique comme celui contenant toutes les vérités. Or l'une de ces vérités correspond à la création par un être divin de la terre, de l'homme et des créatures vivantes. Aussi la question des générations spontanées (les mouches naissent de la décomposition de la viande) pouvait-elle passer, pour certains « savants » du 17^{ème} siècle, comme étant contraire aux « saintes écritures. » L'historien des sciences de la vie Jacques Roger (1920-1990) écrivait à ce propos « L'esprit du XVII^{ème} siècle répugne aux notions de virtualité et de « puissance », qui sont pour lui des degrés incompréhensibles entre l'être et le non être. La Bible nous raconte comment Dieu a créé chaque astre, chaque plante, chaque animal, et le temps est passé où il était licite d'interpréter la Genèse d'une manière symbolique. Dieu a pour ainsi dire pétri un à un, de sa main souveraine, chacun des êtres que nous voyons... L'apparition d'une forme était inconcevable, qu'on prétendît l'attribuer à la puissance de la matière ou aux lois du mouvement. » [4].

En 1668, Francesco Redi (1626-1897) publie les résultats de ses études concernant la génération des insectes *Esperienze intorno alla generazione degl'Insetti*. En épigraphe à son livre il place ce proverbe arabe : « Qui fait des expériences augmente le savoir, qui est crédule augmente l'erreur. » L'œuvre expérimentale de Redi « constitue un bon exemple de cohérence interne de la méthode. » [5] ; il a réalisé des expériences répondant à une logique expérimentale dont les résultats démontrent que les mouches s'accouplent et qu'elles se reproduisent par des œufs. Cette non-génération spontanée et la reproduction par les œufs correspond à une nécessité intellectuelle qui prend ses sources chez William Harvey (1578-1657). Harvey défend l'idée que tout être provient d'un œuf, mais l'idée qu'il se fait de l'œuf n'est pas celle développée par les médecins des années 1670. Il pense que l'œuf est généré par l'utérus, c'est un « élément ovipare » qui possède de l'œuf, non pas la figure, mais « la constitution. » Pour Harvey, les « testicules féminins » ne sont que des ganglions lymphatiques et ne jouent aucun rôle dans la génération : pour lui c'est l'utérus qui est fécondé par une contagion de la semence masculine. Si la conception que Harvey se fait de l'œuf (1651) n'est pas sans avoir apporté une certaine confusion dans l'idée générale que l'on devait s'en faire, elle contient toutefois un ferment intellectuel fort qui va conduire à une conception moins abstraite de la chose. Redi marque une étape dans cette connaissance conceptuelle d'une génération par les œufs. Elle est complétée par des découvertes comme celle faite par Nicolas Sténon (1638-1686) en 1667 que la femelle du « chien de mer », poisson cartilagineux vivipare proche des requins, possède des œufs dans ses « testicules ». Dans ces mêmes années, l'anatomiste hollandais Johann Van Horne (1621-1670) est partisan de faire du « testicule femelle » un véritable ovaire produisant des œufs (1668), et Theodor Kerkring (1640-1693) aussi anatomiste hollandais défend ce système en 1671 : « Qui croirait, si le scalpel de l'anatomiste ne l'avait découvert, que les rudiments de l'homme, comme de l'oiseau, se trouvent dans un œuf ? Car l'homme vient d'un œuf. » [6]. Certes Kerkring fait preuve d'imagination dans ses descriptions puisqu'il affirme avoir observé dans un œuf de trois ou quatre jours un embryon avec une tête bien formée. Comme le fait remarquer J. Roger à ce propos : « Kerkring avait, sans nul doute, le scalpel complaisant et l'imagination vive. » [7]. Il manquait pour que la génération par les œufs soit définitivement établie, ou plus exactement précisée, car il faut parfois du temps pour qu'une idée juste en biologie fasse l'unanimité, une démonstration élaborée, bien expliquée sur des faits et bien écrite.

C'est un médecin hollandais Régnier de Graaf (1641-1673) qui produit cette œuvre fondamentale instituant le principe que la génération de l'homme se fait par les œufs. En 1672 il publie son *Histoire anatomique des parties génitales de l'homme et de la femme*. De Graaf s'appuie sur les études de ses confrères anatomistes et sur ses propres observations de dissections de lapines depuis le « coït » jusqu'à la mise bas. Sans entrer ici dans les détails de ces observations, précisons que de Graaf prend pour des œufs les follicules ovariens qu'on appelle aujourd'hui follicule de de Graaf ; l'ovule contenu dans ce follicule ne sera découvert qu'en 1827 par Karl Ernst von Baer (1792-1876) [8]. Mais peu importe, le système des œufs est en place et de Graaf pouvait conclure : « Voilà grâce à Dieu le Traité des organes des femmes qui servent à la génération achevé avec assez d'exactitude, que je donne non pas pour servir au libertinage, mais à l'avancement de la vérité de la médecine, et faire admirer la providence et la sagesse du Tout-Puissant, en découvrant les ressorts merveilleux dont il se sert pour la propagation et la conservation du genre humain. » Pour de Graaf, l'embryon se trouve déjà dans l'œuf avant l'acte sexuel et la semence mâle agit à distance par une *aura seminalis* qui donne vie à l'embryon. Une grande majorité d'anatomistes et de médecins vont adopter cette thèse qui prend le nom d'ovisme, et désormais les testicules femelles seront dénommés « oeuvriers » ou ovaires. À cette conception toute nouvelle en comparaison des conceptions hippocratiques et aristotéliennes, une autre découverte, qu'on ne pouvait alors imaginer et qui va poser bien des problèmes, est celle des animalcules spermatisques.

Des vers dans le sperme

Un « fonctionnaire municipal » vivant à Delft, passionné par l'étude du vivant et curieux des choses que l'œil ne pouvait percevoir, trouve des « animalcules » dans la semence de l'homme, grâce à des microscopes dont il était l'inventeur et constitués par des lentilles sphériques fixées entre deux plaques métalliques. Ce fonctionnaire, c'est le Hollandais Antoni van Leeuwenhoek (1632-1723) [9]. En 1677, un étudiant en médecine Johan Ham (1654-1725) apprend à Leeuwenhoek, découvreur des globules sanguins en 1674, qu'il a vu des animalcules dans le sperme d'un homme atteint d'une blennorragie. Cette observation va inciter le micrographe de Delft à vérifier l'observation en examinant des semences spermatiques chez l'homme et chez différents animaux. Concernant ces observations des animalcules spermatiques chez l'homme, Leeuwenhoek hésita à les faire connaître en raison du problème religieux qu'une telle observation pouvait provoquer, mais il se dispense de toute faute dans une lettre de novembre 1677 : « Mais quoi que j'ai pu observer, je l'ai seulement fait sans me souiller d'une façon coupable. J'ai seulement utilisé ce que la Nature dans son cours le plus ordinaire, abandonne après le coït conjugal. » C'est le problème de la façon dont l'homme pouvait récolter son sperme qui interdit la pratique de l'insémination chez la femme jusqu'au 20^{ème} siècle.

Les animalcules spermatiques font leur entrée sur la scène des débats médicaux en 1677, et autant le monde savant était préparé à concevoir que les femmes produisent des œufs, autant la découverte des « vers spermatiques » chez l'homme était imprévisible. De plus, si l'on savait à quoi un œuf peut servir, le rôle des animalcules spermatiques posait bien des problèmes et l'une des premières réactions du monde savant fut de douter de l'existence de ces vers. Leeuwenhoek voyait aussi dans le sperme des parties organiques préfigurant les organes de l'individu. Il admet que l'embryon est formé dans le sperme et rejette la thèse oviste : « C'est exclusivement la semence mâle qui forme l'embryon, et la seule contribution que la femme puisse apporter est de recevoir la semence et la nourrir. » : l'homme reprenait à la femme la responsabilité de la génération et la femme redevenait celle qui nourrit et abrite le germe produit par l'homme.

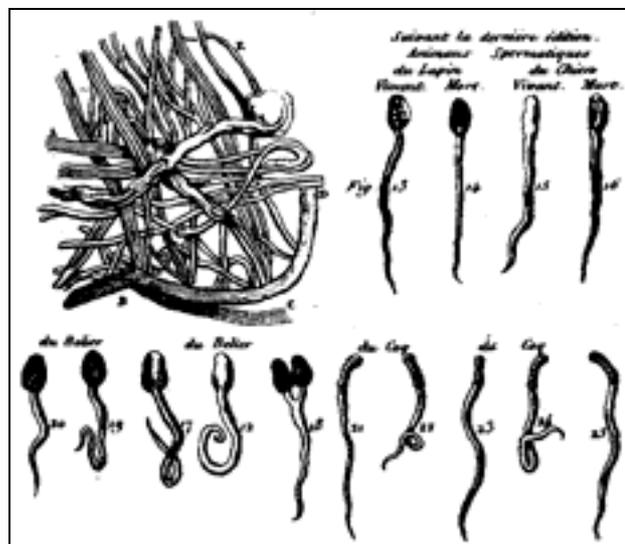


Figure 1. Les animalcules spermatiques découverts par Leeuwenhoek furent utilisés comme modèles pour construire l'animalculisme

Cette façon de concevoir la génération par une préfiguration d'éléments préformés dans la semence mâle est une théorie acceptable puisqu'en 1750 Jacques Gautier D'Agoty (1717-1785) voit dans le sperme humain « un fœtus blanc, de matière opaque et fluide » dont il distingue la tête, plus grosse que le corps et les quatre membres. Dans cette conception de la génération où il n'est pas question d'animalcules spermatiques, seules le sperme contient les éléments préformés en partie ou bien l'embryon préexiste déjà dans sa totalité. Si Leeuwenhoek adhère dans un premier temps à ce système, il va dans un second temps changer d'avis en annonçant en 1683 que tout être humain vient d'un

animalcule et non pas d'un œuf. C'est la naissance de la théorie animalculiste, c'est l'animalculisme qui désormais s'oppose à l'ovisme. Et, si en 1694 Nicolas Hartsoeker (1656-1725) imaginait comment un fœtus entier pouvait se loger dans l'animalcule, en 1699 François de Plantade (1670-1741) affirme, sous le pseudonyme de Dalempatius, avoir réellement observé à l'intérieur de l'animalcule un embryon parfaitement constitué. C'était, comme le souligne Jacques Roger, une mystification qui connut un certain succès.

Si l'existence des animalcules était assez bien acceptée, le rôle qu'ils devaient jouer alimentait de nombreuses discussions et polémiques. Par exemple, ceux qui refusaient de croire à une préexistence de l'embryon dans les animalcules pensaient qu'ils pouvaient servir à détacher les œufs des ovaires, ou à agiter la semence pour qu'elle ne se solidifie pas, ou à exciter l'homme à l'amour, etc. En 1700, Nicolas Andry de Boisregard (1658-1742) publie plusieurs remarques sur les vers spermatiques et considère que ceux-ci sont bien les éléments de la génération contenant l'embryon, et non des vers parasites.

À côté des ovistes et des animalculistes se trouvaient des ovo-vermistes conciliant les deux systèmes : l'un des plus célèbres partisans de cette thèse fut Gottfried Wilhelm Leibniz (1646-1716).

La notion d'embryon parfait préexistant dans l'œuf (ovisme) ou dans l'animalcule (animalculisme) est défendue par les partisans de la préexistence des germes et de leur emboîtement. Cette théorie ou ce dogme prend naissance dans son expression théologique dans les années 1670 et pour s'achever dans les années 1820. Il diffère du concept de préformation, en raison de son référent biblique, et du concept d'épigenèse qui veut que l'embryon se construise par étapes successives à partir d'une matière simple douée d'une puissance vitale : il n'y a ni une théorie de la préformation, ni une théorie de l'épigenèse, mais de nombreuses variantes théoriques de ces deux concepts fondamentaux. La préformation s'applique, par exemple, aux semences représentatives et elle peut se concilier avec un concept d'épigenèse : cette conciliation paraît impossible avec la préexistence des germes et de leur emboîtement en raison même de son fondement créationniste et fixiste.

La naissance d'un dogme

Nous devons à Jan Swammerdam (1637-1680) l'origine du dogme de la préexistence des germes qu'il expose dans son ouvrage *Histoire générale des Insectes* (1669). C'est en rejetant les phénomènes de la métamorphose que Swammerdam voit le papillon dans la chrysalide, et si le papillon est contenu dans la chrysalide, il doit être également contenu dans son état parfait dans la chenille et aussi dans l'œuf puisque la chenille vient d'un œuf. Dieu étant le créateur de toutes choses depuis l'origine a dans son acte créateur créé toutes les générations futures végétales, animales et humaines. Ces générations sont emboîtées les une dans les autres à l'image de la création d'Ève qui correspond à un désemboîtement ; Ève est extraite dans son état parfait du côté (et non de la côte) d'Adam, elle préexistait dans le premier homme, comme Lévi préexistait dans le sein d'Abraham et ce dernier exemple conduisit saint Augustin à cette réflexion : « Pourquoi Abraham n'aurait-il pas été de la même manière dans le sein d'Adam, et Adam dans les premières œuvres du monde que Dieu fit toutes en même temps. » Dans le dogme théologique biblique le modèle idéal est représenté par l'homme, idée aristotélicienne par excellence, et la Genèse (p.e. Genèse 6, 1) parle des fils de Dieu puis des filles des hommes. Le premier des géniteurs, c'est l'homme, et la femme qu'il génère contiendra en elle tous les germes futurs car désormais la génération lui est dévolue : c'est une femme qui donne naissance à Jésus. L'emboîtement des germes et leur préexistence depuis la création spécifie le dogme de la préexistence des germes qui se justifiait aussi bien dans l'ovisme que dans l'animalculisme : « Un seul de ces corps porte dans lui-même un nombre innombrable d'autres corps qui successivement en renferment aussi d'autres... Dieu... nous a tous créés et formés dans le sein du premier homme. » [10].



Figure 2. La naissance d'Ève, que Dieu désenboîte d'Adam, convenait comme preuve théologique au système de l'ovisme (gravure de Johannes de Cuba in *Hortus sanitatis*, Strasbourg, 1536)

Dans ce système la fonction génitale est réduite à donner vie au germe, à le vivifier, à le réveiller de l'engourdissement dans lequel il se trouve depuis la création pour qu'il commence son « évolution » : ici le terme évolution est pris dans le sens premier, *evolutio*, qui signifie développer un parchemin. Le germe se développe (dans le sens physique) comme le parchemin que l'on déroule : il prend du volume. Ce développement, cette « théorie de l'évolution », qui n'a rien à voir avec le lamarckisme ou le darwinisme, est une négation d'une génération telle que nous pouvons la concevoir, dans la mesure où les géniteurs ne participent en rien dans la formation d'un germe déjà formé dans sa perfectibilité depuis l'origine.

La préexistence de germes fonctionne aussi avec le concept d'invisibilité : les germes d'hommes sont si minuscules qu'ils sont invisibles à l'homme, à l'exemple des infiniment petits découverts par les microscopistes. Or ces infiniment petits, inaccessibles à l'imperfection de la vision humaine, sont des organismes qui vivent, se nourrissent et se reproduisent, c'est-à-dire que dans cet infiniment petit il existe des structures encore plus petites. Ces faits de science servaient à consolider le dogme de la préexistence et permettaient d'avancer des arguments aux critiques.

Un autre problème se posait, et non des moindres, c'est celui d'une possible divisibilité ou non de la matière à l'infini. Les germes préexistants sont-ils comme la matière ou les nombres divisibles dans un ordre d'emboîtement pour un temps infini ou pour un temps qui va connaître une fin ? L'humanité est-elle vouée à une éternité ou doit-elle s'arrêter le jour où le dernier des germes va se désenboîter ? Questions de mathématiciens, de physiciens mais aussi de théologiens qui se demandent si Dieu a prévu ou pas une fin à sa créature ? Malebranche est pour une divisibilité à l'infini, et Leibniz qui s'intéressa au calcul infinitésimal dans les années 1684, le suivra dans cette voie en 1710 dans *ses Essais de Théodicée* : « ...il y a une infinité de créatures dans la moindre parcelle de la matière, à cause de la division actuelle du *continuum* à l'infini. » Toutefois le philosophe s'ouvre à une conception dynamique de la vie dans sa *Monadologie* (1714).

Ces problématiques contenues dans le dogme général de la préexistence des germes vont faire l'objet d'importants débats dans les sciences de la vie du siècle des Lumières. Le dogme est omniprésent dans les esprits et que l'on soit pour ou contre, de toute façon il faut argumenter pour défendre le dogme ou le rejeter. Un personnage incontournable qui exerça une grande influence dans la diffusion de la préexistence des germes au 18^{ème} siècle, c'est Nicolas Malebranche (1638-1715) avec

son œuvre *De la recherche de la vérité* (1674-1715) qui connaît de nombreuses éditions au siècle des Lumières. Dans ce texte, Malebranche écrit : « On voit dans le germe de l'oignon d'une tulipe une tulipe entière. On voit aussi dans le germe d'un œuf frais, et qui n'a point été couvé, un poulet qui est peut-être entièrement formé. On voit des grenouilles, et on verra encore d'autres animaux dans leur germe, lorsqu'on aura assez d'adresse et d'expérience pour le découvrir. » La suite de la citation de Malebranche mérite toute notre attention, car elle montre la raison et la démarche intellectuelle de la spécificité de la préexistence des germes : « Mais il ne faut pas que l'esprit s'arrête avec les yeux : car la vue de l'esprit a bien plus d'étendue que la vue du corps. Nous devons donc penser outre cela que tous les corps des hommes et des animaux, qui naîtront jusqu'à la consommation des siècles, ont peut-être été produits dès la création du monde ; je veux dire que les femelles des premiers animaux ont peut-être été créées avec tous ceux de même espèce qu'ils ont engendrés, et qui devaient s'engendrer dans la suite des temps. » [11].

Le dogme de la préexistence des germes est défendu dans ce 18^{ème} siècle par des hommes qui, au-delà de l'idéologie qui les anime, fondent une science du vivant : il suffit de penser à Charles Bonnet (1720-1793), Lazzaro Spallanzani (1729-1799) ou Albrecht von Haller (1708-1777) pour ne citer que ces trois noms parmi de nombreux autres. Toutefois les faits scientifiques qui appuient la préexistence des germes des années 1770 ne sont plus les mêmes que ceux des années 1670. Le progrès des connaissances a changé les paysages de l'argumentation, mais le fond idéologique inspiré du texte biblique reste le même. Et pour bien marquer cette particularité, Jacques Roger évoquait un « théocentrisme ». Aussi, quand les sciences biologiques vont dans les années 1820 démontrer le non fondé d'une préexistence des germes dans une approche du vivant, le dogme pourra persister dans son idéologie dogmatique chrétienne de la création et de la fixité des espèces. Entre temps, d'autres critiques ont pu se faire contre le sens politique contenu dans le dogme. Celui qui rêvait d'une république idéale et à une tropicalité dans laquelle l'homme devait trouver son bonheur, Bernardin de Saint-Pierre (1737-1814), s'élevait contre le dogme de la préexistence des germes qui favorisait l'idée des lignées d'embryons rois, nobles ou roturiers, chacun ayant son destin social préexistant dès la naissance : « C'est cependant sur cette opinion si réfutée par l'expérience, que les aristocraties fondent leurs prérogatives. Dans nos écoles qui ont flatté toutes les tyrannies, on les soutient par des raisonnements subtils. Tous les hommes, y dit-on, ont été contenus de pères en fils, dans le premier homme comme des gobelets renfermés les uns dans les autres. Leur naissance n'est que leur développement. Il en est de même de tous les êtres organisés. Chaque individu sort de son premier germe, où il était enclos avec toute sa postérité. Le premier gland renfermait tous les chênes de l'univers, et si on n'aperçoit pas, dit-on, dans la semence de cette fleur, une seconde génération de tulipes, c'est que l'œil de l'homme ne peut pas porter plus loin ses observations. » [12].

Le discours des sciences de la vie concernant la génération au 18^{ème} siècle est donc marqué par le dogme de la préexistence de germes auquel s'opposent les concepts de préformation (même si ce dernier est parfois confondu avec la préexistence des germes, la différence essentielle tient au fondement théologique de la première) et celui d'épigenèse. L'épigenèse prend forme dans sa scientificité avec les travaux de Caspar Friedrich Wolff (1733-1794) et sa thèse *Theoria generationis* publiée en 1759. Pour lui le développement de l'embryon se fait progressivement, les organes se formant les uns après les autres, les parois de la cavité intestinale se ferment progressivement. Le développement embryonnaire dépend d'une force, la force essentielle, la *vis essentialis*. De ses travaux Wolff conclut : « On peut en conclure que les parties du corps n'ont pas toujours existé mais ont été formées peu à peu ; et cette formation a pu se produire, de quelque manière que ce fut. Je ne dis pas que l'épigenèse se fait par un alliage de particules ou par l'activité de l'âme, mais je dis seulement qu'elle se fait. »

À ce stade de notre exposé, l'historien des sciences de la vie doit faire ce constat : le même objet observé, par exemple l'embryon de poulet, conduit à des interprétations différentes et opposées. Ce n'est donc pas le fait scientifique en lui-même qui détermine l'énoncé théorique, mais c'est la sensibilité idéologique, philosophique, politique de l'homme de science qui détermine le contenu

théorique qu'il expose. Nous pouvons aussi élargir le propos se rappelant cette idée formulée par Jacques Roger, que le fait scientifique ne change pas, mais que ce sont les hommes qui l'interprètent qui changent.

Aussi, n'est-il pas sans intérêt, d'analyser une pensée dix-huitièmiste qui va s'opposer au dogme de la préexistence des germes, en renouant avec les théories antiques du mélange des semences, allant jusqu'à nier l'existence des œufs chez les mammifères à une époque où la chose semble entendue (1749) et à rejeter la présence des animalcules spermatiques. Cette critique est exercée par l'un des grands penseurs du 18^{ème} siècle, Georges-Louis Leclerc de Buffon (1707-1788).

Buffon et les molécules organiques contre la préexistence des germes

L'étude du vivant pouvait être posée en terme dualiste : le vivant correspond à une matière homogène divisible à l'infini ou il correspond à une matière hétérogène composée d'une infinité de particules qui sont à l'origine isolées, et ces particules, ces molécules, se réunissent en fonction de leur affinité pour reproduire l'être vivant à l'image des parents qui doivent pour former l'être se réunir. Cette conception corpusculaire, moléculaire du vivant implique une formation dynamique des organismes.

L'influence de Newton

En 1699, Isaac Newton (1641-1727) est nommé membre « associé étranger » à l'Académie royale des sciences. Quelques années plus tard, en 1704, il publie son traité *Optics*. L'édition française de référence est celle de 1722 ainsi libellée : *Traité d'optique sur les réflexions, réfractions, inflexions, et les couleurs, de la lumière*, par Monsieur Le Chevalier Newton, traduit par M. Coste, sur la seconde édition anglaise, augmentée par l'Auteur, Seconde édition française, beaucoup plus correcte que la première, À Paris, chez Montalant, Quay des Augustins, du côté du Pont saint-Michel, M. DCC. XXII. Dans ce traité de Newton une phrase, du Livre III Question 31, va particulièrement interpeller les hommes de science. C'est la suivante : « Car c'est une chose connue que les corps agissent les uns sur les autres par des attractions de gravité, de magnétisme et d'électricité ; et de ces exemples qui nous indiquent le cours ordinaire de la nature, on peut inférer qu'il n'est pas hors d'apparence qu'il ne puisse y avoir encore d'autres puissances attractives, la nature étant très conforme à elle-même. »

L'idée générale, induite par cette phrase, se résume par l'extrapolation de l'unité d'un mécanisme responsable du mouvement, de l'équilibre, de la « vie » en quelque sorte du système planétaire aux êtres organisés. C'est le désir d'appliquer à l'infiniment petit, qu'est le vivant, une loi physique régissant l'infiniment grand qu'est l'univers.

Dans ce contexte de la physique newtonienne, Buffon est particulièrement présent. Avant d'être naturaliste, il est avant tout mathématicien et physicien. En 1728, il s'instruit sur l'attraction en compagnie du père oratorien Pierre de Landreville ; en 1731, il est en Italie à Florence auprès du mathématicien Tomasso Perelli, puis à Pise avec le père Guido Grandi, éditeur de Galilée, correspondant de Newton ; il entretient des relations épistolaires avec le genevois Gabriel Cramer, mathématicien, admirateur des *Eléments de la géométrie de l'infini* (1727) de Fontenelle. A la Sorbonne, un exemplaire des *Principia mathematica* (1687) de Newton porte cette inscription « Buffon 1728 ». En 1734, Buffon entre à l'Académie royale des sciences dans la classe « mécanique », il a 27 ans. Plus que jamais il se sent proche de Newton ; Voltaire, qui n'est pas étranger aux discussions scientifiques et aux progrès des connaissances, désigne Buffon comme chef du « Parti newtonien », et dans une lettre qu'il adresse à Helvétius le 3 octobre 1739, il écrit : « Si je n'étais avec Mme du Châtelet je voudrais être à Montbard. » (Montbard, près de Dijon, est la résidence Buffon). Buffon, comme le souligne Sainte-Beuve dans ses *Causeries du lundi* (1751), « entra sans hésiter dans la voie de Newton et dans celle des grands physiciens de cette école. »

Sa nomination comme intendant au Jardin du Roi en juillet 1739, ne le fixe pas pour autant dans des études sur l'histoire naturelle. Il reste avant tout mathématicien et physicien. En 1740, il publie sa traduction en français de *La méthode des fluxions et des suites infinies* de Newton à laquelle il joint une importante préface. C'est dans cette préface qu'il prend position dans le débat d'une définition de l'infini : « Nous avons des idées nettes de la grandeur, nous voyons que les choses en général peuvent être augmentées ou diminuées et l'idée d'une chose devenue plus grande ou plus petite est une idée qui nous est aussi présente et aussi familière que celle de la chose même ; une chose quelconque nous étant donc présentée ou étant seulement imaginée, nous voyons qu'il était possible de l'augmenter ou de la diminuer ; rien n'arrête, rien ne détruit cette possibilité, on peut toujours concevoir la moitié de la petite chose imaginable et le double de la plus grande chose ; on peut même concevoir qu'elle peut devenir cent fois, mille fois, cent mille fois plus petite ou plus grande ; et c'est cette possibilité d'augmentation ou de diminution sans bornes en quoi consiste la véritable idée du fini ; une chose finie est une chose qui a des termes, des bornes ; une chose infinie n'est que cette même chose finie à laquelle nous ôtons ces termes et ces bornes ; ainsi l'idée de l'infini n'est qu'une idée de privation et n'a point d'objet réel. » [13]. Cette conception est à retenir pour mieux comprendre l'idée qu'il va développer dans sa présentation du monde organique, réduit à l'unité de la molécule.

Toutefois Buffon va cesser, partiellement, son cheminement dans la voie mathématique, surtout après la question du concours mis à débat par l'Académie des sciences en 1747 concernant « le mouvement relatif de l'apogée de la Lune », qui engendra un « débat » sur l'attraction entre lui et le mathématicien Clairaut. Buffon entre dans le débat en janvier 1748. C'est l'année qui correspond à cette coupure que fait Buffon avec les mathématiques et surtout avec les mathématiciens, puisque pendant les mois de mars à mai 1748 il réalise les « expériences sur la génération » et s'engage d'une façon active dans sa nouvelle voie de recherche et de réflexions sur les sciences de la vie. 1749, c'est la date de parution des trois premiers volumes de son *Histoire naturelle, générale et particulière* [14].

Maupertuis, un mathématicien théoricien du vivant

Avant l'histoire naturelle et le désengagement mathématique, Buffon n'a pas été sans remarquer la pensée de Pierre Louis Moreau de Maupertuis (1698-1759). Ce mathématicien a dévoilé sa pensée sur les sciences de la vie dans deux écrits qui marquent pour l'historien de la biologie un des aspects fondamentaux des critiques adressées contre les systèmes de l'ovisme et de l'animalculisme. En 1744, Maupertuis publie un petit texte « Des Nègres-blancs » à la suite d'une « présentation » à Paris d'un jeune enfant africain de « quatre ou cinq ans » présentant un albinisme. Dans ce texte, Maupertuis considère que l'on ne peut expliquer un tel « monstre » en s'appuyant sur les systèmes de la préexistence des germes et de leur emboîtement, et propose une explication générale de la génération (formation du fœtus et phénomènes héréditaires) en s'appuyant sur la théorie ancienne du mélange des semences : c'était une occasion pour montrer un désaccord avec un concept du vivant forgé sur des bases théologiques et s'affirmer dans une rationalité scientifique faisant plus appel à une logique « des faits qu'il semble que l'expérience nous force d'admettre », qu'à une pensée abstraite. Aussi, pour Maupertuis, les phénomènes qui gèrent le vivant répondent-ils à cet ordre :

« 1°) *Que la liqueur séminale de chaque espèce d'animaux contient une multitude innombrable de parties propres à former par leurs assemblages des animaux de la même espèce.*

2°) *Que dans la liqueur séminale de chaque individu, les parties propres à former des traits semblables à ceux de cet individu sont celles qui d'ordinaire sont en plus grand nombre, et qui ont le plus d'affinité ; quoiqu'il y en ait beaucoup d'autres pour des traits différents.*

3°) *Quant à la matière dont se formeront la semence de chaque animal des parties semblables à cet animal ce ne serait peut-être pas destituer de toute vraisemblance, que de penser que chaque partie fournit ses germes. »* [15].

Ce texte, publié en 1744, est inclus dans un nouvel ouvrage de Maupertuis *Vénus physique* de 1745. Dans ce livre, Maupertuis donne le ton de sa pensée dans ces premières phrase introductives :

« Nous n'avons reçu que depuis peu de temps une vie que nous allons perdre. Placés entre deux instants, dont l'un nous a vu naître, l'autre nous va voir mourir, nous tâchons en vain d'étendre notre être au-delà de ces deux termes : nous serions plus sages, si nous ne nous appliquions qu'à bien remplir l'intervalle. » C'est donc, précise-t-il, en « naturaliste », et non en « métaphysicien », qu'il aborde les problèmes de cet intervalle de vie. Maupertuis fait un éloge de William Harvey (1578-1657), après avoir présenté les thèses oviste, animalculiste et ovo-vermiste : « Tous ces systèmes si brillants, et même si vraisemblables, que nous venons d'exposer, paraissent détruits par des observations qui avaient été faites auparavant, et auxquelles il semble qu'on ne saurait donner trop de poids : ce sont celles de ce grand homme à qui l'anatomie devrait plus qu'à tous les autres, par la seule découverte de la circulation du sang. » Maupertuis, en s'appuyant sur les observations que Harvey réalisa sur des biches et des daines, que Charles Ier avait mises à la disposition de l'anatomiste pour ses études sur la génération, rejette la production d'œufs par les ovaires et le rôle des animalcules comme contenant le germe. Il suit l'idée du mélange de semences masculine et féminine. Dans ce système la semence produite par la femme devait être semblable à celle produite par l'homme et contenir des animalcules, et Maupertuis fait la recherche : « J'ai cherché plusieurs fois avec un excellent microscope s'il n'y avait point d'animaux semblables dans la liqueur que la femme répand. Je n'y en ai point vu : mais je ne voudrais pas affirmer pour cela qu'il n'y en eût pas. » [16]. Enfin, il opte pour une épigenèse dans le développement de l'embryon contre une préexistence des germes, et applique dans cette formation du vivant une loi « ordinaire » du mouvement, inspiré de Newton et des récentes réflexions du chimiste Claude-Joseph Geoffroy (dit Geoffroy le jeune) (1685-1752) et qui n'est autre que l'attraction. En 1706-1707, Geoffroy exposait, en dix séances, aux académiciens l'*Optique* de Newton, et, en 1718, il présentait, devant cette même Académie des sciences à laquelle il appartient, une « Table des différents rapports observés entre différentes substances » inspirée de la question 31 du traité newtonien : « En tête de chaque colonne figure un corps, suivi par tous ceux qui sont susceptibles de se combiner avec lui. L'ordre est déterminé par ce que Newton avait appelé leur « attraction » respective pour les corps figurant en tête : un corps « déplace » dans la combinaison avec celui-ci tous ceux qui le suivent et il « est déplacé » par tous ceux qui le précèdent. » [17].

En 1745, Maupertuis, qui est aussi le « vieil ami » de Buffon, avec sa *Vénus physique* cautionne une nouvelle voie théorique pour expliquer le vivant, animé par une loi du mouvement : cette loi s'apparente à l'attraction qui devait faire le lien comme loi universelle entre la physique, la chimie et les sciences de la vie. La voie est ouverte, Buffon possède les éléments et l'esprit pour s'y engager.

L'engagement de Buffon

Dans son *Histoire naturelle* de 1749 qui débute par l'*Histoire des animaux*, Buffon expose dans les premiers chapitres sa théorie de la génération et date précisément le texte « Au Jardin du Roi, le 6 février 1746 », c'est-à-dire quelques mois après la parution de la *Vénus physique* ; ensuite, une série de six chapitres expose des « Expériences au sujet de la génération » et des « Réflexions sur les expériences précédentes » qu'il date également d'une façon précise « Au Jardin du Roi, le 27 mai 1748. » Ces dates sont *a priori* volontairement précisées par Buffon, pour nous informer qu'il a d'abord développé une théorie de la génération et qu'il a ensuite réalisé des expériences pour appuyer son développement théorique :

« Je réfléchissais souvent sur les systèmes que je viens d'exposer, et je me confirmais tous les jours de plus en plus dans l'opinion que ma théorie était infiniment plus vraisemblable qu'aucun de ces systèmes. Je commençai dès lors à soupçonner que je pourrais peut-être parvenir à reconnaître les parties organiques vivantes, dont je pensais que tous les animaux et les végétaux tiraient leur origine. Mon premier soupçon fut que les animaux spermatiques qu'on voyait dans la semence de tous les mâles pouvaient bien n'être que ces parties organiques, et voici comment je raisonnais. Si tous les animaux et les végétaux contiennent une infinité de parties organiques vivantes, on doit trouver ces mêmes parties organiques dans leur semence, et on doit les y trouver en bien plus grande quantité que

dans aucune autre substance, soit animale, soit végétale, parce que la semence n'étant que l'extrait de tout ce qu'il y a de plus analogue à l'individu et de plus organique, elle doit contenir un très grand nombre de molécules organiques ; et les animalcules qu'on voit dans la semence des mâles ne sont peut-être que ces mêmes molécules organiques vivantes, ou du moins ils ne sont que la première réunion ou le premier assemblage de ces molécules : mais si cela est, la semence de la femelle doit contenir, comme celle du mâle, des molécules organiques vivantes, et à peu près semblables à celles du mâle, et l'on doit par conséquent y trouver, comme dans celle du mâle, des corps en mouvement, des animaux spermatiques ; et de même, puisque les parties organiques vivantes sont communes aux animaux et aux végétaux, on doit aussi les trouver dans les semences des plantes, dans le nectareum, dans les étamines, qui sont les parties les plus substantielles de la plante, et qui contiennent les molécules organiques nécessaires à la reproduction. Je songeai donc sérieusement à examiner au microscope les liqueurs séminales des mâles et des femelles, et les germes des plantes, et je fis sur cela un plan d'expériences ; je pensai en même temps que le réservoir de la semence des femelles pouvait bien être la cavité du corps glanduleux, dans laquelle Vallisnieri et les autres avaient inutilement cherché l'œuf. » [18]. Dans ces « autres » il y a, bien entendu, de Graaf.

Le système de la génération de Buffon s'appuie sur trois concepts : celui du mélange des semences qui implique le rejet des œufs et dans cette logique théorique le rejet de la présence spécifique des animalcules à la seule semence masculine ; celui des molécules organiques correspondant à l'unité fondamentale de l'organisation prochaine de l'individu, et le « moule intérieur » qui serait, pour employer une image, la carte d'identité de l'individu et de l'espèce à laquelle il appartient, mais une carte d'identité ayant les propriétés de se développer et de se reproduire.

Le concept de moule intérieur est pour une part inspiré des *Lettres philosophiques sur la formation des sels et des cristaux* (1729) du naturaliste suisse Louis Bourguet (1678-1742). Ce que défend Bourguet, ce sont les idées mêmes, sinon anciennes, du moins remises au goût du jour, avancées à la fin du 17^{ème} siècle « en France et en Italie, par des médecins à tendance épicurienne et matérialiste » qui sont d'accord, concernant la génération, sur le principe du mélange des semences mâle et femelle produites par toutes les parties du corps ; ils défendent aussi l'idée « de l'assimilation des molécules nutritives aux différents organes, ce que les vieux médecins appelaient "la troisième coction". L'idée, enfin, que cette assimilation devait se faire par l'action d'un "moule". » [19]. Jacques Roger souligne combien Buffon emprunte à Bourguet mais il ne peut s'en recommander dans la mesure où le naturaliste suisse adapte un système d'essence matérialiste au dogme de la préexistence des germes qu'il défend sans hésitation. Or Buffon, comme Maupertuis, n'adhère d'aucune manière au dogme. Il n'est pas sans intérêt de souligner, dans cette histoire, que Bourguet, en 1734, prétend à l'existence d'animalcules dans la semence des femelles et, qu'à cette date, Buffon s'élève contre cette idée [20] ; qu'en 1745, Maupertuis avoue, dans sa *Vénus physique*, les avoir recherchés, croyant qu'ils y sont présents ; et, qu'en 1748-1749, Buffon triomphera en prétendant les avoir découverts dans la semence d'une chienne.

Revenons au moule intérieur qui correspond, pour Buffon, à une propriété de la nature au même titre que la force d'attraction. D'où une certaine difficulté à expliquer et à comprendre ce que représente ce moule intérieur qui est, à l'image du moule extérieur reproduisant la forme extérieure visible par tous, celui qui reproduit les formes intérieures par l'intermédiaire des molécules organiques. Le moule extérieur représente une surface, le moule intérieur un volume, et à l'époque l'analogie avec le fossile (les ammonites par exemple) peut-être faite : aussi, le moule intérieur est-il défini par Buffon comme « une surface massive. » Une certitude pour Buffon : « Il nous paraît donc certain que le corps de l'animal ou du végétal est un moule intérieur qui a une forme constante, mais dont la masse et le volume peuvent augmenter proportionnellement, et que l'accroissement, ou si l'on veut, le développement de l'animal ou du végétal, ne se fait que par l'extension de ce moule dans toutes ses dimensions extérieures et intérieures ; que cette extension se fait par l'intussusception d'une matière accessoire et étrangère qui pénètre dans l'intérieur, qui devient semblable à la forme, et identique avec la matière du moule. » [21]. La matière qui sert au développement et à l'accroissement

vient de l'extérieur et pénètre le moule intérieur par le jeu des forces pénétrantes dont « nous n'aurons jamais d'idée nette » précise Buffon.

« Se nourrir, se développer, et se reproduire, sont donc les effets d'une seule et même cause : le corps organisé se nourrit par les parties des aliments qui lui sont analogues, il se développe par la susception intime des parties organiques qui lui conviennent, et il se reproduit parce qu'il contient quelques parties organiques qui lui ressemblent. Il reste maintenant à examiner si ces parties organiques qui lui ressemblent sont venues dans le corps organisé par la nourriture, ou bien si elles y étaient auparavant. Si nous supposons qu'elles y étaient auparavant, nous retombons dans le progrès à l'infini des parties ou germes semblables contenus les uns dans les autres, et nous avons fait voir l'insuffisance et les difficultés de cette hypothèse. Ainsi nous pensons que les parties semblables au tout arrivent au corps organisé par la nourriture ; et il nous paraît qu'on peut, après ce qu'il a été dit, concevoir la manière dont elles arrivent, et dont les molécules organiques qui doivent les former peuvent se réunir. » [22].

En raison de l'idée que se fait Buffon de l'infini, le concept de molécules organiques correspond à une logique intellectuelle qui lui sied : les molécules organiques représentent l'unité finie, la plus petite partie de l'organique, c'est-à-dire un terme correspondant aussi à une unité puisque ces molécules sont celles-là même qui forment le végétal et l'animal, et surtout elles sont immortelles puisque l'être organisé qui est un assemblage de ces molécules organiques les restitue à la nature après sa mort : « les causes de destruction ne font que les séparer sans les détruire : ainsi la matière que l'animal ou le végétal assimile à sa substance est une matière organique qui est de la même nature que celle de l'animal ou du végétal, laquelle par conséquent peut en augmenter la masse et le volume sans en changer la forme et sans altérer la qualité de la matière du moule... » [23].

La problématique de l'infini est de nouveau évoqué par Buffon dans un chapitre traitant des systèmes de la génération. La préexistence des germes et leur emboîtement contenait l'idée défendue par Malebranche d'une divisibilité de la matière à l'infini nécessitée pour l'accord du dogme avec sa fonction théologique et biblique. Buffon s'avère être proche de Maupertuis dans cette volonté d'étudier l'intervalle de vie sans se préoccuper de l'au-delà dans la constitution d'une science du vivant. Il s'explique à ce propos : « je réponds qu'on se fait sur cette divisibilité à l'infini la même illusion que sur toutes les autres espèces d'infinis géométriques ou arithmétiques : ces infinis ne sont tous que des abstractions de notre esprit, et n'existent pas dans la nature des choses ; et si l'on veut regarder la divisibilité de la matière à l'infini comme un infini absolu, il est encore plus aisé de démontrer qu'elle ne peut exister dans ce sens : car si une fois nous supposons le plus petit atome possible, par notre supposition même cet atome sera nécessairement indivisible, puisque, s'il était divisible, ce ne serait par le plus petit atome possible ; ce qui serait contraire à la supposition. Il me paraît donc que toute hypothèse où l'on admet un progrès à l'infini doit être rejetée, non seulement comme fausse, mais encore comme dénuée de toute vraisemblance ; et comme le système des œufs et celui des vers spermatiques suppose ce progrès, on ne doit pas les admettre. » [24].

L'historien de Buffon, Jacques Roger a, en quelques phrases, montré l'originalité de la pensée de Buffon dans l'exposé de sa théorie de la génération : « Donc les êtres vivants "se reproduisent". La formule même exclut le créationnisme et la préexistence. C'est la "reproduction en général", cette "puissance de produire son semblable", qu'il faut étudier, et Buffon, le premier, donne au mot un sens moderne. Il ne s'agit pas d'étudier la "génération" de telle ou telle espèce, mais la "reproduction" en tant que phénomène universel du vivant. Ce que faisant, Buffon sort de l'histoire naturelle et définit un champ de recherche qui doit être une science du vivant en général, une "biologie" » [25]. Pourquoi pas ! Reste à savoir ce que nous entendons par biologie. Si ce terme correspond à celui réutilisé à la fin du 19^{ème} siècle, par Yves Delage en particulier, pour désigner cette science de la vie qui fait appel à la méthode expérimentale pour résoudre ses problèmes, nous sommes dans un cas d'anachronisme. Maintenant, si nous considérons la biologie comme une approche dynamique du vivant dans l'étude de la génération, de l'hérédité, de la transformation des espèces, c'est-à-dire dans l'étude de ce que l'on va appeler beaucoup plus tard « les grands problèmes de biologie générale », Buffon marque en effet

une originalité dans sa façon d'aborder une explication du fonctionnement et de la vie des êtres organisés.

À la recherche des molécules dans la semence mâle et femelle

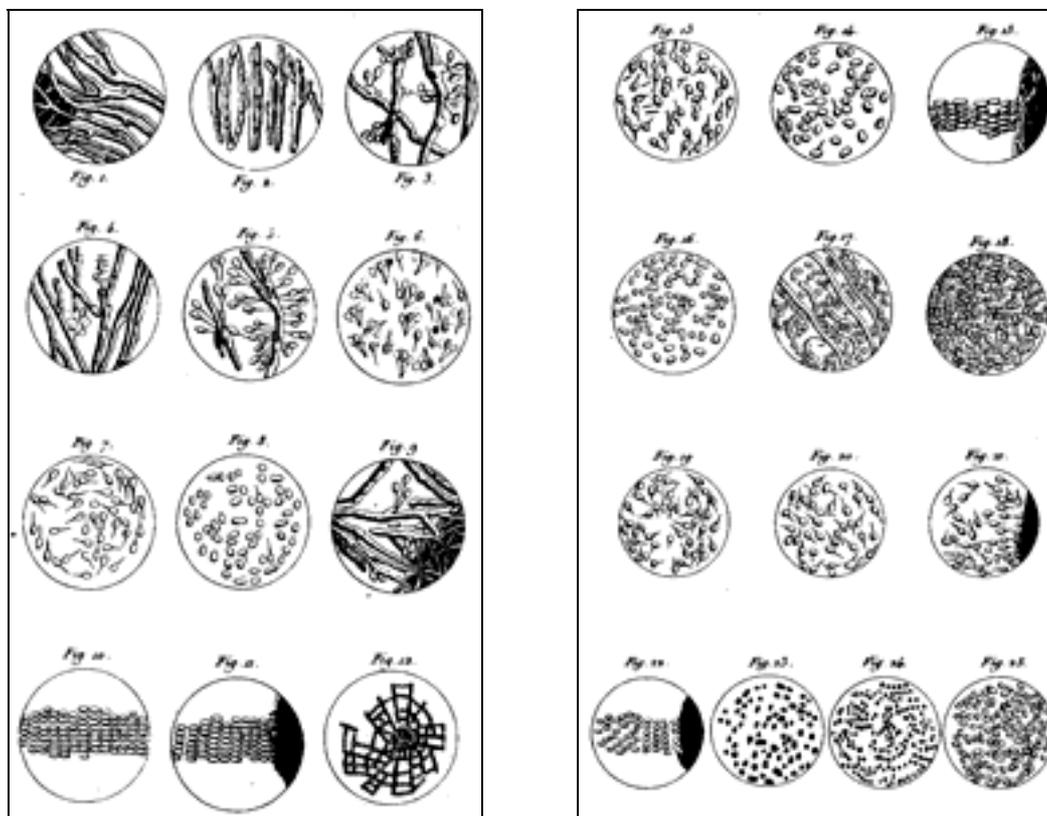
Dans sa théorie de la génération ou de la reproduction, ce terme étant initié par le concept même de moule intérieur, le moule sert à reproduire la forme, Buffon s'intéresse à différents problèmes dont celui de la « formation du fœtus » et, à ce propos, il indique en quelques phrases sa pensée sur la question : « La formation du fœtus se fait donc par la réunion des molécules organiques contenues dans le mélange qui vient de se faire des liqueurs séminales des deux individus : cette réunion produit l'état local des parties, parce qu'elle se fait selon les lois d'affinité qui sont entre ces différentes parties, et qui déterminent les molécules à se placer comme elles l'étaient dans les individus qui les ont fournies ; en sorte que les molécules qui proviennent de la tête, et qui doivent la former, ne peuvent, en vertu de ces lois, se placer ailleurs qu'auprès de celles qui doivent former le cou, et qu'elles n'iront pas se placer auprès de celles qui doivent former les jambes. » [26].

Ces molécules organiques devant être contenues dans les semences, Buffon doit les chercher et même il se doit de les trouver pour donner raison à sa théorie. C'est à l'occasion du passage à Paris du microscopiste anglais l'abbé John Turberville Needham (1713-1781) qu'il décide d'entreprendre des « expériences au sujet de la génération. » Il choisit cet instant, car pour lui Needham possède un microscope bien meilleur que les siens. Buffon réalise ce qu'il nomme ses expériences en présence de Needham et de son collaborateur Louis Daubenton (1716-1800) qui fut régulièrement présent à toutes les observations ; il verra tout ce qu'a vu Buffon, ou plus exactement il verra tout ce que Buffon voulait voir et deviendra le témoin principal de la réussite des expériences sur la génération. Quand la nécessité de trouver est impérieuse au bien fondé théorique, souvent on trouve.

Buffon réalise, avec ses collaborateurs, 45 expériences. La première concerne l'examen de la « liqueur » séminale d'un homme mort de « mort violente » et la dernière se porte sur l'examen de la « laite » de différents poissons. Entre ces « expériences », il observe beaucoup de choses. Non seulement du sperme de chien, de bélier, mais aussi des infusions de plantes, « de l'eau d'huître. » Dans ces liquides, il observe incontestablement deux sortes d'éléments. D'abord il voit les spermatozoïdes quand il observe le sperme fraîchement recueilli et quand il écrit « les petits corps qui se meuvent paraissent en grand nombre ; ils ont, pour la plupart, un mouvement d'oscillation, comme celui d'un pendule ; ils tirent après eux un long filet ; on voit clairement qu'ils font effort pour s'en débarrasser... » ; pour notre observateur ces corps (ces composés de molécules) doivent impérativement perdre ce « filet » (c'est la queue du spermatozoïde) car les observations suivantes montrent ces corps non munis de filet. Ces nouveaux corps sont observés dans des infusions, dans du sperme observé après plusieurs jours parfois mélangé avec de l'eau : Buffon en donne une description qui indique clairement qu'il se trouve en présence d'infusoires de différentes espèces dont des paramécies : « Les petits corps mouvants sont alors dans une grande activité ; ils sont tous débarrassés de leur filet ; la plupart sont ovales ; il y en a de ronds ; ils se meuvent en tous sens ; et plusieurs tournent sur leur centre. J'en ai vu changer de figure sous mes yeux, et d'ovales devenir globuleux ; j'en ai vu se diviser, se partager, et d'un seul ovale ou d'un globule en former deux ; ils avaient d'autant plus d'activité et de mouvement qu'ils étaient plus petits. » [27]. Buffon observe même des infusoires (des paramécies) qui se divisent ; mais pour lui ce sont les mêmes corps transformés qu'il a vu dans le sperme frais. Il a également observé des grains de pollen qui furent décrits comme autant de corps mouvants constitués de molécules organiques, et sûrement observé des mouvements browniens qu'il prit pour ces mêmes corps mouvants.

C'est à la 26^e « expérience » que Buffon se décide à chercher chez la chienne les corps mouvants dans la « liqueur séminale », après avoir vérifié qu'ils sont bien présents dans la semence spermatique du chien. Pour lui la semence des femelles qui allaitent (dont la femme) est contenue dans les follicules de de Graaf. L'examen du liquide folliculaire de la chienne montre aux observateurs les

corps mouvants que Buffon s'attendait à trouver mais qui surprirent Needham et Daubenton : « J'examinai donc cette liqueur au microscope, écrit Buffon, et du premier coup d'œil j'eus la satisfaction d'y voir (*planche 2, fig.20 ci-après*) des corps mouvants avec des queues, qui étaient absolument semblables à ceux que je venais de voir dans la liqueur séminale du chien. MM. Needham et Daubenton, qui observèrent après moi, furent surpris de cette ressemblance, qu'ils ne pouvaient se persuader que ces animaux spermatiques ne fussent pas ceux du chien que nous venions d'observer ; ils crurent que j'avais oublié de changer de porte-objet, et qu'il avait pu rester de la liqueur du chien, ou bien que le cure-dent avec lequel nous avons ramassé plusieurs gouttes de cette liqueur de la chienne pouvait avoir servi auparavant à celle du chien. M. Needham prit donc lui-même un autre porte-objet, un autre cure-dent, et ayant été chercher de la liqueur dans la fente du corps glanduleux, il l'examina le premier et y revit les mêmes animaux, les mêmes corps en mouvement, et il se convainquit avec moi, non seulement de l'existence de ces animaux spermatiques dans la liqueur séminale de la femelle, mais encore de leur ressemblance avec ceux de la liqueur séminale du mâle. Nous revîmes au moins dix fois de suite, et sur différentes gouttes, les mêmes phénomènes ; car il y avait une assez bonne quantité de liqueur séminale dans ce corps glanduleux, dont la fente pénétrait dans une cavité profonde de près de trois lignes. » [28].



Figures 3A et 3B. Les corps mouvants observés par Buffon dans ses expériences sur la génération. Les figures 5, 6 et 7 correspondent aux observations de sperme humain ; noter sur la figure 6 les mouvements d'oscillations observés par Buffon, ces mouvements confirment que nous sommes bien en présence de spermatozoïdes. En revanche ce qu'observe Buffon à la figure 16 ce sont des infusoires, il fait cette observation en examinant l'eau d'un bocal dans lequel il avait placé depuis trois jours des morceaux de testicules de chien. La figure 19 correspond à l'examen du sperme d'un chien et les figures 20 et 21 aux observations faites sur la « liqueur séminale » de chiennes ; les corps mouvants observés chez le chien et la chienne sont en effet parfaitement identiques sur les trois figures.

Cette description est intéressante à plusieurs égards. Elle montre comment Buffon voit ce qui ne peut exister et arrive à convaincre ses collaborateurs qui confirment ce qu'il croit voir. Maintenant qu'ont-ils observé réellement ? Quel fut le degré de connivence entre ces hommes ? Il fallait que la théorie vive et elle pourrait vivre d'autant mieux qu'elle serait établie sur des preuves venant de « l'expérience ».

Une autre expérience n'est pas sans intérêt, c'est la 31^e. Dans cette expérience, Buffon prend de la liqueur séminale d'une chienne qu'il mélange avec de la liqueur séminale d'un chien. Pour nous il paraît évident qu'il pense en réalisant cette manipulation observer un début de formation d'un germe ; mais il ne l'observe pas, il ne dit rien à ce propos ; il note que « ayant examiné ce mélange au microscope je ne vis rien de nouveau, la liqueur étant toujours la même, les corps en mouvement les mêmes : ils étaient tous si semblables qu'il n'était pas possible de distinguer ceux du mâle et ceux de la femelle ; seulement je crus m'apercevoir que leur mouvement était un peu ralenti : mais, à cela près, je ne vis pas que ce mélange eût produit la moindre altération dans la liqueur. » [29]. Sachant que dans cette expérience Buffon prit la liqueur séminale dans les cornes de la matrice de la chienne, il est évident, si on prend en compte ses observations, que cette chienne a été accouplée à un chien et qu'il observe du sperme comme cela s'est certainement produit dans l'expérience 26.

Une critique

Bien entendu, ces observations, ces « expériences sur la génération » vont faire l'objet de nombreuses critiques. L'une d'elle est organisée par l'abbé oratorien Joseph-Adrien Lelarge de Lignac (1710-1762) qui, sous l'anonymat, publie en 1751 les *Lettres à un Américain sur l'histoire naturelle, générale et particulière de M. Buffon*. Lelarge de Lignac, originaire de Poitiers a un complice qui dû rédiger une part de ces *Lettres*, en particulier concernant la rédaction des *Suites aux Lettres à un Américain...* de 1756 : c'est Réaumur (1683-1757), collègue académicien et ennemi de Buffon. Les expériences de Buffon sont vérifiées (en septembre et octobre 1751) et ne confirment pas ce que prétend avoir observé Buffon et Daubenton en particulier, ce dernier jugé comme un « esprit médiocre, asservi à Buffon... » Alors, qu'en est-il des expériences ? « ... ce que M. Needham nous apprend, que la théorie de M. Buffon est antérieure à ses observations, parce que je ne concevais pas comment il avait pu déduire sa théorie de ses observations, et je concevais au contraire très bien qu'il avait assez d'esprit pour forcer ses observations de se rapprocher des principes qu'il se serait faits ; et que son imagination d'autant plus dominante qu'elle est plus belle, était très propre à lui faire voir dans ses expériences ce qu'il avait intérêt d'y trouver. » [30].

À cette critique, Buffon ne répondra pas « à un moine de l'Oratoire aidé d'un pédant de l'Académie », parce que, dit-il « Elle ne m'a point affecté et que d'ailleurs j'ai beaucoup plus d'indifférence qu'on ne suppose pour le succès de mes opinions. » A ce commentaire, Jacques Roger pose la question « Indifférence sincère ou feinte ? Buffon, en tout cas, ne manquera pas l'occasion de régler ses comptes avec Réaumur. » Mais là est une autre histoire.

Conclusion

La théorie de la génération de Buffon va conduire à de nombreuses discussions et réflexions entre les théoriciens de la vie au 18^{ème} siècle. Cette théorie a contribué pour une part non négligeable à alimenter les débats scientifiques dans lesquels on cherchait, suivant les tendances, à donner raison à la préexistence des germes, à l'épigenèse ou à la préformation. L'esprit de la théorie de Buffon nous conduit à la définir comme une théorie de la préformation, les molécules organiques et le moule intérieur préfigurent l'être à venir, théorie qui se concilie pour une part avec une théorie de l'épigenèse dans la mesure où le germe, l'embryon, se construit par étapes successives. La théorie de Buffon est une théorie, parmi d'autres, animée par un matérialisme scientifique, qui fit que son œuvre fut jugé, par certains de ses critiques d'obédience religieuse, comme promulguant un anti-christianisme. La part imaginative de sa théorie n'a pas été sans influence aussi bien sur la science, puisque la théorie des molécules de Buffon est encore un modèle au début du 19^e siècle, que sur la poésie si nous évoquons cette lettre de 1759 de Diderot à Sophie Volland à propos de l'immortalité des molécules organiques : « O ma Sophie, il me resterait donc un espoir de vous toucher, de vous sentir, de vous aimer, de vous chercher, de m'unir, de me confondre avec vous, quand nous ne serons plus ! S'il y avait dans nos

principes une loi d'affinité, s'il nous était réservé de composer un être commun, si je devais dans la suite des siècles refaire un tout avec vous, si les molécules de votre amant dissous venaient à s'agiter, à se mouvoir et à rechercher les vôtres éparses dans la nature ! Laissez-moi cette chimère ; elle m'est douce ; elle m'assurerait l'éternité en vous et avec vous. » [31]. Les molécules de Buffon et leur affinité vont solliciter encore bien des esprits : cette fonction contribua à leur succès.

Notes et références bibliographiques

[1] Hippocrate, *De la génération, de la nature de l'enfant, des maladies, du fœtus de huit mois*, traduit par Robert Joly, Paris, Société d'édition « Les belles lettres », 1970, « De la génération » III, 1., p. 46.

[2] *Ibid.*, V. 1., p. 48.

[3] *Ibid.*, VI. 1., p. 48.

[4] Roger, Jacques, *Les sciences de la vie dans la pensée du XVIII^{ème} siècle*, Paris, Armand Colin, 1971, p. 331.

[5] Buscaglia, Marino, *Pour une histoire spécifique de la méthode en biologie*, Archives Scientifiques de Genève, 1994, vol. 47, fasc. 2, p. 146.

[6] Kerckring, T., *Anthropogeniae ichnographia, sive conformatio foetus ab ovo usque ad ossificationis principia*, Amsterdam, A. Frisiue, 1671, p. 2.

[7] Roger Jacques, *loc.cit.*, n. 4, p. 261.

[8] Concernant l'histoire de ces découvertes consulter l'ouvrage de Jacques Roger cité note 4, ainsi que Fischer, Jean-Louis, *La naissance de la vie, une anthologie*, Paris, Presses Pocket, 1991.

[9] Consulter Boutibonnes Philippe, *Van Leeuwenhoek l'exercice du regard*, Paris, Belin, 1994.

[10] Challes Robert, *Journal de voyage aux Indes orientales*, Rouen, Machuel, 1721, t.1., p. 159.

[11] Malebranche Nicolas, *De la recherche de la vérité*, Œuvres complètes de Malebranche, édition critique publiée sous les auspices de l'Académie française, de l'Académie de Sciences, de l'Académie des Sciences morales et politiques, par Désiré Roustan, en collaboration avec Paul Schrecker, Paris, Boivin et Cie, 1938, t.1, p. 75.

[12] Bernardin de Saint-Pierre, « Préambule de la Chaumière indienne » in *Études de la nature*, Bâle, 1797, t.5, p. 368.

[13] Concernant la vie et l'œuvre de Buffon consulter Roger Jacques, *Buffon, un philosophe au Jardin du Roi*, Paris, Fayard, 1989.

[14] Buffon, préface à la traduction de Newton, *La méthode des fluxions et des suites infinies*, Paris, 1740, p. VIII. Sur cette question consulter Brunet Pierre, La notion d'infini mathématique chez Buffon, *Archeion*, 1931, vol. XIII, p. 24-39 ; et Guichard Jacqueline, *L'infini au carrefour de la philosophie et des mathématiques*, Paris, Ellipses, 1999.

[15] En italique dans le texte. Maupertuis Pierre-Louis Moreau de, *Œuvres*, Hildesheim, Georg Olms, 1965, t.II, p. 120-121.

[16] *Ibid.*, p. 94-95.

[17] Bensaude-Vincent Bernadette et Stengers Isabelle, *Histoire de la chimie*, Paris, La Découverte, 1992.

[18] Buffon, *Œuvres complètes, Histoire des Animaux*, Paris, F.D. Pillot, 1830, t. 11, « Expériences au sujet de la génération », p.7-8.

[19] Roger Jacques, *loc.cit.* n. 13, p. 176.

[20] *Correspondance générale de Buffon*, recueillie et annotée par H. Nadault de Buffon, Genève, Slatkine, 1971, t. I, p. 40.

[21] Buffon, *loc.cit.*, n. 18, t. 10, « De la nutrition et du développement », p. 294.

[22] *Ibid.*, p. 299-300.

[23] *Ibid.*, p. 295.

[24] *Ibid.*, « Exposition des systèmes sur la génération », p.404-405. (Nous rappelons que ces textes sur la génération ont été écrits par Buffon en février 1746).

[25] *Loc. cit.*, n. 13, p. 179.

[26] *Loc. cit.*, n.18, t. 11, p. 227.

[27] *Ibid.*, p. 20.

[28] *Ibid.*, p. 41-42.

[29] *Ibid.*, p.46.

[30] Lelarge de Lignac, *Suites des Lettres à un Américain...* 1756, t. 4, p. 94-95.

[31] Lettre de Diderot à Sophie Volland du 15 octobre 1759, in *Correspondance*, édition établie par Georges Poth, Paris, éd. De Minuit, 1956, t. II, p.284. Consulter également Catherine Larrère, « Diderot et l'atomisme » in *L'Atomisme aux XVII^{ème} et XVIII^{ème} siècles*, sous la direction de Jean Salem, Paris, Publications de la Sorbonne, 1999, p.151-165.

Le rôle créateur des mathématiques en sciences de la vie

Guy Rumelhard,

professeur, Lycée Condorcet, Paris ; INRP

Nécessité de l'interdisciplinarité et obstacles

Parmi les objectifs proposés aux travaux personnels encadrés (TPE), j'ai choisi de privilégier l'interdisciplinarité entre les mathématiques et les sciences de la vie pour les classes de première S, car cet objectif m'a semblé le plus difficile à réaliser, compte tenu des nombreux obstacles qui s'opposent à la rencontre de ces deux disciplines.

Du côté des sciences de la vie

Dans le travail de recherche les biologistes font, de manière très libre, des emprunts à d'autres disciplines, emprunts de techniques expérimentales (microscopie, électrophorèse, chromatographie...), de modèles analogiques (régulateur à boule ou couveuse thermostatée pour expliquer les régulations), de concepts (milieu, cycle, spécificité, affinité chimique), de méthodes pour organiser les expériences (carré latin, tirage au sort). Les découvertes ou plus simplement les avancées sont souvent faites par des savants provenant d'autres disciplines : Pasteur est chimiste comme J. Monod, A. Jacquard est polytechnicien comme D. Schwartz, Schrödinger est physicien, d'autres sont médecins, etc. Mais ce caractère interdisciplinaire peut disparaître dans la mesure où certains biologistes tendent à réduire la biologie à une biochimie et à considérer que le progrès des découvertes provient entièrement d'un progrès des techniques. Pour l'enseignant de biologie, le caractère interdisciplinaire peut également disparaître si l'on continue à croire que toute connaissance résulte directement d'une observation. Dans cette optique, connaître c'est voir. Pour de nombreux enseignants le caractère équiprobable de la séparation des chromosomes homologues au moment de la méiose ne relève pas d'une "conceptualisation" mais d'une "observation" au microscope sur des préparations fixées et colorées.

Par ailleurs, les problèmes concrets qui sont à l'origine de la recherche ne relèvent pas *a priori* d'une seule discipline. Les maladies sont bien souvent complexes, mêmes celles dont l'explication semble se réduire à la présence d'un microbe. Les problèmes écologiques, telle la pollution des sols par les engrais azotés, sont également complexes et concernent les chaînes alimentaires, la chimie des sols, mais aussi les questions économiques, le rendement, l'efficacité d'une production, donc des décisions politiques. Plusieurs maîtres mots caractérisent alors ces questions : prise de risque, prévention, dépistage précoce, prédiction, anticipation.

L'avancée des connaissances conduit à remanier ou à superposer les clivages entre les disciplines biologiques. Si l'on parle d'embryologie, de génétique, d'écologie, d'éthologie, d'immunologie, etc., on découpe également les questions en termes de structure, de fonction, de milieu, d'histoire au double sens de développement et d'évolution. On peut également découper les questions en fonction du concept d'organisation qui se décline en termes de système, de régulation, d'information. On peut aussi utiliser le concept de niveau d'organisation et distinguer les écosystèmes, les populations, les cellules, les molécules (génétique des populations, biologie cellulaire).

Mais il y a plus, car la biologie moléculaire se présente comme le terme ultime de l'analyse biologique et, chaque fois que l'on peut atteindre ce terme, l'approche mathématique semble obsolète. On peut soupçonner que le tabac est cause de certains cancers du poumon en calculant des corrélations, mais depuis que l'on connaît les molécules en cause et leur mécanisme d'action, le calcul

de corrélations semble inutile. Il n'en est rien en réalité car une corrélation ne désigne pas nécessairement une cause unique, ni une cause directe, et il reste que le tabac n'est ni une cause nécessaire (on peut avoir un cancer sans jamais fumer), ni une cause suffisante (on peut fumer sans avoir le cancer).

Dernière difficulté pour rapprocher les mathématiques et les sciences de la vie, les physiciens peuvent parler avec pertinence de "physique théorique", mais il n'est pas encore certain que le concept de "biologie théorique" utilisé depuis le début des années 1970 ait un contenu équivalent.

Actuellement l'approche "expérimentale" domine, ce qui rend difficile d'admettre l'existence, dans les sciences de la vie et de la santé, de deux traditions qui paradoxalement s'opposent alors qu'elles dérivent toutes les deux des travaux de Pierre-Simon Laplace (1749-1827) : d'une part, la recherche d'un *déterminisme* strict qui se présente alors comme une science des certitudes et des lois, d'autre part un calcul des *probabilités* qui se présente comme une science de l'incertain et de la variabilité. Plusieurs titres de livres ou d'articles réunissent ces deux aspects sous une forme qui joue sur ce paradoxe pour créer un "oxymoron" : les certitudes du hasard, les lois du hasard, les structures du hasard [1]. Un recul historique illustre ces deux traditions à travers deux figures de savants exactement contemporains l'un de l'autre mais qui s'ignorent : Claude Bernard et G. Mendel. Claude Bernard (1865) [2], à la suite de Magendie, se préoccupe de sortir la médecine d'un certain empirisme en créant une physiologie expérimentale déterministe qui établit des invariants, des constantes et des lois. Mais ces recherches butent sur un obstacle. En étant très attentif à la variabilité des cas individuels, Claude Bernard se montre très réservé à l'égard de tout calcul de moyenne statistique, seul procédé permettant de réduire cette variabilité qui empêche de trouver des lois, des invariants ou des constantes. Selon lui, la moyenne annule les cas extrêmes, les cas rares et les oscillations. Et il explique qu'il aurait manqué la découverte fondamentale de la fonction glycogénique du foie en procédant ainsi et en faisant la moyenne des glycémies. G. Mendel (1865) [3] conçoit la transmission des "caractères" (nous disons actuellement des gènes) comme une combinatoire. Celle-ci peut faire l'objet de calculs en s'appuyant sur le développement du binôme. Les deux termes du binôme sont les deux allèles de chaque gène. Il établit des règles de combinaison que, paradoxalement, le XX^{ème} siècle tentera de transformer en "lois", selon l'injonction positiviste. En fonction de cela, il refuse de considérer les travaux de ses prédécesseurs sur les hybridations car ils n'ont pas été faits sur un nombre suffisant de cas. Selon lui, tous les cas possibles n'ont pas été réalisés. On ne peut donc les observer.

Du côté des mathématiques

Même si le point de départ qui suscite le travail mathématique est un problème pratique de production (augmenter le rendement d'une culture, rechercher l'action d'un facteur), ou la recherche d'une explication scientifique (mode de transmission des gènes), l'étude nécessite bien souvent un assez long *détour*. L'absence de retour à la question initiale, faute de temps ou de volonté, risque d'effacer l'aspect interdisciplinaire (analyse des développements du binôme pour la génétique, puis "retour" à l'étude de n couples d'allèles).

N'étant pas professeur de mathématiques, je n'avancerai pas d'explication justifiant la réticence vis-à-vis des statistiques. Or celles-ci constituent bien souvent l'essentiel du travail demandé en biologie et peuvent donner lieu à des calculs fastidieux si l'on privilégie l'étude de longues séries de données. La relation entre les deux disciplines se vit alors sur le mode de *l'outil*, de la discipline de service, du procédé de calcul (pour les mathématiques), ou bien sur le mode de *l'illustration* d'un concept ou d'une technique (pour les sciences de la vie).

Le titre de cet exposé soulignant le "rôle créateur des mathématiques" vise à sortir de cette alternative en minimisant par ailleurs la place des calculs, et en insistant sur les concepts. Il copie le titre d'un article concernant les relations entre mathématiques et physique [4]. Traditionnellement le terme d'opérateur était utilisé pour désigner le rôle des mathématiques. Selon Dominique Lecourt [5], qui analyse en 1969 de manière synthétique l'ensemble des travaux de Gaston Bachelard, la compréhension du fonctionnement des sciences trouve sa pierre de touche dans le rôle attribué aux

mathématiques. La pensée commune parle des mathématiques comme d'un *langage*, un simple moyen d'expression qui "met en forme" qui accueille une réalité qui préexiste. Pour G. Bachelard, les mathématiques jouent un *rôle d'opérateur*. Elles constituent, elles construisent les observations et les faits expérimentaux. Elles opèrent comme le scalpel du chirurgien qui coupe et sépare, ou l'aiguille qui coud et relie, mais également comme le ressort tendu, elles relancent la recherche.

Du côté de la didactique

Chaque discipline définit un *ordre de progression* selon ce qui lui semble "simple" ou élémentaire et ce qui lui semble plus complexe. Mais ces ordres ne sont pas les mêmes selon les disciplines et ce qui est simple en mathématiques est bien souvent un cas rare ou singulier en biologie. Ce qui est familier ou d'observation immédiate en biologie est complexe en mathématiques. Bien souvent le fréquent ou le familier, consistant par exemple à comparer l'efficacité de divers engrais sur la croissance de plantes, n'est pas simple. Il y a donc un travail à faire pour choisir les exemples qui favorisent les rencontres. Il faut également savoir abandonner les ordres traditionnels de progression au profit *d'accès directs*, et ceci est souvent mal accepté en mathématiques comme en sciences de la vie. Par exemple, utiliser des tables de résultats, des abaques, des procédés graphiques pour résoudre des problèmes mathématiques sans établir ou démontrer ces résultats, ou bien modéliser un résultat biologique tout en méconnaissant les mécanismes biochimiques, génétiques ou chromosomiques qui l'expliquent et rendent parfois obsolète la modélisation ! (modéliser les changements de forme au cours du développement embryonnaire ou la transmission des gènes).

Éléments d'épistémologie historique

Un deuxième groupe de raisons tenant à l'épistémologie "spontanée" des enseignants des deux disciplines peut expliquer certaines difficultés de la rencontre. En sciences de la vie, la production de connaissances nouvelles résulte d'un *travail théorique* (concepts, modèles analogiques ou formalisés) largement sous estimé par les enseignants, et d'un *travail d'expérimentation*. Quand l'expérimentation n'est pas possible, on peut observer des variations à l'aide de comparaisons entre espèces (comparaisons géographiques, historiques à l'aide des fossiles et au cours du développement embryonnaire ; comparaison de l'anatomie, de l'éthologie, de l'écologie). Ce terme d'expérience est tellement invoqué de manière incantatoire ou comme slogan pour "défendre la discipline" - toutes les sciences étant supposées à tort expérimentales ! – on oublie sa signification. De manière très large, on pourrait dire que *expérimenter c'est faire varier*, et le mathématicien précisera immédiatement : variation absolue, variation relative, vitesse de variation, effet cumulé (relation de proportionnalité, de dérivation, d'intégration, PID en bref). On pourrait également retenir l'expression : il faut *transformer pour connaître*. Et le mathématicien proposera de nombreuses transformations (ou anamorphoses), en particulier pour comprendre les changements de formes qui ne peuvent donner lieu à un travail d'analyse au sens de décomposition. Une forme est un tout qui ne se décompose pas, mais qui se transforme. Par ailleurs, en physiologie, l'analyse ne suffit pas. Elle doit être suivie d'un travail de mise en relation des éléments séparés. Le terme *d'intégration* (emprunté aux mathématiques) prend alors une grande importance. On parle, à propos des systèmes de régulation, de "*biologie intégrative*". L'approche historique développée par cette université d'été ne se sépare pas d'une approche épistémologique. Réciproquement, toute épistémologie qui ne veut pas tomber dans un pur formalisme ou une pure logique se doit de mettre ses présupposés à l'épreuve de l'histoire des sciences. Sans développer longuement ce chapitre d'épistémologie historique, trois autres termes étroitement reliés entre eux méritent qu'on s'y arrête précisément pour les dissocier et recomposer leur ordre d'enchaînement : *décrire, expliquer, prévoir*.

Dans une optique naturaliste *décrire* semble être le premier terme incontournable de tout travail scientifique [6]. On peut être surpris que l'introduction d'un programme de mathématiques statistiques en première D et terminale D en 1966 ait reproduit le même clivage et le même ordre de succession : mathématiques descriptives en première D (ce qui est particulièrement fastidieux), statistiques

"explicatives" ou permettant les prises de décision en terminale. Or les descriptions empiriques sont bien souvent un obstacle à la connaissance. Cela a été pendant longtemps la plus fréquente erreur des médecins. Il ne suffit pas d'enregistrer le nombre de malades présents dans un hôpital et de le mettre en relation avec un traitement donné ou de rechercher des facteurs de risque. Il faut d'abord "construire" l'échantillon à observer en appliquant des règles ou une modélisation et donc surmonter *l'obstacle de l'empirisme* profondément ancré chez les naturalistes. Le savoir est conquis (contre les représentations qui font obstacle) et construit avant d'être simplement constaté. Le naturaliste admet volontiers que doivent se succéder dans le temps de la recherche une "embryologie descriptive", puis une "embryologie causale", et enfin, comme terme ultime supposé, une "embryologie moléculaire" qui oublie parfois le concept de milieu et redécouvre bien tardivement une "embryologie mathématique" présente dans les travaux singuliers (au double sens du mot) de D'Arcy Thompson dans la première moitié du XX^e siècle [7].

Expliquer se décline de plusieurs façons : *conceptualiser, modéliser* (de manière analogique ou formalisée), rechercher des *causes*. Ce dernier terme est récusé par les physiciens positivistes qui ont longtemps parlé de lois (terme d'origine juridique ou religieuse) et utilisent actuellement le terme ambivalent de modèle qui a deux sens exactement inverses, ce qui permet l'intrusion de l'idéologie au cœur des explications scientifiques.

Prévoir est bien souvent couplé de manière indissociable à pouvoir. Les formules positivistes imprègnent implicitement l'enseignement : *connaître pour transformer, savoir pour prévoir, pour pouvoir*. Disons d'un mot que dans le domaine médical il existe de nombreuses situations dans lesquelles on peut prendre des décisions d'action sans connaître les mécanismes en jeu, et inversement, disposer d'explications parfaitement connues qui ne conduisent à aucun remède possible.

Analyse d'exemples du rôle créateur des mathématiques

Les limites imposées à cet exposé ne permettent pas de multiplier les exemples, ni même de développer longuement chacun de ceux que j'expose. Mon but est d'illustrer les difficultés repérées et de proposer des solutions directement dans ce texte ou par l'intermédiaire d'une bibliographie citée en référence.

Les grands domaines des sciences de la vie qui peuvent donner lieu à une rencontre avec les mathématiques peuvent se marquer par quelques concepts importants :

- la *variabilité*, à condition de bien marquer que plusieurs attitudes contradictoires, qui font donc obstacle les unes aux autres, sont ici possibles : réduire cette variabilité en minimisant son importance, en la considérant comme accidentelle, comme regrettable et en se contentant d'un calcul de moyennes (travaux de Quételet sur l'homme moyen à partir de l'observation de la taille des conscrits) dans le but de rechercher des lois ; prendre en compte cette variabilité en la décrivant (variance, écart) ; considérer, à la suite de Darwin, que cette variabilité contient l'explication de la transformation des espèces (nous évitons ici le mot évolution car Darwin parle de "descendance avec transformation") ; expliquer cette variabilité par une combinatoire génétique ;

- la *croissance*, propriété essentielle et spécifique du vivant (même si les minéraux croissent aussi mais de manière très différente), concept que l'on peut appliquer aux individus et à la dynamique des populations (populations animales, végétales, cellulaires, moléculaires) ;

- la *vie et la mort*, c'est à dire l'analyse des facteurs de risque et la modification de l'espérance de vie pour un individu donné ou pour une population en relation avec le concept darwinien de sélection ;

- le *fonctionnement* d'un organisme ou d'un ensemble d'organismes à travers les concepts de fonction, de compartimentation, de régulation, de cycle, de flux, de transfert d'information, etc. ;

- la *normativité biologique ou la créativité du vivant*, qui interdit précisément toute normalisation, toute formalisation *a priori* [8].

Chacun des concepts précédents peut s'analyser dans une optique *déterministe* (recherche de certitudes, de lois) ou *probabiliste* (prise en compte du hasard, d'une incertitude), le terme de modèle masquant cette distinction s'il n'est pas suivi d'un qualificatif (déterministe, stochastique).

Des situations binaires : garçons et filles, hommes et femmes

En statistiques, la demande du mathématicien portera sur un exemple "simple" c'est-à-dire binaire. Le biologiste peut proposer la répartition des sexes ou la répartition de telle maladie selon les sexes. Dans l'optique des TPE, il est aisé de proposer cette situation aux élèves car elle conduit à modéliser la répartition des chromosomes X et Y au moment de la méiose, à distinguer deux types de spermatozoïdes et donc à ouvrir la possibilité d'un choix des sexes, sinon d'un eugénisme (élimination des filles en Chine par exemple). Les anomalies chromosomiques interviennent également pour soutenir l'intérêt de cette question. Les types XXX, XXY, XYY, etc. sont encore dans l'actualité puisque le tueur Francis Heaulme a tenté de plaider la présence du syndrome de Klinefelter (XXY) pour expliquer son comportement. Par ailleurs, le sexe des sportifs s'analyse désormais au niveau chromosomique. Un sujet de baccalauréat avait repris cette idée d'anomalie intellectuelle liée à la trisomie des chromosomes sexuels ce qui est faux, et la notion de "chromosome du crime" n'a pas entièrement disparu. Il existe enfin des familles à filles et des familles à garçons qui contredisent l'équipartition et qu'il n'est pas aisé d'expliquer.

Sur cet exemple le mathématicien pourra introduire les *fluctuations d'échantillonnage* à partir d'une loi d'équipartition (nombre de garçons dans une famille de huit enfants, ce qui est devenu rare !), *intervalle de confiance* d'un pourcentage sur un petit effectif (huit à dix enfants) et sur une très grande population (totalité des naissances pendant une année dans un pays donné), *écart* entre le modèle et la réalité observée, recherche de la *loi de répartition réelle* impliquant la définition des *deux risques* de première espèce (risque α connu d'éliminer des cas vrais, il est choisi à 5%) et de deuxième espèce (risque β inconnu qu'il faut réduire au maximum pour espérer trouver la loi de répartition). On trouvera des données chiffrées dans le livre de Vessereau [9] et dans celui de Yves et Maurice Girault [10]. C'est ici également l'occasion d'utiliser, selon le moment de l'année et les connaissances des élèves, des tables ou des abaques donnant l'intervalle de confiance à 5% ou à 1% en fonction de diverses tailles d'échantillon, ce qui permet une première étude des résultats sans calcul précis [11]. Par la suite on peut donner la formule après l'avoir établie.

Nombre de garçons et de filles à la naissance (Vessereau. Que sais-je ?)

Garçons :	221 023	0,515
Filles :	208 417	0,485
Total :	429 440	1,0

Nombre de garçons dans des familles de huit enfants

0	1	2	3	4	5	6	7	8	Total
215	1 485	5 331	10 649	14 959	11 929	6 678	2 092	342	53 680

Tableau 1

On développera de la même façon le cas de maladies liées au sexe (ou liées aux chromosomes sexuels, ce qui n'est pas la même chose) et dont la prévalence n'est pas la même dans les deux sexes. L'étude se fera alors en comparant la répartition observée à l'hypothèse (dite nulle) d'une égale répartition pour apprécier une éventuelle différence. Il faut prendre en compte la taille de l'échantillon et le cas des non malades, mais aussi d'autres facteurs tel l'âge par exemple.

Les cas rares dans lesquels le polymorphisme d'un caractère est réduit à deux phénotypes peuvent donner lieu à ce même genre d'étude. C'est le cas classique, développé dans tous les manuels de lycée et souvent posé au baccalauréat depuis 1973, de la Phalène du bouleau (*Biston betularia*) étudié par

Ketelwell en Angleterre dans les années 1950 pour soutenir l'idée darwinienne de sélection naturelle et publié dans le livre de *Génétique écologique* de Ford [12].

Imputation causale entre tabac et cancer des poumons

Cette question qui donne lieu à de nombreuses campagnes de la part des comités d'éducation à la santé suscite facilement un vif intérêt, sinon même de violentes polémiques. Il ne s'agit pas ici de prendre parti dans un sens ou l'autre mais de chercher comment une imputation causale a pu être mise en évidence initialement à l'aide d'un procédé mathématique : l'établissement d'une *corrélation*, puis la recherche de *facteurs de risque* dont l'importance peut être appréciée à partir des modifications de *l'espérance de vie*. Dans la mesure où chacun sait que l'on peut être malade avec ou sans tabagisme, et non malade que l'on fume ou pas, un tableau à double entrée croisera les deux situations : malade / non malade et fumeur / non fumeur. Le tabac est une *condition qui n'est ni nécessaire et ni suffisante*. C'est d'ailleurs le cas de beaucoup de facteurs impliqués dans beaucoup de maladies. Pour les maladies infectieuses, la condition nécessaire "présence du microbe" n'est pas suffisante. Nous ne sommes pas égaux devant la tuberculose ou le Sida, même si la présence du bacille de Koch ou du virus HIV est indispensable. D'autres co-facteurs génétiques ou du milieu interviennent. La méthode des corrélations est une recherche de causes éventuelles, mais n'en constitue pas *une preuve*. La corrélation établie peut n'avoir aucun sens, et en tout cas, une corrélation ne signe pas nécessairement une cause unique, ni une cause directe. Il peut toujours exister un facteur qui détermine les deux éléments mis en relation. Pédagogiquement, il peut être intéressant de confronter cette situation aux fausses corrélations qui conduisent à des conclusions visiblement absurdes. Les exemples sont aisés à trouver [13].

Organiser a priori une observation ou une expérience

Le *comptage* des globules rouges dans une goutte de sang, de cellules de levures dans une culture en évolution, de cellules d'algues microscopiques croissant en fonction de divers facteurs implique une procédure précise, faute de quoi les valeurs trouvées n'auront aucune fiabilité. Il faut diluer la solution qui contient en général beaucoup trop de cellules par mm³ et s'assurer que cette dilution est bien homogène. Pour compter sous le microscope, on utilise une lame dont le volume sous la lamelle est parfaitement connu, cette lamelle étant divisée en petits carrés qui servent de repère pour compter. La dilution doit être telle que le nombre de cellules vivantes par carré soit aisément comptable (0 à 10 environ). Mais il faudrait surtout vérifier que la répartition des cellules dans les divers carrés soit aléatoire, c'est-à-dire obéit à une *loi de Poisson*, de façon à prendre en compte le résultat trouvé que l'on multiplie ensuite par le coefficient de dilution [14].

L'organisation d'un *plan d'expérience* peut dépendre également d'une procédure aléatoire, faute de quoi des biais peuvent s'introduire conduisant à des résultats erronés. L'utilisation du *carré latin* en est un bon exemple. Si les individus sur lesquels on expérimente un traitement sont pris eux-mêmes comme témoin et ne sont pas confrontés à un groupe témoin extérieur, il faut combiner les éléments de l'étude, c'est-à-dire un traitement donné (A), sur un individu donné (B), à un moment donné de l'évolution de la maladie (C), dans une quantité donnée (D), à un endroit donné de l'organisme (E), (voie digestive, intramusculaire, intraveineuse) de manière aléatoire. On peut nommer A,B,C,D,E, ces divers éléments. Une combinaison en carré permet d'associer ces éléments :

A B C D E	D C A B E
B C D E A	E D B C A
C D E A B	B E C A D
D E A B C	C A D E B
E A B C D	A B E D C

Tableau 2

Le premier carré obtenu par permutation systématique introduit un biais car les éléments A et B par exemple, se suivent quatre fois. Si on le construit en tirant au sort chaque case, on n'est pas assuré d'avoir les cinq éléments dans chaque ligne ou chaque colonne. On peut donc permuter au hasard ces lignes et ces colonnes. On obtient alors le second carré qui permet de guider l'organisation des expériences [15].

D'autres procédures de "randomisation" peuvent s'appuyer sur des chiffres engendrés au hasard et que l'on peut lire dans des tables (tables de 0 et 1 ; tables de séries de dix chiffres : 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0), ou produire à l'aide des calculatrices dont les élèves disposent.

Modéliser la dynamique de populations animales

Plusieurs situations sont à considérer [16]. Si on observe la totalité de la population à l'œil nu, le dénombrement est plus ou moins aisé (nombre d'enfants trisomiques observés à la naissance ; nombre de cerfs vivants dans une forêt enclose ; nombre de vaches folles atteinte d'ESB en supposant qu'elles n'ont pas été abattues avant l'apparition de la maladie). Bien souvent, la population totale n'est pas visible (animaux souterrains, nocturnes, poissons...) et il faut alors des procédures indirectes : captures simples par analyse des pêches en fonction d'une maille de filet pour déterminer les quotas acceptables. Marquage après capture, puis lâcher et nouvelle capture en admettant que les animaux marqués se "diluent" de manière aléatoire dans la population. Les mathématiques fournissent alors des fonctions décrivant l'évolution et permettant d'extrapoler (ou d'interpoler). Le concept important est alors celui de *modèle*. Idéalement, telle population devrait suivre une *croissance géométrique* : 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, etc. On peut alors évaluer l'influence de tel facteur par rapport à ce modèle d'évolution. Présence d'un facteur limitant, tel que la quantité de nourriture.

Le cas des vaches atteintes d'ESB est d'actualité car une maladie humaine nouvelle lui semble liée : la variante de la maladie de Creutzfeldt Jacob (vMCJ). L'évolution de l'ESB et de beaucoup d'autres infections et intoxications serait modélisée par une courbe de Laplace-Gauss (première ligne du tableau) [17]. Connaissant le début décalé de plus de huit ans de la vMCJ (avant 1995, on ne sait pas distinguer les deux formes classique et nouvelle), on peut donner diverses valeurs à la moyenne et à l'écart-type et extrapoler l'évolution à venir de la maladie. Les nombres actuels croissent de 3 à 25 cas par an en cinq ans. On serait ainsi au début de la courbe de Gauss, mais on ne connaît pas le délai réel d'incubation (8, 10 ou 15 ans ou plus ?). Certains prévoient plus de 100 000 malades au total d'ici 10 ans, au plus fort de la courbe de Gauss. Le nombre de MCJ "classique" qui atteint les adultes âgés semble, quant à lui, ne pas varier (troisième ligne du tableau).

1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994
132	1910	6863	12289	22613	34712	36271	25579
1995	1996	1997	1998	1999	2000		
15453	3672					ESB	
3	10	10	18	15	25	vMCJ	
35	40	59	63	61	38	MCJ	

Tableau 3

Prédire l'espérance de vie et ses facteurs de variation

Notion très largement vulgarisée, l'espérance de vie n'en est pas moins très délicate à définir, plus encore à calculer, soit pour un individu donné à un moment donné de sa vie, soit pour une cohorte d'individus nés la même année, soit pour une population vivant dans un pays donné. Si les tables de mortalité et les *causes de la mort* ont été correctement enregistrées, cette notion trouve une définition idéale une fois que tous les individus nés une année donnée sont morts (soit au maximum 125 ans

après car la durée maximale de vie ne varie pas). Mais cette notion n'intéresse que l'historien ; tant que l'on est vivant, on s'intéresse à la *valeur prédictive* du concept. De même pour les responsables d'un pays. De même pour une population animale dans une optique darwinienne de sélection des espèces en reliant cette notion à l'efficacité des diverses formes de reproduction et aux divers facteurs de risque. Pour avancer davantage, il faudrait reproduire ici de fastidieuses tables de mortalité. Nous renvoyons donc à la bibliographie [18].

Décrire et normaliser la taille et le poids chez l'homme et prédire l'évolution

Cette question largement développée dans l'atelier : *L'homme moyen et la normalisation de la taille et du poids* [dans *Statistiques et probabilités*] [19] est l'occasion de rappeler que la courbe de Gauss n'est que l'approximation de la loi binomiale quand "n" est suffisamment grand. De plus, le facteur intéressant est "sous la courbe". Autrement dit l'explication génétique de la taille fait appel à des éléments discontinus et nombreux, sans que le nombre puisse actuellement être précisé et qui concernent une population d'individus. La loi binomiale suffit donc à fournir une explication théorique. Cette explication se présente comme le modèle de la variabilité de la taille si elle n'était déterminée que génétiquement. De nombreux facteurs du milieu vont modifier cette taille dans un sens ou l'autre et éloigner les observations réelles du modèle. On pourra grâce à cela apprécier éventuellement l'effet de chaque facteur par rapport à la répartition théorique.

Mais une deuxième dimension apparaît ici dans la mesure où il s'agit de l'espèce humaine : c'est l'effet *normalisateur* de ces répartitions, c'est-à-dire la nécessité de se conformer à des valeurs de référence. Cet effet normalisateur prenant de plus en plus une valeur *prédictive*.

Décrire, modéliser, expliquer les formes vivantes

On peut *décrire* certains aspects des animaux et végétaux à l'aide des mathématiques, puis se limiter à contempler, ou admirer les aspects "géométriques" de la nature, par exemple les symétries, les spirales, les hélices, les suites de Fibonacci. En apparence l'art imite parfois la nature selon la thèse contestable développée autrefois par Aristote. Mais prendre la nature pour modèle c'est le *sens inverse* de la modélisation scientifique (et aussi de la véritable création artistique), mais c'est hélas le *sens commun* du terme. La relation de modèle est effectivement *réversible*, au prix d'une ambiguïté, ou d'une utilisation idéologique, qui s'appuie sur ce double sens pour créer un "contresens" sans le dire. Par exemple, le sens du mot *régulation* dans la bouche du physiologiste ou du technologue est exactement l'inverse du sens que lui donne l'économiste.

Le travail du scientifique consiste à "*transformer pour connaître*". Toutes les expériences consistent à créer des variations artificielles, à l'aide de techniques variées, et en ce sens tous les verbes d'action formés avec le préfixe "trans" sont parents (sans mauvais jeu de mots), ainsi que ceux créés avec le préfixe "méta" (métamorphose). La forme des êtres vivants se développe dans l'espace mais aussi toujours dans le temps au double sens de développement et d'évolution, et présente donc des transformations à observer.

Or d'une certaine façon une forme ne se décompose pas. C'est un tout, contrairement aux mécanismes biochimiques. En revanche, on peut la transformer, ou observer sa construction progressive pour comprendre sa formation.

Modéliser, c'est rechercher des lois physiques, des réactions chimiques, des équations mathématiques qui permettent d'expliquer les phénomènes biologiques, et non pas seulement de les décrire. Regarder le vivant *comme un objet chimique* est assez facilement accepté car il y a des réactions de transformation, une dynamique, une construction (synthèse), une destruction (hydrolyse), donc du temps et des forces à l'œuvre, forces de création et de mort. Il en est de même, mais dans une moindre mesure pour la physique.

Regarder le vivant *comme un objet mathématique* qui explique son fonctionnement laisse plus dubitatif car les mathématisations semblent statiques et seulement descriptives. En fait, il faut comparer des états successifs ou des états dans des espèces différentes pour espérer observer des

transformations (puisqu'il faut transformer pour connaître). D'où l'importance par exemple du dernier chapitre du livre de D'Arcy Thompson [20] qui propose des grilles de transformation des formes animales. L'opposition trop marquée des attitudes analytiques et des approches globales constitue cependant un obstacle possible à l'acceptation de ce type de travail.

On compare donc la taille, la surface ou le poids d'organes différents à l'intérieur d'un individu au cours de la croissance et/ou chez des espèces différentes actuelles ou fossiles. On compare ces paramètres au cours du temps, mais non pas par rapport au temps. On compare les variations relatives les unes par rapport aux autres (vitesse de croissance relative, croissance dysharmonique, allométrie) en utilisant des échelles logarithmiques si besoin est.

Dans le cadre de l'évolution, deux conceptions de l'évolution des formes qui s'appuient sur les fossiles et la paléontologie et impliquent des mutations et des effets de sélection sont en concurrence sans s'exclure :

– le *gradualisme* : évolution progressive continue, sans rupture, mais éventuellement à des vitesses différentes ;

– les *équilibres*, stables pendant une période, ponctués par des ruptures et des évolutions rapides pendant un temps bref (ce qui à l'échelle des temps géologiques peut donner l'impression d'un "saut qualitatif").

Bien évidemment, il faut également faire intervenir le milieu, car tout n'est pas déterminé génétiquement et par ailleurs les formes créées sont, ou non, retenues par la sélection.

Les mathématiques du continu sont les plus habituelles (fut-ce en échelle log, ou log/log) et semblent appuyer l'attitude gradualiste sans le dire, mais il faut également faire usage de mathématiques du discontinu permettant de décrire des seuils, des ruptures, des "sauts".

On retrouve ainsi la génétique du développement car ce petit nombre de transformations mathématiques désigne un petit nombre de gènes en action, à des moments successifs et à des vitesses différentes. Il n'est pas besoin de faire appel à une révolution sous forme d'un très grand nombre de mutations et d'un "saut" difficile à comprendre. Cependant, la difficulté est ici la même que pour la génétique dite formelle ou mendélienne. L'approche mathématique directe des lois de Mendel est possible (le développement du binôme modélise bien la transmission des allèles des gènes) mais ceci n'entraîne aucun développement, aucune relance de la recherche tant que les biologistes n'ont pas analysé la méiose et le ballet des chromosomes.

Conclusion

Pour conclure reprenons tous les cas analysés ou simplement évoqués précédemment :

1. Recherche de *facteurs de variation* (et d'imputation causale éventuelle) par la méthode des *corrélations* en épidémiologie, écologie, agronomie (en gardant à l'esprit que corrélation ne signifie pas nécessairement cause, en tous les cas pas cause unique, ni cause directe).

2. Définition *a priori d'un plan* pour réaliser *des expériences ou des observations* (étude statistique sur une population et non pas sur un seul cas, carré latin, tirage au sort...).

3. Proposition d'un *modèle* d'évolution ou de fonctionnement (modéliser la dynamique d'une population, d'un système de régulation, d'un organisme dans lequel on définit des compartiments, etc.), permettant de réaliser *des simulations* (mais il s'agit souvent de fonctions mathématiques inaccessibles aux élèves de première S : équations différentielles du second ordre, etc.).

4. *Comparaison* d'un résultat expérimental à une loi théorique (une probabilité, un pourcentage, une fonction de répartition, la loi binomiale, la loi de Laplace-Gauss, une loi de Poisson) ou à un modèle. *Réfuter ou appuyer* la conformité d'un résultat avec une loi et jouer le rôle de "*preuve*" (risque α et β , tests de signification, intervalle de confiance).

5. *Comparaison* de deux résultats empiriques entre eux (comparaison de deux pourcentages, évolution de la croissance de deux lots de plantes ou d'animaux, comparaison de moyennes et de variances), à l'aide de tests de signification.

6. *Expliquer* en proposant des concepts (la combinatoire permet de prévoir des cas possibles ; le concept d'équiprobabilité permet de prévoir les proportions de garçons et de filles dans la descendance).

7. La statistique permet de *prendre des décisions d'action*, même si l'on n'explique pas le phénomène (cas de l'efficacité des médicaments dont le mécanisme d'action n'est pas connu).

8. Les mathématiques permettent de *réduire la variabilité du vivant* (et donc de dépasser cet obstacle à l'expérimentation constitué par la variabilité) en autorisant l'étude sur une population et non pas sur un seul individu. Mais inversement cette réduction peut être un obstacle dans la mesure ou elle élimine les cas très rares et les oscillations qui ont bien souvent, en biologie, une grande importance.

9. Les mathématiques permettent de réduire la *variabilité due à l'instrument de mesure*.

10. Les mathématiques permettent de critiquer les *fausses représentations* véhiculées par le langage courant sur le concept de hasard par exemple (ou d'autres concepts), ainsi que les fausses mathématisations de doctrines idéologiques [21].

Références bibliographiques

- [1] BOURSIN J.-L., *Les structures du hasard*. Paris : Seuil Le rayon de la science. 1966 ; BOREL É. *Probabilités et certitudes* Paris : PUF, Coll. Que sais-je ? n° 445 ; BOLL M. *Les certitudes du hasard*. Paris : PUF, Coll. Que sais-je ? n° 3. 1941
- [2] BERNARD C., *Introduction à l'étude de la médecine expérimentale*. Paris : 1865. Édition avec préface de F. Dagognet chez Garnier-Flammarion. 1966
- [3] RUMELHARD G., *La génétique et ses représentations* Bern. Peter Lang 1986
- [4] BOUTOT A., *Le pouvoir créateur des mathématiques*. La Recherche n°215 Novembre 1989 p.1340-1348.
- [5] LECOURT D., *L'épistémologie historique de Gaston Bachelard*. Paris : Vrin 1969
- [6] *Décrire dans toutes les disciplines*. Revue *Cahiers pédagogiques* coordonnée par Yves Reuter. n°373 avril 1999
- [7] D'ARCY Thompson, *Formes et croissance*. Paris : Seuil coll. Sources. 1994. Préface de Alain Prochiantz ; Prochiantz A., *Machine-esprit*. Paris : Odile Jacob. 2001 p.103-122 sur D'Arcy Thompson.
- [8] CANGUILHEM G., *Le normal et le pathologique*. Paris PUF 1966 ; Canguilhem Georges (1968). *Études d'histoire et de philosophie des sciences concernant les vivants et la vie*. Paris : Vrin. (La 7^{ème} édition de 1994 est augmentée de plusieurs articles)
- [9] VESSEREAU A., *La statistique* Paris : PUF, Coll Que sais-je ? n°281 1947
- [10] GIRAULT Y. et M., *L'aléatoire et le vivant* Paris : Diderot. 1999 (accessible aux élèves)
- [11] FORD E., *Génétique écologique*. Paris : Masson. 1973 ; Jacquard Albert (1978) *Éloge de la différence. La génétique et les hommes*. Paris : Seuil (accessible aux élèves)
- [12] SCHWARTZ D., (1991) *La statistique dans les sciences du vivant*. Dossier documentaire INSERM (épuisé), et une vidéo (accessible aux élèves) ; Schwartz Daniel (1994) *Le jeu de la science et du hasard*. Paris Flammarion (reprend en partie le dossier INSERM) ; Schwartz Daniel (1963) *Méthodes statistiques à l'usage des médecins et des biologistes*. Paris, Flammarion. 318 pages
- [13] RUMELHARD G., (éd) *Les formes de la causalité dans les sciences de la vie et de la Terre*. Paris INRP. 2000.
- [14] LAMOTTE M., (1948) *Introduction à la biologie quantitative*. Paris : Masson.
- [15] BERTRANDIAS J.-P. et F., (1997) *Mathématiques pour les sciences de la vie, de la nature et de la santé*. PUG ; Piquemal Jacques (1993) *Essais et leçons d'histoire de la médecine et de la biologie*. Paris : PUF (articles sur P. Louis et les débuts de l'épidémiologie)
- [16] SAFINA C., (1996) *Les excès de la pêche en mer*. Pour la Science n°219 Janvier 1996 pages 28-36. Mot clé : surpêche ; Dajoz Roger (1973). *La dynamique des populations exploitées : le cas des poissons marins*. *Bull. Écologie* t. IV, 2, pp 121-131 ; Dajoz Roger (1970). *Précis d'écologie*. Dunod ;

Lamotte M., Bourlière F. *Problèmes d'écologie : échantillonnage des peuplements animaux des milieux terrestres*. Paris : Masson 1969.

[17] Cité des sciences et de l'industrie : *En période de vache folle* Juin 2001 ; Tangente N° 80 Avril-Mai 2001

[18] TEMAN D., *La croissance de l'espérance de vie*. Tangente n°80 Avril-mai 2001. Consulter les sites Internet de l'INED <http://www-census.ined.fr/demogrus/Demographie/Mortalité/> ; Fagot - Largeault Anne (1989) *Les causes de la mort. Histoire naturelle et facteurs de risque*. Paris : Vrin

[19] ARRIGHI M., *La variabilité de la taille et du poids chez l'homme : moyenne statistique, normalité, normativité. Une approche interdisciplinaire au collège*. Aster 30.p. 143-168. 2000

[20] Sur la modélisation de la forme on peut consulter : Collectif (1998) *Les symétries de la nature*. Pour La Science. Juillet. Dossier hors série ; Gayon J. (2000) *De la croissance relative à l'allométrie (1918-1936)*. Rev. hist. Sc. 53/3-4, 475-500 ; Douady S., Couder Y., (1993) Les spirales végétales. *La Recherche* Janvier 1993 ; Murray J., (1988) *Les taches du léopard*. Pour La Science n°127 mai ; Reffye Ph de. ; Edelin C. ; Jaeger M. (1989) *La modélisation de la croissance des plantes*. *La Recherche* n°207 Février 1989 p. 158-168 ; Niklas K., (1986) *L'évolution des plantes simulée par ordinateur* Pour La Science n°103 mai ; Gayon J., Wunenburger J-J. (éd) (1992) *Les figures de la forme*.

[21] LAHANIER-REUTER D., (1999) *Conceptions du hasard et enseignement des probabilités et statistiques*. PUF, Paris.

Le débat sur les atomes au XIX^{ème} siècle

Myriam Scheidecker-Chevallier,
maître de conférences, université de Nice-Sophia-Antipolis

I. Les atomes chimiques de John Dalton

Contrairement à ce que l'on répète trop souvent, John Dalton (1766-1844) n'a pas inventé les atomes. Comme la plupart de ses contemporains, il admet sans discussion que la matière est formée par un ensemble de corpuscules distincts entre lesquels s'exercent des forces attractives et répulsives : "... les corps de grandeur pondérable sont constitués par un grand nombre de particules extrêmement petites appelées atomes de matière. Il n'entre pas dans mon dessein de contester cette hypothèse - elle me satisfait entièrement - mais de montrer que nous n'en avons pas fait un usage suffisant, et qu'en conséquence nous n'avons que des idées très obscures concernant les actions chimiques" [1].

Newton était atomiste ; E. Stahl lui même, l'inventeur de la théorie du phlogistique que Lavoisier s'est appliqué à détruire, était atomiste ; mais si le nom du chimiste anglais est resté associé à "l'hypothèse atomique" au début du XIX^{ème} siècle, c'est qu'il a introduit une nouvelle conception de l'atome, particulièrement intéressante parce qu'elle deviendra féconde pour les chimistes.

Newton avait fait des hypothèses spéculatives sur la constitution intime de la matière, sans les confondre avec des démonstrations mathématiques ; les particules ultimes étaient en petit nombre, et les mêmes pour tous les corps. La diversité observée des corps à notre échelle provenait de la diversité dans l'arrangement de ces quelques principes élémentaires ; ainsi l'or, construit à partir de "particules ultimes" de même matière homogène que l'argent, mais différentes en tailles et figures, possédait un caractère particulier différent de l'argent, non pas en vertu d'atomes d'or élémentaires tous identiques entre eux et radicalement différents des atomes d'argent, mais parce que ses atomes, les mêmes que ceux de l'argent, étaient arrangés différemment dans les deux métaux. Il y avait un premier arrangement de particules primaires donnant des particules de première composition, ces dernières étant arrangées pour donner des particules de seconde composition et ainsi de suite jusqu'à la nième composition. Ces architectures emboîtées et hiérarchisées donnaient ses particularités à l'espèce chimique considérée.

Les opérations chimiques que réalisaient les chimistes ne détruisaient les édifices qu'au niveau le plus superficiel, celui de la dernière composition. À ce compte là, les opérations de transmutation, par exemple de l'argent en or, étaient envisageables si les réarrangements se produisaient au niveau des particules ultimes de matière, niveau qui n'était pas celui des réactions chimiques ordinaires.

L'innovation de Dalton est d'introduire une alternative aux idées de Newton. Désormais, chaque corps simple identifié possède une spécificité chimique parce qu'il est constitué "d'atomes chimiques" tous identiques et spécifiques de par leur poids et leurs qualités propres. Ce sont les particularités, la spécificité des atomes eux-mêmes, qui communiquent aux corps à notre échelle leur spécificité chimique, et non plus l'agencement différent d'unités de base identiques comme le pensait Newton.

La particule d'hydrogène cessait d'être vue comme le résultat complexe d'une structure interne ordonnée et compliquée mais comme une planète, un petit solide sphérique, une boule de billard.

L'atome de chaque corps simple est désormais défini par son poids relatif et, pour connaître ces poids et dresser ainsi le premier tableau des poids atomiques, il suffit de réaliser en laboratoire des réactions chimiques qui sont des additions d'atomes. Dalton rapporte tous les poids atomiques à une unité fixée de manière conventionnelle. Il choisit l'hydrogène pour unité ; dès lors, le poids atomique de chaque élément est la quantité pondérale qui s'unit avec un gramme d'hydrogène pour former la combinaison la plus stable. L'hypothèse de Dalton vient donner une explication simple à plusieurs lois empiriques de l'époque : la loi de stœchiométrie des chimistes allemands de la fin du XVIII^{ème} siècle,

Richter et Wenzel [2], celle des proportions définies objet du débat entre Proust et Berthollet [3] et la loi des proportions multiples attribuée à Dalton [4]. La combinaison chimique peut désormais être envisagée à l'échelle des atomes invisibles ou particules ultimes de matière, comme un acte individuel d'addition d'atomes qui, en se multipliant sur un très grand nombre de fois, aboutit, à notre échelle, aux lois expérimentales des proportions définies et multiples, dès lors que les atomes élémentaires sont tous les mêmes pour un même élément et que les atomes d'éléments différents ont des poids différents. Sans l'hypothèse atomique, ces lois demeurent mystérieuses comme les lois de Kepler en attendant Newton.

Pour la première fois, on rattache les propriétés d'un élément à une caractéristique atomique accessible à l'expérience s'exprimant par une grandeur quantitative : *le poids atomique*. Ainsi à chaque atome se trouve associé un nombre. Mais même en Angleterre, Dalton ne fait pas l'unanimité ; certains chimistes considèrent comme un abus de langage de parler de poids atomique alors qu'il suffit de considérer les "poids proportionnels" selon l'expression de H. Davy ou "poids équivalents" selon W.-H. Wollaston.

Cependant l'hypothèse atomique va permettre très vite de rationaliser plusieurs faits expérimentaux : 1) la loi volumétrique de Gay-Lussac de 1809, selon laquelle à l'état gazeux les substances se combinent dans des rapports en volume entiers et très simples, comme 1, 2, 3 [5] ;

2) la loi sur les chaleurs spécifiques de Dulong et Petit en 1819, selon laquelle les atomes de tous les corps simples pris à l'état solide ont exactement la même capacité pour la chaleur [6] ;

3) la loi de l'isomorphisme découverte par Mitscherlich en 1823, selon laquelle les corps qui sont composés d'un même nombre d'atomes assemblés de la même manière affectent la même forme quand ils cristallisent [7].

Les atomes de Dalton sont un instrument heuristique puissant pour les travaux expérimentaux et les spéculations théoriques des chimistes ; ils vont de plus permettre de donner une explication simple aux phénomènes de l'électricité "galvanique" qui se manifestent au tout début du XIX^{ème} siècle.

II. L'atome et l'électricité : H. Davy, J.-J. Berzelius, M. Faraday

Avant la découverte de l'électricité galvanique et l'invention de la pile de Volta (1800), on ne s'était pas aperçu des liens qui pouvaient exister entre les transformations chimiques et la production d'électricité. Si les appareils électriques du XVIII^e siècle, purement électrostatiques, étaient le siège de tension considérable, les quantités d'électricité en revanche étaient faibles et n'auraient pas permis, en admettant qu'on s'en préoccupât, de transformer des quantités de matière décelables.

La pile est conçue au départ comme un organe électrique artificiel destinée à réfuter l'idée d'une électricité d'origine animale, avancée par Galvani à la suite de ses expériences de contraction du muscle de la grenouille. Volta remplace le muscle et le nerf de la grenouille, branchés entre fer et cuivre, par des bouts de carton et des chiffons mouillés et triomphe de son compatriote Galvani. La grenouille n'est pas la cause de la circulation d'un courant, elle n'en est que le conducteur et l'origine du phénomène est attribué au contact de deux métaux différents.

A. Humphry Davy (1778-1829)

Le célèbre chimiste anglais H. Davy comprend très vite ce que les chimistes vont pouvoir tirer de la pile de Volta, génératrice d'électricité dynamique ou courant galvanique.

Carlisle et W. Nicholson mettent au point le procédé d'électrolyse et réussissent à décomposer l'eau en ses deux éléments : l'oxygène se dégage au pôle positif et l'hydrogène au pôle négatif. C'est une formidable avancée pour l'analyse chimique : la séparation en deux parties du composé chimique par simple passage d'un courant électrique au sein de la solution.

En 1807, H. Davy utilise ce procédé pour décomposer les alcalis fixes, la potasse et la soude, qui avaient jusque-là résisté à l'analyse et que Lavoisier avait classés dans les corps simples pour rester

cohérent à sa définition du corps simple [8], mais qu'il soupçonnait néanmoins être constitués d'oxygène et d'un radical inconnu.

H. Davy réussit à obtenir, par décomposition électrolytique de la potasse et de la soude, les deux nouveaux éléments métalliques que sont le potassium et le sodium.

La question qui se pose alors aux chimistes est la suivante : si la matière est bien composée d'atomes, est-ce l'électricité qui maintient les atomes ensemble dans une combinaison chimique ? Autrement dit, le lien chimique responsable de "l'affinité" serait-il d'origine électrique ?

Pour Davy, qui récuse les "atomes chimiques" de Dalton et adhère plutôt à la vision atomique de Newton que nous avons évoquée plus haut, les qualités différentes que présentent les corps proviennent d'états électriques différents, états qui dépendent eux-mêmes d'arrangements différents de leurs atomes. Ainsi donc, pour Davy, une même matière peut prendre différentes "formes chimiques" ou différentes "formes électriques", ces deux états étant étroitement corrélés entre eux. Ce qui est clair, c'est que quelle que soit la force qui maintient les atomes ensemble, le phénomène de l'électrolyse montre que celle-ci peut être neutralisée par l'électricité. Il est alors logique de penser que la cause qui produit l'affinité des éléments entre eux est elle-même électrique [9]. H. Davy attribue donc aux attractions électriques et chimiques une cause primaire identique qu'il n'est pas en mesure d'interpréter, mais qui lui laisse caresser l'espoir de pouvoir mesurer, grâce à la pile, les affinités chimiques des corps.

Ainsi, l'idée d'une connexion intime entre l'électricité et les atomes de matière se fait jour peu à peu ainsi que celle de l'existence de charges électriques sur les atomes eux-mêmes.

B. Jöns - Jacob Berzelius (1779-1848)

Au même moment, le suédois Berzelius étudie l'action décomposante de la pile ; il expose ses recherches faites en collaboration avec Hisinger dès 1803.

La nature électrique des atomes individuels, autrement dit des "atomes daltoniens", peut rendre compte, croit-il, de leurs propriétés individuelles, propriétés qui sont celles de la substance tout entière. Pour Berzelius, contrairement à Davy, la combinaison chimique implique la neutralisation des charges, et qui plus est, la pile au cours de l'électrolyse a le pouvoir de redonner aux constituants leur charge respective initiale.

Berzelius se représente les atomes de Dalton comme des sphères mécaniquement indivisibles d'égal rayon. Ces sphères sont des sortes de petits dipôles avec un pôle positif et un pôle négatif qui ne s'équilibrent pas exactement : l'un des deux pôles domine et par conséquent les atomes possèdent une charge électrique nette ou résiduelle qui peut être de l'un ou l'autre signe. La polarité des atomes va être la clé de l'explication de la réactivité chimique : cette hypothèse explique tout naturellement la combinaison chimique entre corps de polarité contraire ; quant à l'union de deux corps, tous deux électro-négatifs, comme l'oxygène et le soufre par exemple, qui se combinent plus intimement que le plomb et l'oxygène de polarité contraire, il faut faire intervenir un autre facteur "l'intensité de leur polarité en général". Ainsi, l'intensité du pôle positif du soufre est plus grande que l'intensité du pôle positif du plomb. Il s'en suit que : "le pôle positif du soufre neutralise une plus grande quantité d'électricité négative dans le pôle dominant de l'oxygène, que le pôle positif du plomb ne peut en neutraliser" [10].

La théorie dualistique de la combinaison chimique de Berzelius suggère de mettre l'accent sur la nature des atomes. Cette théorie explique, de plus, qu'un corps binaire n'ayant presque jamais ses deux électricités exactement saturées est encore apte, avec son électricité résiduelle, à produire de nouvelles combinaisons : ternaires, quaternaires, etc. Berzelius étend aux composés organiques le dualisme établi pour les acides, bases et sels ; par exemple, il écrit la composition de l'acide acétique ($C_4H_6O_3 + H_2O$) sur le modèle de l'acide sulfurique ($SO_3 + H_2O$). Comme on le verra plus loin, cette théorie est loin d'être féconde en chimie organique.

C. Michael Faraday (1781-1867)

Faraday effectue ses premiers travaux en conjonction avec ceux d'Ampère, d'Oersted et d'Ohm ; il associe des données quantitatives au courant électrique, à la charge et au voltage. En 1833, il démontre que le flux de courant est dû à une action corpusculaire interne, à un mouvement de particules chargées - qu'il appelle des *ions* - et qui étaient déjà présentes dans la solution avant que la différence de potentiel imposée ne les déplace. Ce sont bien les ions seuls qui transportent l'électricité. Après avoir fait passer la même quantité de courant dans plusieurs solutions - eau, chlorure d'étain, borate de plomb, acide chlorhydrique - il fixe la notion "d'équivalent électrochimique" correspondant au poids de divers corps décomposés par une même quantité d'électricité ; cet équivalent se trouve relié directement au "poids équivalent" ou "atomique" par un facteur 1, 2, 3... Ainsi, non seulement il démontre comme H. Davy que la force de l'affinité entre les atomes est électrique, mais aussi que tous les atomes chargés ou ions transportent exactement la même charge ou un multiple de 2, de 3 de cette charge. Comme J. Dalton, la génération précédente avait montré que la matière consistait en petites particules discrètes ou atomes ; Faraday semble montrer maintenant que l'électricité associée à la matière existe aussi en petites unités discrètes. De plus, les "poids équivalents" des corps sont simplement les quantités de ces corps qui contiennent des quantités d'électricité égales. Les travaux de Faraday en électricité sont une confirmation expérimentale intéressante de l'hypothèse atomique.

Tandis que les travaux de Davy, Berzelius, Faraday font entrevoir, du moins pour la chimie minérale, un lien certain entre la combinaison d'atomes et l'électricité, d'autres chimistes vont imaginer pour les combinaisons d'atomes, en chimie organique, des explications structurales. Ils vont spéculer sur l'arrangement des atomes dans les structures moléculaires, question laissée totalement en suspens par la chimie daltonienne.

III. L'atome et la molécule : les contributions de A.-M. Ampère, J.-B. Dumas, M.-A. Gaudin, A. Laurent et C. Gerhardt

L'atome de Dalton va peu à peu changer de signification ; le concept évolue au fur et à mesure de la compréhension et de l'acceptation de l'hypothèse d'Avogadro-Ampère par la communauté des chimistes. Alors que l'atome daltonien simple est défini avant la molécule (ou atome composé), peu à peu ce sera l'inverse : la définition de l'atome sera dépendante de celle de la molécule. Tout est centré autour de l'acceptation de la célèbre hypothèse d'Avogadro-Ampère. En effet, accepter l'hypothèse d'Avogadro Ampère et distinguer clairement l'atome de la molécule sont deux problèmes intimement liés dans la chimie de la première moitié du XIX^è siècle.

A. André-Marie Ampère (1775-1836)

Ampère, bien connu pour ses travaux en mathématiques et en électrodynamique, s'est aussi intéressé à la chimie. Dans sa lettre à Berthollet de 1814 [11], Ampère, utilisant conjointement la science des cristaux d'Haüy et les résultats expérimentaux de Gay-Lussac, formule l'hypothèse, indépendamment et trois ans après Avogadro [12], selon laquelle des volumes égaux de gaz quelconques, pris dans les mêmes conditions de température et de pression, contiennent le même nombre de particules [13].

Ampère est en mesure de distinguer "la particule", polyèdre régulier et "la molécule-point" qui se trouve à chaque sommet de ces polyèdres. Nous voyons qu'il s'agit bien, chez lui, de la distinction molécule/atome, mais avec une terminologie différente de la nôtre. A l'aide de ce modèle purement géométrique, chimie structurale avant l'heure, il est en mesure de proposer une théorie de la combinaison chimique qui explique l'affinité, non pas par des forces électriques, mais par des considérations structurales de superpositions de polyèdres donnant naissance à un polyèdre régulier : "Quand des particules se réunissent en une particule unique, c'est en se plaçant de manière que les centres de gravité des particules composantes, étant au même point, les sommets de l'une se placent dans les intervalles que laissent les sommets de l'autre, et réciproquement" [14]. S'il n'en est pas ainsi,

la combinaison ne peut se former et les particules seront simplement “juxtaposées” ou “agrégées”. Si les formes représentatives résultantes de la réunion de plusieurs tétraèdres et plusieurs octaèdres ne sont pas régulières, elles doivent être “rejetées”; l’expérience montre d’ailleurs “que les proportions qu’elles supposent dans les compositions chimiques ne se rencontrent pas dans la nature [15]”.

Deux chimistes français de la génération suivante vont exploiter avec profit l’hypothèse d’Avogadro-Ampère, ainsi que les intuitions structurales d’Ampère : il s’agit de J.-B. Dumas et M.-A. Gaudin.

B. Jean-Baptiste Dumas (1800 -1884)

En 1826, Jean-Baptiste Dumas s’intéresse à la recherche “des poids absolus des atomes”. Il réussit à mettre au point une méthode de mesure des densités de vapeur qui rend l’hypothèse d’Avogadro-Ampère opératoire pour calculer le poids des “atomes” ou “molécules” d’un grand nombre de substances [16]. Il laisse entendre que tous les physiciens, de fait, acceptent l’hypothèse d’Ampère, ce qui est loin d’être le cas : « ... les gaz, dans des circonstances semblables, sont composés de molécules ou atomes placés à la même distance, ce qui revient à dire qu’ils en renferment le même nombre sous un même volume” [17].

Pendant longtemps dans ses nombreuses publications, le vocabulaire de Dumas, contrairement à celui d’Ampère, n’a pas la précision requise concernant la distinction atome - molécule, ce qui au dire de S. Cannizzaro retardera l’acceptation de l’hypothèse d’Avogadro-Ampère par le monde savant. Pourtant, Dumas distingue bien “la molécule chimique” ou “atome d’un corps simple” qui se conserve dans les réactions chimiques et “la molécule physique” ou “atome composé” : « l’atome d’un corps simple est donc la particule très petite de ce corps qui n’éprouve plus d’altération dans les réactions chimiques. L’atome d’un corps composé n’est à son tour que le petit groupe formé par la réunion des atomes simples qui le constituent » [18]. Dumas a bien conscience, semble-t-il, que les mesures de densité de vapeur donnent non pas les poids “atomiques” mais les poids “moléculaires”, et que les “molécules” ou “atomes” d’un même corps simple peuvent rester groupées entre elles à l’état gazeux : « ... Si les molécules d’un corps simple, en passant à l’état gazeux, restent encore groupées en certain nombre, nous pouvons bien comparer ces corps dans des conditions telles, qu’ils renferment le même nombre de ces groupes ; mais il nous est impossible d’arriver pour le moment à connaître combien, dans chacun de ceux-ci, il existe de molécules élémentaires » [19].

Dumas est à la recherche d’une meilleure connaissance de la composition moléculaire afin d’atteindre une écriture univoque des formules chimiques. Fidèle en la méthode de la science positive, dit-il : “la formule d’un composé devrait donc toujours représenter ce qui entre dans un volume de ce corps pris à l’état gazeux” [20]. Ainsi, est-il tenté d’écrire la formule de l’eau $HO_{1/2}$ plutôt que H_2O afin de ne pas aller plus loin que l’expérience [21]. Il est clair que pour Dumas les moitiés de “molécules” ne sont pas nécessairement les “particules ultimes” de matière.

Il paraît impossible à Dumas de savoir si les particules ultimes impliquées dans les réactions chimiques sont des “atomes” individuels ou plutôt des “agrégats d’atomes”.

En somme Dumas est l’un des premiers chimistes à se servir de l’hypothèse d’Ampère de façon opératoire, sans reconnaître la contribution d’Avogadro, et ce, dès le début de sa carrière. De plus, il ne remet pas en doute cette hypothèse lorsqu’en 1832 il constate des valeurs anormales pour les densités de vapeur des éléments tels que le phosphore, l’arsenic, le soufre... en reconnaissant simplement : « qu’on a tort de supposer que les vapeurs des corps peu volatils doivent ressembler pour leur mode de division aux gaz permanents que nous connaissons” [22]. Dumas évoque simplement l’ignorance dans laquelle on se trouve relativement à “l’atomicité” des molécules de gaz. Il ne prétend pas que l’utilisation de l’hypothèse lui permettra d’atteindre cette “atomicité”. Ce qu’il met en doute finalement, à cette époque, c’est l’utilité du concept “d’atome” lui-même : « ... si j’en étais le maître j’effacerais le mot atome de la science”, dit-il, dans une de ses leçons restée célèbre [23].

C. Marc-Antoine Gaudin (1804-1880)

La position de M.-A. Gaudin au sujet des atomes est tout autre que celle de J.-B. Dumas [24]. Certes, tout comme Dumas, il se prononce, en 1833, sur la nécessité d’utiliser l’hypothèse d’Ampère

en chimie et ce, vingt cinq ans avant qu'elle ne soit acceptée par la communauté scientifique : « nous poserons en principe avec monsieur Ampère, que dans tous les corps gazeux à même pression et même température, les molécules sont sensiblement à la même distance » [25], mais alors que Dumas ne croit pas indispensable de spéculer sur l'arrangement moléculaire au sein de la matière et de chercher à définir "l'atomicité" des molécules, Gaudin poursuit au contraire et avec profit, semble-t-il, dans cette voie. Gaudin considère, en effet, de la plus haute importance la connaissance du nombre exact des "atomes" dans la "molécule" et de leur poids.

Aussi n'est-il pas surprenant de voir Gaudin prendre soin, à cette fin, de définir de façon non équivoque les termes "atome" et "molécule" qui conservent chez les chimistes de l'époque, nous l'avons vu, un certain flou : « Nous établirons donc une distinction bien tranchée entre les mots atome et molécule, et cela avec d'autant plus de raison que, si jusqu'à ce jour on n'est pas parvenu aux mêmes conclusions que moi, c'est uniquement faute d'avoir établi cette distinction. Un atome sera pour nous un petit corps sphéroïde homogène, ou point matériel essentiellement indivisible, tandis qu'une molécule sera un groupe isolé d'atomes, en nombre quelconque et de nature quelconque. Afin d'écarter les périphrases, et au lieu de dire : une molécule composée d'un, de deux, de trois, de quatre, de cinq, de plusieurs atomes, etc., nous ferons suivre le substantif molécule de l'adjectif monoatomique, diatomique, triatomique, tétraatomique, pentaatomique, polyatomique, etc. » [26]. De plus, contrairement à Dumas, il veut remplacer le terme "volume" par celui "d'atome" et changer le vocabulaire d'Ampère en appelant "molécule" la "particule" d'Ampère : « Reprenons les combinaisons des gaz ; et puisque les particules sont toujours censées à la même distance, pour une même pression et une même température, nous dirons 1, 2, 3 particules, au lieu de 1, 2, 3 volumes, et substituerons même le mot molécule à celui de particule, puisque celle-ci est réputée maintenant contenir plusieurs atomes » [27].

Alors qu'Ampère avait fait l'hypothèse de la tétra-atomicité des "molécules" d'hydrogène, d'oxygène, d'azote, et de l'octa-atomicité des molécules de chlore..., alors que Dumas refuse de faire aucune hypothèse sur cette atomicité, se contentant de noter la division en deux au cours de la réaction en phase gazeuse, Gaudin, quant à lui, se prononce sans ambiguïté sur la di-atomicité des molécules d'hydrogène, d'oxygène, d'azote et de chlore... Il franchit le pas que ni Avogadro, ni Dumas ne franchissent, en posant que désormais les moitiés de molécules de ces gaz sont, jusqu'à preuve du contraire, des atomes : « Une molécule de gaz hydrogène, en se combinant avec une molécule de chlore, donne 2 molécules de gaz hydrochlorique ; pour que la combinaison se fasse et que les molécules composées observent la même distance que celles des gaz composans, il faut et il suffit que chaque molécule composante se divise en deux; jusqu'à ce qu'on prouve que ces moitiés de molécule se divisent ultérieurement, nous les tiendrons pour atomes; donc les gaz hydrogène, chlore et hydrochlorique sont biatomiques au moins » [28]. Mais par la suite Gaudin fera preuve de rigidité, refusant d'accepter le concept de valence et semblant ignorer les développements de la stéréochimie après 1860, la théorie qu'il développe dans son ouvrage [29] n'évoluera guère ; si elle fut génératrice d'idées nouvelles en 1831, elle finira en 1873 par devenir obsolète.

D. Auguste Laurent (1807-1853) et Charles Gerhardt (1816-1856)

Avec le développement de la chimie organique, autour des années 30, il devient très difficile d'expliquer les propriétés individuelles, extrêmement différentes de ces composés, uniquement par la nature et la proportion de quatre éléments : le carbone, l'azote, l'oxygène et l'hydrogène communs à tous. On commence à entrevoir que la différence de propriétés des substances organiques doit être due aux différences dans l'arrangement des atomes. Les phénomènes tels que l'isomorphisme [30], l'isomérisation [31] et l'allotropie [32] se prêtent à cette interprétation.

F.-G. Hopkins, lauréat du prix Nobel de médecine en 1929 reconnaît que : « la chimie organique structurale est l'un des plus grands exploits de l'esprit humain » », de même que R.-P. Feynman, qui obtient le prix Nobel de physique en 1965 renchérit ainsi : « La chimie organique est l'une des plus fantastiques enquêtes policières jamais réalisées ».

Le français Auguste Laurent, qui en est l'un des plus prestigieux instigateurs, ne centre pas son programme de recherche sur un thème défini *a priori*. Il se rend compte que la chimie organique se développe sans aucune base solide. Il lui faut trouver une méthode et c'est sur ce point que sa contribution sera la plus originale et la plus féconde.

Ses premiers travaux, proposés par Dumas, consistent en une expérimentation rigoureuse et exhaustive du naphthalène et de ses dérivés. L'énorme masse de résultats qu'il obtient, sur des corps de composition voisine avec des atomes toujours identiques, oriente sa réflexion vers l'arrangement des atomes. Partant d'une observation dont le premier mérite revient à Dumas, Laurent trouve dans les phénomènes de substitutions les arguments qui ruinent la théorie dualistique de Berzelius.

En traitant certains carbures d'hydrogène par le chlore, Dumas note en 1833, que l'halogène possède le pouvoir singulier de s'emparer de l'hydrogène et de le remplacer atome par atome [33]. Dumas, prudent, en reste à un bilan de comptabilité : un hydrogène est perdu, un chlore est gagné. Dans le laboratoire même de Dumas, Laurent va beaucoup plus loin, il multiplie les expériences du même genre et ose affirmer que le chlore remplace au sens propre l'hydrogène, c'est-à-dire occupe la place et joue le même rôle que l'hydrogène auquel il se substitue. En 1836, faire jouer au chlore, le plus négatif des éléments, le même rôle qu'à l'hydrogène, le plus positif, c'est contester de front la théorie dualistique de Berzelius alors en vigueur et c'est tout simplement inacceptable !

Laurent suppose que les propriétés chimiques d'un corps dépendent très fortement de l'arrangement de ses atomes ; ainsi le fait expérimental que l'hydrocarbure hydrogéné et l'hydrocarbure chloré ont des propriétés pratiquement identiques vient confirmer son idée directrice : les deux composés ont donc le même arrangement. C'est ce que ne veut pas conclure Dumas qui, pour se justifier auprès de Berzelius, précise : « M. Berzelius m'attribue une opinion précisément contraire à celle que j'ai toujours émise, savoir que, dans cette occasion, le chlore prendrait *la place* de l'hydrogène. Je n'ai jamais rien dit de pareil [...]. Je ne suis pas responsable de l'exagération outrée que M. Laurent a donnée à ma théorie » [34].

Dans sa thèse de doctorat qui reprend son important article de 1836, Laurent précise ses intentions. À travers les réactions, il veut chercher ce qui demeure invariable, la charpente de l'édifice moléculaire : « Toutes les combinaisons organiques dérivent d'un hydrogène carboné, radical fondamental, qui souvent n'existe plus dans les combinaisons mais y est représenté par un radical dérivé renfermant autant d'équivalent que lui » [35]. En effet, ses connaissances en cristallographie l'aident à concevoir les composés organiques comme des édifices atomiques qui conservent, au cours des réactions, tout ou seulement une partie de leur structure : « on voit donc que comme en cristallographie on pourra enlever des modifications ou une partie seulement sans les remplacer ou en les remplaçant toutes ou partiellement mais il n'en sera pas de même dans la charpente centrale ou dans le radical ; on ne pourra lui enlever une seule pièce, c'est-à-dire un seul atome sans le détruire à moins qu'on ne remplace l'atome enlevé par un autre atome équivalent qui viendrait maintenir l'équilibre de la charpente » [36].

Mais comment accéder à cet "arrangement des atomes" dans les composés organiques (les futures formules développées), qu'il juge tellement utile pour l'avenir de la chimie ?

Il ne connaît certes pas cette structure qui persiste sans se détruire dans une suite de réactions chimiques mais il peut "la suivre", parce qu'elle *reste la même* dans beaucoup de transformations, ou "métamorphoses" qu'il fait subir aux composés : « J'ignore complètement, disais-je, quel est l'arrangement des atomes dans l'éther acétique [...] je ne sais ; mais je soutiens que, quel que soit cet arrangement, il reste le même dans les dérivés chlorés » [37].

Laurent utilise la réactivité chimique et l'isomorphisme dans une sorte de va et vient continu entre l'une et l'autre et en confrontation constante avec sa théorie ; l'isomorphisme est là pour vérifier ce qu'il a déjà prévu grâce à sa théorie des combinaisons organiques et dans presque tous les cas ses prédictions sont vérifiées.

Les formules de Laurent n'ont plus rien à voir avec les formules dualistiques de Berzelius ; celles-ci délivraient l'arrangement binaire, celles-là doivent permettre de concevoir les métamorphoses et traduire les analogies.

Ce qui est remarquable dans la méthodologie de Laurent, c'est le changement du statut de la théorie. En effet, avant lui on essayait de deviner, à partir des faits, les "causes" qui les avaient produits ; telle était la position de Haüy, Lavoisier, Berzelius, Dumas... on testait ensuite par des expériences les hypothèses envisagées comme "causes". Mais cette méthode simple qui a si bien fonctionné avec Lavoisier ne convient plus pour l'énorme masse de faits complexes de la chimie organique.

Laurent doit créer "l'objet" qu'il se propose d'étudier, objet qui n'est plus donné, ce qui exige une méthode beaucoup plus sophistiquée. Certes on peut admettre, comme M. Blondel-Négrélis, que la méthode de "transformation des arrangements" de Laurent fonctionne à la manière d'un mécanisme de transformation de fonction mathématique, à la manière d'Évariste Galois, grand mathématicien de la même époque : « Le noyau [...] introduit à la manière des nombres complexes, il est ce qui doit permettre de résoudre le problème des arrangements, théoriquement. Le noyau d'Haüy était un être naturel, celui de Laurent est un être mathématique » [38], mais à condition de ne pas oublier que c'est un ensemble d'expériences chimiques concrètes et complètement exploitées qui le mène à la reconnaissance des groupements structurés. Laurent visualise l'architecture atomique le flacon à la main, pourrions-nous dire, c'est-à-dire en relation étroite avec la réactivité chimique.

En ne se préoccupant pas de rechercher le "vrai" arrangement mais de suivre dans les métamorphoses et dans les formes cristallines dans quels cas cet arrangement est *le même*, le statut de la théorie a changé, il ne s'agit plus qu'elle soit "vraie" mais qu'elle soit "féconde" : « ... si je l'avais cru aussi vrai qu'un axiome, je me serais croisé les bras, pensant que j'avais pour la science, fait assez. En attendant je m'en suis servi comme un aveugle s'appuie sur un bâton, prêt à le jeter lorsqu'on lui ouvrira les yeux » [39]. La théorie n'est plus seulement expression des faits observés mais aussi, d'une certaine façon, expression d'une idée de l'homme quant aux faits observés. La connaissance est le résultat d'un travail de l'homme sur les choses. Il s'agit désormais de cheminer de l'objet au sujet, mais aussi du sujet à l'objet, parcourir en quelque sorte l'espace entre les deux [40].

Ainsi, pour Laurent, la molécule qui acquiert une dimension architecturale devient l'unité pertinente dans l'étude des réactions : l'atome est désormais la plus petite quantité d'un corps simple qui peut exister en combinaison et la molécule représente la plus petite quantité d'un corps simple qui peut être employée comme réactif pour effectuer une réaction chimique.

Si Laurent, sur le plan épistémologique comme nous l'avons vu, est un novateur, son ami Gerhardt l'est aussi mais d'une toute autre façon.

Charles Gerhardt, qui devient ami et collaborateur de Laurent, va lui aussi contribuer à clarifier fortement les concepts d'atome de molécule ainsi que le concept d'équivalent. En étudiant un grand nombre de composés du carbone, il repère des disparités entre les formules couramment admises sur la base des équivalents pondéraux et les quantités pondérales ou volumiques obtenues dans les réactions. Le repli général sur les équivalents dans les années 1840, motivé par les difficultés rencontrées dans l'utilisation des densités gazeuses par Dumas, avait totalement éliminé de la scène les considérations de volume. En admettant, comme Berzelius, que l'eau renferme deux atomes d'hydrogène pour un atome d'oxygène et l'acide carbonique un atome de carbone pour deux d'oxygène, Gerhardt remarque que les quantités obtenues, dans les réactions de la chimie organique, correspondent toujours au double de ces formules : H_4O_2 au lieu de H_2O et C_2O_4 au lieu de CO_2 . Il en déduit que les formules admises en chimie organique sont deux fois trop fortes et que cela complique inutilement l'écriture. Il propose donc de doubler les poids atomiques du carbone (12 au lieu de 6), de l'oxygène (16 au lieu de 8) et de réduire de moitié les poids atomiques de certains métaux. Il en résulte une division par deux d'un certain nombre de formules, notamment celles de l'acide acétique, des alcools, des aldéhydes et des hydrocarbures et une homogénéisation de celles-ci avec la chimie minérale. Ces formules

simplifiées s'opposent à toute écriture dualistique et se prêtent au contraire à une interprétation en termes de types.

Les réformes préconisées par Laurent et Gerhard semblent apporter dans un premier temps plus de confusion qu'elles n'en lèvent. Le travail de Gerhardt complète admirablement celui de Laurent ; il est d'ailleurs difficile, dans la période de leur étroite collaboration, de savoir ce qui revient à l'un et à l'autre. Wurtz en associant les noms de Laurent et Gerhardt le reconnaîtra : « Une théorie est bonne lorsqu'elle parvient à grouper les faits dans un ordre logique. Elle est féconde lorsqu'elle provoque des découvertes et qu'elle porte en elle le germe de progrès importants. Aucun de ces avantages n'a manqué à la théorie des types [de Laurent et Gerhardt]. De ses derniers développements est sortie une conception nouvelle, plus générale et qui supplée à l'insuffisance que nous venons de souligner. Nous voulons parler de la théorie de l'atomicité » [41].

La théorie des types met l'accent sur le "centre actif" dans une molécule, c'est-à-dire sur la "nature" de tel atome particulier. En effet, tous les atomes ne jouent pas le même rôle et les seules considérations d'arrangement ne suffisent plus. C'est alors qu'on découvre une propriété fondamentale des éléments, leur "atomicité" ou "valence" : Le chlore, le brome, l'iode,... sont toujours monovalents, c'est-à-dire qu'ils s'unissent à un seul atome d'hydrogène, l'oxygène est toujours divalent, l'azote est toujours trivalent... Qu'en est-il du carbone ? La contribution la plus importante pour établir la tétravalence du carbone et la liaison du carbone avec lui-même, viendra de l'allemand August Kekule (1829-1896) et de l'écosais Archibal Scott Couper (1831-1892) en 1858. Dès lors, l'écriture des formules développées devient possible et l'on comprend par exemple pourquoi l'éther éthylique et l'alcool qui ont exactement la même formule brute - C_2H_6O - ont des propriétés si différentes. En effet, leurs formules développées sont respectivement : CH_3-O-CH_3 et CH_3-CH_2-OH . Il faudra attendre le néerlandais H. Van't Hoff (1852-1911) et le français A. Le Bel (1847-1930) en 1874, pour que les quatre liaisons du carbone soient envisagées : tétraédriques, ce qui ouvrira la voie à la stéréochimie ou chimie dans l'espace.

Mais l'atome reste toujours une hypothèse. Un long débat va en résulter : entre les "équivalentistes" et les "atomistes" chez les chimistes et entre les "énergétistes" et les "atomistes" chez les physiciens.

IV. L'atome en débat

A. Le débat chez les chimistes

Au milieu du siècle, les chimistes sont divisés. Il leur est impossible de trouver un terrain d'entente ; non seulement le conflit entre "équivalentistes" et "atomistes" est ouvert mais, à l'intérieur de chaque camp, on constate de sérieuses divergences. Les équivalentistes ont le choix entre des équivalents fondés uniquement sur des rapports pondéraux de combinaison, ou bien sur des rapports volumiques, ou bien sur des équivalents de substitution, ou bien ils peuvent opter pour un système mixte adoptant toujours la formule la plus simple. Du côté des atomistes, l'accord n'est pas non plus parfait. Un chaos indescriptible de chiffres et de formules sévit : une même formule peut désigner plusieurs substances ; par exemple, HO désigne aussi bien l'eau et l'eau oxygénée, C_2H_4 le méthane et l'éthylène. Kékulé pour illustrer cet indescriptible désordre relève au moins 19 formules différentes pour le seul acide acétique. N'y tenant plus, il décide finalement de réunir ses collègues en congrès.

Les questions qui agitent le monde des chimistes sont particulièrement difficiles. Tout d'abord les chimistes ne s'accordent pas sur les valeurs à donner aux poids atomiques, moléculaires ou "équivalents", et encore moins sur l'écriture des formules chimiques des composés organiques. L'influence de Berzelius est encore prégnante, sa théorie dualistique empêche de concevoir l'union de deux atomes semblables ; aussi les gaz hydrogène et oxygène ne peuvent être conçus diatomiques, comme Gaudin le prétend ; Dumas, dont l'influence est tout aussi considérable, ne fait pas, nous l'avons vu, une nette distinction entre atome et molécule.

C'est alors qu'un professeur italien entre en scène : son objectif clairement affiché est de faire un cours compréhensible à ses étudiants. Il s'agit de faire accéder ceux-ci à une claire distinction des

concepts d'atome et de molécule : il faut leur décrire des méthodes physiques permettant d'accéder aux poids moléculaires et atomiques et enfin les habituer à la notation atomique pour écrire de façon univoque les formules chimiques, et ce faisant, leur donner l'amour de cette discipline, tellement formatrice pour l'esprit. Dès la première leçon de son cours, Cannizzaro montre que l'hypothèse d'Avogadro-Ampère, formulée en 1811 et 1814, selon laquelle "des volumes égaux de gaz quelconques, pris dans les mêmes conditions de température et de pression, contiennent un nombre égal de molécules", est générale et s'appuie sur des faits indéniables.

Comment l'hypothèse d'Avogadro-Ampère peut-elle être utilisée ? Elle sert bien sûr à déterminer les poids moléculaires, en lui associant la méthode des densités de vapeur déjà exploitée, mais incomplètement, par Dumas. Puisque les poids atomiques sont relatifs, il choisit de prendre un poids atomique comme unité de comparaison : le poids "d'une moitié de molécule d'hydrogène". Il n'y a pas lieu de se préoccuper, dans un premier temps, de savoir si le corps étudié est simple ou composé et quelle est sa composition ; dans tous les cas la mesure de sa densité de vapeur donne le poids moléculaire. Dans un deuxième temps, si le corps est décomposable, on pratique une analyse élémentaire pour obtenir les proportions en poids des divers éléments qu'il contient.

En proposant alors à ses étudiants d'examiner les tableaux des différents poids moléculaires obtenus par cette méthode, il les amène à constater que les quantités variées du même élément contenues dans diverses molécules sont toutes multiples entières d'une même quantité, laquelle restant toujours entière doit s'appeler raisonnablement atome.

Sur le plan épistémologique, remarquons la façon dont Cannizzaro introduit et définit le concept "d'atome" ; il ne définit pas ce concept de façon réaliste puisque l'atome ne semble avoir aucune existence ontologique, il s'agit plutôt d'un concept opératoire : l'atome est avant tout une quantité mesurable.

La méthode de détermination des poids moléculaires, et par voie de conséquence des poids atomiques, nécessite des composés volatils ; or ceux-ci ne le sont pas toujours. En revanche, la méthode des chaleurs spécifiques découverte par Dulong et Petit est utilisable pour des composés solides ; elle donne les poids atomiques d'abord et, par voie de conséquence, les poids moléculaires. Dans le cas où les deux méthodes peuvent être utilisées, elles fournissent le même résultat, ce qui renforce considérablement l'argumentation de Cannizzaro.

Toute la synthèse de Cannizzaro le "Sunto di un corso di filosofia chimica..." paraît sous la forme d'une lettre adressée au professeur S. De Luca ; elle repose sur l'acceptation claire et totale de l'hypothèse d'Avogadro-Ampère, remarquable théorie ordonnatrice qu'il a su percevoir et qui va bientôt accéder au statut de "loi".

Mais c'est surtout, comme on le sait, au premier congrès international de chimie de Karlsruhe les 3, 4, 5 septembre 1860, que Cannizzaro a la possibilité de donner à ses idées une publicité plus large. Le but de ce congrès, suscité par Kékulé et C. Weltzien, est d'essayer de mettre les chimistes d'accord sur un certain nombre de définitions des concepts d'atome, de molécule, d'équivalent, d'atomicité... Wurtz s'associe à ses collègues allemands pour l'organiser. Certains chimistes confirmés, en place dans les institutions, refusent d'y participer tels Liebig et Wölher..., à l'exception de Dumas qui va d'ailleurs jouer un rôle de frein comparativement aux jeunes chimistes fougueux et dynamiques qui ont davantage besoin de voir évoluer les choses. L'issue des débats reste ambiguë : l'assemblée des chimistes se sépare en laissant à chaque auteur la liberté d'utiliser les notations qu'il souhaite. Cependant l'ami de Cannizzaro, Angelo Pavesi, professeur de chimie à l'université de Padoue, prend l'initiative de distribuer à chaque congressiste un exemplaire du "Sunto". C'est ainsi que Lothar Meyer en reçoit un qu'il met dans sa poche pour le lire pendant le voyage de retour. Cette lecture le convertit à la nouvelle façon de voir de Cannizzaro : la chimie organique doit obéir aux mêmes lois que la chimie minérale. Lothar Meyer publie en 1864 son livre célèbre qui, reprenant les idées de Cannizzaro : "*Die modernen theorien der Chemie*" exerce une énorme influence. La prise en compte des poids atomiques de Cannizzaro permet précisément à Lothar Meyer et Mendeleïev de formuler la loi périodique à la fin de 1860. On doit d'ailleurs à Mendeleïev cette nouvelle définition, encore plus

précise, des concepts d'atome et molécule : « De même que jusqu'à Laurent et Gerhardt, on a employé les mots « molécule », « atome », les uns pour les autres, de même aujourd'hui on confond souvent les expressions de *corps simple et d'élément* ; chacune d'elles a cependant un sens bien distinct qu'il importe de préciser pour éviter les confusions dans les termes de la philosophie chimique. Un corps simple est quelque chose de matériel, métal ou métalloïde, doué de propriétés physiques et chimiques. À l'expression de *corps simple* correspond l'idée de *molécule* [...], il faut réserver au contraire le nom *d'éléments* pour caractériser les particules matérielles qui forment les corps simples et composés et qui déterminent la manière dont ils se comportent au point de vue physique et chimique. Le mot d'élément appelle l'idée *d'atome*" [42].

La confusion dans les formules disparaît peu à peu, ce qui permet, entre autres, le développement de la chimie structurale. Pourtant, en France, comme on le sait, l'adoption générale de la notation atomique n'a lieu qu'en 1893 pour l'enseignement secondaire et seulement plusieurs années après pour le supérieur, alors que les chimistes l'utilisent partout depuis longtemps pour se comprendre et faire avancer leur science. Les efforts de Cannizzaro, qui permirent de rallier une majorité de chimistes organiciens à la notation atomique, n'eurent aucune influence sur M. Berthelot (1827-1907), professeur influent de chimie organique au collège de France qui maintient, en France, jusqu'à la fin du siècle, la notation équivalentiste.

En 1877 le débat entre les atomistes et les équivalentistes est relancé à l'Académie des sciences, à propos de la dissociation des vapeurs à haute température. Ce phénomène, découvert quelque vingt ans plus tôt par H. Sainte Claire Deville, semble mettre en question l'hypothèse d'Avogadro-Ampère. La discussion s'étend rapidement à tout un ensemble de questions liées à l'atomisme.

A Paris, la notation atomique est adoptée par Wurtz, Friedel, Saler, Naquet, Schutzenberger et d'autres... tandis que la notation en équivalents est préconisée par Berthelot, Sainte Claire Deville, Troost, Lemoine, Bouchardat, etc. Berthelot reproche à son collègue Wurtz, ardent défenseur de l'atomisme de croire aux atomes comme si on pouvait les voir. Convaincu que la science peut seulement révéler des rapports entre phénomènes, Berthelot veut en rester aux équivalents qui seuls, à ses yeux, résultent de l'expérience.

Victor Grignard qui reçut le prix Nobel de chimie en 1912 rapporte qu'il lui fut impossible d'obtenir des renseignements sur la notation atomique pendant ses études. Paul Sabatier, un autre prix Nobel français critique violemment le monopole de l'enseignement des équivalents dans l'enseignement supérieur. La censure était si totale que pour institutionnaliser l'enseignement de la notation atomique, les rares défenseurs du système alternatif durent créer une école indépendante sponsorisée par les industriels parisiens et le conseil municipal de Paris : l'École de physique et de chimie industrielle de Paris ouverte en 1882. [43].

B. Le débat chez les physiciens

Tandis que les chimistes se disputent sur la nécessité d'introduire les atomes dans leur science, plusieurs physiciens de la fin du XIX^e en ont besoin comme modèle pour construire leurs théories [44].

Maxwell (1831-1879) intervient dans le développement de la théorie cinétique, peu après les premiers travaux de Clausius (1857-1858). Mais, contrairement à ce dernier, il part de l'hypothèse que les particules d'un gaz se déplacent à différentes vitesses et il calcule leur distribution statistique. Une deuxième contribution importante de son œuvre est le principe "d'équipartition de l'énergie" déjà supposé par Clausius. Ce principe fondamental de la théorie cinétique des gaz permet d'affirmer que le nombre de molécules dans un volume donné, dans les mêmes conditions de température et de pression, est toujours le même pour tous les gaz parfaits. Ainsi, l'hypothèse d'Avogadro-Ampère débattue pendant un demi-siècle dans les milieux chimistes, acquiert une confirmation rigoureuse à travers une théorie physique. De même, dans le cadre de la théorie cinétique, la molécule reçoit une définition dynamique qui permet de la distinguer de l'atome. Elle est la particule sur laquelle s'exercent les forces

intermoléculaires prises en considération dans le calcul et elle est la particule sur laquelle s'applique l'hypothèse d'Avogadro-Ampère.

W. Ostwald (1853-1932), professeur de chimie à Leipzig, obtient le prix Nobel en 1909 pour son travail sur la catalyse. Il centre son travail de recherche sur l'application de la thermodynamique à la chimie. C'est lui qui fait connaître aux chimistes l'importance des travaux de Gibbs sur la loi des phases et qui entreprend de réinterpréter toute la chimie, en termes d'énergie, à la lumière des deux principes de la thermodynamique. Dès lors, l'hypothèse atomique devient une hypothèse inutile et le concept de matière, lui-même lié à une interprétation mécaniste de la nature, lui paraît dépassé. Ce travail, qui trouve un écho en France dans l'œuvre de Pierre Duhem, repose sur une épistémologie caractéristique que Boltzmann dénonce comme attitude phénoménologique selon laquelle une théorie scientifique doit rester au plus près de la description des faits observés et minimiser le rôle des hypothèses.

Il faut toutefois signaler qu'en 1909, Ostwald renonce à son combat contre l'atomisme, considérant que les travaux de J.-J. Thomson sur l'ionisation des gaz et de Jean Perrin sur le mouvement brownien apportent une preuve expérimentale de la structure atomique de la matière.

L. Boltzmann (1844-1906) marque la science de son temps par ses travaux sur la théorie cinétique et la thermodynamique. Il enseigne entre autres la physique théorique à Munich, Vienne et Leipzig. Il est l'auteur de l'interprétation probabiliste de l'entropie qui donne la solution à la question difficile de la conciliation de la deuxième loi de la thermodynamique avec la réversibilité des équations de la mécanique.

Boltzmann, partisan de l'atomisme, et Ostwald, défenseur de l'énergétisme, s'affrontent lors du colloque de Lübeck en 1895. L'atomisme de Boltzmann est lié au finitisme mathématique, une interprétation du calcul infinitésimal, mais il reflète également une position épistémologique plus générale : selon lui il n'y a pas d'expérience pure ; les concepts et les théories sont toujours des images mentales. Par conséquent, les équations de la phénoménologie ne tirent pas moins que celles de l'atomistique leur origine des images mentales mécanisées. Boltzmann défend l'atomisme avec ardeur non parce qu'il le considère comme la seule description de l'univers, mais parce qu'il constate que les concepts mécaniques ont rendu et peuvent encore rendre un inestimable service à la science. Malgré la force des arguments et l'ardeur du combat, Boltzmann ne réussit pas à convaincre ses adversaires.

Les travaux de Jean Perrin et le développement de la physique quantique balaieront les derniers doutes sur "l'existence" des atomes mais Boltzmann n'en profitera pas, s'étant donné la mort le 5 septembre 1906.

V. Des atomes à l'atome

À la fin du XIX^{ème} siècle, un nouveau type de phénomène fait son apparition dans le laboratoire des physiciens, les rayons : 1) les rayons cathodiques, étudiés par le physicien anglais W. Crookes (1832-1919), apparaissent comme composés de projectiles électrisés négativement ; 2) les rayons X, repérés par le physicien allemand W. Roentgen (1845-1923), électriquement neutres et très pénétrants ; 3) les rayons "uraniques" émis par un sel d'uranium, découverts en 1896 par Henri Becquerel (1852-1908). Cette dernière découverte va achever de clore le débat, tant des chimistes que des physiciens, sur "l'existence" des atomes ; nous devrions dire sans abus de langage, sur l'atome en tant qu'objet scientifique utilisable.

En 1897, J.-J. Thomson (1856-1940) publie les résultats de ses expériences : 1) les rayons cathodiques sont des corpuscules chargés d'électricité négative ; 2) les corpuscules ont un rapport e/m (charge/masse) mille fois supérieur à celui d'un ion hydrogène et, en admettant que leur charge électrique est égale à une unité électrolytique, la masse de ces corpuscules est mille fois inférieure à celle d'un atome d'hydrogène ; 3) la faible masse de ces corpuscules explique la facilité avec laquelle ils peuvent pénétrer une mince feuille d'or ; 4) toutes ces propriétés étant indépendantes de la nature du matériau des électrodes et de la nature du gaz, il faut en conclure que ces particules sont les constituants universels de tous les atomes chimiques.

Le congrès international de physique de Paris en 1900 consacre l'existence de ces corpuscules subatomiques, baptisés électrons. J.-J. Thomson propose en 1903 un premier modèle de l'atome : une charge diffuse de densité de charge constante dans laquelle se meuvent les électrons sous l'effet de forces électrostatiques. Il utilise ce modèle de façon heuristique sans lui accorder de statut réaliste. En 1906, il reçoit le prix Nobel de physique, partagé avec Kaufman.

Tandis qu'il examine la phosphorescence des sels d'uranium, H. Becquerel découvre que, même dans l'obscurité, ceux-ci donnent naissance à des radiations pénétrantes qui impressionnent une plaque photographique pourtant enveloppée dans un papier noir. Cette curieuse propriété se manifeste aussi pour d'autres sels : les sels de thorium ; puis, suite aux travaux de Marie et Pierre Curie, deux nouveaux éléments radioactifs sont isolés : le polonium et le radium.

Rutherford et F. Soddy étudient alors la nature chimique de la radioactivité et arrivent à la conclusion, somme toute extraordinaire, qu'un atome radioactif quel qu'il soit peut spontanément se scinder, évacuant un fragment de lui-même, les particules α (noyaux d'hélium) et laissant comme résidu un élément tout autre. La transmutation des éléments devient réalisable en même temps que l'atome n'est plus considéré comme insécable. Il en résulte par conséquent que des atomes différents sont constitués de la même matière en différentes quantités. La matière élémentaire primordiale est donc la même dans les atomes de chaque substance. Rutherford en observant le comportement des particules α qu'il envoie sur de minces plaques métalliques exprime ainsi sa stupéfaction en découvrant l'existence du noyau atomique : « C'était le plus incroyable événement qui arrivait dans ma vie. C'était au moins aussi incroyable que si vous aviez tiré une balle de 15 inch sur un morceau de papier et qu'elle revienne vers vous pour vous tuer » [45].

En 1908, Rutherford réussit avec Geiger à déterminer le nombre d'Avogadro sur un gaz d'hélium en comptant les particules α émises à partir des scintillations provoquées sur une plaque de sulfure de zinc. En 1911, Rutherford est en mesure de proposer un nouveau modèle de l'atome. Chaque atome est malgré son extrême petitesse presque entièrement vide : toute sa charge positive et sa masse sont concentrées dans un noyau dont la taille est le 1/100000 de la taille de l'atome lui-même. Si toute la charge positive se trouve concentrée dans un noyau minuscule, où donc se situent les électrons négatifs ? Rutherford se contente de les imaginer dans une sphère négative autour du noyau.

Le physicien danois Niels Bohr (1885-1962) complète le modèle de Rutherford et donne un modèle planétaire de l'atome très célèbre, bien que très vite révisé et dépassé. Bohr améliore le modèle de Rutherford en tentant d'articuler la spécificité chimique des éléments regroupés dans le tableau de Mendeleïev avec la description du comportement des électrons qui, dans ce modèle, tournent autour du noyau.

Pour rendre compte de la relation empirique établie par Balmer en 1885 qui donne les fréquences du spectre de l'hydrogène, Bohr, en 1913, adopte le modèle planétaire de Perrin-Rutherford qu'il modifie en y introduisant la quantification du rayonnement de Plank. L'atome planétaire est instable selon la mécanique classique et doit émettre un rayonnement continu ; pour lever la difficulté, Bohr imagine alors qu'il existe des états stationnaires de l'atome où les électrons gravitent, sans rayonner, sur des orbites privilégiées, désignées par des nombres entiers n, m, \dots qui correspondent à des niveaux énergétiques E_n, E_m, \dots . Pour déterminer ces orbites, Bohr introduit une condition de quantification, en supposant que les valeurs permises de l'action des électrons, pendant une révolution, sont des multiples entiers du quantum d'action h ; l'émission (ou l'absorption) d'un rayonnement correspond à des transitions des électrons entre deux orbites, les quantités d'énergie mises en jeu sont alors quantifiées : $\Delta E = E_m - E_n$ et le rayonnement émis est monochromatique, sa fréquence ν est donnée par la relation de Plank : $\Delta E = h\nu$. Le calcul de Bohr est en accord avec la valeur expérimentale de la relation de Balmer pour le spectre de l'hydrogène.

Non seulement le modèle atomique de Bohr explique le spectre visible de l'hydrogène, mais il s'applique aussi avec succès aux spectres de rayons X de divers éléments. Quand des rayons cathodiques très rapides (des électrons) percutent une cible de métal froid, des rayons X sont émis (rayons semblables à la lumière mais avec une longueur d'onde un millier de fois plus faible). En

1914, un brillant élève de Rutherford, Henry Mosley mesure les longueurs d'onde de ces rayons X pour une série de métaux de poids atomiques croissants. Les résultats montrent un décroissement de la longueur d'onde des rayons X émis au fur et à mesure que le poids atomique des éléments augmente. Mathématiquement, il n'est pas difficile de montrer que cela constitue une preuve de la croissance régulière de la charge positive du noyau d'une unité électronique pour chaque élément successif. Les travaux de Mosley sont si fondamentaux qu'ils ont pu prédire l'existence de trois nouveaux éléments jusque là inconnus qui ont été ensuite confirmés et identifiés.

Les modifications que Bohr est amené à faire subir aux lois de la physique classique sont guidées par deux impératifs : le premier est de rendre compte des discontinuités des valeurs des fréquences du spectre en utilisant au mieux les règles de quantification du rayonnement de Plank-Einstein ; le second est une exigence de cohérence telle que les modifications qui peuvent être apportées aux lois de la physique classique doivent permettre aux nouvelles lois élaborées de retrouver les lois classiques comme cas limite : par exemple, lorsque les rayons des orbites électroniques sont grands, dans le cas limite où les électrons sont faiblement liés au noyau de l'atome, leur comportement doit être prédit de la même manière par la théorie classique et par la théorie des quanta. Bohr est amené à utiliser, en 1918, un "principe" de correspondance entre les grandeurs physiques classiques et quantiques. L'atome de Bohr ne permet pas de prévoir les transitions individuelles des électrons ; l'utilisation de ce modèle implique de recourir à une interprétation probabiliste, donc de renoncer à une interprétation déterministe.

Des historiens ont relevé que si Bohr n'a eu aucune répugnance à surmonter les contradictions d'un modèle qui, selon les circonstances, contredit la mécanique de Newton ou l'électrodynamique de Maxwell et qui introduit en physique le concept de transitions brusques, acausales, c'est sans doute qu'il était familier avec les philosophies de S. Kierkegaard et W. James. En effet, pour James, les changements dans la qualité de la conscience connaissent des haltes ou "parties substantives" et des modifications ou "parties transitives" que l'observation introspective ne peut fixer ; Kierkegaard insiste sur l'indétermination des sauts entre niveaux de conscience qui sont incompatibles entre eux et dont la description dépend du choix de l'individu.

Pour terminer, nous dirons un mot de Jean Perrin (1870-1942) qui, en 1913, rédige un ouvrage "les atomes" [46] en destination du grand public qui a, de suite, un impact considérable en France dans le débat sur l'atomisme. Jean Perrin défend une physique réaliste qui ne se contente pas d'être féconde mais qui prétend expliquer le réel. Il propose une élégante démonstration indirecte qui mobilise un large éventail de branches de la physique et de la chimie. La théorie cinétique offre plusieurs voies pour déterminer la constante d'Avogadro N, par le biais des mesures de viscosité, de l'équation de Van der Waals, du mouvement Brownien, la théorie des quanta, la théorie des électrons, la genèse et la destruction des substances radioactives. Perrin conclut que cette convergence vers une même valeur de N, aux erreurs expérimentales près, à partir d'une douzaine de méthodes expérimentales indépendantes tiendrait du miracle si les atomes et les molécules n'avaient pas une réalité objective.

Désormais les atomes ne doivent plus être considérés comme de petits édifices rigides, les "boules de billard" de Dalton du début du XIX^{ème} siècle, régis par une mécanique simple. Ils laissent entrevoir de petits mondes complexes et hiérarchisés qui obligeront les savants à inventer de nouveaux outils de pensée. Mais à partir de là, bien sûr, il s'agit d'une autre histoire.

Notes et références bibliographiques

[1] DALTON J., cité par Lucia de Brouckère in "Évolution de la pensée scientifique" Éd. Maison de la Laïcité, Bruxelles, 1980, 163.

[2] Lois expérimentales qui montrent que les quantités de bases qui saturent un même poids d'un acide quelconque saturent aussi des poids correspondant de tout acide.

[3] Lorsque deux corps se combinent, le poids de l'un est dans un rapport fixe avec le poids de l'autre.

[4] Lorsque deux corps A et B sont susceptibles de donner naissance à plusieurs corps, les divers poids du corps B qui s'unissent avec un même poids du corps A sont dans des rapports très simples, petits et entiers comme 1, 2, 3.

[5] GAY-LUSSAC J.-L., "Mémoire sur la combinaison des substances gazeuses, les unes avec les autres", Mémoires de la Société d'Arcueil, 2, 1809, 207-234.

[6] DULONG M. et PETIT, "Recherches sur quelques points importants de la théorie de la chaleur", Annales de chimie et de physique, T.10, 1819, 395-424.

[7] MITSCHERLICH E., "Sur la relation qui existe entre la forme cristalline et les proportions chimiques" Annales de chimie et de physique, 14, 1820, 172-191.

[8] " ... si, ... nous attachons au nom d'élément ou de principes des corps l'idée du dernier terme auquel parvient l'analyse, toutes les substances que nous n'avons encore pu décomposer par aucun moyen, sont pour nous des éléments ; non pas que nous puissions assurer que ces corps que nous regardons comme simples, ne soient pas eux-mêmes composés de deux ou même d'un plus grand nombre de principes, mais puisque ces principes ne se séparent jamais, ou plutôt puisque nous n'avons aucun moyen de les séparer, ils agissent à notre égard à la manière des corps simples, et nous ne devons les supposer composés qu'au moment où l'expérience et l'observation nous en auront fourni la preuve." Lavoisier A.-L., Traité élémentaire de chimie, Discours préliminaire, Tome 1, 1789, réédition fac similé, Bruxelles, Culture et Civilisation, 1965, p.XVII.

[9] DAVY H., "The bakerian lecture : on some chemical agencies of electricity", Philosophical Transaction, 97, 1807, 41.

[10] BERZELIUS J.-J., Essai sur la théorie des proportions chimiques et sur l'influence de l'électricité, 1819, Paris, 91 et 98.

[11] AMPÈRE A.-M., "Lettre de M. Ampère à M. le Comte de Berthollet, sur la détermination des proportions dans lesquelles les corps se combinent d'après le nombre et la disposition relative des molécules dont leurs particules intégrantes sont composées", Annales de chimie, 90, 1814, 43-86

[12] AVOGADRO A., Essai d'une manière de déterminer les masses relatives des molécules élémentaires des corps et les proportions selon lesquelles elles entrent dans ces combinaisons, Journal de physique, de chimie et d'histoire naturelle, 73, 1811, 58-76.

[13] Pour une étude plus complète, on peut consulter : M. Scheidecker-Chevallier, R. Locqueneux, "La théorie de la combinaison chimique d'A.-M Ampère", Revue d'histoire des sciences, XLVII/3-4, 1994, 309-352 ; M. Scheidecker-Chevallier, "L'hypothèse d'Avogadro (1811) et d'Ampère (1814) : La distinction atome/molécule et la théorie de la combinaison chimique", Revue d'histoire des sciences, 1997,50/1-2,159-194.

[14] AMPÈRE A.-M., "Lettre à Berthollet...", loc.cit.,155.

[15] *Ibid*,56.

[16] Pour une étude plus détaillée du travail de Dumas, on peut consulter : M. Scheidecker-Chevallier, "Impact des idées d'Ampère en chimie sur J.-B. Dumas et M.-A. Gaudin", Science et Technique en perspective, 1997, II^e série, 1,fas. 2, 283-307.

[17] DUMAS J.-B. "Traité de chimie appliquée aux Arts", 8 volumes, Paris-Bechel, 1828, Vol.1, Introduction, xxxv.

[18] *Ibid*, xxxiv.

[19] DUMAS J.-B., "Mémoire sur quelques points de la théorie atomistique", Annales de chimie et de physique, 33, 1826, 337-391, 338.

[20] *Ibid*, 339.

[21] Gay-Lussac dès 1816, en se servant de la dénomination "volume" de préférence à celle "d'atome", spécifiait pour les formules de l'eau HO_{1/2}, de l'ammoniac NH₃, de l'acide sulfurique SO_{3/2} ce qui rendait acceptable la présence de fractions dans les formules.

[22] DUMAS J.-B. "Sur la densité de la vapeur du phosphore" Annales de chimie et de physique, 49,1832, 210-214, 214.

[23] DUMAS J.-B., Leçons sur la philosophie chimique, 1837, Paris ; Éd. Culture et civilisation, Bruxelles, 1972, 249.

- [24] Pour plus de précisions sur le travail de Gaudin, on peut consulter : M. Scheidecker-Chevallier, "La chimie géométrique d'A.-M. Ampère et M.-A. Gaudin", L'Actualité Chimique, Juin 1999, p.34-39.
- [25] GAUDIN M.-A., "Recherche sur la structure intime des corps inorganiques définis...", Annales de chimie et physique, 52, 1833, 113-133, 116.
- [26] *Ibid*, 115-116.
- [27] *Ibid*, 121.
- [28] *Ibid*, 121.
- [29] GAUDIN M.-A., *L'Architecture du monde des atomes*, 1873, Paris, Éd. Gauthier-Villars.
- [30] L'isomorphisme montrant que "le nombre et l'arrangement des éléments d'un système moléculaire sont indépendants de la nature de ces éléments".
- [31] L'isomérisation où : "un nombre déterminé d'atomes se groupent de différentes manières (de façon que les corps) possédant une composition chimique identique jouissent de propriétés physiques et chimiques différentes".
- [32] Le polymorphisme ou allotropie, sorte : "d'isomérisation considérée chez les corps simples" ; par exemple : l'oxygène O₂ et l'ozone O₃.
- [33] L'anecdote est connue : Lors d'une soirée aux Tuileries, dans les années 1830, les chandelles dégageaient une fumée particulièrement irritante ; Dumas, chargé d'étudier le phénomène, montre que les vapeurs incriminées sont de l'acide chlorhydrique qui provient du remplacement, lors du blanchiment de la cire au chlore, des atomes d'hydrogène de la cire par des atomes de chlore.
- [34] Dumas cité par A. Laurent, *Méthode de chimie*, 1854, Paris, Éd. Mallet-Bachelier, 242-243.
- [35] LAURENT A., "Théorie des combinaisons organiques", Annales de chimie et de physique, 61, 1836, 125-146, 126.
- [36] Laurent cité par J. Jacques dans "La thèse de doctorat d'Auguste Laurent et la théorie des combinaisons organiques", Bulletin de la Société Chimique de France, 5e série, 1954, D.31-D.38, D38.
- [37] LAURENT A., *Méthode de chimie*, *Loc. cit.*, 239.
- [38] BLONDEL-NÉGRÉLIS, *Dire les choses : Auguste Laurent et la méthode chimique*, Paris, 1996, Éd. J. Vrin, 189.
- [39] LAURENT A., "Suite des recherches diverses en chimie organique", Annales de chimie et de physique, 66, 1837, 314-336, 335.
- [40] Pour plus de précisions à ce sujet, on peut consulter : M. Scheidecker-Chevallier, "Baudrimont, Gaudin, Laurent et l'approche structurale de la chimie", Revue d'histoire des sciences, 53/1, 2000, 133-167.
- [41] WURTZ A., "Histoire des doctrines chimiques depuis Lavoisier", Dictionnaire de chimie pure et appliquée, Vol.1, 1870, Hachette, Paris, xciii.
- [42] MENDELEËV D., "La loi périodique des éléments chimiques"(1871), Le Moniteur scientifique, traduction française, 21, 1879, 691-737, 693.
- [43] Pour des précisions sur ce sujet, on peut consulter : T. Shinn, "The French Science Faculty System, 1808-1914 : Institutional Change and Research Potential in Mathematics and the Physical Sciences", Historical studies in the Physical Sciences, Vol.10, 1979, 271-332.
- [44] Pour la fin de notre exposé qui traite de questions particulièrement bien connues, nous renvoyons le lecteur intéressé aux ouvrages de base, entre autres : BENSAUDE-VINCENT B., STENGERS I., *Histoire de la chimie*, 1993, Paris : Éd. La découverte ; LOCQUENEUX R., *Histoire de la physique, Que sais-je ?*, 1987, Éd: PUF ; BENSAUDE-VINCENT B. et KOUNÉLIS C., *Les atomes, une anthologie historique*, 1991, Press pocket, Agora ; PULLMAN B., *L'atome dans l'histoire de la pensée humaine*, 1995, Paris, Éd : Fayard.
- [45] RUTHERFORD, cité par Joan Solomon in *The structure of matter*, 1973, d : David and Charles, Newton Abbot, Great Britain, 99.
- [46] PERRIN J., *Les atomes* (1913), réédition Gallimard, collection Idées, 1970.

Regards croisés de l'histoire des sciences et de la didactique de la physique sur le concept d'onde

Laurence Maurines,
maître de conférences, IUFM de Créteil
Arnaud Mayrargue,
professeur, IUFM de Créteil

I. Introduction

Après Bachelard (1938), Halbwachs (1974), Piaget et Garcia (1983), de nombreux chercheurs en didactique de la physique font, depuis plusieurs années, un parallèle entre les conceptions et modes de raisonnement utilisés de nos jours par les élèves et une théorie d'une époque historique particulière : en mécanique (Saltiel, 1979, 1987 ; Viennot, 1979 ; Saltiel et Viennot, 1984), en électricité (Benseghir, 1989), en optique géométrique (Galili, 1996), en thermodynamique (Agabra, 1986), dans le domaine des ondes (Maurines, 2001). S'il n'y a aucun sens à chercher un parallèle strict de ce type en raison de la différence des contextes matériels et culturels (on constate non seulement l'existence de similitudes mais aussi de divergences) et d'affirmer que la pensée des élèves évolue en suivant un cheminement historique, il est cependant possible de faire un parallèle d'un autre type. Il s'agit de dégager des difficultés récurrentes, des "*constantes*" pour reprendre un terme de Saltiel (1987), et de montrer qu'aujourd'hui, lors de l'apprentissage d'un domaine particulier, les élèves butent sur des obstacles analogues à ceux rencontrés autrefois par les scientifiques lors de l'élaboration de la physique de ce domaine.

C'est sur l'exemple particulier du concept d'onde que nous allons illustrer ce parallèle. Dans un premier temps, nous présenterons brièvement le pourquoi des études sur les conceptions et modes de raisonnement des élèves, et rapprocherons certaines de leurs caractéristiques des obstacles épistémologiques dégagés par Bachelard lors de son analyse de la transition entre les périodes préscientifique et scientifique. Dans un deuxième temps, nous illustrerons quelques caractéristiques des conceptions et modes de raisonnement des élèves à l'aide de résultats de recherche portant sur la propagation des signaux sur une corde et de signaux sonores. Dans un troisième temps, nous montrerons que celles-ci se retrouvent dans certaines théories du son et de la lumière utilisées autrefois. Nous les détaillerons en particulier à propos du phénomène d'aberration des étoiles. Pour terminer, nous analyserons les ressemblances et différences existant entre les modes de raisonnement utilisés par les élèves et ceux utilisés par nos prédécesseurs. Dans le travail effectué en atelier, nous avons montré comment la connaissance de ce parallèle peut guider l'utilisation de textes historiques en classe.

II. Modes de raisonnement communs et obstacles épistémologiques

Les didacticiens s'accordent actuellement sur une vision socio-constructiviste de l'apprentissage. Pour eux, l'appropriation d'un savoir nouveau ne résulte pas d'une simple transmission de l'enseignant à l'élève. Celui-ci n'est pas un réceptacle dans lequel on déverse des connaissances : il les construit avec celles qu'il possède déjà, en interaction avec son environnement social.

Cette vision de l'apprentissage a conduit les didacticiens à étudier les idées préalables des élèves dans des domaines spécifiques de la physique. Ils ont alors constaté que :

– beaucoup d'élèves expriment des idées identiques à propos d'une même situation et que certaines idées se manifestent dans davantage de situations que d'autres du domaine considéré. Elles traduisent

l'existence de structures cognitives permettant de donner sens aux informations glanées et éventuellement de fédérer de nouvelles données, les "conceptions".

– des procédures mentales identiques se manifestent de manière transversale à différents domaines de la physique et apparaissent comme des structures plus profondes de la pensée, les "modes de raisonnement".

– cette connaissance "commune" (car partagée à un degré divers par tout le monde) ou "spontanée" (car non apprise en tant que telle) est individuelle, implicite, partiellement structurée et cohérente. Presque jamais conforme à la science enseignée, elle gêne l'accès à la connaissance scientifique et se révèle sur certains points très résistante à l'enseignement. On peut même la retrouver chez des experts.

Les historiens des sciences nous apprennent que la physique est une construction intellectuelle élaborée en réponse à des questions posées par les scientifiques dans le but d'interpréter et de prédire les phénomènes du monde empirique, c'est-à-dire obtenus lors d'observation ou d'expérimentation. Elle se distingue de la connaissance commune en ce qu'elle est explicitée et partagée par une communauté, qu'elle est constituée d'ensembles totalement structurés de concepts, lois et principes : les théories et modèles. Ceux-ci doivent être interprétés sur le plan formel et ne doivent pas être considérés comme la copie d'une situation donnée. Les théories et modèles, représentations hypothétiques du monde empirique, sont provisoires. Des difficultés ont été franchies grâce à des questions nouvelles qui ont conduit à des changements de perspective. Certaines de ces difficultés, qualifiées par Bachelard d'obstacles épistémologiques car provenant de "*l'acte même de connaître*" (Bachelard, 1938), se manifestent fréquemment dans les idées des élèves et étudiants. Il en est ainsi :

– de *l'expérience première* (la première expérience sensible non questionnée) et de *l'obstacle réaliste* (le modèle "colle" à la réalité si bien qu'il n'y a pas à la comprendre, il faut seulement la voir). Beaucoup de recherches en didactique soulignent ainsi "*le primat de la perception sur la conceptualisation*" (Astolfi et Peterfalvi, 1993) ou "*la prédominance de l'intuition sensible*" (Ballini et al, 1997), "*la vision empiriste de la science*" (Guilbert et Meloche, 1993) ou le "*mythe naturaliste*" (Johsua, 1989).

– de *l'obstacle substantialiste* (approche réductrice qui conduit à faire intervenir une substance enfermée dans l'objet et à tout expliquer grâce à elle). C'est ainsi que Viennot note que "*l'idée centrale qui oriente le raisonnement commun est celle d'objet quasi-matériel doué de propriétés intrinsèques*" (1996). De même, pour Resnick (1989), c'est la présupposition matérialiste "*qui amène à supposer que tous les phénomènes physiques doivent être expliqués en fonction des comportements et des propriétés des substances matérielles... C'est à travers les conceptions qu'ont les élèves de la lumière, de l'électricité, de la chaleur et de la température, que la présupposition matérialiste se manifeste le plus souvent*".

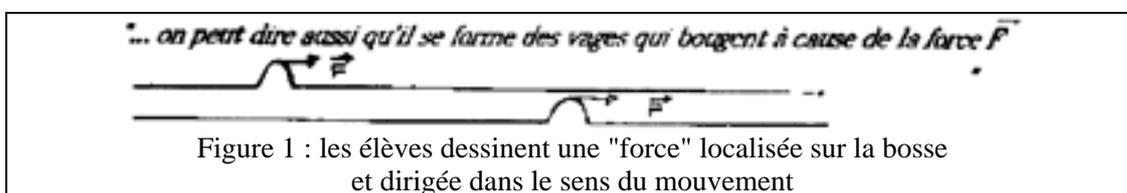
III. L'obstacle substantialiste dans le raisonnement des élèves

Bien que tous ces obstacles se manifestent dans le domaine des ondes, nous ne nous intéresserons pour des raisons de temps qu'à un seul d'entre eux : l'obstacle substantialiste. Nous allons tout d'abord montrer que, pour expliquer la propagation d'un signal, les élèves et étudiants se centrent sur le signal en déplacement et le traitent comme un objet matériel mis en mouvement par la source qui l'a créé, et qu'une seule notion, concept hybride et rassembleur de grandeurs physiques, permet de rendre compte de cette "mécanique spontanée du signal". Nous analyserons ensuite ce qu'il en découle pour le milieu de propagation. Nous illustrerons ces points à l'aide de résultats de recherche portant sur la propagation d'un signal sur une corde ou d'un son dans l'air. Les élèves et étudiants ont été interrogés à l'aide de questionnaires. Ceux interrogés avant enseignement sur les ondes étaient âgés de 15 à 17 ans, ceux interrogés après enseignement de 17 à 20 ans. Pour plus de détails sur ces recherches, le lecteur pourra se référer à Maurines et Saltiel (1988) et Maurines (1991, 1998).

A. Le capital, concept hybride, support du raisonnement des étudiants

Pour introduire ce capital, nous allons présenter les résultats de questions portant sur la vitesse de propagation d'un signal sur une corde. Des questions identiques ont été posées pour la propagation d'un son dans l'air et ont obtenu des résultats similaires.

Lorsqu'on demande aux élèves et étudiants s'il y a un moyen de bouger la main qui tient l'extrémité d'une corde allongée sur le sol pour qu'un point de la corde bouge plus tôt, 60% des élèves interrogés avant enseignement sur les ondes (N=42) et 75% après (N=16), répondent positivement. Alors que la vitesse de propagation d'un signal sur une corde ne dépend que du milieu, elle dépend pour ces élèves de la force exercée par la main pour créer le signal. Plus cette force est grande, plus la vitesse l'est : *"la bosse se déplacera de plus en plus vite, si le geste est vif"*, *"la vitesse dépend de la force avec laquelle il a bougé la main"*. De plus, tout semble se passer comme si la force exercée au départ par la main restait attachée au signal et se déplaçait avec lui : *"si l'intensité de la force propagée est plus forte alors la bosse aussi se répandra plus vite"*. Certains schémas (figure 1), fournis en plus des explications, renforcent cette hypothèse. La force qui y est représentée est localisée sur la "bosse", c'est-à-dire sur le signal (et non sur un élément quelconque du milieu). Elle a pour direction celui du mouvement de propagation (et non celui de la tangente à la corde).



Lorsqu'on demande aux élèves et étudiants si des signaux de formes différentes se propagent avec la même vitesse sur la corde, 87% des élèves interrogés avant enseignement (N=93) et 41% après (N=27) répondent que les différents signaux peuvent se propager avec des vitesses différentes. Les justifications montrent que la force communiquée par la source au signal peut être déduite de la forme du signal, plus précisément de son amplitude. Plus l'amplitude du signal est grande, plus cette force est grande et plus la vitesse de propagation l'est : *"la C va le plus vite car la force fournie par le bras de l'enfant modifie la forme de la bosse et la vitesse. Donc plus la force est intense, plus la forme de la bosse sera grande et plus la vitesse sera grande"*, *"cela dépend de la force avec laquelle le mouvement a été fait. Cela se voit selon la grandeur de la bosse. Elle est le reflet de cette force engagée par l'enfant pour arriver à ce résultat..."*.

Lorsqu'on demande aux élèves si la vitesse de propagation d'une bosse qui disparaît avant d'atteindre l'autre extrémité de la corde est constante ou non au cours du temps, 68% des élèves interrogés avant enseignement (N=56) et 55% après (N=42) répondent qu'elle diminue. Pour eux, une diminution d'amplitude indique une diminution de la force communiquée au signal et donc une diminution de la vitesse de propagation : *"la hauteur faiblit car l'action de la main s'atténue"*, *"si la bosse disparaît, c'est que la force qui la faisait disparaît. Pendant ce temps, la vitesse diminue"*.

Ces résultats montrent donc que, pour les élèves, la source semble communiquer quelque chose à la corde lors de la création du signal, quelque chose qui se déplace et reste localisée dans le signal, quelque chose qui détermine l'amplitude du signal et qui peut changer au cours de la propagation. Les élèves l'appellent le plus souvent "force" mais c'est en réalité un concept hybride, mélange de force, d'énergie, de vitesse... Nous avons appelé ce concept hybride CAPITAL car il a de nombreux points communs avec le capital de force introduit par Viennot (1979) pour interpréter les réponses d'étudiants en dynamique élémentaire. Le tableau 1 montre la similitude existant entre les arguments donnés par les élèves et les étudiants pour la propagation d'un signal sur une corde ou d'un son dans l'air, et ceux donnés pour le mouvement d'un objet matériel lancé à la main.

Signaux sur une corde (Maurines et Saltiel, 1988)	Signaux sonores (Maurines, 1998)	Objets (Viennot, 1979)
<i>"si les enfants peuvent donner la même force au départ, alors les formes auront la même vitesse"</i>	<i>"les puissantes ondes de Pierre sont plus rapides que celles de Jean"</i>	<i>"on lui a donné un certain mouvement, une certaine vitesse"</i>
<i>"la vitesse diminue car la force que la main a fournie s'atténue"</i>	<i>"le bruit perd de son intensité et il va moins vite"</i>	<i>"la force que lui a imprimée le bonhomme diminue de plus en plus"</i>
<i>"on ne donne pas tout le temps une impulsion à la bosse pour qu'elle avance"</i>	<i>"le son s'atténue de plus en plus et va donc plus lentement..."</i>	<i>"si une balle continue de monter après qu'on l'a lancé, c'est qu'elle a de la force vers le haut"</i>

Tableau 1 : arguments donnés par les élèves et les étudiants pour expliquer le mouvement d'un objet matériel ou la propagation d'un signal

B. Conséquences d'un raisonnement en terme de capital

Nous allons à présent montrer qu'un raisonnement en terme de capital conduit les élèves et étudiants non seulement à appliquer au signal une "mécanique" de l'objet matériel, mais aussi à lui attribuer certaines caractéristiques d'un objet.

À une question demandant de tracer au même instant deux signaux se propageant sur deux cordes différentes et obtenus par des mouvements de mains identiques, 60% des 80 étudiants interrogés après enseignement représentent des signaux de largeurs identiques alors qu'elles devraient être différentes car la largeur d'un signal ($L=VT$) dépend non seulement de la source (par T) mais aussi du milieu de propagation (par V) : *"largeurs identiques si on donne exactement la même impulsion à C_1 et C_2 ", " $C_1=C_2$, la largeur de la bosse dépend de la durée de l'ébranlement initial"*.

À une question demandant de comparer, dans la même situation, la durée du mouvement de deux repère situés sur chacune des cordes, à même distance des extrémités, 48% des 46 étudiants interrogés après enseignement disent que les durées sont différentes alors qu'elles sont identiques, les mouvements de main l'étant. Pour eux, le repère se trouvant sur la corde de plus grande vitesse de propagation bouge moins longtemps. Les justifications montrent un lien non pertinent entre la vitesse de propagation du signal et la vitesse d'un point du milieu : *"la durée du mouvement de R_1 est plus grande que celle de R_2 , car l'amplitude est la même, mais la vitesse de l'onde en R_2 est plus grande qu'en R_1 "*.

Pour les élèves, un signal est donc caractérisé par une grandeur spatiale (sa largeur) et non temporelle (la durée du mouvement d'un point du milieu). Tout comme la forme d'un objet matériel est indépendante de sa vitesse de déplacement, la largeur d'un signal est indépendante de la vitesse de propagation. Tout comme la durée d'observation d'une voiture en un point de l'espace dépend de sa vitesse de déplacement, la durée du mouvement d'un point du milieu dépend de la vitesse de propagation du signal.

Ce raisonnement mono-notionnel en terme d'objet que l'on suit entraîne que le milieu de propagation est un support passif. Le mouvement d'un point du milieu ne résulte pas d'une interaction avec les points voisins du milieu ayant son origine dans le champ de forces interne au milieu mais de l'existence d'un capital communiqué par la source à ce milieu. Dans le cas du son, le milieu peut même être perçu comme un obstacle à la propagation et comme inutile.

Ainsi, à une question demandant si un son émis par un haut parleur fixé à l'extrémité de quatre tubes de même longueur et constitué de milieux différents (air, eau, acier, "vide") peut être enregistré par le microphone se trouvant à l'autre extrémité, 44% des 108 élèves interrogés avant enseignement répondent qu'un son peut se propager dans le vide : *"oui, le son ne rencontre aucune opposition"*.

Dans les trois autres cas, le pourcentage de réponses indiquant que la propagation est possible diminue avec la densité du milieu (91% des 108 élèves pensent qu'un son peut se propager dans l'air, contre 73% dans l'eau et 30% dans l'acier) : *"oui, sauf l'acier plein parce que le son ne pourra pas traverser le tube plein pour être enregistré", "oui, pour l'air et le vide, car il n'y a pas la présence d'isolant comme l'eau"*. Cette tendance à considérer que la propagation est d'autant plus difficile que le

milieu est dense se manifeste également sur les résultats à une question demandant si le son émis par le haut-parleur se propage avec la même vitesse dans les quatre tubes. Pour 35% des 108 élèves, la vitesse de propagation diminue avec la densité du milieu : *"cela prendra plus de temps pour le tube d'acier que pour le tube où le vide a été fait"*, *"un tube peut être rempli et l'autre pas. Dans ce cas, le son ira plus vite. D'où le classement : vide, air, eau, acier"*.

Parallèlement à cette conception du milieu, on en rencontre une autre dans laquelle la propagation d'un signal s'accompagne d'un déplacement de matière à grande échelle. Celui-ci peut correspondre à un déplacement du milieu lui-même si celui-ci est fluide ("un vent", "un courant") ou de particules qu'il contient. C'est la raison pour laquelle 45% des 108 élèves interrogés avant enseignement répondent que la propagation d'un son est impossible dans le vide (*"non, il n'y a rien dans le tube"*, *"non il n'y a pas de courant pour porter le son"*) et 61% dans l'acier (*"rien ne peut conduire le son"*, *"il reste immobile"*). De même, pour certains d'entre eux, la propagation est possible dans l'eau car *"il y a de l'oxygène"*.

Si ces conceptions erronées sur le rôle du milieu diminuent fortement après enseignement, on les rencontre encore. C'est ainsi que, pour certains élèves, un son se propage dans l'eau *"car le courant et l'air de l'eau portent le son jusqu'au micro"* et ne peut se propager dans l'acier *"car le son ne peut pas traverser l'acier"*. Il est cependant à noter l'apparition d'un autre type de justifications. Si l'essentiel des arguments invoqués par les élèves avant enseignement portent sur le niveau macroscopique, une partie des arguments utilisés par les élèves après enseignement portent sur le niveau microscopique, c'est-à-dire sur les molécules du milieu de propagation. C'est ainsi que pour certains élèves, un son ne se propage pas dans le vide et l'acier car *"le son se propage uniquement dans des milieux où les molécules peuvent bouger. Dans le vide, il n'y a pas de molécules et dans l'acier, les molécules sont fixes"*. De même, pour certains, la vitesse du son dépend du milieu car *"il est freiné par les collisions avec les plus ou moins nombreuses molécules du milieu"*, *"les molécules d'air sont beaucoup plus souples que celles de l'eau"*.

C. Conclusion

Terminons cette présentation du raisonnement des étudiants en disant que la conception substantialiste de l'onde se retrouve dans nombre d'études portant sur la lumière, par exemple dans celles de Fawaz et Viennot (1986), de Kaminsky (1989) portant sur la formation des images en optique géométrique. Nous ne citerons ici que celle réalisée par Lefèvre (1988) auprès de 176 étudiants en première année d'université scientifique. Pour 30% d'entre eux, *"le fond des mers est sombre car la lumière solaire pénètre à la surface, ralentit et finit par s'arrêter à une certaine profondeur"*. Pour 61% d'entre eux la grandeur qui se conserve lors de la transmission de la lumière d'un milieu à un autre est la longueur d'onde et non la fréquence. A l'occasion d'interviews, certains disent que la lumière se propage d'autant moins vite que le milieu matériel est dense : *"ça va moins vite quand il y a plus d'obstacles. Dans le vide, ça va plus vite. Dans l'air, un peu moins vite. Dans les liquides, encore un peu moins"*.

IV. L'obstacle substantialiste dans l'histoire de la physique des ondes

Il n'est pas question dans cette partie de faire une étude exhaustive de cette question. Nous montrerons uniquement sur deux points que, dans les idées avancées autrefois par certains scientifiques, on retrouve cette tendance vers des raisonnements mécanistes. Nous commencerons par quelques éléments concernant le son puis continuerons en montrant comment le phénomène d'aberration des étoiles a mis en défaut ce type de raisonnement. Pour plus de détails, le lecteur pourra se référer, par exemple, à Lindsay (1972) pour l'histoire du son et à Ronchi (1956) pour l'histoire de la lumière.

A. Le son

La conception ondulatoire du son est définitivement admise lorsque Boyle en 1660 réalise l'expérience de la cloche à vide avec un vide suffisant.

Auparavant, une conception corpusculaire du son était encore en vogue. C'est ainsi que :

– Gassendi (1592-1655) pense qu'un son correspond à un jet de petites particules invisibles émises par les sources sonores et que la vitesse du son est égale à la vitesse de ces particules, sa fréquence étant égale au nombre de particules émises par unité de temps.

– Von Guericke (1602-1686) et Kircher (1600-1680) pensent qu'un son peut se propager dans le vide car les expériences de la cloche à vide qu'ils ont réalisées avant Boyle étaient imparfaites.

Une fois la nature ondulatoire du son admise, la question qui intéresse les scientifiques est celle de la dynamique à laquelle obéit la propagation du son.

La dynamique proposée par certains d'entre eux présentent des points communs avec la dynamique de l'objet. C'est ainsi que Newton, dans la première théorie de la propagation du son (1687), fait un bilan de forces, non pas sur un élément infinitésimal du milieu matériel, mais sur un élément du signal lui-même, comme par exemple le cône tronqué $degf$ de la figure 2 : *"Let the cone APQ be divided into frustums by the transverse planes de, fg, hi. Then, while the ABC, propagating the pressure, urges the conic frustum degf beyond it on the superficies de, and this frustum urges the next frustum fgih on the superficies fh and that frustum urges, and so in infinitum..."*

D'autres, en revanche, montrent que la vitesse du son a des propriétés très différentes de celles d'un solide. Gassendi (1635), Mersenne (1644) et Derham (1708) mesurent la vitesse du son et montrent qu'elle est indépendante de son intensité, de sa fréquence et de sa diminution d'intensité. Poisson, dans son mémoire sur la théorie du son (1808) rappelle qu'Euler a modélisé la propagation du son sur une ligne et a montré que *"la vitesse du son est indépendante de la vitesse des molécules d'air et donc de la cause qui a produit le son"*.

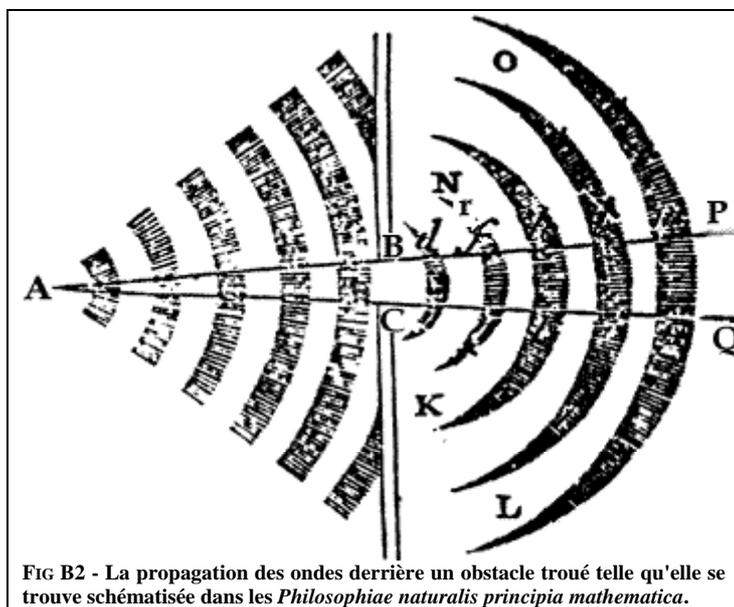


FIG B2 - La propagation des ondes derrière un obstacle troué telle qu'elle se trouve schématisée dans les *Philosophiae naturalis principia mathematica*.

Figure 2 (tirée de Linsay, 1972, p.76)

B. La lumière et le phénomène d'aberration des étoiles

1. Introduction

L'étude du phénomène d'aberration des étoiles fait appel à différents domaines des sciences : astronomie, mécanique, optique, mathématiques. Ce phénomène, découvert au dix-huitième siècle, est important pour notre propos, parce qu'il a eu au moins deux conséquences :

– à la fois confirmer et infirmer la théorie de la lumière avancée par Newton au dix-septième siècle. Celle-ci suppose que la lumière est constituée de corpuscules de lumière qui se déplacent avec une vitesse finie, et interagissent avec la matière par l'intermédiaire d'une force d'origine gravitationnelle, dont la valeur dépend de leur nature et de leur vitesse. Ainsi, dans le cas du phénomène de réfraction, observé lorsque la lumière traverse une lame de verre, il suffit, selon Newton, d'admettre qu'une force s'exerce perpendiculairement à la surface séparant les deux milieux pour expliquer les changements de direction des rayons lumineux. Lorsque le rayon lumineux « passe » de l'air dans le verre, tout se passe, selon Newton, comme si la force agissait vers le bas ; dans le second cas, c'est l'inverse (voir la figure 3)

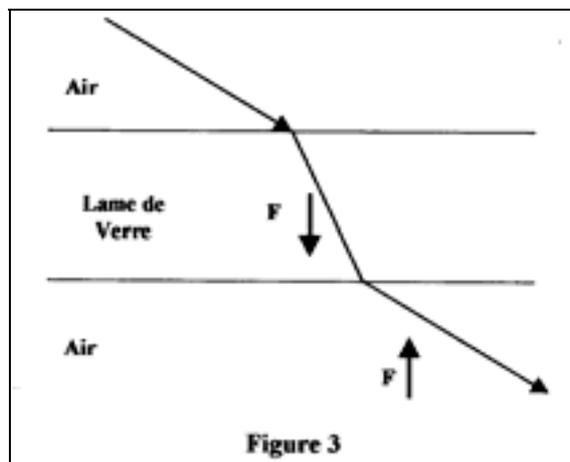


Figure 3

– contribuer, au début du 19^{ème} siècle, à l'adoption d'une théorie ondulatoire de la lumière. Celle-ci, élaborée dès le 17^{ème} siècle par Huygens, laisse supposer que la lumière se meut sans transport de matière à grande échelle, telle une onde dans un milieu homogène. Ce milieu matériel subtil, c'est l'éther optique.

Dans ce qui suit, nous allons rappeler aussi rapidement que possible ce qu'est le phénomène d'aberration des étoiles et présenter les problèmes soulevés par l'interprétation de ce phénomène dans chacune des deux théories (corpusculaire et ondulatoire). Nous verrons qu'avec l'adoption de la théorie ondulatoire de la lumière va se faire sentir la nécessité d'élaborer une théorie de l'éther, et de sa structure, qui puisse rendre compte de nombreux phénomènes optiques, notamment de la double réfraction et de la polarisation de la lumière. Nous montrerons également que les scientifiques ont eu fréquemment recours à des analogies.

2. La bonne étoile de James Bradley

Transportons-nous par la pensée en Angleterre au début du 18^{ème} siècle, et voyons ce qui préoccupe les astronomes anglais. Depuis un siècle environ, on sait, après Képler, selon quelles lois les planètes parcourent leurs orbites autour du soleil. Galilée, Huygens et Cassini ont découvert les satellites de Jupiter et de Saturne avec ses anneaux étonnants. Newton enfin a fourni une loi du mouvement qui permet de décrire le système solaire.

Ce qui préoccupe maintenant les anglais, c'est de dresser une carte précise du ciel en déterminant l'emplacement des étoiles, grâce à tous les outils dont ils disposent - la lunette astronomique, le télescope ou l'oculaire de Huygens. Et même, si cela est possible, d'être suffisamment précis pour détecter d'éventuelles variations de ces emplacements, c'est-à-dire pour mettre en évidence l'existence de parallaxes annuelles.

La détermination de ces parallaxes était très intéressante, puisqu'elle devait permettre d'évaluer les distances interstellaires. Mais il existait un autre intérêt à cela, beaucoup moins "technique" celui-là, et finalement plus essentiel : la parallaxe devait confirmer définitivement la théorie héliocentrique de Copernic.

Alors, concrètement, comment procédait-on pour mesurer cette parallaxe ?

Soient E, S, T, respectivement une étoile, le Soleil et la Terre ; α l'angle que font ET et ES (voir la figure 4).

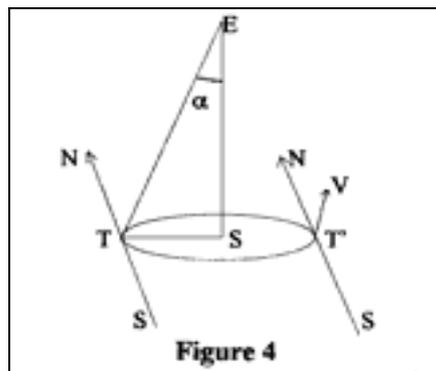


Figure 4

Il s'agissait de mesurer la valeur de l'angle α , qui représente la parallaxe, où T et T' sont les positions que la Terre occupe à six mois d'intervalle. La connaissance de l'angle α permettait de connaître la distance SE de l'étoile, puisque $SE = a/\tan \alpha$, où a est la distance de la Terre au Soleil.

Bradley entreprend des observations pour détecter une éventuelle parallaxe et s'aperçoit très rapidement d'un problème important. Il existe bien un déplacement de l'étoile observée, mais pas dans la direction attendue lorsqu'on ne fait intervenir, comme c'était le cas, que les relations spatiales. Dans ce cadre, l'étoile devrait en effet se déplacer dans une direction contenue dans le plan TSE. Or, l'étoile paraît se déplacer dans le plan perpendiculaire au plan TSE.

Après bien d'autres observations et tentatives d'interprétation, Bradley décide de prendre en compte un résultat que Roemer avait donné cinquante auparavant, mais qui n'était encore que peu accepté par les scientifiques, à savoir que la vitesse de la lumière était finie. Ce véritable changement de point de vue lui permet alors de parvenir à donner une explication du phénomène observé :

"Le mouvement était dû au mouvement progressif de la Lumière et au mouvement annuel de la terre sur son orbite."

Ce qui signifie que cet effet, appelé aberration des étoiles, s'obtient en faisant ce que nous appelons aujourd'hui la composition vectorielle de la vitesse « c » de la lumière issue des étoiles avec la vitesse « v » de la Terre sur son orbite autour du Soleil. L'écart résultant se situe bien dans un plan perpendiculaire au plan TSE de la parallaxe (voir la figure 5).

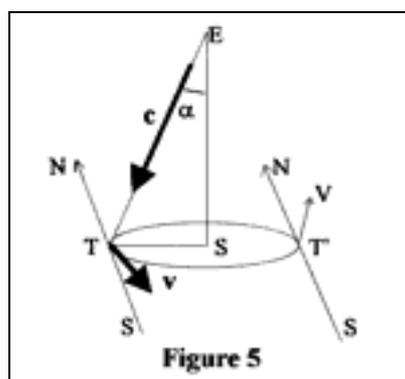


Figure 5

Bradley parvient à un second résultat qui va se révéler avoir des conséquences très importantes en optique. Il s'aperçoit que l'angle d'aberration (voir la figure 6) de toutes les étoiles qu'il observe, a la même valeur θ . Pour interpréter cette observation, il procède de la manière suivante : si l'observateur est au repos en A, l'étoile observée E apparaît dans la direction AE. Si l'observateur est en mouvement

de B vers A, puisque le mouvement de la lumière est progressif, et si par exemple il regarde au travers d'un "tube", il doit l'incliner dans la direction BE pour observer l'étoile. Comme, en regardant la figure, nous pouvons remarquer que cet angle θ ne dépend que de la vitesse "c" de la lumière issue des étoiles et de la vitesse "v" de la Terre sur son orbite, il en déduit, puisque "v" est constante, que la vitesse de la lumière issue des étoiles est constante, c'est-à-dire indépendante de l'étoile. C'est un résultat surprenant, puisque la théorie newtonienne de la lumière prévoit au contraire « que les rayons lancés au dehors par les vibrations des corps lumineux, étant à peine sortis de sa sphère d'attraction, sont poussés en avant » [42, p. 339] avec une certaine vitesse, selon cette théorie ; la valeur de cette dernière devrait donc dépendre de l'attraction gravitationnelle plus ou moins grande exercée par l'étoile sur les corpuscules de lumière.

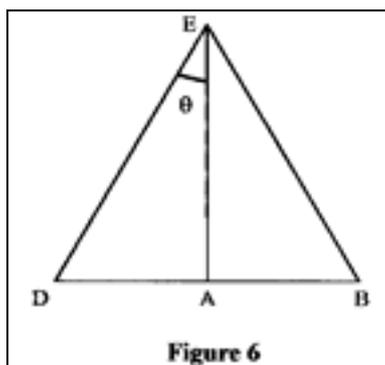


Figure 6

Bradley a ainsi pu donner une explication du phénomène d'aberration des étoiles en se plaçant dans le cadre de la théorie newtonienne de la lumière. Ce résultat a donc contribué à conforter cette dernière. Mais dans le même temps, il a trouvé un second résultat pour le moins étonnant, et en contradiction avec cette même théorie : la vitesse de la lumière est la même pour toutes les étoiles. Ces résultats vont évidemment avoir des conséquences sur le mouvement des idées en optique.

3. Le dilemme d'Arago

Le résultat de Bradley sur l'aberration des étoiles va, dans un premier temps - au 18^{ème} siècle - conforter, s'il en était besoin, la théorie newtonienne de la lumière. Les quelques irréductibles qui n'avaient pas été convaincus par les résultats de Roemer sur la vitesse de la lumière, c'est-à-dire essentiellement les cartésiens, sont définitivement convaincus du bien-fondé du cadre newtonien. Ils n'ont plus l'argument qu'utilisait Descartes pour rejeter l'idée de propagation non-instantanée de la lumière : celui-ci s'appuyait précisément sur le fait que jamais on n'avait observé un mouvement apparent des étoiles.

Ce mouvement apparent des étoiles fixes, repéré par Bradley, a également pour conséquence de permettre l'adoption définitive de la théorie de Copernic.

Restent en suspens les problèmes soulevés par le second résultat de Bradley sur la vitesse de la lumière issue des étoiles. Clairaut évoque en 1739, ce second résultat, mais s'arrête là. Il n'en tire aucune conséquence. Il faut attendre la fin du 18^{ème} siècle pour que naissent des interrogations quant à la nature de la lumière et que se fassent jour des critiques de la théorie newtonienne de la lumière :

– Faut-il penser que la vitesse de propagation de la lumière ne dépend que de la nature et de l'état de la source, ou alors que cette vitesse dépend uniquement du milieu et pas du mouvement de la source ?

– Qui, de Newton, ou de Huygens, "imagine" le mieux ?

C'est dans le cadre de ce questionnement qu'il faut comprendre les expériences qu'Arago entreprend en 1806 et 1810. L'idée remarquable d'Arago est de reprendre le second résultat de Bradley afin de le discuter. L'objet de son expérience, réalisée en 1806 *"était d'examiner si la vitesse de la lumière est constamment la même, quels que soient les corps célestes ou terrestres dont elle émane ou par*

lesquels elle est réfléchiⁿⁱ. Il utilise pour cela le phénomène de réfraction de la lumière en observant au travers d'un prisme la lumière issue de diverses étoiles, du Soleil, de la Lune, des planètes, et des lumières terrestresⁱⁱ. La théorie de Newton, pour laquelle le phénomène de réfraction dans le prisme permet de séparer les rayons correspondant à des lumières de vitesses différentes, prévoit que les lumières issues de ces différentes sources sont déviées différemment. Or, il constate dans sa première série d'expériences que toutes ces lumières subissent la même déviation quand elles traversent le prisme. Dans une seconde série d'expériences, réalisées en 1810, il prend en compte le mouvement de la Terre sur son orbite et parvient au même résultat négatif.

De deux choses l'une : ou bien le mouvement de la lumière est uniforme et la théorie de Newton sur la réfraction est correcte mais ses idées sur l'émission de la lumière fausses ; ou bien une égalité de déviation de la lumière par un prisme ne correspond pas à une égalité de vitesse des corpuscules et la théorie de la réfraction de Newton est fausse.

4. Fresnel : propositions nouvelles

Arago s'adresse à Fresnel pour lui demander d'interpréter son expérience dans le cadre de la théorie ondulatoire de la lumière. C'est une démarche compréhensible, puisque Arago sait que, d'une part, Fresnel s'est déjà intéressé au problème de l'aberration, et que d'autre part, au même moment, il fait adopter la théorie ondulatoire par la communauté scientifique grâce à son "Mémoire couronné sur la diffraction" (1818).

Reprenant ses travaux, Fresnel, pour interpréter à la fois l'expérience de réfraction d'Arago et le phénomène d'aberration des étoiles dans le cadre de la théorie ondulatoire de la lumière, cherche à montrer que, moyennant certaines hypothèses sur le milieu de propagation des ondes lumineuses, les deux phénomènes produisent des effets qui se compensent et qu'on peut ainsi expliquer le résultat négatif des expériences d'Arago. Dans un premier temps, il détermine la variation de déviation des rayons réfractés par le prisme quand ce dernier est en mouvement avec la Terre. Dans un second temps, il fait l'hypothèse d'un entraînement partiel de l'éther par les corps en mouvementⁱⁱⁱ, et peut alors déterminer les effets de cet entraînement sur le phénomène d'aberration des étoiles. Il affirme ensuite, sans vraiment donner de démonstration rigoureuse, avoir trouvé des résultats identiques, au signe près, et en conclut alors qu'on peut finalement expliquer l'absence d'influence sensible du mouvement terrestre sur la réfraction.

Fresnel peut ainsi rendre compte du phénomène d'aberration des étoiles et donner une réponse à l'expérience d'Arago sur la réfraction de la lumière issue de diverses étoiles.

Fresnel semble donc être parvenu à ses fins, mais c'est au prix de grosses difficultés. Il est en effet amené à faire des hypothèses très discutables sur la nature du milieu, l'éther. À partir de ce moment, ces incertitudes quant au milieu vont être la principale préoccupation en optique. La science se trouve en panne conceptuelle. Il n'existe pas de concept d'éther permettant d'interpréter simplement l'ensemble des phénomènes lumineux. C'est d'autant plus important que cela concerne de nombreux phénomènes ; Fresnel travaille ainsi sur la double réfraction et la polarisation de la lumière depuis plusieurs années, et des notes manuscrites nous montrent qu'il a acquis la certitude que les vibrations de la lumière ne sont pas longitudinales, comme le pensait Huygens, mais transversales. Mais il ne peut l'affirmer haut et fort, car il ne peut proposer de support à la propagation de ces ondes transversales. Nous voyons donc se déplacer les centres d'intérêt. Le phénomène d'aberration lui-même n'est plus étudié pendant deux décennies, car il manque à l'optique une théorie de l'éther.

Fresnel trace les grandes lignes de la structure du milieu qui, pour que puissent se propager des vibrations transversales, doit être à la fois caractérisé par une discontinuité et une rigidité, et donne les lois régissant la répartition et le mouvement des "molécules éthérées" constituant ce milieu. Pour justifier son hypothèse de vibrations transversales, il est amené à changer de type d'analogie : il abandonne l'analogie sonore, utilisée jusqu'alors et conduisant à dire que la lumière est une onde longitudinale, et lui substitue l'analogie avec une corde vibrante. L'éther est devenu, non sans mal d'ailleurs, un solide élastique : il tient à la fois, et c'est paradoxal, du solide et du fluide.

Cette théorie est âprement discutée et contestée. En fait, pour que ce concept d'éther soit accepté, il faut qu'il puisse s'intégrer dans le cadre d'une théorie mécanique fondée sur des concepts mathématiques rigoureux. C'est là-dessus que vont travailler plusieurs savants à la suite de Fresnel, tels Cauchy ou Green. Ces propositions seront discutées, et même contestées, bien après la mort de Fresnel, notamment par Stokes, Maxwell, Lorentz, puis Einstein qui décidera que l'« éther est superflu ». Cependant, à partir du début du 19^e siècle, grâce à Fresnel, le concept d'onde lumineuse est définitivement adopté. Fizeau, au milieu du même siècle, montrera que si l'éther existe, alors il est bien entraîné partiellement comme prévu et que la formule proposée intuitivement par Fresnel est exacte.

5. Conclusion

Au travers de l'étude du phénomène d'aberration, il a été vu que la théorie corpusculaire de la lumière pouvait contribuer à rendre compte du phénomène étudié d'une façon relativement simple. Mais, certaines limites de cette théorie ont été atteintes lorsque la question de la constance de l'angle d'aberration a été examinée. C'est notamment pour dépasser ces limites que la théorie ondulatoire de la lumière a été introduite. On voit donc bien, au travers de cette étude de cas, la nécessité d'introduire cette théorie. Celle-ci permet d'expliquer de nombreux phénomènes optiques et de lever d'autres contradictions de la théorie corpusculaire de la lumière comme celle de l'indépendance des rayons lumineux. En effet, comment expliquer, par exemple, que deux rayons lumineux peuvent se croiser sans être déviés s'ils sont constitués de corpuscules lumineux ?

V. Comparaison des raisonnements utilisés par les élèves aujourd'hui et de ceux utilisés par les scientifiques autrefois

Concluons cet exposé en soulignant les ressemblances et différences entre les raisonnements utilisés par les élèves et étudiants aujourd'hui et ceux utilisés par certains scientifiques dans la période classique.

Dans les deux cas, on observe des tendances vers des raisonnements mécanistes. Si la démarche des scientifiques est raisonnée, celle des étudiants ne l'est pas. Si les raisonnements des scientifiques s'appuient sur le cadre théorique de leur époque (la mécanique newtonienne), ceux des élèves relèvent d'une mécanique "spontanée".

Deux visions mécanistes de l'onde, liées à la nécessité ou non d'un milieu matériel, se retrouvent dans les raisonnements des élèves et des scientifiques :

– dans l'une, la propagation d'une onde dans le vide est possible, une onde correspondant à un déplacement de particules matérielles. Cette vision a été illustrée ici par Gassendi pour le son et par Newton pour la lumière.

– dans une autre, la propagation d'une onde nécessite un milieu matériel, celui-ci bougeant à grande échelle. L'onde correspond alors à un "vent" ou à un "courant". C'est la vision d'Aristote dans le cas du son et de Grimaldi dans le cas de la lumière.

Une vision ondulatoire matérielle de l'onde, dans laquelle le milieu matériel bouge à petite échelle, se rencontre également dans les deux raisonnements. Pour les scientifiques, tel Newton, il y a interaction entre éléments matériels voisins, alors que pour les élèves, il n'y en a pas. La grande question qui interpella les scientifiques était de savoir si la dynamique à laquelle obéit la propagation est identique ou non à celle de l'objet matériel en mouvement. Les élèves utilisent une dynamique "spontanée" de l'objet : l'onde correspond au déplacement d'un "capital".

VI. Bibliographie

A. Didactique

- [1] AGABRA, J. *Les échanges thermiques*, in *Aster*, éditions INRP, 1986, n°2, pp.1-42.
- [2] *Aster. Didactique et histoire des sciences*, éditions INRP, 1986, n°5.
- [3] ASTOLFI, J.P. et PETERFALVI, B. *Obstacles et construction de situations didactiques en sciences expérimentales*, in *Aster*, éditions INRP, 1993, n°16, pp.100-110.
- [4] BALLINI, P. et ROBARDET, G. et ROLANDO, J.M. *L'intuition, obstacle à l'acquisition de concepts scientifiques : propositions pour l'enseignement du concept d'énergie en première S*, in *Aster*, éditions INRP, 1997, n°24, pp.81-112.
- [5] BENSEGHIR A. *Transition électrostatique-électrocinétique ; point de vue historique et analyse des difficultés des élèves*. Thèse, Université Paris 7, 1989.
- [6] FAWAZ, A. et VIENNOT, L. *Image optique et vision*, in *B.U.P.*, 1986, n°686, pp.1125-1146.
- [7] GALILI, I. *Students' conceptual change in geometrical optics*, in *Int.J.Sci.Educ*, 1996, vol.18, n°7, pp.847-868.
- [8] GALILI, I. et HAZAN, A. *The influence of an historically oriented course on students' content knowledge in optics evaluated by means of facets-schemes analysis*, on web : <http://www.ppm.ipn.unikiel.de/ipn/projekte/esera/book/eserbook.htm>, 1999.
- [9] GUILBERT, L. et MÉLOCHE, D. *L'idée de science chez les enseignants en formation : un lien entre l'histoire des sciences et l'hétérogénéité des visions ?*, in *Didaskalia*, éditions DeBoeck, 1993, n°2, pp.23-46.
- [10] HALBWACHS, F. *La pensée physique chez l'enfant et le savant*, éditions Delachaux et Niestlé, 1974.
- [11] JOHSUA, S. *Le rapport à l'expérimental dans la physique de l'enseignement secondaire*, in *Aster*, éditions INRP, 1989, n°8, pp.29-54.
- [12] KAMINSKY, W. *Conceptions des enfants et des autres sur la lumière*, in *B.U.P.*, 1989, n°716, pp.973-996.
- [13] LEFÈVRE, R. *Contribution à l'étude des conceptions des étudiants de l'université sur le thème de l'optique*. Thèse, Université Paris 7, 1988.
- [14] MARTINAND, J.L. *Histoire et didactique de la physique et de la chimie : quelles relations ?* in *Didaskalia*, éditions de Boeck, 1993, n°2, pp.89-99.
- [15] MAURINES, L. et SALTIEL, E. *Mécanique spontanée du signal*, in *B.U.P.*, 1988, n°707, pp.1023-1041.
- [16] MAURINES, L. *Raisonnement commun à propos du son*, in L.Viennot, *Raisonnement en physique*, éditions De Boeck, 1996, pp.157-167.
- [17] MAURINES, L. *Les élèves et la propagation des signaux sonores*, in *B.U.P.*, 1998, n°800, pp.1-22.
- [18] MAURINES, L. *Le raisonnement géométrique en terme d'objet dans la physique des ondes*. Mémoire d'habilitation à diriger des recherches, Université Paris 11, 2001.
- [19] PIAGET, J. et GARCIA R. *Psychogénèse et histoire des sciences*, éditions Flammarion, 1983.
- [20] RESNICK, L. *Convictions ontologiques dans l'apprentissage de la physique*, in N Bednarz et C. Garnier, *Construction des savoir, Obstacles et conflits*, éditions CIRADE, Agence d'ARC inc, Ottawa, 1989, pp.103-119.
- [21] SALTIEL, E. *Qu'apprend-on d'une comparaison entre raisonnements spontanés des élèves et modèles physiques anciens ?*, in *Actos do i encontro sobre educaçao em ciencias Brag*, éditions M. Sequeira, L. Leite et M. Freitas, 1987, pp.145-161.
- [22] SALTIEL, E. et MALGRANGE, J.L. *Les raisonnements naturels en cinématique élémentaire*, in *B.U.P.*, 1979, n°616, pp.1325-1342.
- [23] SALTIEL, E. et VIENNOT L. *What do we learn from similarities between historical ideas and the spontaneous reasoning of students ?*, in P. Linjse (Ed.), *The many faces of teaching and learning mechanics*. Utrecht, éditions GIREP/SVO/UNESCO, 1984.
- [24] TOUSSAINT, J. et GRÉA, J. *Construire des concepts et mettre en œuvre des raisonnements, ce que peut apporter un regard sur l'histoire des sciences*, in J. Toussaint (coord), *Didactique appliquée de la physique-chimie*, éditions Nathan, 1996, pp.86-118.
- [25] VIENNOT, L. *Le raisonnement spontané en dynamique élémentaire*, éditions Hermann, 1979.
- [26] VIENNOT, L. *Raisonnement en physique*, éditions De Boeck, 1996.

B. Historique

- [27] ACLOQUE P., *Cahier d'histoire et de philosophie des sciences*, N°4, "Histoire des expériences pour la mise en évidence du mouvement de la terre" : "Les expériences d'optique. Expérience sans repère extérieur.", 73-89, "Expériences sur la chute des corps." ,15-35, Paris, (1982). N°36, « L'aberration stellaire », Paris, 1991.
- [28] AUDIGIER, Fillon, *Enseigner l'histoire des sciences et des techniques*, Paris, INRP, 1991.
- [29] BACHELARD, G. *La formation de l'esprit scientifique*, éditions Vrin, 1938.
- [30] BALIBAR F., *Einstein 1905, de l'éther aux quanta*, Paris, PUF, coll. Philosophies, 1992.
- [31] BALIBAR F., *Galilée, Newton lus par Einstein*, Paris, PUF, coll. Philosophies, 1994.
- [32] BLAY, M. *La conceptualisation newtonienne des phénomènes de la couleur, "L'œuvre créatrice de Newton"*, 79-113, Paris (1983).
- [33] BLAY, M., *Lumières sur les couleurs*, Ellipse, Paris, 2001.
- [34] DAUMAS M., *Histoire de la science*, ed. La Pléiade, Paris, 1963.
- [35] A. EINSTEIN, L. INFELD, *L'évolution des idées en physique*, (1936 rééd. Paris, Flammarion 1982).
- [36] FEYERABEND, *Contre la méthode : esquisse d'une théorie anarchique de la connaissance*, Paris, Seuil, 1988.
- [37] KUHN (Thomas), *La Structure des révolutions scientifiques*, Paris, Champs Flammarion, 1983 (1ère ed. anglaise en 1962), au moins l'introduction et les chapitres 3 à 8.
- [38] LINDSAY, R.B. *Acoustics : historical and philosophical development*, éditions Dowden Hutchinson and Ross Inc., 1972.
- [39] MAITTE B., *La lumière*, Paris, (1981).
- [40] MAYRARGUE A., *Fresnel et l'éther optique*, La Recherche n° 218, février 1990.
- [41] MAYRARGUE A., *Physique Technologie*, Bordas, 2001.
- [42] NEWTON I., *Optique*, (1722) (Paris, rééd. Bourgeois, 1989).
- [43] POINCARÉ H., *La science et l'hypothèse*, Paris, Flammarion, 1968.
- [44] RONCHI, V. *Histoire de la lumière*, éditions Colin, 1956.
- [45] ROSMORDUC J., *Une histoire de la physique et de la chimie*, Paris, Seuil, 1983.
- [46] Les cahiers Clairaut, publiés par le CLEA (Université Paris-Sud).
- [47] Revue d'Histoire des Sciences, dirigée par Michel BLAY.
- [48] *Aster*, Revue de didactique des sciences expérimentales, INRP, N°5, 1987, *Didactique et histoire des sciences*.

ⁱCe point est souligné dans la pochette de séance manuscrite que nous avons consultée, et non dans le procès-verbal de séance. Arago, Comptes rendus de l'Académie des Sciences, « Mémoire sur la vitesse de la lumière, lu à la première classe de l'Institut le 10 décembre 1810, T. 36, 38-49, Paris, 1853, p. 38.

ⁱⁱ C'est la première expérience par rapport au mouvement absolu de la Terre. Cette expérience constitue donc le premier pas vers la relativité restreinte. Elle montre l'impossibilité de mettre en évidence le mouvement absolu de la Terre. C'est une question essentielle, reprise plus tard par Michelson, puis par Einstein qui conclura à l'impossibilité, "par des expériences de physique faites à l'intérieur d'un système de mettre en évidence le mouvement rectiligne et uniforme de l'ensemble de ce système."

ⁱⁱⁱ Grâce à cette hypothèse, Fresnel peut calculer le coefficient d'entraînement de l'éther. C'est un résultat essentiel, puisque cette formule est l'un des points de départ de ce qu'on appellera plus tard la relativité restreinte.

Les sciences des artistes : musique, couleur et perspective chez Alberti

Marie-Noëlle Racine, professeur au lycée Le Castel, Dijon

Patrick Guyot, professeur au lycée Alexandre Dumaine, Mâcon

Philippe Regnard, professeur au lycée Jules Renard, Nevers ; Irem Dijon

Les sciences interviennent à des titres divers dans le monde contemporain et, sans nécessairement les connaître et les pratiquer, nul aujourd'hui ne met en doute leur forte implication dans notre vie. Mais il fut une époque où le savoir scientifique n'était pas toujours présent dans l'ensemble du monde économique et dans la vie quotidienne ; il reste néanmoins que ce savoir s'inscrit de longue date dans la pratique de certaines corporations.

Nous nous sommes personnellement penchés sur la communauté des artistes, en particulier sur l'état des connaissances scientifiques qu'ils pouvaient utiliser à différentes périodes, état qui n'est pas sans incidence sur la vision du monde qui en découlait pour eux.

Il n'est naturellement pas question ici d'effectuer une étude exhaustive des trois domaines concernant directement les artistes et sur lesquels nous avons travaillé - musique, couleur et perspective - mais plutôt, à travers quelques touches, de suggérer et mettre en avant quelques instants marquants. Pour fournir non pas une unité, puisque nous traiterons séparément des trois domaines précités, mais plutôt un élément commun à notre exposé, nous avons recherché un personnage ayant abordé les trois sujets. Nous avons retenu Leon Battista Alberti.

I. Leon Battista Alberti 1404-1472

Qui mieux que Leon Battista Alberti peut incarner aux côtés de Léonard de Vinci le parfait humaniste de la Renaissance italienne ? Issu d'une famille florentine, il naquit à Gênes le 14 février 1404, à la suite d'une proscription et dut attendre près d'un quart de siècle avant de pouvoir retrouver la capitale toscane. Sa formation dans plusieurs villes du nord de l'Italie fut très diverse : latin, grec, droit, mais aussi sciences physiques et mathématiques.

Ses premiers écrits, après son retour à Florence puis à la chancellerie du pape Eugène IV, furent littéraires. Mais il profita de son séjour à Rome pour étudier les ruines de l'ancienne ville et se livrer à des expériences d'optique.



.Baptista de alberti

Figure 1

De retour à Florence, il retrouve l'élite artistique de la ville et, peu après, formule les premiers principes de la perspective dans le *De Pictura* (1435) et ses théories sur les proportions dans le *De Statua*. Mais pour lui, l'architecture est l'art par excellence. Voulant rédiger, à la demande d'une noble, un commentaire sur l'architecture de Vitruve, il décide d'écrire lui-même un traité inspiré de l'architecte romain, mais adapté aux nécessités modernes. Le *De Re Aedificatoria*, publié en 1485, est le premier texte moderne d'architecture. Selon lui, l'architecture est une sorte d'harmonie et d'accord entre toutes les parties qui forment un tout construit selon un nombre fixe, une certaine relation, un certain ordre, comme l'exige le principe de symétrie qui est la loi la plus élevée et la plus parfaite de la nature.

Il mourut à Rome en avril 1472, laissant derrière lui des réalisations architecturales peu nombreuses. Alberti était en effet un homme de cabinet mais pas de terrain. Ses édifices sont cependant célèbres dans l'histoire de l'architecture car ils posent les deux problèmes importants de l'époque : celui du plan centré ou longitudinal et celui de l'adaptation des formules antiques aux façades des églises modernes. Citons en particulier la façade de l'église *Santa Maria Novella* et le palais *Rucellai* à Florence, ainsi que l'église *San Francesco* à Rimini.

Cette biographie succincte met en évidence la polyvalence d'Alberti et son grand intérêt pour nous puisqu'il a laissé de nombreuses traces écrites de ses expériences et de ses réflexions.

Les thèmes abordés seront successivement, comme nous l'avons évoqué plus haut, la musique, la couleur et la perspective.

II. Rapports musicaux

A. Les rapports musicaux dans la musique grecque

Les rapports de l'harmonie musicale proposés par l'école pythagoricienne ont largement dépassé le cadre de la science des sons. Platon dans *le Timée* les utilise déjà pour nous proposer une explication de son cosmos. Vitruve au chapitre 3 du dixième livre de son traité d'architecture les étudie en détail afin de préciser les proportions de son théâtre antique. Le récit sans doute légendaire de la découverte de ces rapports par Pythagore a été rapporté entre autres par Nicomaque de Gérase dans *son Manuel d'Harmonie* :

« Quant à la quantité numérique qui représente la distance des cordes sonnantes la quarte, celle de la quinte, celle qui par leur réunion devient ce qu'on nomme diapason enfin le ton additionnel placé entre les deux tétracordes, voici comment Pythagore, à ce qu'on affirme, s'y est pris pour en rendre compte.

Un jour qu'il se promenait tout en s'abandonnant aux réflexions et aux pensées que lui suggéraient ses combinaisons, cherchant s'il ne pourrait pas imaginer un secours pour l'oreille, sûr et exempt d'erreur, tel que la vue en possède un dans le compas et dans la règle ou même, disons-le, dans la dioptra, le toucher dans la balance, ou dans l'invention des mesures, il vint à passer, par une coïncidence providentielle, devant un atelier de forgeron, et entendit très distinctement des marteaux de fer frappant sur l'enclume et donnant pêle-mêle des sons parfaitement consonants entre eux à l'exception d'un seul couple. Il reconnut parmi ces sons, les consonances de diapason de diapente et de diatessaron. Quant à l'intervalle intermédiaire entre la quarte et la quinte, il s'aperçut qu'il était inconsonnant en lui-même, mais, d'autre part, complémentaire de la plus grande de ces deux consonances.

Rempli de joie, il rentra dans l'atelier comme si un dieu secondait son dessein, et, au moyen d'expériences variées, après avoir reconnu que c'était la différence de poids qui causait la différence de son, et non pas l'effort des forgerons ni la forme des marteaux, ni le déplacement du fer laminé, il releva avec un grand soin le poids des marteaux et leur force impulsive qu'il trouva parfaitement identique, puis il rentra chez lui.

Il fixa un clou unique dans l'angle formé par deux murailles, pour éviter qu'il y eût même de ce côté la moindre différence ou que, d'une manière quelconque, la pluralité des clous ayant chacun leur matière propre rendît l'épreuve suspecte. Il suspendit à ce clou quatre cordes semblables par la

substance, le nombre de fils, la grosseur, la torsion et fit supporter à chacune d'elles un poids qu'il fixa à son extrémité inférieure. De plus, il rendit les longueurs des cordes de tout point égales, puis frappant ensemble les cordes deux à deux, il reconnut respectivement les consonances précitées qui variaient avec chaque couple de cordes.

La corde tendue par la suspension du plus grand poids, comparée avec celle qui supportait le plus petit, lui fit constater une résonance à l'octave ; or celle-ci représentait 12 des poids donnés, et celle-là 6. Il établit ainsi que l'octave est dans le rapport double, ce que les poids eux-mêmes lui avaient fait entrevoir. La plus grande corde, comparée avec celle qui venait après la plus petite et qui représentait 8 poids, sonnait la quinte, et il établit qu'elles étaient dans le rapport sesquitièrs, ce qui était aussi le rapport des poids entre eux ; puis il la compara avec celle qui la suivait, par rapport au poids supporté. La plus grande des autres cordes se trouvant avoir 9 poids sonnait la quarte proportionnellement aux poids ; or il constata qu'elle était dans le rapport inversement sesquitièrs et que cette même corde se trouvait par nature sesquialtère de la plus petite car 9 est à 6 dans le même rapport, de même que la corde proche de la petite et supportant 8 poids était à la corde qui en supporte 6 dans le rapport sesquitièrs et à la corde de 12 poids dans le rapport sesquialtère.

Par conséquent, l'intervalle compris entre la quinte et la quarte, c'est-à-dire celui dont la quinte surpasse la quarte, était confirmé comme se trouvant dans le rapport sesquioctave qui est celui de 9 à 8. Le diapason (octave) était le système formé par la réunion de l'une et de l'autre autrement dit de la quinte et de la quarte placées en conjonction ; de même que le rapport double se compose du sesquialtère et du sesquitièrs, soit 12, 8, 6 ; ou inversement, par la réunion de la quarte et de la quinte, de même, que le double se compose du sesquitièrs et du sesquialtère, soit 12, 9, 6, placés dans cet ordre...

Il nomma *hypate* le son correspondant au nombre 6, *mèse* le son 8, qui se trouve être son sesquitièrs ; *paramèse* le son 9, plus aigu d'un ton que le son moyen et par conséquent son sesquioctave ; enfin *nète* le son 12. Ensuite il suppléa les points intermédiaires, suivant le genre diatonique, au moyen de sons proportionnels et subordonna ainsi l'*octacorde* aux nombres consonants, savoir le double, le sesquialtère, le sesquitièrs, et à la différence de ces deux derniers, le sesquioctave. » [3].

Les relations entre les impressions subjectives de consonances entre les sons et les rapports numériques sont clairement établies : 2 pour 1 (diapason, octave), 3 pour 2 (diapente, quinte) et 4 pour 3 (diatessaron, quarte) qui restent les trois consonances admises par les Grecs, le ton (9 pour 8) n'étant que la différence dissonante entre la quinte et la quarte. Cette histoire, rapportée par de nombreux auteurs comme Gaudence, Jamblique ou Boèce influença toutes les théories musicales jusqu'à la Renaissance. Malheureusement, elle comporte deux défauts majeurs. D'une part, l'interprétation physique est fautive. C'est le carré des rapports des sons qui est proportionnel aux rapports des masses fixées à la corde. Pour passer, par exemple, d'un do au do supérieur (2 pour 1), il faut une tension quatre fois plus importante. Les résultats énoncés sont exacts si la seule variable est la longueur de la corde, mais non sa tension, comme l'a démontré Taylor au 17^{ème} siècle. D'autre part, en privilégiant les rapports numériques au détriment de la sensibilité musicale, les successeurs de Pythagore s'imposèrent trop de contraintes sclérosantes.

Pour enrichir la gamme de leurs sons, les musiciens grecs prirent pour support leur plus petite consonance, le diatessaron, et entre ces deux notes dans le rapport de 4 pour 3, ils intercalèrent deux autres sons. Les quatre notes ainsi obtenues constituaient un tétracorde. Une octave (rapport 2 pour 1) s'obtenait de deux façons différentes : deux tétracordes disjoints séparés par un ton ou bien deux tétracordes conjoints précédés d'un ton. Examinons la première strophe du premier hymne delphique à Apollon datant du deuxième siècle avant J. C. et découvert sur le mur d'un temple en 1893 par l'École Française d'Athènes. La partition en notation moderne peut être la suivante :

figure et la collocation. Et, après avoir rappelé les différents intervalles de la musique ancienne, il propose une classification des différentes formes de rectangles suivant le rapport de leurs dimensions :

« ... Maintenant il nous faut parler de ces choses par le menu, mais avant tout des aires, ou les diamètres se joignent ensemble deux à deux.

D'icelles aires les unes sont courtes, les autres sont longues, et les autres moyennes ; toutefois la plus courte est la carrée, c'est-à-dire dont les côtés sont tous aussi longs l'un que l'autre, et répondent en angles droits très-tous.

Celle d'après est la sesquialtère et même la sesquitière se peut compter entre les courtes.

Ces trois correspondances donc, qui entre nous se disent simples, se doivent accommoder en aires courtes.

Pareillement il y a trois autres qui sont propres pour les moyennes, dont la meilleure est celle que nous appelons double, et la prochaine se compose de la sesquitière double se faisant comme je vous vais dire. Quand le moindre nombre de l'aire qui est carrée est posé, on le veut allonger par ladite proportion, cela se monte à six, puis en y ajoutant une autre sesquialtère dudit six, cela produit justement neuf. Au moyen de quoi la plus grande longueur excède la plus courte d'un double, et d'un ton de double.

Encore aux dites moyennes peut-on donner la sesquitière, en la doublant par la manière dite : et si cela se fait en tel endroit sera comme de neuf, et la grande comme de seize ; si que la dite grande sera excédée par la moindre doublée de moins d'un ton.

Mais aux plus longues aires la raison veut qu'on s'y gouverne ainsi. C'est que la double se joint avec la sesquialtère, et par ce moyen devient triple ou bien avec la double se met la sesquitière dont les nombres extrêmes se correspondent comme de trois à huit ; ou bien on joint deux diamètres pour les entre correspondre par la proportion quadruple.

Or ai-je dit des aires courtes esquelles les nombres se répondent ou par une égalité, ou comme deux à trois, ou comme trois à quatre, et pareillement des moyennes esquelles les dits nombres conviennent ou à la double, ou comme quatre à neuf, ou comme neuf à seize ; puis j'ai aussi parlé des plus longues où les nombres conviennent en triple et en quadruple, ou ainsi que trois sont à huit. Mais en tierçant nous accouplerons tous les diamètres d'un corps avec iceux nombres qui (s'il faut que je dise ainsi) sont ou nés avec les harmonies, ou bien tirés d'ailleurs par certaine bonne raison.

Aux harmonies il se trouve des nombres de la correspondance desquels se perfont leurs proportions, comme en la double, en la triple, et en la quadruple. Car au regard d'icelle double on la peut composer d'une simple sesquialtère, en y ajoutant une sesquitière ; et par exemple, soit le moindre nombre de la double deux, de celui là je produirai le trois, en faisant la sesquialtère, et du trois par la sesquitière j'engendrerai le quatre, lequel sera double au dit deux. Ou autrement encore. Soit le plus petit nombre trois ; si l'on en fait une sesquitière, la mesure portera à quatre, et en y ajoutant une sesquialtère, assurément on y trouvera six, lesquels comparés audit trois présenteront la double.

Outre plus la triple se compose d'une double et une sesquialtère ajoutées ensemble. Et pour le déclarer ouvertement, soit ici le petit nombre deux, celui là doublé fera quatre, et si l'on y met une sesquialtère ce fera la somme de six lequel six répond au deux en proportion triple. Ou en autre manière. Soit le petit nombre deux, adjoignez lui une sesquialtère, il y aura trois, puis doublez tout cela, et vous trouverez six, qui est un nombre triple au regard de son deux.

Par semblables extensions ou allongissements se formera la quadruple, car à la double ajoutez-lui une autre double, et cela fera quadruple proportion, que les musiciens appellent didiapason. Et se fait ainsi qu'il s'ensuit. Soit en ce cas le moindre nombre deux, je double celui-là, et provient le diapason, lequel répond ainsi que quatre à deux ; puis je redouble encore tout cela, et s'en fait le didiapason qui se conforme ainsi que deux à huit. Davantage encore se compose cette quadruple par la voie suivante. C'est à savoir en joignant à la double une sesquialtère et une sesquitière. Chose qui est facile à faire répond ainsi que quatre à deux ; puis je redouble encore tout cela, et s'en fait le didiapason qui se conforme ainsi que deux à huit. Davantage encore se compose cette quadruple par la voie suivante.

C'est à savoir en joignant à la double une sesquialtere et une sesquiterce. Chose qui est facile à faire en observant les règles ci-dessus. Ce néanmoins pour rendre cette mienne tradition plus entendible, quand on a mis le pur nombre de deux, celui-là de trois lui succède par le moyen d'une sesquialtere, et par la sesquiterce il monte à quatre lequel étant doublé arrive à huit. Ou encore pour le mieux dire. Soit le moindre nombre trois, celui-là doublé fera six, à quoi en y ajoutant encore trois feront neuf, et derechef autant ce feront douze qui conferés à leur premier posé, le quadrupleront justement. » [4]

En résumé :

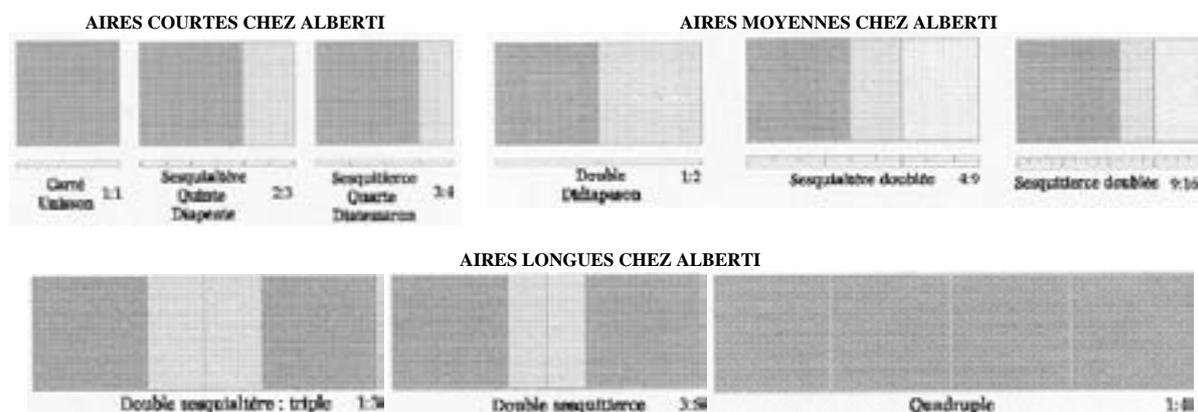


Figure 3

Si les aires courtes sont classées dans la même octave, il n'en est pas de même des moyennes dont la sesquiterce doublée appartient aussi à la première octave, et des longues dont la double sesquiterce appartient à la deuxième octave.

Néanmoins, Alberti est préoccupé de donner à ses pièces rectangulaires des proportions harmonieuses en accord avec les rapports musicaux mais sans l'aide de la "divine proportion".

III. La couleur

L'approche de la notion de couleur à laquelle nous nous attachons maintenant montre une ambiguïté qui se retrouve dans l'étude de la musique : leur connaissance est partiellement affectée par l'intervention des sens de l'être humain (la vue pour la couleur, l'ouïe pour la musique). On peut bien étudier d'un point de vue scientifique tous les éléments liés à la couleur, on n'empêchera pas une subjectivité et l'intervention d'une sensibilité personnelle. Des civilisations et des époques différentes ont des comportements particuliers devant les couleurs et, pour celui qui veut les étudier, il faut prendre en compte ces éléments. Le risque est grand de tomber dans l'anachronisme et nous essaierons d'éviter cet écueil.

Le point de vue de l'artiste sera central mais il ne peut être détaché du point de vue du savant, connaissances scientifiques et conceptions artistiques étant à chaque époque en même temps proches mais distinctes. Nous le verrons avec Alberti qui s'appuie sur l'aristotélisme ambiant mais qui veut mettre en avant ses conceptions de peintre, et en particulier ses idées sur le juste et le beau. Nous essaierons à travers quelques textes de mettre en évidence ces remarques. Seront successivement rencontrés Platon, Aristote, Alberti, Du Roure, Descartes et enfin Newton.

Pour les lecteurs souhaitant avoir une vue d'ensemble sur le sujet, signalons un petit ouvrage très intéressant de Michel Blay récemment publié [1].

Le premier auteur sur lequel nous nous pencherons est Platon. Dans *le Timée* (vers 360 av. J-C), Platon évoque les sensations du corps humain : le goût, l'odorat et l'ouïe, avant de détailler la sensation des couleurs, qui nous concerne ici.

Nous retrouvons à travers ce texte la subsistance d'une conception assez répandue dans la Grèce Antique jusqu'à Aristote qui la rejettera : la vision serait le résultat d'une rencontre entre un rayon provenant des yeux et un rayon provenant de l'objet vu. Nous constatons par ailleurs que l'idée de l'obtention d'une couleur par mélange (ou combinaison) de deux ou plusieurs couleurs est déjà présente chez lui :

« Il nous reste encore une quatrième espèce de sensation, qu'il faut classer, car elle embrasse un grand nombre de variétés, que nous avons toutes appelées couleurs ; c'est une flamme qui émane de chaque corps, et dont les particules présentent un ordre de grandeur en accord avec le rayon visuel, de manière à produire la sensation. [...] Les particules qui proviennent des autres corps et qui entrent en collision avec le rayon visuel, sont parfois plus petites, parfois plus grandes et parfois de la même taille que les particules du rayon visuel lui-même. Celles qui sont de la même taille ne sont pas perceptibles, et ce sont précisément celles que nous appelons "transparentes". Celles qui sont plus larges et qui contractent le rayon visuel, et celles qui sont plus petites et qui le dilatent sont sœurs de celles qui paraissent chaudes ou froides à la chair, et âpres à la langue ; ainsi en va-t-il aussi de toutes ces particules que nous avons appelées "âcres", parce qu'elles réchauffent. Le blanc et le noir sont des propriétés identiques aux précédentes, mais elles se produisent dans un autre organe, ce qui explique pourquoi elles présentent pourtant un aspect différent. Voici donc quel nom il faut donner à ces affections : "blanc", ce qui dilate le rayon visuel, et "noir", ce qui le contracte.

Quand c'est le mouvement plus vif d'une autre variété de feu qui entre en collision avec le rayon visuel et qui le dilate violemment, il se fraie de force un chemin à travers les ouvertures mêmes des yeux et il les irrite, en faisant s'écouler cette masse de feu et d'eau, que nous appelons "larmes" ; quand ce mouvement, qui est lui-même du feu, rencontre le feu qui arrive en sens inverse, alors l'un des feux jaillit comme d'un éclair et l'autre entre et vient s'éteindre dans le liquide, et dans ce bouillonnement surgissent des couleurs de toutes sortes ; cette impression, nous l'appelons "éblouissement" et ce qui la déclenche, nous lui avons donné les noms de "brillant" et d'"étincelant".

Par ailleurs, quand le genre de feu intermédiaire entre ceux-là parvient à l'humeur des yeux et qu'il s'y mêle, sans être "brillant", il produit, grâce à la lueur de ce feu mélangée dans le liquide, une couleur sanglante, à laquelle nous donnons le nom de "rouge sang".

Le brillant mélangé avec du rouge et du blanc donne le doré ; [...] Le rouge mêlé à du noir et à du blanc donne le pourpre. Il donne le bistre quand, à ce mélange brûlé davantage on ajoute du noir. Le roux naît d'un mélange de doré et de gris, le gris d'un mélange de blanc et de noir ; quant à l'ocre, il provient du blanc mêlé à du doré.

Quand on combine à du brillant du blanc et qu'on plonge ce mélange dans un noir intense, on obtient du bleu lapis ; du bleu lapis mêlé à du blanc du glauque ; du roux mêlé à du noir donne du vert. » [5].

Vient ensuite Aristote, dont les écrits vont faire référence pendant de nombreux siècles, et qui relie les couleurs aux quatre éléments, le feu, l'air, l'eau et la terre, qui sont pour lui les constituants fondamentaux du monde qui nous entoure. Il apporte un élément intéressant par sa présentation du noir comme une couleur, mais aussi comme une absence de lumière. La couleur elle-même serait un affaiblissement de la lumière. Cette théorie, partiellement adaptée, prévaudra longtemps, jusqu'à Descartes compris. Laissons-lui la parole à travers *De Coloribus* (vers 310 av. J-C), *Sur les couleurs* :

« I. Les couleurs simples sont celles qui appartiennent aux éléments, feu, air, eau et terre. Car l'air et l'eau sont naturellement intrinsèquement blancs, alors que le feu et le soleil sont dorés. La terre également est blanche, mais semble en couleur car elle est teinte. Cela devient évident lorsque l'on considère les cendres ; car elles deviennent blanches lorsque l'humidité qui causait leur teinte est totalement consumée, mais pas entièrement, car elles sont aussi teintées par la fumée, qui est noire. De la même façon, le sable devient doré car le rouge ardent et le noir teintent l'eau. La couleur noire appartient aux éléments des choses qui subissent une transformation de leur nature. Les autres couleurs sont évidemment dues au mélange, lorsqu'elles sont alliées l'une à l'autre. Car l'ombre arrive quand la lumière s'éteint.

Le noir nous apparaît de trois manières. De la première manière, ce qui n'est pas vu est, de façon générale, naturellement noir (car quelque lumière provenant d'une telle chose est réfléchié noire) ; de la seconde, le noir est ce de quoi aucune lumière ne parvient à l'œil ; car ce qui n'est pas vu, lors même que ce qui l'environne est vu, donne une impression de noir. De la troisième, une chose paraît noire dans la mesure où une très petite quantité de lumière est réfléchié. C'est pourquoi l'ombre paraît noire. On peut déduire de nombreux faits que l'obscurité n'est pas du tout une couleur, mais plutôt une absence de lumière, et particulièrement du fait qu'il n'est pas possible de percevoir dans l'obscurité le caractère ou la silhouette de quoi que ce soit, comme ça l'est dans le cas des objets visibles.

Mais que la lumière soit la couleur du feu, ceci est clair par le fait qu'il n'en a pas d'autre que celle-là, et parce que lui seul est visible par lui-même, alors que toutes les autres choses sont visibles par lui [...]

II. Les autres couleurs tirées de celle-ci par mélange en plus ou moins grande proportion sont très variées. Par plus ou moins grande proportion, j'entends comme le rouge et le pourpre, par mélange comme le noir et le blanc, qui, quand ils sont mélangés, donnent l'apparence du gris. Ainsi, quand ce qui est noir et obscur est mélangé avec la lumière, le résultat est rouge. Car nous voyons que quand ce qui est noir est mélangé avec la lumière du feu et du soleil, le résultat est toujours rouge, et les choses noires quand on les brûle, prennent toujours une couleur rouge ; car la flamme fumante et le charbon rougeoyant, sont vus rouges.

III. Nous ne devons cependant pas négliger parmi les couleurs, celles qui sont bigarrées ou mal définies, et les quantités auxquelles leur existence est due. Nous trouverons que c'est parce qu'elles ont des parts inégales et disproportionnées de lumière et d'ombre ; car la différence entre la lumière et l'ombre est une différence quantitative de plus et de moins, de sorte que par elles-mêmes, lorsqu'elles sont mélangées à d'autres couleurs, elles en causent le changement, soit parce que les couleurs mélangées diffèrent en quantité et en force, soit parce qu'elles n'ont pas les mêmes proportions. [...]

Nous ne voyons aucune des couleurs pures comme elles sont en réalité, mais toutes sont mélangées à d'autres couleurs ; ou si elles ne sont pas mélangées à d'autres couleurs, elles sont mélangées à des rayons de lumière et à de l'ombre, c'est pourquoi elles apparaissent différemment et non comme elles sont. » [6]

Les siècles qui vont succéder à cette période, même s'ils ont apporté quelques nouveautés pour le sujet qui nous intéresse, ne seront pas déterminants et les changements vont essentiellement survenir après le XIV^{ème} siècle. Bernard Maitte, dans un ouvrage intitulé *La Lumière* [2], et qui en raconte l'histoire, nous rapporte par exemple que Thierry de Freiberg (mort en 1311) explique les couleurs par le mélange de deux qualités opposées, *l'éclat* et *l'obscurité*. La réfraction provoque un affaiblissement de la lumière et l'apparition des couleurs en est la conséquence.

Nous en arrivons à Alberti. Celui-ci, dans *De La Pittura* (1435), après avoir présenté la dépendance manifeste entre lumière et couleur, se défend d'appartenir à une école de pensée plutôt qu'à une autre sur l'origine des couleurs, mais il ne peut s'empêcher un peu plus loin de les relier aux quatre éléments aristotéliens, ce qui nous montre bien la subsistance de ces notions dans le monde de la Renaissance. Il reste que sa préoccupation d'artiste est constamment présente dans son discours :

« [...] Il est évident que les couleurs sont modifiées par les lumières, et qu'elles sont ou dans l'ombre, ou exposées aux rayons lumineux. L'ombre rend les couleurs sombres, et la lumière les rend vives et claires. Les philosophes affirment qu'on ne saurait voir que ce qui est revêtu de lumière et de couleur. C'est pourquoi il existe entre ces deux effets une très grande parenté, à ce point que, si on enlève la lumière, les couleurs vont peu à peu s'obscurcissant, et qu'au contraire, si on la rétablit, elles reprennent aussitôt leur éclat. Puisqu'il en est ainsi, occupons-nous d'abord des couleurs ; nous verrons après comment elles se modifient par les lumières. Laissons de côté les débats des philosophes sur la première origine des couleurs. Qu'importe au peintre de savoir si elles sont engendrées du mélange du rare avec l'épais, ou du chaud et du sec avec le froid et l'humide ? Ce n'est pas, d'ailleurs, que je mésestime cette opinion philosophique qui veut que les couleurs soient au nombre de sept, le blanc et

le noir formant les deux extrêmes, puis une intermédiaire entre laquelle et ces premières on en place deux autres qui, participant chacune plus que l'autre de sa proche voisine, rendent incertaine la place qu'elles doivent occuper. Il suffit pour le peintre de bien savoir quelles sont les couleurs et l'usage qu'il faut en faire en peinture.

Je ne voudrais pas être repris par les gens instruits qui suivent les opinions des philosophes, affirmant que, dans la nature, il n'y a que deux véritables couleurs, le blanc et le noir, et que toutes les autres naissent de leur mélange. Quant à moi, je sens, comme peintre, que, du mélange des couleurs, on en peut faire d'autres à l'infini. Mais, pour le peintre, il y a quatre sortes de couleurs, nombre des éléments, et dont peuvent naître des variétés considérables. En effet, il y a la couleur du Feu, pour ainsi dire, et qu'on nomme rouge ; il y a celle du Ciel, qui s'appelle céleste ou bleue ; la couleur de l'Eau, qui est le vert ; la couleur de la Terre, ou couleur cendrée. Quant aux autres couleurs, elles résultent du mélange, ainsi que font les jaspes et les porphyres. Ces quatre genres de couleurs forment, par leur mélange avec le blanc et le noir, des variétés innombrables. Car nous voyons les feuillages verts perdre peu à peu leur verdure jusqu'à devenir blancs ; nous voyons également l'air, teint de vapeurs blanches, retourner progressivement à sa première nuance. C'est ce que nous remarquons dans les roses, dont les unes ont le ton de la pourpre ardente, et d'autres celui de la joue des vierges ou la blancheur de l'ivoire. La couleur de terre forme également, par l'adjonction du noir ou du blanc, des tons qui lui sont propres. Ainsi donc, le mélange avec le blanc ne change pas le genre des couleurs, mais il crée des espèces. La couleur noire a cette même puissance ; car le noir, par ses mélanges, engendre des tons divers. En effet, on s'aperçoit bien que la couleur est, dans son premier état, modifiée par l'ombre, puisque, si celle-ci vient à augmenter, la clarté et la pureté de la couleur diminuent ; si, au contraire, la lumière apparaît, les tons s'éclaircissent et s'avivent. Donc, le peintre se pourra convaincre que réellement le blanc et le noir ne sont, pour ainsi dire, que des modifications des colorations, attendu que le peintre n'a rien pu trouver que le blanc pour exprimer le dernier éclat de la lumière, ni rien avec quoi il pût davantage rendre l'extrême obscurité que le noir. Joins-y qu'en aucun lieu tu ne trouveras le blanc ou le noir sans qu'il incline vers quelque genre de coloration. »

Alberti divise la peinture en trois parties : la circonscription, la composition et la réception de la lumière. Dans la troisième partie, il revient sur le rôle essentiel du blanc et du noir en peinture, en particulier pour donner du relief et du modelé au sujet sur le tableau. Le blanc et le noir sont les couleurs par lesquelles on doit représenter sur la toile les lumières et les ombres. Notons la proposition d'utilisation du miroir, que Léonard de Vinci préconisera également, ainsi que de nombreux autres peintres jusqu'à notre époque actuelle.

« [...] Car, comme la chute de la lumière et des ombres produit un effet tel, qu'elles apparaissent en tout endroit où les superficies se soulèvent ou se retirent en creux, et en toute partie où elles déclinent ou fléchissent, ainsi, l'arrangement du blanc et du noir produit l'effet qui valait des louanges au peintre Nicias d'Athènes. C'est là ce que doit d'abord rechercher l'artiste, afin que ses peintures semblent avoir un grand relief.

[...] Quant à moi, je tiendrai pour nul ou médiocre tout peintre qui ne comprendra pas parfaitement quelle puissance toute ombre et toute lumière exercent sur les superficies. Mais, de l'avis des savants et des ignorants, je priserais fort ces figures qui semblent, comme des sculptures, sortir du tableau. Au contraire, je ne saurais que blâmer celles qui n'auraient d'autre qualité d'art que dans les contours. Je veux qu'une composition soit bien dessinée et bien colorée aussi. Or, pour qu'un peintre échappe au blâme et mérite des louanges, il faut qu'il observe surtout les lumières et les ombres. Il faut noter que la couleur doit être plus brillante et plus claire sur une surface où tombent des rayons lumineux, et qu'elle s'assombrit à partir de l'endroit où la force de la lumière commence à s'affaiblir. Enfin, il faut considérer ce fait par lequel les ombres correspondent toujours aux lumières dans un sens opposé ; de sorte qu'en aucun corps une surface ne saurait être éclairée sans que les surfaces qui lui sont opposées soient couvertes d'ombre. Mais j'engage fortement à imiter les lumières et les ombres par le blanc et le noir, afin d'apporter une étude toute spéciale dans la connaissance des surfaces qui sont touchées par la lumière ou l'ombre. C'est ce que la nature, c'est ce que les objets mêmes vous apprendront. Lorsque,

enfin, vous posséderez bien ces notions, vous modifierez la couleur en son lieu et place et dans ses contours par une quantité de blanc extrêmement petite, et au même instant vous aurez soin de poser quelque peu de noir dans la partie opposée, afin que, par cet équilibre de blanc et de noir, pour ainsi dire, un relief, s'élevant, prenne plus d'apparence. Vous continuerez à ajouter ainsi ces deux couleurs avec la même modération, jusqu'à ce que vous sentiez être parvenu à un effet suffisant. Le miroir sera un juge excellent pour l'apprécier. Je ne sais vraiment par quel phénomène une peinture sans défaut paraît gracieuse dans le miroir, et il est étonnant que les fautes y semblent plus grandes. Ainsi donc, les choses faites d'après le naturel sont amendées par le jugement du miroir. » [7].

Le XVII^e siècle sera un siècle de grandes avancées scientifiques, celui qu'on a pu appeler le Siècle de la Lumière, par opposition au siècle suivant des Lumières, puisque c'est dans les années 1600 que de grandes découvertes en optique sont réalisées, depuis la lunette diffusée par Galilée jusqu'aux explications newtoniennes de la lumière. Deux périodes riches vont se succéder, en optique comme en mécanique, la première cartésienne et la deuxième newtonienne.

Pour mieux comprendre les explications de Descartes qui suivront, nous proposons la lecture d'un de ses disciples, Jacques Du Roure qui nous présente les vues des cartésiens dans une langue et une orthographe que nous avons respectées.

« *De l'Opacité & de la Transparance, ou des Corps Diaphanes & Colorez.*

Parce que tous les corps Opaques qui reflechissent la lumiere paroissent Colorez, plusieurs se persuadent que la Couleur de ces corps n'est pas diferente de leur Opacité ou de la disposition de leurs parties ; & qu'en cete sorte, ele demeure toujours atachée, même aux objets que la nuit ne nous permet pas d'apercevoir. Neantmoins s'ils prennent garde à ce qu'on apele proprement Couleur, ils en formeront peut-être une autre idée, que l'on pourroit si je ne me trompe exprimer en cete maniere. *La Couleur est une lumiere terminée par quelques corps, dont les diferentes superficies diversifient le mouvement, qui produit en nous le sentiment de la veuë.* L'explique tous les termes de cete definition par autant de remarques, qui leur correspondent. L'assure que les Couleurs sont la même chose, que la lumiere modifiée par les corps d'où ele vient, ou sur léquels ele tombe. De sorte que là où il n'y a point de lumiere, il n'y a aussi point de Couleur. Ceux qui disent que les Couleurs ne laissent pas d'être, lors mêmes qu'eles ne sont pas éclairées, soutiennent cete proposition & sans experience & contre la raison ; Car comment peuvent-ils sçavoir l'existence des choses qu'ils ne voyent pas, & qu'ils ne peuvent pourtant connoitre que par la veuë. [...] Il faut que la lumiere qui frape nos yeux & qui reçoit le nom de Couleur soit terminée & qu'ele borne notre veuë : Aussi ne la voyons nous jamais dans les corps transparants, mais seulement en ceux qui ont quelque opacité ; c'est-à-dire qui ont leurs pores autrement disposez qu'en ligne droite, & qui consequemment ne sçauroient par leur moyen transmettre l'action des corps lumineux. Les diferentes superficies des corps & les diverses dispositions de leurs parties sont tres-remarquables dans les Couleurs. En sorte que c'est à cause de cét arrangement & de cete disposition des parties que le feu change la Couleur des corps qu'il agite par sa chaleur, & que la neige fonduë perd sa blancheur aveq la figure ronde de ses parties. Pour entendre plus clairement la nature & l'action des Couleurs, aveq la diversité & la necessité du mouvement qui doit se trouver dans les petits corps, qui frappent notre veuë ; il faut le comparer à celui d'une bale qui est ensemble droit & circulaire, & qui peut-être diversement changé par la seule situation des corps. Le mouvement des petits corps lumineux dont nous parlons & dont l'action nous fait apercevoir les objets, est si indubitable que quiconque ne l'admet, ne sçauroit rendre raison pourquoy certaines Couleurs blessent la veuë & en dissipent les esprits. Ce que j'ay dit d'une bale qui ne laisse pas de se mouvoir circulairement, cependant qu'on la pousse en ligne droite vers quelque lieu, se doit entendre du mouvement qu'ele a autour de son centre. Descartes dans son Livre des Meteores prouve que c'est en un pareil roulement que consiste la nature des Couleurs. » [8].

Les Météores de René Descartes (1637) contiennent dans le discours huitième, *De l'arc-en-ciel*, une justification de l'apparition des couleurs selon le système qu'il avait mis en place, système annoncé par Du Roure. Nous y percevons la permanence de l'idée d'une explication des couleurs par un

affaiblissement de la lumière blanche, idée initiée par Aristote. Pour son explication de l'arc-en-ciel, Descartes propose d'utiliser expérimentalement un prisme car celui-ci montre des couleurs semblables à celles observées dans un arc-en-ciel.

« ... J'en ai considéré un qui était tel qu'ici MNP, dont les deux superficies MN et NP sont toutes plates et inclinées l'une sur l'autre, [...]. Et couvrant l'une de ces deux superficies d'un corps obscur, dans lequel il y avait une ouverture assez étroite comme DE, j'ai observé que les rayons, passant par cette ouverture et de là s'allant rendre sur un linge ou papier blanc FGH, y peignent toutes les couleurs de l'arc-en-ciel. [...] En suite de quoi, j'ai tâché de connaître pourquoi ces couleurs sont autres vers H que vers F, nonobstant que la réfraction et l'ombre et la lumière y concourent en même sorte. Et concevant la nature de la lumière telle que je l'ai décrite en la Dioptrique, à savoir comme l'action ou le mouvement d'une certaine matière fort subtile, dont il faut imaginer les parties ainsi que de petites boules qui roulent dans les pores des corps terrestres, j'ai connu que ces boules peuvent rouler en diverses façons, selon les diverses causes qui les y déterminent ; et, en particulier, que toutes les réfractions qui se font vers un même côté les déterminent à tourner en même sens ; mais que, lorsqu'elles n'ont point de voisines qui se meuvent notablement plus vite ou moins vite qu'elles, leur tournoiement n'est qu'à peu près égal à leur mouvement en ligne droite ; au lieu que, lorsqu'elles en ont d'un côté qui se meuvent moins vite, et de l'autre qui se meuvent plus ou également vite, ainsi qu'il arrive aux confins de l'ombre et de la lumière, si elles rencontrent celles qui se meuvent moins vite, du côté vers lequel elles roulent, comme font celles qui composent le rayon EH, cela est cause qu'elles ne tournoient pas si vite qu'elles se meuvent en ligne droite ; et c'est tout le contraire, lorsqu'elles les rencontrent de l'autre côté, comme font celles du rayon DF.

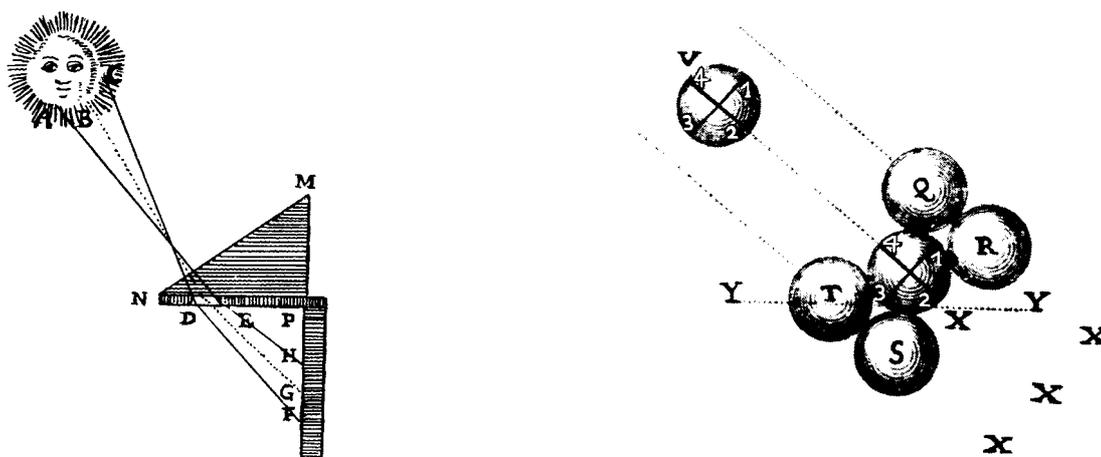


Figure 4

Pour mieux entendre ceci, pensez que la boule 1234 est poussée de V vers X, en telle sorte qu'elle ne va qu'en ligne droite, et que ses deux côtés 1 et 3 descendent également vite jusques à la superficie de l'eau YY, où le mouvement du côté marqué 3, qui la rencontre le premier, est retardé, pendant que celui du côté marqué 1 continue encore, ce qui est cause que toute la boule commence infailliblement à tournoyer suivant l'ordre des chiffres 123. Puis, imaginez qu'elle est environnée de quatre autres, Q, R, S, T, dont les deux Q et R tendent, avec plus de force qu'elle, à se mouvoir vers X, et les deux autres S et T y tendent avec moins de force. D'où il est évident que Q, pressant sa partie marquée 1, et S, retenant celle qui est marquée 3, augmentent son tournoiement ; et que R et T n'y nuisent point, parce que R est disposée à se mouvoir vers X plus vite qu'elle ne la suit, et T n'est pas disposée à la suivre si vite qu'elle la précède.

Ce qui explique l'action du rayon DF. Puis, tout au contraire, si Q et R tendent plus lentement qu'elle vers X, et S et T y tendent plus fort, R empêche le tournoiement de la partie marquée 1, et T celui de la partie 3, sans que les deux autres Q et S y fassent rien. Ce qui explique l'action du rayon

EH. Mais il est à remarquer que, cette boule 1234 étant fort ronde, il peut aisément arriver que, lorsqu'elle est pressée un peu fort par les deux R et T, elle se revire en pirouettant autour de l'essieu 42, au lieu d'arrêter son tournoiement à leur occasion, et ainsi que, changeant en un moment de situation, elle tournoie après suivant l'ordre des chiffres 321 ; car les deux R et T, qui l'ont fait commencer à se détourner, l'obligent à continuer jusques à ce qu'elle ait achevé un demi-tour en ce sens-là, et qu'elles puissent augmenter son tournoiement, au lieu de le retarder. Ce qui m'a servi à résoudre la principale de toutes les difficultés que j'ai eues en cette matière.

Et il se démontre, ce me semble, très évidemment de tout ceci, que la nature des couleurs qui paraissent vers F ne consiste qu'en ce que les parties de la matière subtile, qui transmet l'action de la lumière, tendent à tourner avec plus de force qu'à se mouvoir en ligne droite ; en sorte que celles qui tendent à tourner beaucoup plus fort causent la couleur rouge, et celles qui n'y tendent qu'un peu plus fort causent la jaune. Comme, au contraire, la nature de celles qui se voient vers H ne consiste qu'en ce que ces petites parties ne tournoient pas si vite qu'elles ont de coutume, lorsqu'il n'y a point de cause particulière qui les en empêche ; en sorte que le vert paraît où elles ne tournoient guère moins vite, et le bleu où elles tournoient beaucoup moins vite. Et ordinairement aux extrémités de ce bleu, il se mêle de l'incarnat, qui, lui donnant de la vivacité et de l'éclat, le change en violet ou couleur de pourpre. Ce qui vient sans doute de ce que la même cause, qui a coutume de retarder le tournoiement des parties de la matière subtile, étant alors assez forte pour faire changer de situation à quelques-unes, le doit augmenter en celles-là, pendant qu'elle diminue celui des autres. Et, en tout ceci, la raison s'accorde si parfaitement avec l'expérience, que je ne crois pas qu'il soit possible, après avoir bien connu l'une et l'autre, de douter que la chose ne soit telle que je viens de l'expliquer. » [9]

Il faudra attendre quelques années pour qu'Isaac Newton nous fournisse une explication, elle aussi appuyée par l'expérience du prisme traversé par la lumière du soleil, mais considérant cette lumière comme la "somme" ou synthèse de lumières élémentaires. Dans son *Traité d'Optique*, il appelle homogène cette lumière élémentaire :

« Toute lumière homogène a sa couleur propre qui répond à ses degrés de réfrangibilité, et cette couleur ne peut être changée ni par réflexion ni par réfraction. »

Dans les expériences décrites plus haut, après que j'eus séparé les rayons hétérogènes les uns des autres, le spectre formé par des rayons séparés, en avançant depuis son extrémité sur laquelle tombèrent les rayons les plus réfrangibles, jusqu'à son autre extrémité sur laquelle tombèrent les rayons les moins réfrangibles, parut illuminée des couleurs suivantes, dans l'ordre que je vais les nommer : le violet, l'indigo, le bleu, le vert, le jaune, l'orangé, le rouge, avec tous les degrés intermédiaires dans une continuelle succession qui variait perpétuellement ; de sorte qu'on voyait autant de degrés de couleurs qu'il y avait d'espèces de rayons de différente réfrangibilité.

Or, que ces couleurs ne pussent point être changées par réfraction, c'est de quoi je m'assurai en rompant avec un prisme, tantôt une très petite partie de cette lumière et tantôt une autre. Car par cette réfraction la couleur de la lumière ne fut jamais changée le moins du monde. Si quelque partie de la lumière rouge était rompue, elle demeurait entièrement du même rouge qu'auparavant. Cette réfraction ne produisait ni orangé, ni jaune, ni vert, ni bleu, ni aucune nouvelle couleur. Et bien loin que la couleur fût changée en aucune manière par des réfractions répétées, c'était toujours entièrement le même rouge que la première fois. Je trouvai la même immutabilité dans le bleu, le jaune et les autres couleurs. De même, lorsque je regardai au travers d'un prisme quelque corps illuminé de quelque partie que ce fût de cette lumière homogène, il ne me fut pas possible d'apercevoir aucune nouvelle couleur produite par ce moyen-là. Tous corps illuminés d'une lumière hétérogène, regardés au travers d'un prisme, paraissent confus et teints de diverses couleurs nouvelles. Mais ceux qui sont illuminés d'une lumière homogène, ne paraissent au travers des prismes, ni moins distincts, ni autrement colorés que lorsqu'on les regardait simplement avec l'œil. La couleur n'en était nullement changée par la réfraction du prisme interposé. Je parle ici d'un changement sensible de couleur. Car la lumière que je nomme ici homogène, n'étant pas homogène absolument et à toute rigueur, son hétérogénéité doit produire un petit changement de couleur. Mais lorsque cette hétérogénéité diminuait jusqu'au point où

l'on peut la réduire par les expériences mentionnées ci-dessus, ce changement de couleur était insensible; et par conséquent, dans des expériences où les sens sont juges, il doit être compté pour rien.

Et comme ces couleurs ne pouvaient être changées par des réfractions, elles ne l'étaient pas non plus par des réflexions. Car tout corps blanc, gris, rouge, jaune, vert, bleu, violet, comme le papier, les cendres, le vermillon, l'orpiment, l'indigo, l'azur, l'or, l'argent, le cuivre, l'herbe, les fleurs bleues, les violettes, les bulles d'eau teintées de différentes couleurs, les plumes de paon, la teinture du bois néphrétique, et autres telles choses, tout cela exposé à une lumière homogène rouge, paraissait entièrement rouge, à une lumière bleue entièrement bleu, à une lumière verte entièrement vert, et ainsi des autres couleurs. Dans la lumière homogène de quelque couleur que ce fût, tous ces corps paraissaient totalement de cette même couleur, avec cette seule différence que quelques-uns réfléchissaient cette lumière d'une manière plus forte, et d'autres d'une manière plus faible. Mais je n'ai point encore trouvé de corps qui, en réfléchissant une lumière homogène, pût en changer sensiblement la lumière.

De tout cela, il s'ensuit évidemment que, si la lumière du soleil ne consistait qu'en une seule sorte de rayons, il n'y aurait qu'une seule couleur dans le monde ; qu'il ne serait pas possible de produire aucune nouvelle couleur par voie de réflexion ou de réfraction ; et que, par conséquent, la diversité des couleurs dépend de ce que la lumière est un composé de rayons de différentes espèces.

[...] Que si je parle quelquefois de la lumière et des rayons comme colorés, je prie le lecteur de se ressouvenir que je ne prétends pas parler philosophiquement et proprement, mais grossièrement et conformément aux conceptions que le peuple serait sujet à se former en voyant les expériences que je propose dans cet ouvrage. Car à parler proprement, les rayons ne sont point colorés, n'y ayant autre chose en eux qu'une certaine puissance ou disposition à exciter une sensation de telle ou telle couleur. Car comme le son n'est dans une cloche, dans une corde de musique, ou dans aucun autre corps résonnant, qu'un mouvement tremblotant ; qu'il n'est dans l'air que ce même mouvement transmis depuis l'objet ; et que dans le lieu des sensations c'est le sentiment de ce mouvement sous la forme de son : de même les couleurs dans les objets ne sont autre chose que la disposition qu'ils ont à réfléchir telle ou telle espèce de rayons en plus grande abondance que toute autre espèce ; et dans les rayons qu'une disposition à transmettre tel ou tel mouvement jusque dans le sensorium, où se font les sensations de ces mouvement sous forme de couleurs. » [10].

Avant Newton, la lumière blanche est homogène et c'est son affaiblissement par la traversée de milieux réfringents qui est la cause des couleurs. Après lui, la lumière blanche s'obtient par la synthèse additive des lumières colorées homogènes qui la composent.

Sur le principe, une jonction paraît être faite avec les artistes : la couleur sur la toile peut s'obtenir par la somme (mélange) d'autres couleurs ; il s'agit bien sûr de synthèse soustractive, mais le rapprochement symbolique entre savants et artistes est pour nous suffisamment net pour que nous ne résistions pas à le souligner.

IV. La perspective

Si on veut faire une rétrospective rapide de la méthode utilisée par les artistes pour représenter l'espace, on peut parler de réalisme intellectuel chez les Anciens et au Moyen-Âge, par opposition au réalisme visuel de la Renaissance. On a pu peindre de la manière que l'on pense par opposition à la manière dont on voit. Si l'on n'a pas toujours peint de la façon dont on voit, il n'y a pas seulement un problème technique mais aussi un problème éthique, il y a différentes façons de voir le monde et de le montrer. Chez les Égyptiens, toutes les représentations de personnages obéissent aux mêmes règles : pieds de profil, épaules de face, tête de profil avec un œil de face. Pour les objets, on utilise de simples projections orthogonales (vues en plan par exemple) et des rabattements. Dans l'Antiquité toujours, mais chez les Romains, à Pompeï, on a retrouvé des fresques et des mosaïques qui prouvent que les Romains ont représenté des paysages « en perspective » ou des pièces en trompe-l'œil sur les murs. Et puis on a changé de mode de pensée. En Occident surtout, les règles de la religion sont assez strictes et

dans les tableaux, on ne représente pas (ou presque) de paysages qui s'éloignent vers l'arrière plan car on peint un fond doré qui symbolise la présence divine. La taille des personnages ne dépend pas de leur éloignement (plus on est loin, plus on est petit) mais dépend de leur importance liturgique (plus on est important, plus on est grand). À la fin de la période médiévale, des peintres comme Giotto ou certains artistes flamands commencent à peindre un décor où les éléments lointains se rejoignent en un point. Il s'agit, comme chez les Romains, de perspective empirique. Il n'y a pas d'unité spatiale, il n'est pas rare de voir se côtoyer sur un même tableau différentes perspectives (avec fuyantes concourantes ou avec fuyantes parallèles). À la Renaissance, on veut représenter ce que l'on voit, tel qu'on le voit. Se pose alors le problème technique de façon cruciale. Quelques mathématiciens ou architectes ont laissé des ouvrages sur le "comment on voit". Citons Euclide, Vitruve pour les plus anciens. C'est au XV^e siècle que l'on a réussi pour la première fois à peindre en réalisant une construction juste, qui se confonde avec la réalité lorsqu'on regarde depuis le bon point de vue.

A. Comment on voit

Euclide (environ -300) est surtout connu pour ses *Eléments* mais, d'après le témoignage de Proclus de Lycie (philosophe du V^e siècle), on lui attribue aussi un traité d'optique. Pour Euclide (définition 1), les rayons visuels ont leur source dans l'œil et se propagent en lignes droites qui divergent de manière à embrasser dans leur angle la grandeur regardée. Puis (définition 4), la taille des objets dépend de l'angle sous lequel on les voit. Euclide est ensuite amené à démontrer un certain nombre de propositions, dont celle-ci :

« PROPOSITION IV (théorème)

Parmi les longueurs égales se trouvant sur une même droite, celles qui sont vues à plus grande distance apparaissent plus petites.

Soient AB, BC, CD des longueurs égales situées sur une seule et même droite, et menons à angles droits la droite AE, sur laquelle nous plaçons l'œil E. Je dis que la longueur AB paraîtra plus grande que la longueur BC, et la longueur BC plus grande que la longueur CD. En effet, menons les rayons incidents EB, EC, ED, et menons par le point B, la droite BZ parallèle à la droite CE. En conséquence, la droite AZ est égale à la droite ZE ; car, puisque la droite BZ est menée parallèlement à l'un des côtés CE du triangle AEC, il s'ensuit que la droite EZ est à la droite ZA comme la droite CB est à la droite BA ; donc la droite AZ est égale à la droite ZE comme nous venons de le dire. Or, le côté BZ est plus grand que le côté ZA ; donc il est aussi plus grand que le côté ZE ; donc l'angle compris sous les droites ZE, EB est aussi plus grand que l'angle compris sous les droites ZB, BE. De plus, l'angle compris sous les droites ZB, BE est égal à l'angle compris sous les droites BE, EC ; donc, l'angle compris sous les droites ZE, EB est aussi plus grand que l'angle compris sous les droites CE, EB. En conséquence, la droite AB sera vue plus grande que la droite BC. Derechef, si l'on mène de même, par le point C, la droite parallèle à la droite DE, la droite BC sera vue plus grande que la droite CD. » [11].

B. Comment on fait voir ce que l'on voit

Si l'on intercale un tableau (T) entre l'œil E et la ligne (AD) parallèlement à cette ligne, comment doit-on dessiner les images des segments AB, BC, CD sur (T) pour faire voir ce que l'on voit ? La réponse est évidemment que ces images sont des segments de mêmes longueurs et ceci est d'ailleurs utilisé par Alberti dans le *Traité de la PEINTURE* :

« Mon premier acte, quand je veux peindre une superficie, est de tracer un rectangle, en guise de fenêtre ouverte par où je puisse voir le sujet. Là, je détermine la hauteur des hommes que j'entends représenter. Je divise cette hauteur en trois parties qui seront proportionnelles à la mesure que le vulgaire désigne sous le nom de brasse. Car on voit par les proportions des membres de l'homme, que la longueur du corps humain est généralement de trois brasses. Je divise la ligne inférieure du rectangle en autant de parties que cette mesure y est contenue de fois. » [7].

Pour trouver la taille des personnages à dessiner, Alberti utilise les subdivisions du quadrillage horizontal : chaque personnage devra mesurer 3 brasses de haut, soit un peu plus de 1,70 m (qui a dit

qu'à la Renaissance les gens étaient plus petits qu'aujourd'hui ?) ; sur la transversale où l'on veut placer un personnage, on mesure 3 graduations et on reporte cette mesure « en hauteur » pour connaître la taille à donner à cette personne dans le dessin.

Pour quadriller le sol et donner des repères pour peindre, Alberti utilise la propriété que des segments isométriques placés sur une transversale auront des images isométriques entre elles sur une transversale du tableau, chaque graduation est alors proportionnelle à une brasses.

« La base du rectangle sera proportionnelle à la ligne transversale la plus rapprochée tracée sur le sol à égale distance de tous les points de la première. Je pose ensuite un point unique, dans l'aire du rectangle, à l'endroit où se porte la vue et où doit aboutir le rayon central. Aussi le nommé-je point de centre. [...] Le point de centre une fois placé, je mène des lignes droites de ce point à toutes les divisions de la ligne de base. Ces lignes me montrent de quelle manière les quantités transversales successives semblent se rétrécir à la vue, par la distance, jusqu'à l'infini. » [7].

Alberti affirme ici qu'il existe un unique point vers lequel convergent les lignes perpendiculaires au plan du tableau. Ce point était déjà utilisé depuis longtemps, sans que son existence et son unicité aient jamais été démontrées auparavant. Il sera appelé plus tard point de fuite et il faudra attendre la fin du XVI^{ème} siècle pour que l'architecte italien Vignole lui donne enfin une légitimité.

« Il en est qui traceraient à travers le rectangle une ligne dont tous les points seraient également distants de ceux de la ligne de base, puis ils diviseraient en trois parties, dans le sens des lignes, l'espace compris entre l'une et l'autre. Enfin, suivant leur méthode, ils traceraient une nouvelle ligne dont les points seraient également distants de ceux de la seconde, à une distance telle, que l'espace compris entre la ligne de base et cette seconde dépassât d'une de ces parties l'espace compris entre la seconde et la troisième ligne, et ainsi de suite jusqu'à ce que les dernières lignes se confondissent en une seule. Cela, en observant que chaque espace compris entre les lignes fût, comme disent les mathématiciens, en dégradation par rapport à celui qui le précède. Pour moi, j'estime que ceux qui pensent suivre ainsi, en peinture, une bonne voie, se trompent sensiblement, attendu qu'ayant placé au hasard la première ligne au-dessus de celle de la base, quand même les autres lignes seraient dans un ordre logique et régulier, il ne s'ensuivrait pas, pour cela, qu'on obtint l'endroit juste et précis où doit aboutir la pointe de la pyramide ni un point de vue exact. Ajoutez que cette méthode serait on ne peut plus fautive chaque fois que le point de centre serait placé au-dessus ou au-dessous de la stature du personnage. » [7].

Les artistes du XIV^è et du début du XV^è siècle utilisaient souvent cette règle dite « des deux tiers » qui consistait à calculer les espaces entre les lignes transversales en progression géométrique de raison $2/3$. Cette méthode est inexacte (quelle que soit la raison de la suite géométrique d'ailleurs) et les arguments donnés par Alberti sont probants ; mais on peut aussi remarquer qu'avec cette construction on ne peut pas tracer une diagonale unique au quadrillage ainsi dessiné (voir figure ci-dessous).

Est-ce parce que la somme des termes d'une suite géométrique (infinie) de raison $2/3$ est égale à 3 qu'Alberti a fait sa remarque à propos de la position du point de centre ?

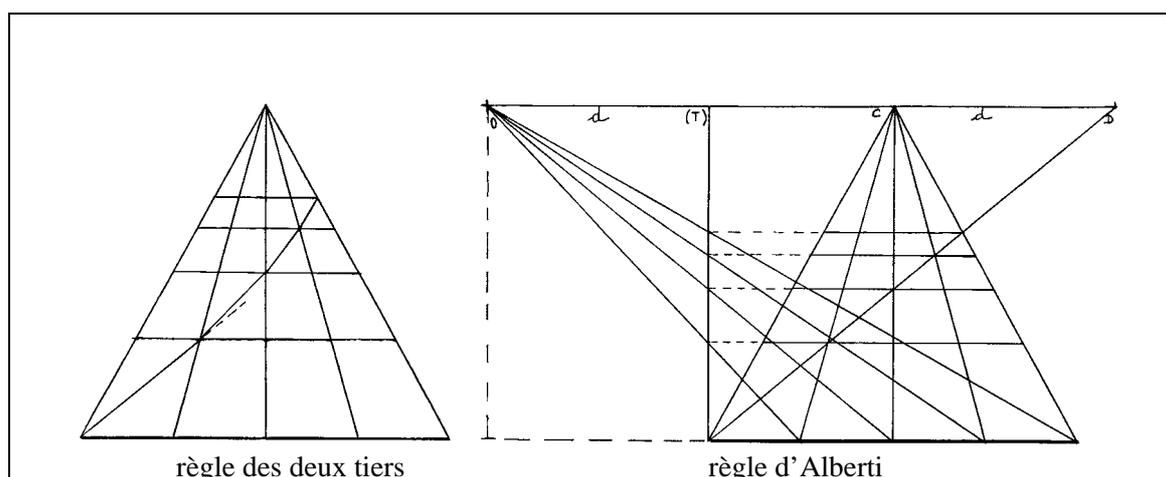


Figure 5

« [...] Quant aux quantités transversales, voici comment je procède : j'ai une aire où je trace une ligne droite que je divise en mêmes parties que l'est déjà la ligne de base du rectangle ; puis je pose sur cette ligne un point unique aussi élevé que le point de centre l'est lui-même au-dessus de la ligne divisée base du rectangle ; et, de ce premier point, je mène une ligne à chaque division de la base. Je décide alors de la distance que je veux qui soit entre l'œil du spectateur et la peinture. Là, ayant établi l'endroit de l'intersection par une ligne perpendiculaire, comme disent les mathématiciens, je forme intersection avec toutes les lignes qu'elle rencontre. [...] En effet, cette ligne perpendiculaire, par les intersections qu'elle détermine, me donnera les limites de toute la distance qui doit exister entre les lignes transversales du sol parallèles entre elles. » [7].

Nous y voilà, la construction tant attendue est enfin dévoilée, sous forme de recette, fais comme ci, fais comme ça, et tu auras dessiné ce que tu veux. Cette recette tient du miracle, puisque rien n'est démontré, au sens euclidien du terme, mais elle fonctionne bien, et pour le vérifier, lisons la suite du texte d'Alberti :

« J'aurai donc dessiné ainsi sur le sol toutes les parallèles, et j'aurai la preuve qu'elles seront faites régulièrement, si une ligne continuée, tracée sur le sol, sert de diamètre aux rectangles juxtaposés. Les mathématiciens nomment diamètre d'un rectangle cette ligne droite qui, allant d'un angle à celui qui lui est opposé, divise le rectangle en deux parties, de façon à en faire deux triangles. ... » [7].

Alberti est convaincu de la justesse de la construction car il peut tracer une diagonale au quadrillage. Cette diagonale rencontre la ligne de centre en un point appelé plus tard "point de distance", et on peut constater que la longueur entre le point de centre et le point de distance est précisément la même que la longueur entre l'œil et le tableau. Si d'aventure on peut trouver le point de fuite d'un tableau ainsi que le point de distance, connaissant la longueur d qui les sépare, on place un œil sur la perpendiculaire au tableau passant par le point de fuite, à la distance d , et on verra le tableau tel que le peintre voyait la réalité lorsqu'il l'a dessinée, c'est-à-dire en trois dimensions !

Ce texte d'Alberti fait date dans l'histoire de la peinture car il est le premier qui explique la « construction légitime », mais il n'a pas eu un retentissement très important car d'autres théoriciens, dès le quattrocento, ont expliqué comment procéder, ont démontré, par des raisonnements mathématiques la justesse des constructions, ont surtout utilisé une construction plus facile que celle d'Alberti, en se servant du point de distance (citons notamment Piero Della Francesca à la fin du XV^e siècle). L'équivalence des deux constructions ne fut démontrée que bien plus tard, au XVII^e siècle par Del Monte.

Les peintres de la Renaissance peuvent désormais faire voir ce qu'ils voient, à condition que le spectateur soit placé au bon point de vue. Les constructions sont longues et fastidieuses, ils vont chercher à s'en affranchir en inventant des machines à "perspectiver".

L'histoire de la représentation de l'espace ne s'arrête pas là et, selon que l'on est astronome, géographe, cristallographe, architecte, militaire ou tout simplement professeur de mathématiques, on va vouloir montrer certaines propriétés bien particulières du ciel, d'un lieu, d'une pierre, d'une place à fortifier, d'un solide. Il va falloir mettre au point d'autres perspectives ou projections de l'espace sur un plan pour montrer ce que l'on veut faire voir. On rejoint alors les préoccupations des musiciens qui doivent créer les gammes telles qu'elles permettront de percevoir ce qu'ils ont envie de faire entendre.

V. Conclusion

Ainsi, comme de nombreux autres artistes, Alberti a utilisé son savoir rationnel pour comprendre et justifier ses propres perceptions esthétiques. Cette approche n'est pas étonnante quand on sait l'étendue des connaissances de ce grand humaniste de la Renaissance. Elle fut cependant contestée, et ceci depuis l'antiquité, par des artistes qui, plus instinctifs, ne s'embarrassaient pas de telles contraintes. Mais bien que les relations entre l'art et la science ne soient plus les mêmes, des artistes continuent à s'intéresser aux évolutions techniques et scientifiques pour dynamiser leur propre inspiration.

Bibliographie

- [1] BLAY M. *Lumières sur les couleurs, le regard du physicien*, collection l'Esprit des sciences, Ellipses, 2001.
[2] MAITTE B. *La Lumière*, Points Sciences, Seuil, 1981.

Textes étudiés

- [3] NICOMAUQUE de GÉRASE. *Manuel d'Harmonie*. Traduction en français de Ch. E. Ruelle. Baur libraire-éditeur, 1881.
[4] ALBERTI, Leone Battista. *De Re Aedificatoria. Architecture et art de bien bestir*, traduit en français par Ian Matin. Éditeur : J. Kerver à Paris. 1553.
[5] PLATON. *Le Timée*. Traduction, introduction et notes par Luc Brisson, GF Flammarion, 1992.
[6] ARISTOTE. *De Coloribus. Sur les couleurs*. Traduction anglaise de W.S. Hett, The Loeb Classical Library, London, W. Heinemann Ltd, 1936, traduction française de Frédéric Métin, Dijon, 2001.
[7] ALBERTI, Leone Battista. *De La Pittura* (manuscrit datant de 1435), traduit du latin en français par Claudius Popelin, édité par A. Lévy, Paris, 1869.
[8] Du ROURE, Jacques. *La physique expliquée suivant le sentiment des anciens et nouveaux philosophes ; & principalement de Descartes*, à Paris, chez l'avtevr, 1653.
[9] DESCARTES, René. *Les Météores* (1637). Réédition Garnier-Flammarion, 1966.
[10] NEWTON. *Traité d'Optique*, traduction Coste, Paris, 1722, reproduit dans *Pages choisies de savants modernes*, Rebière, Paris, 1900.
[11] EUCLIDE. *L'optique et la catoptrique*. Traduction de Paul Ver Eecke, Blanchard, Paris 1959.

La musique au carrefour des mathématiques, des sciences et des arts

Anne Boyé,

professeure, lycée de Grand Air, La Baule ; IREM Pays de Loire

I. Introduction

L'idée de cet atelier est née de questions lors de l'animation de stages sur les travaux personnels encadrés (TPE). Les enseignants avaient des difficultés à imaginer des sujets dans lesquelles les mathématiques n'apparaîtraient pas seulement comme discipline de service. La plupart du temps, dans ce cas, le niveau demandé était alors très au-dessus de celui d'un élève de première. Je suggérais alors la musique, ce qui ne manquait pas d'étonner : musique et physique, certes, mais les mathématiques ?

Cet étonnement s'est retrouvé, avec plus de force encore, lors de journées de formation en deuxième année d'Iufm.

Il suffit souvent de proposer quelques textes simples et évocateurs, pour qu'une réflexion démarre. Ce fut l'objet de cet atelier. Il ne s'agit pas ici de faire une histoire complète des théories de la musique, ni d'entrer dans le détail du phénomène musical, mais de donner quelques éléments qui permettront d'aller plus loin et qui ont fait l'objet de la discussion pendant l'atelier. Trois points de vue seront abordés : le point de vue des mathématiques, le point de vue de la physique, et le point de vue de la physiologie. Il reste bien sûr ceux de l'esthétique, de l'art, qui sont évidemment essentiels, mais qui viennent plus facilement à l'idée. Comme on peut s'en douter, il en a été question lors de l'atelier, mais ils peuvent être éclairés par la connaissance des trois autres.

Ce programme est presque parfaitement résumé dans le chapitre I du *Tentamen novae theoriae musicae*¹ de L. Euler, "Du son et de l'ouïe" :

"Notre dessein étant de traiter la musique comme on traite les sciences exactes, où il n'est permis de rien avancer dont la vérité ne puisse être démontrée par ce qui précède, nous devons avant tout exposer la doctrine du son et de l'ouïe : la première fournit la matière de la musique, et la seconde en embrasse le but et la fin qui est de charmer l'oreille ; car la musique enseigne comment il faut produire et combiner les sons pour qu'il en résulte une harmonie qui affecte agréablement le sens de l'ouïe. La nature des sons, leur formation et leurs variétés, voilà donc ce qu'il faut que nous examinions ; et c'est dans la physique et dans les mathématiques que nous puiserons les moyens d'en acquérir une connaissance suffisante. Si à cette connaissance nous ajoutons ensuite celle des principaux organes de l'ouïe, nous comprendrons comment se fait la perception des sons. On sentira facilement quel avantage on tirera de ces notions pour établir avec solidité les bases de la musique, si l'on réfléchit que l'agrément qu'on trouve dans les sons, dépend de la manière dont on les perçoit, et que par conséquent c'est là qu'il faut en chercher l'explication." [10].

II. Le point de vue des mathématiques

Pourrait-on dire que la musique, du moins occidentale, n'aurait pas existé sans les mathématiques ? Rappelons qu'au moyen âge, les quatre "arts mathématiques", désignés par le quadrivium, comportaient l'arithmétique, la musique, la géométrie et l'astronomie.

Un peu plus tard, sans que cette tradition ait vraiment perduré, les mathématiques transparaissent de façon persistante dans la musique, au moins pour tout ce qui concerne la théorie. Écoutons plutôt Jean-Philippe Rameau :

"Nonobstant toute l'expérience que je pouvais m'être acquise dans la musique pour l'avoir pratiquée pendant une assez longue suite de temps, ce n'est cependant que par le secours des mathématiques que mes idées se sont débrouillées, et que la lumière y a succédé à une certaine obscurité dont je ne m'apercevais pas auparavant." [18].

Ce sentiment n'est pas, pour autant, partagé totalement par d'autres. Dans les faits, si les mathématiques sont le fondement de la théorie musicale, déjà chez les grecs anciens, nous en reparlerons, certains comme par exemple Aristoxène, s'élevaient contre le "tout mathématique" dans la musique, contre le dogme du nombre des pythagoriciens.

Comme en toute chose, il est souvent bon de trouver un juste équilibre. En musique, en particulier, il y a la théorie et l'usage que l'on peut en faire pour construire une œuvre d'art. C'est ce que D'Alembert exprime dans son introduction à "Eléments de musique selon les principes de M. Rameau", en 1752 :

"La considération des rapports est sans doute nécessaire à quelques égards dans la musique pour la composition des sons entre eux ; (...) mais la considération des rapports est illusoire pour rendre raison du plaisir que la musique nous cause." [6].

Quoiqu'il en soit, nous retrouvons en théorie de la musique la plupart des grands noms des mathématiques : Galilée, Descartes, Leibniz, Huygens, Euler, déjà cité, D'Alembert, ...

Examinons les choses d'un peu plus près. La musique occidentale repose sur la notion de gammes, qui définissent les sons que l'on peut employer dans son écriture, puis sur les agencements de ces sons pour construire un assemblage agréable. Il semble logique de penser que tout a commencé par des expériences. Traditionnellement l'instrument expérimental pour la musique est ce que l'on nomme le monocorde, une corde tendue sur une caisse de résonance, dont on peut faire varier la longueur et la tension :

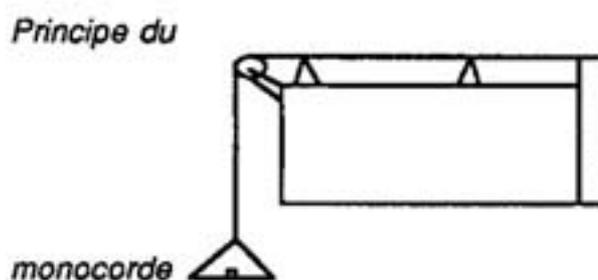


Figure 1

Dans un premier temps, on observera que si on place le chevalet au milieu de la corde, les deux parties de la corde donnent le même son, plus aigu, que celui produit par la corde entière ; si on place le chevalet au tiers à partir d'une des extrémités, la partie la plus longue donne un nouveau son (la quinte supérieure du son initial), etc.

Les pythagoriciens auraient rapidement modélisé leurs observations, c'est-à-dire mathématisé, voire axiomatisé la définition de sons qui joués ensemble résonneront agréablement. Deux sons qui pris ensemble donnent une des impressions les plus agréables sont ceux qui diffèrent d'une quinte. À partir de là, on construit la gamme pythagoricienne, basée sur le "cycle des quintes".

Par exemple, l'intervalle mesuré par le rapport $\frac{3}{2}$ s'appelle une quinte.

L'octave s'exprime par le rapport $\frac{2}{1}$.

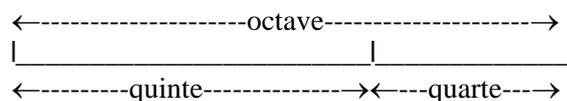


Figure 3

Nous voudrions savoir quel est le complément à l'octave de la quinte, c'est-à-dire l'intervalle qu'il faut ajouter à une quinte pour obtenir l'octave.

Ce sera : $\frac{2}{1} \div \frac{3}{2}$ c'est-à-dire $\frac{4}{3}$, qui se nomme une quarte.

Une quarte plus une quinte donne l'octave, car le produit de leurs rapports donne 2. Nicolas Mercator (1620-1687) est un des premiers à avoir constaté que les logarithmes étaient l'instrument privilégié pour la mesure des intervalles. Il n'est pas inintéressant de donner cette autre vision des logarithmes, comme instrument de mesure des rapports.

La différence entre une quinte et une quarte est un ton : le ton correspond donc au rapport $\frac{3}{2} \div \frac{4}{3} = \frac{9}{8}$.

Le logarithme est presque devenu partie intégrante de la musique. Par exemple, le cent est l'unité logarithmique de hauteur des sons. 1200 cents correspondent à 1 octave.

Revenons à l'établissement de la gamme, à partir par exemple du cycle pythagorien. "Ajoutant" des quintes, on dépasse bien sûr l'octave. Or la gamme est constituée de notes qui partagent l'octave en une suite d'intervalles. Pour obtenir ces notes, l'usage est de se "ramener" à l'octave.

Une première quinte correspond au rapport $\frac{3}{2}$, par exemple l'intervalle do-sol. Lui "ajoutant" une deuxième quinte, on obtient : $\frac{3}{2} \times \frac{3}{2}$ soit $\frac{9}{4}$, qui est supérieur à 2. Se ramener à l'octave, c'est diviser

par 2 autant de fois que nécessaire pour obtenir un rapport inférieur à 2. Ici ce sera : $\frac{9}{4} \div 2$ soit $\frac{9}{8}$, qui correspond au ton. Ainsi on obtient la note ré, partant de do. Etc.

Il n'entre pas dans mon propos, comme je l'ai souligné en introduction, de rentrer dans le détail de la construction de la théorie musicale ; il s'agit juste de donner quelques pistes de travaux possibles avec nos élèves. Vous trouverez, en bibliographie, de nombreux textes sur ce sujet, abordables par eux et par quiconque n'a pas une formation musicale particulièrement poussée.

Il sera bon par exemple d'évoquer la gamme de Zarlino et d'apercevoir à quel problème musical elle voulait répondre. Bien sûr il faudra évoquer aussi le problème des gammes tempérées, excellente réponse à la demande de simplicité de transposition ou de jouabilité, au moment où des instruments comme le clavecin, sur lesquels il est difficile de faire varier la longueur de cordes par exemple, apparaissent, au détriment de la justesse des sons. Il sera nécessaire pour cela d'abandonner le dogme de la rationalité des rapports. La gamme tempérée, qui correspond par exemple aux notes du piano, s'obtient en divisant l'octave en 12 demi-tons égaux. Chacun correspond donc à un intervalle qui s'exprime par un nombre t dont la puissance douzième est 2.

$$t^{12} = 2 \text{ donc } t = \sqrt[12]{2}$$

Peut-on encore parler de sons consonants, de sons qui, joués ensemble, produisent un effet agréable à l'oreille ? La discussion dans ce cas va devenir plus physique, physiologique et artistique.

La lecture du texte d'Euler se présente alors comme un petit joyau pour aller plus avant dans ce questionnement. Nous y retrouvons le traité d'arithmétique, avec des tableaux impressionnants de diviseurs, de PGCD, de PPCM, et une reconstruction de toutes les gammes à partir de principes clairement établis, et d'autres, absolument époustouflantes, injouables à son époque sur les instruments existants. Signalons seulement que, par exemple Kirnberger, un élève de J.-S. Bach, a mis en pratique les théories d'Euler et fait construire des orgues permettant de jouer les sons de ses gammes.

Le propos d'Euler est en quelque sorte de mettre tout à plat et de reconstruire scientifiquement :

"Il résulte clairement des bons et mauvais jugements dont nous venons de parler, qu'il doit y avoir une théorie qui, se basant sur les principes les plus certains, peut expliquer pourquoi telle musique plaît ou déplaît. C'est pourquoi nous avons résolu de faire de ces principes l'objet de nos recherches, et d'établir sur eux une nouvelle théorie de la musique. Beaucoup d'autres avant nous ont entrepris ce travail, mais personne n'est allé au-delà de la doctrine des accords ; celle-ci même n'a pas été traitée de manière qu'on puisse en faire usage dans la pratique. Nous laissons à d'autres le soin de juger combien nous avons contribué à la solution d'une question que nous n'avons pas traitée dans toute son étendue ; cependant nous dirons que les préceptes qui découlent de notre théorie, s'accordent tellement bien avec la musique généralement approuvée, qu'il nous est impossible de douter de la solidité et de la vérité de nos principes. Pour obtenir cet accord nous avons rempli nous-mêmes la tâche du physicien, et nous avons poussé nos investigations sur les véritables causes de ce qui, d'après l'opinion commune, contribue à rendre la musique agréable ou désagréable. Si donc notre théorie est confirmée par l'expérience, nous croyons nous être acquitté de la tâche que nous sommes imposée." [10].

III. Le point de vue de la physique

Pour construire sa théorie, Euler commence par s'intéresser à ce qu'il nomme, ainsi que nous l'avons dit plus haut, "la doctrine du son et de l'ouïe". "La première fournit la matière de la musique, et la seconde en embrasse le but et la fin qui est de charmer l'oreille. (...) La nature des sons, leur formation et leurs variétés, voilà donc ce qu'il faut que nous examinions." [10].

Nous devons reconnaître que la connaissance de l'organe de l'ouïe à l'époque d'Euler est assez restreinte et se résume plus ou moins au tympan. Mais nous nous proposons ici de considérer le point de vue de la physique et Euler, sur ce plan, avance des arguments assez performants et fera même progresser la connaissance des instruments à vent.

Pour comprendre en quoi consiste le son, il prend, de façon classique, le modèle d'une corde tendue, qui, frappée, rend un son. Le choc sur la corde lui confère un mouvement vibratoire, qui est transmis aux molécules de l'air, ces vibrations s'affaiblissant au fur et à mesure qu'on s'éloigne de la source. La perception du son n'est autre que la perception des vibrations sur le tympan.

La propagation n'est pas instantanée et cette assertion donne l'occasion à notre mathématicien d'évoquer la mesure de la vitesse du son. Euler ne se contente pas d'affirmer, il justifie par des observations.

Tout son est de nature vibratoire, mais il y a des sons qui sont des "bruits" et d'autres qui sont agréables, comme la musique. Parmi ces sons agréables, il y a ceux qui sont produits par les cordes d'instruments comme les clavecins ou les violons. On peut se demander pourquoi elles produisent des sons de hauteurs différentes par exemple. Euler n'est pas le premier à essayer de donner une explication physique au phénomène. Galilée, dans la "Première journée" de son "Discours sur deux sciences nouvelles", en propose une explication. Il avance l'idée que tout réside dans la fréquence de vibrations de la corde mise en mouvement.

"Si après avoir disposé une corde sur un monocorde on la fait vibrer tout entière, puis seulement sa moitié, en plaçant un chevalet à mi-longueur, on perçoit bien l'octave, alors que si le chevalet est placé au tiers de la corde, en faisant résonner la corde entière puis les deux tiers, on obtient la quinte ; en foi de quoi ils déclarent que l'octave est dans le rapport de deux à un et la quinte dans celui de trois à deux. Cette explication, dis-je, ne me semblait pas satisfaisante pour établir sans conteste que les

rapports de deux à un et de trois à deux sont bien les rapports de l'octave et de la quinte, et voici pourquoi. Il y a trois manières de rendre plus aigu le son d'une corde : la raccourcir d'abord, l'étirer ou plutôt la tendre davantage ensuite, enfin l'amincir."

Puis, plus loin :

"Elle fut le fait du hasard ; mon seul rôle fut de noter l'observation, de l'apprécier à sa valeur, puis d'y percevoir la confirmation d'importantes spéculations, encore qu'en elle-même elle fut fort banale. Je raclais en effet avec un ciseau de fer tranchant une plaque de laiton dans le but d'enlever quelques taches, lorsqu'en déplaçant avec rapidité mon ciseau j'entendis à une ou deux reprises, outre les nombreux coups donnés, un sifflement très fort et clair ; regardant la plaque, je vis alors une longue suite de minces virgules, parallèles entre elles et séparées par des intervalles rigoureusement égaux. Passant et repassant le ciseau un grand nombre de fois, je m'aperçus que des marques apparaissaient sur la plaque seulement lorsqu'un sifflement était émis, et qu'il n'y avait pas la moindre trace de ces petites virgules quand le raclage ne s'accompagnait d'aucun bruit. Je recommençais plusieurs fois le même jeu en faisant glisser mon ciseau tantôt plus vite et tantôt moins vite : le sifflement obtenu était d'un ton parfois plus aigu parfois plus grave ; j'observai aussi que les traces laissées à l'occasion d'un son plus aigu étaient plus serrées, et à l'occasion d'un son plus grave plus espacées ; d'autres fois encore, si le passage du ciseau avait été plus rapide à la fin qu'au début, on entendait le son devenir plus aigu, et l'on voyait les petites virgules devenir plus denses, mais toujours elles conservaient leur grande netteté et leur parfaite équidistance ; de plus, chaque fois qu'un sifflement se produisait, je sentais le fer trembler dans mes doigts en même temps qu'une sorte de frisson parcourait ma main. (...) Je dis que la raison première et immédiate dont dépendent les rapports des intervalles musicaux n'est ni la longueur des cordes, ni leur tension, ni leur grosseur, mais la proportion existant entre les fréquences des vibrations, et donc des ondes qui, en se propageant dans l'air, viennent frapper le tympan de l'oreille en le faisant vibrer aux mêmes intervalles de temps."

Il s'agit donc de déterminer les fréquences des vibrations. Voici la loi que nous propose Euler dans son "Tentamen". Cette loi a été indiquée par Mersenne en 1636 et presque simultanément par Galilée. Elle a été démontrée théoriquement par Taylor et publiée en 1713, dans "Methodus incrementorum".

Le nombre d'oscillations en une seconde est de : $\frac{355}{113} \sqrt{\frac{3166n}{a}}$ où n est le rapport entre la tension de

la corde et son poids, a est la longueur de la corde en scrupules et 3166 la longueur de la corde, en

scrupules, du pendule qui bat la seconde. $\frac{355}{113}$ est la valeur, due à Metius (1527-1607), du nombre π .

Le scrupule est le millième du pied Rhénan. Un pied Rhénan vaut environ 0,320 m.

Que d'histoire, que de recherches possibles dans une seule formule !

Nous ne nous étendrons pas plus sur le point de vue de la physique. Sachez que vous trouverez dans le texte d'Euler bien d'autres éléments, comme la théorie des nœuds, observée tant dans les cordes vibrantes que dans les colonnes d'air des instruments à vent.

L'on pourra aussi s'intéresser aux phénomènes des harmoniques, des battements, consultant à ce sujet les théories de Rameau et de Sauveur, avant de se plonger éventuellement dans les séries de Fourier. Lorsqu'une corde vibre, par exemple, elle va faire vibrer toutes les cordes qui correspondent à des multiples de sa fréquence. C'est ce que l'on nomme les harmoniques. Rameau avait découvert que l'on entendait, outre le son principal, sa douzième (une quinte plus une octave), et sa dix-septième majeure (une tierce majeure plus deux octaves). Empiétant sur le domaine de la physiologie, chacun sait que l'oreille a ses limites, et qu'elle ne peut percevoir toutes les harmoniques. Pour Euler par exemple, les limites extrêmes de perception de vibrations par seconde étaient de 30 à 7520. Ce qui représente environ 8 octaves. Actuellement, on va jusqu'à environ 20 000.

Sauveur (1753-1716), un des fondateurs de l'acoustique, ajoute aux phénomènes des harmoniques celui de battements, qui se présentent lorsqu'on entend deux sons de fréquences voisines, et qui sont très importants pour l'accordage des instruments.

Ces textes des XVII^e et XVIII^e siècles sont suffisamment lisibles et abordables pour permettre de se mettre en appétit sur ces phénomènes au demeurant complexes.

IV. Le point de vue de la physiologie

Nous l'avons déjà évoqué à plusieurs reprises, ce qui était inévitable, puisque la musique est avant tout liée à notre perception sensitive.

C'est Helmholtz (1821-1894) qui, s'intéressant à la musique sous toutes ses formes, donnera un début d'explication sérieux à la perception des sons, musicaux en particulier, par l'oreille, dans un ouvrage de 1863, traduit en français en 1868, sous le titre : *Théorie physiologique de la musique, fondée sur les sensations auditives*.

Il y a en fait deux problèmes : comment percevons nous les sons, au sens physiologique du terme, et pourquoi certaine musique nous plaît plus qu'une autre, pourquoi certains sons sont agréables et d'autres non ?

Euler, ayant établi que le son se transmettait par des chocs sur le tympan, avait émis l'hypothèse que ce qui était agréable était ce qui comportait un ordre reconnaissable. Il avait alors établi une théorie sur les degrés d'agrément : deux sons sont d'autant plus consonants que les coups qu'ils portent sur le tympan (liés évidemment à leur fréquence) s'organisent suivant un ordre simple. Les fréquences doivent donc être multiples ou diviseurs. Pour visualiser cette harmonie, un peu comme Galilée, il utilise une autre expérience. Une disposition de points, agréable à la vue, peut symboliser une ordonnance de petits chocs sur le tympan, agréable à l'oreille.

Nous trouvons ainsi ce célèbre schéma :

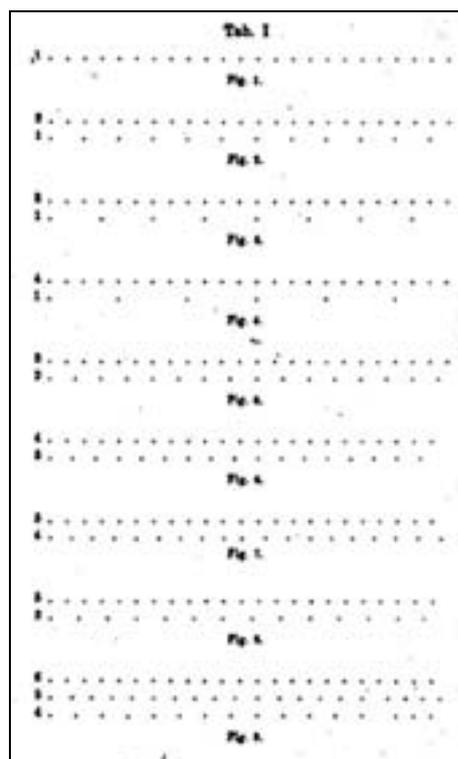


Figure 4

Les séries de points sont classées par "degré d'agrément", du plus agréable au moins agréable. Euler note au passage qu'une trop grande simplicité n'est pas forcément source de plaisir.

Ceci est à la base de toute la théorie de Euler et de sa construction des gammes. Reconstituant tout sur ces bases, il retrouve comme signalé plus haut "la musique généralement approuvée", ce qui le mène à considérer ses hypothèses comme tout à fait valides.

Il est assez intéressant de comparer ce schéma à celui que l'on peut trouver dans un ouvrage récent [2] à propos des harmoniques de deux sons qui forment un intervalle de quinte qui est considéré comme très consonant et de deux sons qui forment un intervalle de quarte, moins consonant :

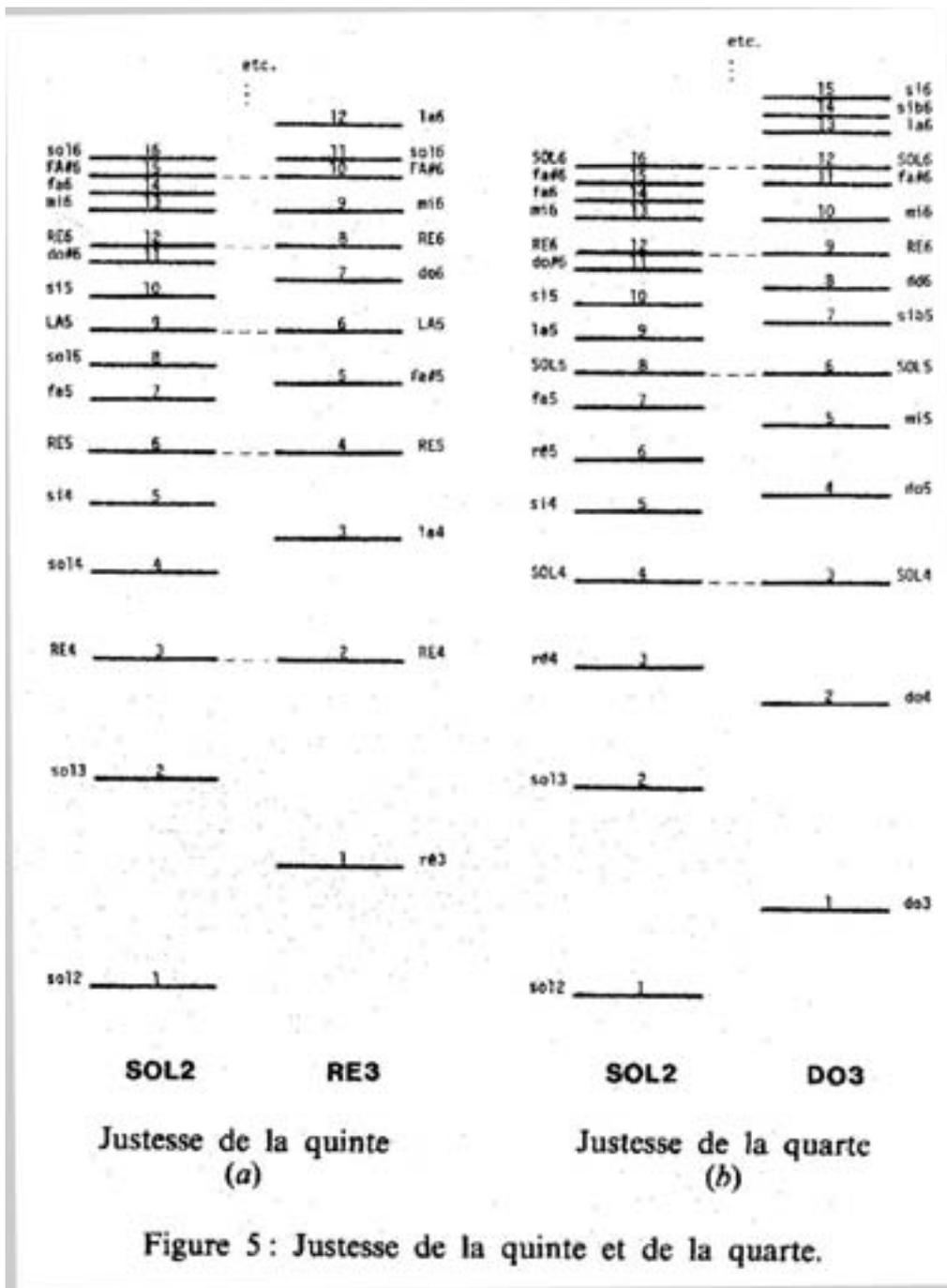


Figure 5

Partant du sol 2, les petits traits représentent les fréquences des harmoniques successives.

Euler signalera aussi que la "réalité physique" en quelque sorte n'est jamais en adéquation parfaite avec le modèle. En pratique, un son n'est jamais réellement pur, mais l'oreille sait rétablir le son parfait, si la différence reste dans certaines limites que l'on peut calculer.

Pour finir d'illustrer le point de vue physiologique, nous ne pouvons que recommander de s'intéresser au système auditif, qui constitue en soi un instrument de musique extrêmement perfectionné.

V. Conclusion

Vous aurez sans doute compris que ce sujet est inépuisable et que des facettes nouvelles se présentent à chaque détour. Nous avons effleuré le problème des instruments de musique, qui sont eux-mêmes liés au développement de la théorie musicale. Un autre angle d'approche pourrait être tout ce qui est lié à l'astronomie et à la musique des sphères. Nous avons aussi évoqué dans l'atelier l'aspect contemporain de la musique, l'écriture musicale, l'évolution de la manière d'apprécier la musique, qui est en grande partie culturelle, mais peut-être pas seulement. Enfin, à l'époque de la parité, il serait peut-être judicieux d'évoquer la part des femmes dans la musique.

Nous espérons avoir montré par ailleurs qu'il n'est pas obligatoire d'être un musicologue averti pour se lancer. Le biais de l'histoire permet justement au néophyte de se former peu à peu.

Au-delà de la bibliographie que nous indiquons, vous pourrez trouver de nombreux dictionnaires ou histoires de la musique ; le sujet est à la mode et nous ne nous en plaindrons pas.

Bibliographie

- [1] ANSERMET, E. *Les fondements de la musique dans la conscience humaine et autres écrits*, collection Bouquins, éditions Laffont, 1989.
- [2] ASSELIN, P. Y. *Musique et tempérament*, éditions Costallat, 1985.
- [3] BELIS, A. *Aristoxène de Tarente et Aristote : le traité d'harmonique*, éditions Klincksieck, 1986.
- [4] BOYÉ, A. *Sur l'Essai d'une nouvelle théorie de la musique de L. Euler*, in *Sciences et techniques en perspective*, volume 23, Université de Nantes, 1993.
- [5] BOYÉ, A. *Musique et mathématiques*, in *Actes de la quatrième université d'été*, IREM de Lille, 1994.
- [6] D'ALEMBERT, *Eléments de musique suivant les principes de M. Rameau*, 1762, éditions d'aujourd'hui, 1984.
- [7] DESCARTES, R. *Compendium musicae*, éditions Adam et Tannery, tome X, p. 89-141. Traduction française, PUF, 1987.
- [8] EUCLIDE, *La division du canon*, in *Les livres arithmétiques d'Euclide*, traduction Itard J., éditions Hermann, 1961, p. 201-205.
- [9] EULER, L. *Lettres à une princesse d'Allemagne*, in *Opera physica miscellanea epistolae*, éditions A. Speiser, réédition 1960.
- [10] EULER, L. *Tentamen novae theoriae musicae*, St. Petersbourg 1739, traduction française publiée par l'Association des capitaux intellectuels pour favoriser le développement des sciences physiques et des mathématiques, Bruxelles, 1839.
- [11] HELMOLTZ, H. *Théorie physiologique de la musique fondée sur l'étude des sensations auditives*, traduction de Guérout, M. G., éditions Masson, 1868.
- [12] HUYGENS, C. *Le cycle harmonique*, 1691, éditions The diapason Press, Utrecht, 1986.
- [13] IREM, *Kreisleriana*, cahiers du groupe mathématique et musique n°1, IREM de Basse Normandie, 1985.
- [14] MERSENNE, M. *Traité de l'Harmonie universelle*, 1627
- [16] MICHELS, U. *Guide illustré de la musique*, 2 volumes, éditions Fayard, 1990.
- [17] PARZYSZ, B. *Musique et mathématiques*, éditions de l'APMEP, n°53; 1983.
- [18] RAMEAU, J. P. *Complete theoretical writings*, American Institute of musicology, 1969.
- [19] THEON de SMYRNE, *Exposition des connaissances mathématiques utiles pour la lecture de Platon*, éditions Culture et civilisation, 1966.

ⁱ Essai d'une nouvelle théorie de la musique, écrit par Leonard Euler en 1731.