



Perspectives islamiques sur la science moderne

Une introduction aux débats entre science et religion

Sous la direction de
Abd-al-Haqq Guiderdoni

**Organisation islamique pour l'Education, les Sciences et la Culture -ISESCO-
1434H-2013**

Dépôt légal : 2013 MO 1729
ISBN : 978-9981-26-582-0

**Photocomposition, montage
et impression : ISESCO
Rabat - Royaume du Maroc**

الْحَمْدُ لِلَّهِ
الْعَلِيِّ الْعَظِيمِ

Table des matières

Préface	7
A propos des auteurs	9
L'islam et la science : une brève introduction	11
<i>Abd-al-Haqq Guiderdoni</i>	
Science et spiritualité dans le monde musulman contemporain	33
<i>Mohamed Tahar Bensaada</i>	
La structure de la matière	59
<i>Inès Safi</i>	
L'histoire du cosmos	91
<i>Nabila Aghanim</i>	
L'histoire de la vie	113
<i>Rana Dajani</i>	
Lexique	135

Préface

L'Organisation Islamique pour l'Education, les Sciences et la Culture est heureuse de présenter au public cet ouvrage sur l'islam et la science contemporaine. Ce livre porte sur les rapports que la pensée et la culture musulmanes entretiennent avec la science, dans sa méthode, ses résultats, et sa vision du monde. Il s'adresse principalement aux universitaires et étudiants du monde musulman, dans les domaines des sciences exactes, des sciences humaines, et de la théologie, pour leur donner un outil d'information et de formation qui alimente leur réflexion et les aide à participer aux débats sur ce sujet. Plus généralement, ce livre s'adresse au public musulman cultivé et au public international désireux de se faire une opinion sur ce sujet. Nous sommes bien ici dans la triple vocation de l'ISESCO : éduquer, éduquer à la science, et éduquer à la culture dans son rapport complexe et multiforme à la science.

L'on sait que, dans la grande période des Califats Omeyyade et Abbasside, la civilisation arabo-musulmane a porté haut le flambeau des connaissances. Les travaux récents des historiens des sciences montrent désormais que cet effort s'est poursuivi pendant des siècles. Aujourd'hui, de nombreux scientifiques de culture musulmane participent à l'effort international de développement des sciences. La science nous permet de mieux connaître le monde et d'agir sur lui. Dans le même temps, elle fait face à des visions du monde plus anciennes, mais toujours bien vivantes, qui sont issues de la culture religieuse. Les penseurs musulmans ont constamment cherché les voies pour articuler, de façon harmonieuse, les résultats de la démarche rationnelle et les enseignements du Coran et de la tradition prophétique. Cet effort doit être renouvelé aujourd'hui, dans le contexte d'une science qui dévoile chaque jour davantage la grandeur et la complexité du monde.

C'est pour cette raison que les échanges entre scientifiques, philosophes et religieux se développent rapidement au niveau international. Le monde musulman doit participer à ce débat, pour y faire valoir la voix de l'islam. Il s'agit de se réapproprier le patrimoine scientifique de l'humanité, auquel les musulmans ont contribué de façon spectaculaire, et continuent de contribuer, et de le placer dans la cadre du *tawhid* et de la vision éthique globale qui caractérisent l'islam. Le monde attend la position de l'islam sur ces questions. Par ce livre, l'ISESCO entend lancer une contribution à ce débat, et encourager universitaires et étudiants à y participer activement.

Sous la direction d'Abdel-al-Haqq Guiderdoni, une équipe composée de Nabila Aghanim, Mohamed Tahar Bensaada, Rana Gajani et Inès Safi, a élaboré cet ouvrage. L'ISESCO remercie les auteurs pour ce travail dont le contenu se maintient dans le débat d'idées grâce à leur sagacité et à leur lucidité.

Dr Abdulaziz Othman Altwaijri
Directeur général
Organisation islamique
pour l'Education, les Sciences et la Culture
-ISESCO-

A propos des auteurs

Abd-al-Haqq Guiderdoni est astrophysicien, Directeur de recherche au Centre National de la Recherche Scientifique, et dirige l'Observatoire de Lyon. C'est un spécialiste de la formation des galaxies. Il a animé un réseau de chercheurs musulmans qui a produit l'ouvrage collectif «Science et religion en Islam (Editions AlBouraq, 2012, Paris). Abd-al-Haqq Guiderdoni a contribué à plusieurs livres et donné de nombreuses conférences en Europe, au Maghreb et au Mashreq sur le débat entre science et religion.

Mohamed Tahar Bensaada est philosophe et historien de la pensée. Il enseigne à la Haute Ecole Libre Ilya Prigogine à Bruxelles, et a contribué à plusieurs ouvrages collectifs. Il intervient régulièrement dans les débats de la communauté musulmane en Europe.

Inès Safi est physicienne, Chargée de recherche au Centre National de la Recherche Scientifique. C'est une spécialiste de la physique mésoscopique. Elle travaille au Laboratoire de Physique des Solides (Université Paris 11).

Nabila Aghanim est astrophysicienne, Directrice de recherche au Centre National de la Recherche Scientifique. C'est une spécialiste de la cosmologie. Elle travaille à l'Institut d'Astrophysique Spatiale (Université Paris 11).

Rana Dajani est microbiologiste, Professeure associée à la *Hashemite University*, en Jordanie. Ses recherches concernent divers aspects génétiques de maladies comme le diabète ou le cancer. Elle est aussi la fondatrice et la directrice d'une organisation non gouvernementale, «*We Love Reading*», qui promeut la lecture auprès des enfants.

Remerciements

Abd-al-Haqq Guiderdoni remercie vivement l'ISESCO qui a rendu ce projet possible.

Chapitre 1

L'Islam et la science : une brève introduction

Abd-al-Haqq Guiderdoni

C'est une histoire que les astronomes racontent parfois dans des congrès scientifiques. Un professeur d'astronomie fait une conférence pour le grand public sur les dernières découvertes de la cosmologie contemporaine. Il y expose la théorie du *Big Bang*, l'expansion de l'univers, la formation des galaxies, etc. A la fin de la conférence, une dame très âgée vient voir le conférencier et lui dit : «Cher Professeur, tout ce que vous avez raconté me semble très compliqué. En effet, on sait bien que le monde repose sur le dos d'une grande tortue.» Le professeur retient un sourire, et pose à la dame une question : «Très bien, chère Madame, mais sur quoi cette tortue repose-t-elle, à son tour ?» La dame répond : «Mais c'est évident, sur une autre tortue.» Et voyant que le professeur allait répéter sa question, la dame prend les devants : « Et d'ailleurs, vous savez, il y a des tortues jusqu'en bas.»

Il y a dans cette petite histoire un mélange d'ironie et de dépit : ironie par rapport à l'ignorance de la vieille dame ; dépit par rapport à notre ignorance de «ce sur quoi repose le monde». La vieille dame a tort du point de vue scientifique, mais elle a raison du point de vue métaphysique, en ce sens qu'elle sait que toute chose repose sur une fondation, un soubassement, un socle. Et le professeur d'astronomie, qui a peut-être raison du point de vue scientifique, a tort du point de vue métaphysique, s'il refuse l'existence de ce socle qui brise la régression *ad infinitum* des tortues, ou de toute autre entité cosmique. On pourrait dire que la science s'intéresse avec succès aux «tortues», plus exactement à la chaîne des causes et des effets qui régissent le monde. Mais elle reste muette sur le socle, qui échappe à son regard, ce socle qui nous permet de répondre à la question de Leibniz (1646-1716) : «Pourquoi y a-t-il quelque chose plutôt que rien ?» A cette question, les croyants répondent que ce socle ne peut être que Dieu, aṣ-Ḥamad, l'Indépendant des mondes, Celui dont tout dépend, al-Haqq, le Réel sur lequel tout s'appuie, al-Muhîṭ, Celui qui nous entoure de toutes parts. *Subhâna-Llâh, 'ammâ yaçifûn*. C'est Sa *rahmah* qui maintient le monde dans l'être (*wujûd*), au-dessus du néant (*'adam*). Si Dieu retirait Sa *rahmah*, le monde cesserait aussitôt d'exister.

Cette histoire permet de comprendre pourquoi la question des relations entre science et religion est intéressante. Ces relations sont aussi anciennes que la

philosophie elle-même, qui s'est, dès ses débuts, attachée à définir les positions respectives de la raison et de la foi, du vrai et du juste, de la liberté et du destin. On suit la trace de ces débats dans les élaborations doctrinales du judaïsme, du christianisme, et de l'islam, pendant la période qui, en Occident, recouvre l'ensemble du Moyen Âge. Cette question était tout aussi présente au moment de la naissance de la science moderne, aux XVI^{ème} et XVII^{ème} siècles. Enfin, la prise d'indépendance de la raison par rapport à la révélation, et des sociétés par rapport aux églises, reste le fil rouge qui traverse toute l'époque moderne, jusqu'aux fameux «maîtres du soupçon» (Marx, Nietzsche et Freud) qui ont ouvert la voie au doute contemporain. L'opinion dominante fut alors de considérer que science et religion, ayant mené jusqu'à son terme un divorce douloureux, dont l'affaire Galilée reste, en Europe, l'événement emblématique, n'avaient plus rien à se dire.

Pourtant, rien n'est joué définitivement pour la pensée humaine, et il n'est pas exagéré d'affirmer que l'étude des relations entre science et religion conserve, au début du XXI^{ème} siècle, un intérêt certain. En effet, dans ce domaine, le tournant du millénaire, dans un contexte de mondialisation des échanges et des défis, a vu émerger des problématiques nouvelles, ou a assisté à la résurgence de questions plus anciennes, mais renouvelées par le décor inédit dans lequel elles se placent. Force est de constater que le thème du «dialogue entre science et religion» est en train de connaître une expansion rapide, avec ses acteurs, sa littérature et ses centres de recherche. Ce thème se développe surtout dans le monde occidental, un environnement marqué par ses racines chrétiennes (catholiques et protestantes), au sein de sociétés frappées par le «désenchantement du monde» et la désillusion post-moderne. Mais d'autres aires culturelles sont également intéressées par ce dialogue, notamment le monde du Christianisme oriental, l'Inde et la Chine. Nous voulons examiner dans ce livre pourquoi le monde musulman doit participer à cette entreprise, et comment il peut le faire.

Le dialogue entre science et religion ne peut commencer que dans la mesure où les termes employés sont précisés. En effet, les conditions du dialogue requièrent au préalable de dégager ce qui, dans la science et la religion, entre en dialogue. On partira ici de deux préalables. Premièrement, au-delà de la diversité des disciplines, il y a un fonds commun à la pratique scientifique -nous visons ici plus particulièrement les sciences de la nature- comme démarche de compréhension du monde utilisant la raison, dans un va-et-vient entre théorie et expérimentation (et/ou observation). Deuxièmement, et c'est ici une affirmation qui n'est pas objet de consensus, nous poserons qu'il y a aussi un fonds commun à toutes les religions, au moins dans la mesure où elles traduisent une expérience humaine, mais aussi parce qu'elles constituent toutes des adaptations d'une même «tradition

primordiale» - ce que nous appelons, en islam, *ad-dîn al-qayyim*. Ce qui dialogue, c'est le discours interprétatif, de nature philosophique, qui peut être élaboré à partir des méthodes, des pratiques, et des résultats de la science, et le discours théologique, ou doctrinal, qui est élaboré à partir du donné de la révélation et de l'expérience de la foi, voire de l'expérience de la connaissance spirituelle.

Il convient aussi de se demander si ce dialogue est réellement pertinent. En Occident, nombreux sont ceux qui défendent une vision matérialiste du monde, vision qui prétend s'appuyer sur la science. Certes, la science prend comme «règle du jeu» de chercher des explications naturelles aux phénomènes naturels, et elle y réussit. C'est ce que certains ont appelé le naturalisme *méthodologique* de la science. Beaucoup en concluent alors qu'il n'y a, dans l'ordre de la réalité, que des explications naturelles. C'est ce qu'on appelle le naturalisme *ontologique*. Il s'agit là pourtant d'un saut qui n'est pas nécessaire. Pour les croyants, en effet, Dieu a choisi ces règles du jeu, et incite l'homme à en admirer la perfection. Bien sûr, on a tout à fait le droit de considérer que le naturalisme *ontologique* est la condition du naturalisme *méthodologique* de la science. Ce faisant, on pose évidemment la réponse avant la question : Si l'on tient que la science ne peut se développer, en toute cohérence, que dans l'univers philosophique global du naturalisme, voire du matérialisme, les religions n'ont aucune légitimité, du point de vue de leur pensée sur le monde, et le dialogue entre science et religion ne peut être mené, faute d'interlocuteur. Inversement, la position religieuse dite «fidéiste» consiste à tenir que la voix de l'homme n'a aucun poids face au message divin, que l'homme ne peut rien comprendre au monde, et donc que l'entreprise d'exploration du monde menée par la science est illégitime, sinon dangereuse. On veut ici défendre une position moins arrêtée que le matérialisme et le fidéisme, une sorte de troisième voie très large : celle qui conduit la science, et ses différents environnements philosophiques, à confronter leurs concepts sur la réalité et la connaissance, avec ceux issus des grandes religions, et leurs différentes interprétations, en n'essayant surtout pas d'obtenir le triomphe de telle ou telle vision ou idéologie. Car ce qui est le plus important dans cette entreprise, c'est justement le maintien du dialogue. Celui-ci se construit en repérant les interfaces, les points de désaccord, les incompatibilités, les similitudes et les convergences. Il s'agit-là, en fin de compte, d'une tentative de cartographie d'un vaste terrain, qui s'est singulièrement agrandi et compliqué avec les progrès rapides de la science, l'ouverture des religions «au monde» et «à la modernité», et la prise de conscience de la diversité des religions.

Pourquoi y a-t-il, aujourd'hui dans le monde, une résurgence du débat ancien entre foi et raison, sous la forme d'un «dialogue entre science et religion» ? Il

nous semble que l'on peut identifier au moins quatre grands facteurs qui concourent à ce renouveau.

Premièrement, les révolutions de la science contemporaine, à partir du début du XX^{ème} siècle, ont provoqué l'émergence de nouveaux paradigmes scientifiques. Ces paradigmes ont comme caractéristique de repérer, de l'intérieur même de la science, des limites fondamentales à l'entreprise de connaissance du monde. C'est ainsi que, dans les mathématiques, la physique, la cosmologie contemporaines, sont apparues les notions d'incomplétude, d'indécidabilité, d'indéterminisme, d'imprédictibilité, ou d'horizon à l'observation. Pour résumer, la science comprend désormais qu'il y a des frontières intrinsèques à sa compréhension du monde. Bien loin d'être une défaite de la raison, ces avancées scientifiques en témoignent de la puissance. Mais elles appellent aussi des interprétations de caractère philosophique qui ne sont pas aussi simples que dans les paradigmes précédents, où la science prétendait avoir accès à toutes les vérités. Certes, il reste possible de ne pas se poser de «grandes questions philosophiques» et de considérer la science comme «l'ensemble des recettes qui réussissent toujours», selon le mot de Paul Valéry (1871-1945). Mais nombre de scientifiques contemporains, qui refusent cette option dite «opérationnaliste», croient vraiment qu'il existe une réalité indépendante d'eux, et sont ainsi «en quête de sens», un sens à leurs pratiques et à leurs résultats. Ils cherchent, en fin de compte, à comprendre les raisons du succès et des limites de la science, en l'incorporant dans une perspective plus large

Deuxièmement, le dialogue est aussi favorisé par l'intérêt des théologiens et des penseurs religieux eux-mêmes, ou au moins de ceux qui estiment qu'il faut considérer le monde pour comprendre l'action que Dieu y mène. Ces penseurs tiennent que toutes les constructions théologiques faites à partir du donné du révélé ne se valent pas également, dans la mesure où certaines sont manifestement en contradiction flagrante avec ce que nous savons du monde. Ainsi, scientifiques et penseurs religieux, également intéressés par la réalité du monde, selon des perspectives qui leur sont propres, se retrouvent dans un «lieu commun» pour s'interroger sur ce que la science et la religion nous apprennent, et sur ce qu'elles ne peuvent pas nous apprendre. Les uns et les autres sont, peu ou prou, les derniers à s'intéresser à la réalité, ce «donné» qui *résiste*, et donc *existe* indépendamment de nous. En effet, la plupart des autres acteurs de la pensée contemporaine sont davantage préoccupés par les constructions humaines, et par l'action qui donne corps aux idées en retaillant un monde plastique et «absurde» à leur mesure.

Troisièmement, cette rencontre entre scientifiques et penseurs religieux est nécessaire dans le contexte de la globalisation des problèmes de l'humanité, dont

les pages d'actualité des journaux se font régulièrement l'écho. Citons, en vrac, les décisions «planétaires» qu'il s'agira de prendre sur le réchauffement climatique, l'accès de tous à l'eau, le partage des ressources naturelles, les manipulations génétiques, la conservation de la biodiversité, la gestion des déchets... Il est bien évident que de telles décisions, pour être viables, devront avoir été éclairées par un débat scientifique. Or comment prendre en compte la diversité des cultures- et donc des religions qui en sont souvent la base -dans l'acceptation de débats complexes, et de décisions difficiles qui, pour être efficaces, devront être communes ? A cet égard, le débat entre science et religion permet de repérer les points d'articulation propres à chaque religion, de dégager des constantes, et d'apprendre à partager, petit à petit, un même langage.

Enfin, le quatrième facteur est peut-être le plus important. Le dialogue entre science et religion, dans le contexte nouveau d'une prise de conscience de la diversité des religions, et de leur coexistence physique à tous les endroits de la planète, donne un premier «contenu» au dialogue interreligieux. En évoquant le discours de la science sur le monde -un monde qui nous est commun- et la façon dont ce discours résonne, ou non, avec le discours de chaque religion, les uns et les autres apprennent à se connaître, à s'apprécier, à collaborer. En parlant de la réalité physique qui résiste, des chemins de la connaissance que les êtres humains ne parcourent qu'en tâtonnant, ils s'approchent des questions métaphysiques sur la nature de la réalité ultime et de la connaissance ineffable, et s'ouvrent à une véritable reconnaissance du patrimoine spirituel de l'humanité.

Le dialogue entre science et religion est donc poussé par des vents forts en ce début du XXI^{ème} siècle. Il est toutefois indispensable de comprendre, sous peine de connaître une profonde déception, que tous les passagers ne partagent pas la même vision sur ce qui doit être le terme du voyage. On peut identifier immédiatement ceux qui, d'un côté comme de l'autre, ont des objectifs apologétiques, en faveur exclusive de la science ou en faveur exclusive de la religion. Pour cette première catégorie de passagers, le «dialogue» doit finalement conduire à la défaite d'un des deux protagonistes, parce que les deux ne sauraient coexister durablement. Etrange dialogue, en vérité. Pour d'autres, il s'agit de faire l'apologie de sa propre religion, en utilisant la science comme juge de paix. Une telle attitude, il faut le reconnaître, est très répandue chez nous, dans le monde musulman, où beaucoup estiment que l'islam est la seule religion compatible avec la raison humaine - mais quelle forme de raison ? Une troisième catégorie de passagers est engagée dans une entreprise qui a eu ses lettres de noblesse et a essuyé de sévères critiques : celle de la «théologie naturelle». La théologie naturelle est la démarche qui consiste à essayer de prouver l'existence de Dieu par les seules menées de la raison explorant le

monde. Dieu pourrait-il être au bout de l'entreprise scientifique ? Au, tout au moins, Dieu pourrait-il être considéré comme une option possible avec, et après, la science, voire comme une option raisonnable ? Enfin, une quatrième catégorie, peut-être minoritaire, se satisfait davantage du processus que du terme. Le dialogue devient alors un aiguillon pour s'engager plus avant dans les énigmes de la science, qui nous renvoient à un double mystère fondamental, celui du monde et celui de l'homme, et au vertige de leur mise face à face, comme un jeu de miroirs. C'est la perspective dans laquelle nous voulons nous placer ici, et que nous allons développer maintenant plus spécifiquement pour l'islam.

La recherche du savoir

La recherche du savoir occupe une place centrale dans la doctrine islamique. Les premiers versets du Coran annoncent au Prophète Muhammad que Dieu vient, par la révélation du Livre saint de l'islam, «apprendre à l'homme ce que celui-ci ne savait pas»⁽¹⁾. Le thème du «savoir» (*'ilm*) revient à de nombreuses reprises dans le texte coranique, comme dans la tradition prophétique (*sunnah*). Selon le hadîth, «la recherche du savoir est une obligation religieuse pour tout musulman»⁽²⁾, et les savants sont même considérés comme les «héritiers des prophètes»⁽³⁾. Bien évidemment, le savoir dont il s'agit est d'abord le *'ilm at-tawhîd*, le savoir d'ordre métaphysique sur l'unicité de Dieu et sur les conséquences qui en découlent pour la nature de l'homme, la pratique de sa religion, et son comportement dans la société. En son sommet spirituel, ce savoir se transforme en une attention constante qui veille à ne rien associer à Dieu, considéré comme la source et le but de toute connaissance. Par la suite, le savoir central relatif à l'unicité divine s'est entouré d'une multitude de «savoirs religieux» (*'ulûm dîniyyah*) rendus nécessaires pour la bonne compréhension du message coranique⁽⁴⁾. Au cours des premiers siècles de l'islam, ces savoirs ont été progressivement codifiés, et sont ainsi devenus de véritables savoirs techniques, c'est-à-dire des «sciences» faisant un large appel à la raison, en plus du donné de la révélation. L'usage de la raison, non seulement dans le domaine religieux, mais encore dans les diverses circonstances de la vie

(1) Coran 96:3-5.

(2) Ibn Mâjah, Suyûtî.

(3) Bukharî, Abû Dâwûd, Ibn Mâjah, Tirmidhî.

(4) Lexicographie (*alfâzh*) et grammaire (*nahw*), calligraphie (*khatt*), lecture clairement articulée et psalmodie du texte sacré (*tartîl et tajwîd*), hadîth et savoir sur les chaînes de transmissions (*isnâd*) et les listes de transmetteurs (*tabaqât*), savoir sur les «circonstances de la révélation» (*asbâb an-nuzûl*), sur la vie du Prophète (*sîrah*), enfin, savoirs du commentaire (*tafsîr*), de la pensée théologique (*kalâm*), et des principes et applications de la jurisprudence (*uçul wa furû' al-fiqh*).

quotidienne, a été légitimé très tôt, par l'enseignement du Prophète à l'un de ses compagnons, Mu'âdh Ibn Jabal, envoyé comme ambassadeur en Abyssinie. Alors que le Prophète lui demandait comment il agirait dans des situations qui n'étaient pas explicitement mentionnées par le Coran et la sunnah, Mu'âdh répondit qu'il recourrait à l'effort personnel de réflexion (*ijtihâd*), et le Prophète fut très satisfait de cette réponse⁽⁵⁾. Selon les mots mêmes du hadîth, l'*ijtihâd* a une valeur intrinsèque, puisqu'il porte avec lui une «récompense divine», indépendamment de son résultat⁽⁶⁾. L'*ijtihâd* permit, entre autres choses, l'élaboration du droit musulman (*fiqh*) pendant la période des Omeyyades et des Abbassides.

Mais qu'en est-il du «savoir» qui n'est pas explicitement relié au religieux ? Quand le Prophète conseille à ses compagnons de «chercher le savoir jusqu'en Chine»⁽⁷⁾, fait-il référence exclusivement à l'enseignement alors délivré par la révélation du Coran et la sunnah, ou bien fait-il allusion à *tous* les savoirs ? Il est clair qu'il existe un domaine du savoir qui se trouve en dehors du message de la révélation. Cela apparaît nettement dans la célèbre histoire de la pollinisation des palmiers dattiers relatée dans le hadîth. Le Prophète ayant donné le conseil de ne pas polliniser les palmiers à ses compagnons de Médine, la récolte qui s'ensuivit fut de médiocre qualité. Alors que les compagnons s'en plaignaient auprès du Prophète, celui-ci déclara : «Il s'agissait juste d'une opinion personnelle, et ne suivez pas (nécessairement) mon opinion personnelle. Mais quand je vous dis quelque chose pour le compte de Dieu, alors acceptez-le car je n'attribue aucun mensonge à Dieu.» Dans une autre version du même hadîth, le Prophète ajoute : «Vous êtes plus savants que moi sur les affaires de votre monde.»⁽⁸⁾ Pour les commentateurs, le Prophète -qui n'est qu'un homme (*bashar*), même s'il est inspiré par Dieu et miraculeusement préservé de tout péché- a mené un «effort d'interprétation» (*ijtihâd*), sans recevoir, sur cette question, le secours de la «révélation» (*wahy*). Le savoir sur certaines choses du monde est donc «neutre» ou «indifférent» (*mubâh*) du point de vue de la loi religieuse, en l'absence de toute indication claire le concernant dans les sources textuelles.

Toutefois, le Prophète demandait à Dieu de le préserver de tout «savoir qui n'est pas utile» (*'ilm lâ yanfa'*).⁽⁹⁾ Le «savoir utile» est certainement celui qui sert à satisfaire les besoins fondamentaux des êtres humains et à assurer le

(5) Ibn Hanbal, Abû Dâwûd, Tirmidhî.

(6) Muslim. «Le juge qui effectue un effort d'interprétation pour rendre son jugement aura deux récompenses quand il tombe juste, et une seule quand il se trompe.»

(7) Bayhaqî, Ibn 'Abd-al-Barr, Ibn 'Adî.

(8) Muslim.

(9) Muslim.

développement de la société. Mais, en fin de compte, c'est, dans la perspective religieuse, d'abord et surtout celui qui permet de conduire au salut. Pour les musulmans, la révélation véhicule directement la parole de Dieu, qui transmet la connaissance symbolique des signes divins dans ce monde, de l'histoire sacrée, et des réalités de l'autre monde. Les phénomènes y sont autant de dévoilements de l'action de Dieu dans la Création, adressés à l'être humain installé comme le représentant ou lieutenant de Dieu sur Terre, pour qu'il approfondisse sa connaissance de Dieu. Le temps et l'espace, les êtres et les événements ne sont pas à eux-mêmes leur propre fin : ils sont appréciés pour leur signification qualitative, par le fait qu'ils renvoient aux fins dernières. Le monde visible lui-même (*'âlam ash-shahâdah*) n'est que la trace du monde invisible (*'âlam al-ghayb*), plus vaste. Pour autant, l'insistance mise sur la recherche du savoir ne pouvait pas ne pas conduire les musulmans à s'ouvrir à l'investigation sur la nature.

La découverte de la philosophie et les débats entre raison et foi

On comprend donc l'intérêt, mais aussi la prudence, avec laquelle les penseurs de l'islam accueillirent la philosophie d'inspiration aristotélicienne et néoplatonicienne, et les sciences grecques et hellénistiques. Il ne s'agissait pas seulement de savoirs techniques sur le monde, comme le savoir agronomique de la pollinisation des palmiers, qui était utile à la vie de la communauté, mais de savoirs qui se prétendaient fondamentaux, et qui étaient porteurs d'une nouvelle vision du monde dans laquelle la preuve de la vérité appartenait à la raison, et non plus à l'argument irréfragable (*dalîl qat'î*) que représentait la révélation. L'alignement constant sur la norme de la raison humaine (*'aql*)⁽¹⁰⁾ dans la falsafah, la philosophie islamique d'inspiration hellénistique, risquait donc de remettre en cause tout l'édifice de la doctrine islamique, et d'inverser la hiérarchie qui faisait des fondements scripturaires (*naql*) la source première.

Dès lors, comment gérer les désaccords potentiels qui viendraient de contradictions apparentes entre les données de la philosophie islamique et celles de la révélation, ou, en d'autres termes, comment définir les relations possibles entre

(10) Dans le contexte de la falsafah, le mot *'aql* traduit le Grec nous, qui désigne, l'intellect humain dans sa double fonction de «saisie intuitive» de la vérité (*noêsis*, en arabe *hads*) et de «production valide» d'énoncés vrais à partir d'autres énoncés vrais (*dianoia*, en arabe *tafakkur*). Dans le monde arabe comme en Occident, le sens a progressivement glissé pour désigner la «raison critique» moderne. Par ailleurs, la racine verbale *'aqala* apparaît à de nombreuses reprises dans le Coran, et désigne la compréhension intellectuelle et spirituelle des enseignements délivrés par Dieu. C'est ce sens qui est aussi retenu dans la doctrine mystique du soufisme.

les sciences intellectuelles (*'ulûm 'aqliyyah*) et les sciences religieuses (*'ulûm dîniyyah*) ? Cette question occupa la pensée musulmane pendant plusieurs siècles. Les premières grandes synthèses philosophiques entreprises par Abû Yûsuf Al-Kindî (801-873), Abû Naçr Muhammad Al-Farabî (872-950), et surtout Abû 'Alî al-Husayn Ibn Sînâ (980-1037) faisaient naître de nombreux points de conflit avec la pensée théologique classique, celle du *kalâm* d'Abû Hasan Al-Ash'arî (874-935). Le grand penseur Abû Hâmid Al-Ghazâlî (1058-1111) aborda cette question, et relata les inquiétudes qu'elle suscita en lui, dans son autobiographie intellectuelle⁽¹¹⁾. Après qu'il eut subi une crise de confiance radicale, une certitude finit par guider sa réflexion : la raison humaine est un don de Dieu. Puisque Dieu en est le garant, celle-ci, si elle est bien menée, ne peut arriver à des conclusions contraires à la foi, dans le domaine où l'une et l'autre s'appliquent de façon valide. De même que Dieu est Un, il ne peut y avoir de «double vérité», l'une à laquelle on parviendrait en étudiant le monde, l'autre qui nous serait donnée par l'intermédiaire de la révélation. Toute contradiction apparente entre les résultats des études rationnelles et ceux de l'étude des textes sacrés provient donc d'une erreur de perspective qu'il s'agit de débusquer. Al-Ghazâlî identifia certaines de ces contradictions apparentes à son époque : par exemple, la philosophie néoplatonicienne d'Ibn Sînâ enseignait que le monde était éternel, alors que la révélation disait le contraire. Pour lui, une telle contradiction était due à une erreur des philosophes qui avaient été conduits à des résultats erronés par une pratique impropre de leur discipline. Al-Ghazâlî entreprit alors de rectifier cette erreur de l'intérieur même de la philosophie, en s'efforçant de repérer où le raisonnement des philosophes avait été fautif.

Au siècle suivant, Abû-l-Walîd Muhammad Ibn Rushd (1126-1198) aborda la même question, avec les mêmes présupposés sur la valeur de la raison humaine et l'unicité de la vérité. Toutefois, il parvint à des conclusions différentes de celles proposées par Al-Ghazâlî, à l'issue d'une controverse intellectuelle qui restera célèbre dans l'histoire de la pensée musulmane. L'essence de cette controverse apparaît dans un petit traité⁽¹²⁾ qui se présente comme un «avis jurisprudentiel» (*fatwâ*) à propos de la licéité de l'étude de la sagesse (*hikmah*), un euphémisme prudent pour mentionner la falsafah. Ibn Rushd conclut que cette étude est non seulement «licite » du point de vue de la loi religieuse (*sharî'ah*), mais «obligatoire», non à titre individuel, étant donné la difficulté des matières abordées,

(11) *Al-Munqidh min ad-dalâl*. Traduction française : Farid Jabre, Erreur et délivrance, 1969, Librairie Orientale, Beyrouth.

(12) *Kitâb façli-l-maqâl wa taqrîr mâ bayna-sh-sharî'ah wa-l-hikmah min-al-ittiçâl*. Traduction française : L'Accord de la religion et de la philosophie : traité décisif, 1988, Sindbad, Paris.

mais à titre collectif, et sous la responsabilité des «savants». Pour Ibn Rushd, quand les résultats de la raison et ceux provenant de la lecture des textes sacrés sont en contradiction apparente, il faut retourner vers les textes pour en faire une nouvelle lecture, et proposer une interprétation qui permette de retrouver l'accord, parce que, dit-il, «la spéculation fondée sur la démonstration ne conduit point à contredire les enseignements donnés par la Loi divine.» Ibn Rushd répondit aux critiques qu'Al-Ghazâlî avait émises à propos de la falsafah, en les réfutant méthodiquement. Une fois ces arguments exposés, aucun consensus réel sur cette question ne s'installa dans le monde musulman. La majorité des penseurs religieux rallièrent finalement la position d'Al-Ghazâlî qui trouvait naturellement sa place dans le cadre de la théologie ash'arite, celle du courant principal de l'islam. Depuis lors, la compréhension la plus répandue de cette position est qu'il y a bel et bien une frontière définie par la religion, que la science ne saurait franchir impunément. Il convient enfin de rappeler que l'Occident médiéval ne connut pas directement ces débats, car les textes mentionnés ne furent pas traduits en latin, mais qu'il entendit l'écho des polémiques, et que les figures d'Avicenne, d'Alghazel et d'Averroès - c'est ainsi que ces noms passèrent en Europe - eurent une grande place dans les synthèses intellectuelles des XIII^{ème} et XIV^{ème} siècles, comme dans la naissance de la pensée philosophique au sein des premières universités⁽¹³⁾.

Brefs aperçus sur la méthode scientifique

Ces leçons du passé doivent être gardées en mémoire, quand il s'agit de reconsidérer la problématique du rapport de l'islam aux sciences, dans le contexte contemporain. Bien sûr, la nature de la science a beaucoup changé depuis l'époque médiévale. La «science» aristotélicienne était principalement déductive, c'est-à-dire qu'à partir d'un nombre limité de principes qu'elle présentait comme «intuitivement évidents», étaient déduits «validement» toute une série d'énoncés qui étaient, en conséquence, eux aussi présentés comme «vrais». Or la science moderne n'est plus fondée sur le pouvoir de la seule raison, mais aussi sur l'observation et l'expérimentation. Elle est désormais à la fois déductive et inductive. A partir de faits isolés, elle pressent des principes généraux. Ces principes sont d'abord des hypothèses, d'où l'on va s'efforcer de tirer des conséquences ou prédictions nouvelles susceptibles d'être comparées avec les résultats de nouvelles observations ou expérimentations. Si l'hypothèse ne résiste pas à ces premiers tests, il faut la rejeter et en élaborer une autre. Si, au contraire, elle résiste, il faut trouver d'autres conséquences susceptibles d'être

(13) Voir Alain de Libera, *Penser au Moyen Age*, 1991, Seuil, Paris.

testées à leur tour. C'est ainsi que les hypothèses qui survivent à ce jeu «d'essais et d'erreurs» (en anglais, *trial-and-error*) sont de plus en plus robustes. Ces hypothèses finissent par s'agencer dans des théories spécialisées et formalisées. La question de la vérité des théories scientifiques reste ouverte. Pour Karl Popper (1902-1994), aucune expérience ne peut prouver la vérité d'une théorie, mais une seule expérience qui en contredit les prédictions permet d'en montrer la fausseté.⁽¹⁴⁾ Les théories sont scientifiques justement parce qu'elles tendent le cou -les anglophones disent : *they stick their neck out-* pour être réfutées. En attendant cette réfutation, toujours possible, les théories qui survivent aux tests doivent être considérées comme simplement «renforcées» ou «corroborées». Dès lors, ce que l'on peut suivre avec précision, c'est la croissance des connaissances scientifiques, et un sujet d'études est vu comme d'autant plus «actif» et «vivant» qu'il connaît un taux élevé de «réfutations». Thomas Kuhn (1922-1996) a, de son côté, attiré l'attention sur le développement historique de ce processus, et montré qu'à des périodes de science dite «normale», pendant lesquelles s'installent des théories cadres appelées «paradigmes», succèdent des périodes dites de science «révolutionnaire», où les anciens paradigmes sont réfutés pour être remplacés par de nouveaux.⁽¹⁵⁾ Comme ces nouveaux cadres englobent les anciens, en étant plus généraux, on peut parler d'accumulation des connaissances. Enfin, il est juste de mentionner que ces conceptions issues de réflexions épistémologiques ou de l'histoire des sciences sont, elles-mêmes, contestées par des penseurs encore plus radicaux, qui voient dans la science une activité humaine à laquelle il arrive de tomber juste⁽¹⁶⁾. En conséquence, il faut bien comprendre que les théories scientifiques sont bien plus que de simples «opinions» ou «conjectures», mais qu'elles sont sans doute moins que la «vérité», qui n'est plus un concept scientifique solide dans les sciences de la nature, mais une simple facilité de langage pour parler des théories qui sont corroborées par les faits. Tout cela peut facilement être compris et accepté dans le cadre des visions du monde s'ancrant dans la foi et la culture musulmanes.

(14) Karl Popper, *The Logic of Scientific Discovery*, 1959, Hutchinson C° Publishers, Londres. Traduction française : *La Logique de la découverte scientifique*, 1978, Payot, Paris.

(15) Thomas Kuhn, *The Structure of Scientific Revolutions*, 1962, 1970, 1996, The University of Chicago Press. Traduction française : Laure Meyer, *La Structure des révolutions scientifiques*, 1999, Flammarion, Paris

(16) Voir par exemple, Paul Feyerabend, *Against Method*, 1975, New Left Books, Londres. Traduction française : *Contre la Méthode*, 1979, Seuil, Paris, ou Alan Chalmers, *What is this Thing called Science ?* University of Queensland Press, 1976, 1982, St Lucia. Traduction française : *Qu'est-ce que la science ?* 1987, La Découverte, Paris.

Par ailleurs, la science n'a pas seulement l'ambition de prédire des phénomènes, qui peuvent être, par la suite, observés dans la nature ou produits par l'expérimentation. Elle a aussi l'ambition de les expliquer. L'équilibre entre prédiction et explication est délicat. En effet, il y a beaucoup d'opinions ou de conjectures de toutes origines qui prétendent «expliquer» tout ou partie du réel, et le caractère «satisfaisant» d'une explication est largement une affaire subjective. La spécificité de la science est que son «explication» reste limitée, mais s'articule avec son pouvoir de «prédiction»⁽¹⁷⁾. Dans sa tentative d'explication du monde, la science, depuis le début du XVII^{ème} siècle, a systématiquement mis en avant la recherche des «causes efficientes», au détriment des «causes finales» privilégiées par l'approche religieuse⁽¹⁸⁾. Son développement rapide en Occident, à partir de cette époque, a conduit à une vision du monde comme un ensemble de particules et de forces. Différentes lectures ou interprétations des théories scientifiques ont circulé, et les philosophies matérialistes ont trouvé leur justification dans le panorama offert par la science. Ainsi la science en interaction constante avec ces philosophies a-t-elle, de facto, concouru à faire reculer la vision traditionnelle qualitative du monde comme un réseau de symboles. Le scientisme né au XIX^{ème} siècle a même prétendu, non seulement que la science avait le pouvoir de dire la réalité, mais qu'il n'y avait pas de réel en dehors de ce que la science étudiait⁽¹⁹⁾.

Perspectives musulmanes sur la science contemporaine

Le monde musulman a vécu cette «colonisation du réel» par le scientisme à l'instar de la colonisation géographique et culturelle par l'Occident. Tout le débat, initié par les réformateurs de la fin du XIX^{ème} siècle appelant de leur vœux une

(17) Un exemple bien connu est la différence entre la théorie de la gravitation de René Descartes (1596-1650) où l'attraction des corps est due à des chocs d'atomes, et la théorie d'Isaac Newton (1643-1727), où existe une force d'attraction à distance. Alors que l'explication cartésienne semble de bon sens, Newton ne «forge pas d'hypothèses» pour expliquer cette force (le fameux «*hypotheses non fingo*» des *Principia Mathematica*). D'où l'adage dû à René Thom (1923-2002) : «Descartes, avec ses tourbillons et ses atomes crochus, expliquait tout et ne calculait rien, Newton, avec la loi de gravitation en $1/r^2$, calculait tout et n'expliquait rien.» (Stabilité structurelle et morphogénèse, 1972, 1977, Interéditions, Paris). Par la suite, l'origine de la force de gravitation a trouvé une «explication» en termes géométriques, dans la théorie de la Relativité générale proposée par Albert Einstein (1879-1955).

(18) Aristote distingue quatre causes qui conditionnent l'existence d'une chose : outre la cause formelle et la cause matérielle, la cause finale est ce pour quoi la chose existe, et la cause efficiente, ce qui fait qu'elle existe. Notre conception moderne de la causalité est la fille de la causalité efficiente.

(19) Voir le chapitre 2 de cet ouvrage.

«renaissance» de la pensée islamique (*nahdah*), a cherché à faire une distinction entre la pratique de la science, et les interprétations philosophiques et idéologiques auxquelles elle a donné lieu en Occident. Cette distinction est malaisée à établir. En effet, les théories se fondent sur les faits observationnels et expérimentaux, qui sont eux-mêmes produits, et acquièrent une existence en tant que «faits scientifiques», dans le cadre des théories. Les théories donnent ensuite naissance à différentes lectures ou interprétations, plus ou moins influencées par les grandes idéologies et philosophies, et se trouvent, en retour, suscitées de façon préférentielle selon le contexte où elles se développent. Faits, théories et interprétations se trouvent donc liés par des réseaux de relations multiples et complexes, qu'il est difficile de débrouiller. En tout état de cause, le monde musulman a été conduit à assimiler la science et la technologie, sous la poussée de la nécessité historique. La pensée musulmane contemporaine est désormais fortement sollicitée par des problématiques d'origine scientifique, et se pose la question de savoir dans quelle mesure la science est indissolublement attachée à une vision matérialiste du monde incompatible avec la perspective religieuse de l'islam. Alors que la technologie, qui apporte des bienfaits indiscutables -mais aussi des risques et des dangers inhérents à son pouvoir- semble plus aisément «maîtrisable», la science ne serait-elle pas, quant à elle, le «cheval de Troie» du matérialisme ? Dès lors, trois grandes catégories d'attitudes sont possibles. On peut penser que l'interprétation matérialiste de la science n'est qu'un événement historique contingent lié à l'Occident, et encourager une science dégagée de ses interprétations ou valeurs matérialistes les plus voyantes : c'est la position des «modernistes». On peut estimer que les liens entre science occidentale et matérialisme sont si serrés qu'il faut reconstruire la science, dans ses présupposés épistémologiques, ses méthodes et ses buts, en fonction des principes et valeurs de la foi et de la culture musulmanes : c'est la position des «reconstructionnistes». Enfin, on peut croire que rien ne peut être sauvé de la science moderne, trop viciée dès le départ par une vision erronée du réel, et chercher à réhabiliter les savoirs plus empiriques du passé : c'est la position des «traditionalistes».

Probablement une façon de dégager une position musulmane contemporaine à propos de la science pourrait-elle commencer en rappelant la métaphore des «deux livres». Dieu crée le monde par son ordre (*amr*), le «sois !» (*kun*) initial⁽²⁰⁾. Les choses et les phénomènes du monde y sont les signes (*âyat*) du Créateur qui parlent à l'intellect humain. De façon semblable, Dieu parle aux peuples par l'intermédiaire des prophètes et envoyés, et leur fait parvenir sa révélation sous la forme de livres.

(20) Coran 2:117 : «Lorsqu'il a décrété une chose, il lui dit seulement : sois ! et elle est.»

Le Coran constitue la dernière révélation selon l'ordre divin (*amr*), et commence avec l'ordre transmis au Prophète Muhammad par l'ange Gabriel : «Lis !» (*iqra'*)⁽²¹⁾. Les versets coraniques (*âyat*) s'adressent aussi à l'intellect humain. Le «livre de l'existence» et le «livre de la révélation» ont donc un seul et même auteur, et parlent tous deux de la réalité, mais avec des mots différents, et surtout dans des objectifs différents. Le «livre de l'existence» parle du Créateur et nous rappelle à notre vocation en ce monde-ci, comme lieutenant ou vice-régent de Dieu, à qui Dieu a enseigné «tous les noms»⁽²²⁾, et qui doit agir comme le bon jardinier dans le «jardin» dont Dieu est le seul propriétaire. Le «livre de la révélation» vient enseigner à l'être humain ce que celui-ci ne savait pas, ou qu'il avait oublié à cause de sa nature congénitale, argileuse et obscure : la connaissance des fins dernières dans l'autre monde, et le rappel à la connaissance de Dieu par l'adoration. De même que le croyant se déplace dans le livre de la révélation comme dans un monde, il doit apprendre à regarder la création de Dieu comme un livre que Dieu écrit par un effet de sa majesté et de sa beauté.

Il est donc licite et souhaitable d'aller lire, dans le «jardin» du monde qui nous a été confié, les «noms» que Dieu a enseignés à l'homme, et les signes qu'il y a placés, et qui témoignent de sa louange et de sa gloire. Cette idée « d'aller voir » la nature est un élément important dans le débat qui a opposé Al-Ghazâlî et les philosophes musulmans d'inspiration aristotélicienne et néo-platonicienne. Ceux-ci considéraient que l'intellect humain était capable de saisir toute la vérité et, à partir de principes intuitivement évidents, d'en déduire de façon nécessaire toute la réalité, selon un système complexe de causalité. Al-Ghazâlî critiqua fortement cette position parce que, de facto, elle aboutissait à restreindre la liberté de Dieu, qui n'aurait pas eu d'autre choix que de créer ce monde-ci, et non un autre (car seul ce monde-ci serait «nécessaire»). Bien au contraire, argumenta Al-Ghazâlî, de nombreux aspects du monde ne nous apparaissent pas nécessaires, c'est-à-dire qu'ils auraient très bien pu être «autrement» qu'ils ne sont. S'ils ont les propriétés que nous observons, c'est en raison d'un libre choix de Dieu. L'intellect humain ne peut donc pas savoir a priori ce que Dieu a prévu pour le monde, car Dieu y a fait son choix parmi de nombreux possibles contenus dans son savoir tout-englobant. Aucun raisonnement ne permettra jamais de prévoir à coup sûr si une chose existe ou non. Il faut aller constater l'existence, ou la non-existence, de celle-ci, dans la réalité. La causalité au sens aristotélicien est donc une conception simplificatrice et trompeuse.

(21) Coran 96:1.

(22) Coran 2:31.

Pour Al-Ghazâlî, les «régularités» que nous observons dans le monde ne sont pas dues à cette causalité nécessaire introduite par les philosophes. Elles résultent d'une «coutume» (*sunnah*) ou «habitude» (*'âdah*) de Dieu. Dieu choisit, par miséricorde (*rahmah*), de ne pas changer d'habitude et de nous rendre le monde en partie intelligible : «Il n'y a pas de changement dans la création de Dieu.»⁽²³⁾ C'est pourquoi les savants arabo-musulmans⁽²⁴⁾ ont toujours privilégié l'observation, qui permet justement de se rendre compte, dans le monde, de ce que Dieu a décidé, sans chercher à anticiper ce qu'est la science de Dieu par des opérations rationnelles *a priori*. Le temps de la raison ne vient qu'après. Lors de la grande période classique, ils se sont intéressés à la connaissance du monde, en entreprenant une vaste entreprise de collection, d'appropriation et de hiérarchisation des connaissances de leur temps, et en développant ces savoirs dans des domaines aussi variés que les mathématiques, l'astronomie, la physique, la botanique, ou la médecine. Comme l'ont désormais montré les historiens des sciences, ces savants n'ont pas été seulement des transmetteurs. Par exemple, poussés par leur souci de vérification de ce qui advient dans la réalité, ils ont affiné les mesures, et corrigé les erreurs numériques, présentes dans certains textes grecs, notamment l'*Almageste* de Ptolémée (ca 90-ca 168), le livre fondateur de la cosmologie médiévale, sur laquelle les musulmans de l'époque classique d'abord, puis les juifs et les chrétiens du Moyen Âge, ont bâti leur vision du monde.⁽²⁵⁾ Leur critique de la philosophie aristotélicienne les a conduits à remettre en cause le modèle astronomique et les astuces opérationnalistes de Ptolémée, puis à proposer de nouveaux théorèmes mathématiques, comme le couple de Tûsî,⁽²⁶⁾ qui permirent de fonder des modèles astronomiques en meilleur accord avec la réalité observationnelle, et semblent avoir dégagé le terrain pour l'héliocentrisme de Copernic (1473-1543).⁽²⁷⁾

Le développement de la science contemporaine est éminemment technique, et doit être laissé aux spécialistes. Cependant, tout homme, toute femme, est susceptible de s'intéresser à cette activité pour comprendre le monde dans lequel il, ou elle, vit. Quelques thèmes peuvent être mentionnés. Ce qui compte ici n'est pas, bien sûr,

(23) Coran 30:30.

(24) Pensant et écrivant en langue arabe, ils étaient musulmans, mais aussi chrétiens de diverses églises, juifs, ou «sabéens».

(25) George Saliba, *Islamic Science and the Making of the European Renaissance*, 2007, MIT Press.

(26) Naçîr ad-Dîn At-Tûsî (1201-1274).

(27) George Saliba, *A History of Arabic Astronomy: Planetary Theories during the Golden Age of Islam*, 1994, New York University Press.

l'éventuelle «compatibilité» ou «incompatibilité» des données scientifiques actuelles avec la lettre des textes sacrés, qui serait tout illusoire, mais la «résonance», ou l'«écho», que certains thèmes de la science contemporaine suscitent par rapport à la vision métaphysique et symbolique du monde proposée par la révélation. Autrement dit, il est assez évident que la lecture interprétative qu'un croyant informé, voire un scientifique croyant, feront de la science, et le «sens» qu'ils y trouveront, seront caractéristiques de leur foi et de leur culture.

Les thèmes qui font débat entre science et religion

L'un des thèmes les plus marquants de la science contemporaine est la découverte que les régularités du monde prennent la forme de «lois universelles» dont l'expression utilise le langage des mathématiques. Il s'agit là, d'un certain point de vue, de la redécouverte de l'ancienne sagesse pythagoricienne, mais les relations entre les phénomènes ne sont pas seulement de nature arithmétique : les structures mathématiques convoquées pour décrire la nature sont beaucoup plus complexes et abstraites. Les lois de la physique sont à la fois quantitatives et qualitatives : elles apparaissent comme des lois de conservation, et, en même temps, comme des symétries géométriques. La raison pour laquelle les mathématiques sont si efficaces pour décrire les lois de la nature demeure une énigme. Le physicien Eugene Wigner (1902-1995) parlait même d'une «efficacité déraisonnable».⁽²⁷⁾ Pour un matérialiste qui estime qu'il n'y a que la matière et les forces, il est difficile d'accepter que les mathématiques soient le tissu même de la réalité physique. Pour lui, elles ne sont que des astuces permettant de mesurer ou peser la matière. L'argument alors utilisé est que la sélection naturelle nous aurait conduit à identifier les «symétries» caractéristiques des formes vivantes évoluées, celles des proies et des prédateurs, et donc à penser «mathématiquement».⁽²⁹⁾ Dans cet ordre d'idées, l'efficacité des mathématiques pour décrire le monde serait juste un «sous-produit» de cette capacité, dont le succès passé ne garantirait en rien le succès à venir. Un croyant, en revanche, va adhérer à l'idée que le monde a été créé par l'intelligence de Dieu, et nous a été rendu intelligible par le Créateur. Bien évidemment, cette intelligibilité est d'abord symbolique, mais rien n'exclut qu'elle soit aussi mathématique, dans la mesure où, comme on le lit dans le texte coranique, «le soleil et la lune sont régis par un comput (*husbân*)».⁽³⁰⁾ Enfin, ces lois universelles de nature mathématique, qui

(28) Eugene Wigner, «The Unreasonable Effectiveness of Mathematics in the Natural Sciences», 1960, *Communications on Pure and Applied Mathematics* 13 (1) : 1-14.

(29) Voir par exemple John Barrow, *Impossibility*, 1998, Oxford University Press, Oxford, p.5.

(30) Coran 55:5.

décrivent les particules et les forces, ont été progressivement «unifiées», lors du progrès des connaissances. A travers plusieurs changements de paradigmes, elles ont donné naissance à l'actuel «modèle standard» de physique des particules, et aux efforts pour aller au-delà, vers ce qui pourrait être une «théorie de grande unification». Tout croyant musulman va regarder ce mouvement d'unification avec intérêt. Bien sûr, sa vision métaphysique de la réalité comme création du Dieu unique le conduit naturellement à considérer l'unité sous-jacente, non seulement à la matière même des choses et des êtres, mais à leur réalité la plus profonde qui ne se limite pas à celle-là.⁽³¹⁾

Un second thème très présent dans la science contemporaine est la grandeur inouïe du monde telle qu'elle apparaît dans les sondages cosmologiques, qui dévoilent, au sein de l'univers observable, une centaine de milliards de galaxies. Chaque galaxie est une ensemble de dizaines, voire de centaines de milliards d'étoiles. Sur la base des observations faites sur les étoiles les plus proches de nous, on soupçonne désormais fortement l'existence d'un cortège d'«exoplanètes» autour de beaucoup de ces étoiles, peut-être même de la plupart d'entre elles. Cet univers observable n'est lui-même qu'une petite zone de l'univers pris «dans son ensemble», un univers qui est peut-être infini. La question de savoir si l'univers est fini ou infini -est ancienne, et demeure difficile, voire insoluble, tant du point de vue scientifique que du point de vue philosophique. Dans la perspective de l'islam, il suffit ici de dire que l'univers infini n'est pas davantage une charge à Dieu que l'univers fini. Ce qui est nouveau avec la science contemporaine, c'est le panorama de l'extraordinaire diversité qui se dévoile à nous. Chacune des planètes étudiées dans notre Système Solaire a ses propres caractéristiques, et il en est sans doute de même pour les exoplanètes. Sur Terre, des millions d'espèces vivantes ont été recensées. Cette constatation fait ainsi écho à l'émerveillement et à la louange constamment mentionnés dans le Coran à propos de la grandeur et de la beauté de la Création.⁽³²⁾

Un troisième thème de la science contemporaine est la découverte que l'univers a une histoire, que les caractéristiques des galaxies, des étoiles, des planètes, ont été acquises à la suite d'un long processus, que les formes vivantes sur la Terre sont le produit de l'évolution biologique. Quel est le rôle du hasard dans cette évolution ? L'apparition de la vie était-elle «inévitable», étant donné le très grand nombre de planètes ? Comment l'homme lui-même est-il apparu ? On sait que les interprétations de la théorie darwinienne de l'évolution ont suscité de féroces

(31) Voir le chapitre 3 de cet ouvrage.

(32) Voir le chapitre 4 de cet ouvrage.

polémiques. Les philosophies matérialistes ont en effet souvent utilisé leur propre lecture de la théorie pour renforcer leur discours. En retour, beaucoup de croyants, notamment dans le monde musulman, affichent une hostilité plus ou moins grande à la théorie de l'évolution, surtout quand elle s'intéresse aux origines de l'homme. Le hasard traduit, en fait, l'existence de chaînes de causalité indépendantes qui se rencontrent et interagissent. Dans la perspective métaphysique de l'islam, toutes les chaînes de causalité remontent in fine à Dieu, et n'ont d'existence que par Dieu, qui est la cause première et, au fond, la seule cause de tout ce qui advient : «Le poids d'un atome n'échappe à ton Seigneur, ni sur Terre, ni dans les cieux. Il n'y a rien de plus petit ou de plus grand qui ne soit inscrit dans un livre explicite».⁽³³⁾ En revanche, le fait que rien n'échappe à Dieu comme le principe de la création, ne signifie pas que nous puissions avoir connaissance de tout, et, de notre point de vue, le hasard a une signification. Il existe donc des lectures théistes de la théorie de l'évolution dans laquelle Dieu ne cesse de créer des formes nouvelles en utilisant le «hasard».⁽³⁴⁾

Un dernier thème remarquable de la science contemporaine est la découverte, de l'intérieur même de la science, de limites infranchissables à la connaissance rationnelle : il y a donc de l'indécidable, de l'indéterminé, de l'imprévisible, au cœur même de la démarche scientifique. Une telle reconnaissance peut être vue comme une victoire de la raison humaine capable de repérer ses propres limites. Elle résonne de façon très intéressante avec le discours religieux qui affirme et qui nie la possibilité de connaître, qui montre tout à la fois la lumineuse intelligibilité du monde créé par Dieu, lequel a créé aussi notre intelligence, et le mystère fondamental des actions de Dieu. Parce que nous ne sommes pas auto-suffisants, parce que notre être dépend de l'Être de Dieu, il y a toujours quelque chose qui nous échappe.

Enfin, ces thèmes prennent leur sens par rapport à une dimension éthique que le croyant ne peut séparer de la pratique scientifique. Deux lignes directrices guident la pensée musulmane en ce domaine. La première est la vocation inaliénable de l'homme, mâle et femelle, à la connaissance, et l'adoration n'a pour but que la «certitude» (yaqîn).⁽³⁵⁾ La dignité attribuée par Dieu à l'homme lors de la création réside en effet dans l'enseignement de «tous les noms» (*al-asmâ' kullahâ*) qui a été prodigué à Adam par Dieu. C'est ce qui rend l'homme supérieur aux anges, forcés de se prosterner devant lui sur ordre exprès de Dieu.⁽³⁶⁾ Dans la shari'ah classique, le droit de chaque personne (*haqq an-nafs*) se décline par le respect des cinq éléments

(33) Coran 10:61.

(34) Voir le chapitre 5 de cet ouvrage.

(35) Coran 15:99.

(36) Coran 2:34.

fondamentaux (*ad-darûriyyat al-khamsah*) que sont la religion, l'intelligence, les biens, l'honneur et la vie.⁽³⁷⁾ Ces éléments prennent leur sens comme des *conditions* de la recherche du savoir, et de son terme, la certitude mentionnée plus haut. Le développement de la science doit prendre en compte cette dignité, ce qui, bien sûr, peut, et doit, lui imposer des limites et des contraintes, par exemple quand il s'agit de sciences biologiques. Le rapport au vivant est lui aussi marqué par la nécessité de la sollicitude. La souffrance que l'homme impose autour de lui doit être strictement encadrée, et ne peut, en fait, être justifiée que parce qu'il a besoin de manger pour survivre.⁽³⁸⁾ La seconde ligne directrice est la notion de «responsabilité» (*mas'ûliyyah*). L'être humain placé par Dieu comme son lieutenant dans la création (*khalîfah*) en est le gardien, et non le propriétaire. Il doit démentir la sombre prédiction des anges quand Dieu leur annonce son intention : «Vas-tu placer quelqu'un qui sèmera la corruption et le sang sur Terre ?»,⁽³⁹⁾ c'est-à-dire l'injustice et la violence. A contrario, l'être humain doit garantir la justice et la paix, qui sont indissociables dans l'esprit de l'islam. Ce qui rend l'être humain «responsable», c'est bien le fait, qui relève de la foi seule, qu'il sera un jour interrogé et aura à «répondre» de ses actes. Dans cette perspective, la nécessité de la préservation de la Création l'emporte sur la liberté de l'usage de la Création. Ce thème est évidemment très fort aujourd'hui, alors que l'on se rend compte qu'un certain modèle de développement sans frein, basé sur la certitude que la science et la technologie finiront toujours par résoudre les problèmes qu'elles produisent, montre tragiquement ses limites. Ici encore, cela impose des contraintes au développement scientifique et technologique, car il faut mettre en balance la croissance du bien être avec l'objectif de la vie humaine et la responsabilité vis-à-vis du monde. Au fond, la science et la technologie se sont toujours développées en ayant des cadres et des contraintes, explicites ou implicites. Ceux qui nous sont imposés actuellement, dans le modèle occidental, sont principalement d'ordre économique, et bien des sujets de recherche sont abandonnés car «trop chers», «trop incertains», ou «pas assez rentables», soit économiquement, soit en termes de reconnaissance par les pairs et de carrière pour les scientifiques.

(37) Mohammad Hashim Kamali, *Principles of Islamic Jurisprudence*, 1991, Islamic Texts Society, Cambridge, p. 271.

(38) «Pas de bête sur la terre ni d'oiseau volant de ses deux ailes qui ne constitue des nations pareillement à vous.» (Coran 6:38). Dès lors, selon le hadîth, «celui qui tue un moineau ou un animal plus gros sans droit devra rendre des comptes à Dieu le jour du jugement. - Et quel est son droit, demanda-t-on ? - C'est qu'il l'abatte et en consomme la chair, et non qu'il en coupe la tête et la jette.» (rapporté par Nasâ'i). Il y a là une différence abyssale avec la conception de «l'animal machine» qui nous a accompagnés en Occident depuis Descartes.

(39) Coran 2:30.

Pourquoi le débat entre science et religion ?

On saisit dès lors ce qui peut intéresser le croyant dans l'étude de la science. D'une part, connaître le monde actuel, et les idées scientifiques et techniques qui s'y développent, lui permet d'aiguiser son pouvoir de discrimination, et de comprendre ce qui est de l'ordre du religieux et ce qui ne l'est pas, ce qui est de l'ordre du scientifique et ce qui ne l'est pas. D'autre part, cet intérêt doit l'amener à purifier la conception qu'il peut avoir de l'action que Dieu y mène, s'il suit en cela l'incitation, exprimée dans le célèbre hadîth qudsî, «d'avoir de Dieu l'idée la plus haute».⁽⁴⁰⁾ Regarder et contempler le monde, s'émerveiller de le voir «sans fissure» et «sans faille»,⁽⁴¹⁾ lui permet notamment d'éviter une forme subtile d'anthropomorphisme qui, en faisant de Dieu une «chose» ou un «agent», certes très puissants, contribuerait à établir entre le monde et Dieu une différence qui serait plus de degré que d'essence. Mais Dieu est «le Très-Haut», et «rien n'est semblable à lui».⁽⁴²⁾ Certes, ce n'est pas la science qui permet d'avoir de Dieu quelque idée que ce soit-positive ou négative ; c'est la réflexion doctrinale et théologique sur le monde, alimentée par la foi, et désormais en partie informée par la vision contemporaine, qui permet de comprendre ce que Dieu y fait. Et, par-dessus tout, le croyant reste ouvert aux énigmes du monde, où il voit l'écho du mystère fondamental de Dieu, et se garde bien de figer sa connaissance, quelle qu'elle soit. Il se souvient régulièrement que la véritable intelligence consiste à savoir jusqu'où la raison peut se rendre pour explorer le monde, et à avoir la lucidité de s'arrêter à temps.

De ce point de vue, les deux leçons données par Ibn Rushd d'une part, Al-Ghazâlî d'autre part, restent, dans leur essence, pleinement valables, comme deux pôles d'une même attitude équilibrée et mesurée vis-à-vis de la science. D'une part, Ibn Rushd nous rappelle que les textes sacrés peuvent, et doivent, être «interprétés» pour que nous obtenions une cohérence d'ensemble avec notre savoir qui résulte de notre exploration rationnelle du monde. Mais la recherche de cette intelligibilité globale peut se faire dans deux sens : en effet, les textes sont susceptibles d'être interprétés ou bien pour *se rapprocher* des énoncés scientifiques,⁽⁴³⁾ dans une

(40) Dieu dit : «Je suis conforme à l'idée que mon serviteur se fait de Moi», hadîth qudsî, Bukharî, Muslim.

(41) «Tu ne verras pas de fissure dans la Création du Miséricordieux. Retourne ton regard : y vois-tu quelque faille ?» Coran 67:3.

(42) Coran 42:11.

(43) Ibn Rushd utilise ce premier genre d'interprétation dans son traité susmentionné, quand il essaie de montrer que le Coran affirme aussi l'éternité du monde -comme Aristote- puisqu'il existait quelque chose avant les cieux et la Terre : «[Dieu] s'est ensuite tourné vers le ciel qui était une fumée (*dukhân*)» (Coran 41:11).

démarche de nature *concordiste*, ou bien pour s'en *éloigner*, et donc s'en protéger, en revêtant un sens symbolique ou métaphorique. Le premier type d'interprétation n'est pas sans risque. Par exemple, le verset : «Dis : qui est le Seigneur des sept cieux, le Seigneur du Trône immense ?»⁽⁴⁴⁾ a été compris, quand les musulmans ont découvert la science hellénistique, comme faisant allusion aux sept sphères planétaires de la cosmologie aristotélicienne et du modèle astronomique de Ptolémée. On sait désormais que ce modèle du cosmos ne correspond pas à la réalité. Il n'est plus possible d'interpréter ce verset comme une allusion à une connaissance scientifique. Cet exemple montre assez le danger de vouloir placer la science, par nature en mouvement, et la religion sur le même plan, que ce soit pour y trouver des dissonances ou des concordances, ainsi que nous le comprenons maintenant avec le recul donné par l'histoire des sciences. D'autre part, comme Al-Ghazâlî l'a écrit, il y a bien un double risque dans la pratique de la science. Emportés par leur enthousiasme, et souvent ignorants des grandes problématiques philosophiques et religieuses qui ont accompagné l'humanité depuis vingt-cinq siècles, certains scientifiques risquent d'être trop sûrs d'eux-mêmes, et de faire des déclarations qui sortent du domaine de validité de leur science, notamment quand ils s'aventurent à se prononcer sur la nature ultime de la réalité, et prétendent pouvoir «connaître la pensée de Dieu».⁽⁴⁵⁾ Ces excès provoquent, en retour, un manque de confiance dans la science, qui est rejetée sans discrimination, en même temps que les excès de certains scientifiques, par les simples croyants qui n'ont pas les compétences pour distinguer ce qui s'appuie sur des arguments scientifiques de ce qui est pure spéculation ou interprétation personnelle.

Il s'agit finalement de fournir un contenu au terme de «science islamique». La question est la fois du domaine de l'éthique (personnelle et collective), de l'épistémologie, et de la vision du monde (on dirait en allemand la *Weltanschauung*) de nature métaphysique qu'elle présuppose. Chaque courant de pensée doit faire face, lors du passage de la théorie à la pratique, à des problèmes spécifiques qui résultent de sa position particulière, mais aussi des difficultés économiques et sociales du monde musulman. En tout cas, il est indispensable de susciter rapidement, chez les universitaires et les étudiants du monde musulman, un intérêt pour cette question qui puisse dépasser le simple recours à la vulgarisation scientifique. Les musulmans doivent retrouver le goût de tous les ordres du savoir, conformément à l'ordre de Dieu. L'avenir de la contribution de la civilisation islamique au développement de la connaissance universelle dépend en partie de la réponse qui sera donnée à cet appel. *Wa-Llâhu a'lam.*

(44) Coran 23:86.

(45) Voir par exemple Stephen Hawking, *A Brief History of Time*, 1988, Bantam Book, New York. Traduction française : *Une Brève histoire du temps*, 1989, Flammarion, Paris.

Chapitre 2

Science et spiritualité dans le monde musulman contemporain

Mohamed Tahar Bensaada

A l'heure où l'humanité s'apprête à affronter de nouveaux défis environnementaux, démographiques et sociaux grâce notamment au concours de la science et des technologies nouvelles, la question des rapports complexes qu'entretient la science avec les autres dimensions constitutives de l'humain remonte à la surface avec une acuité jusqu'ici jamais égalée. Dans un monde musulman confronté en plus aux problèmes du développement et de la gouvernance, la question se pose avec plus d'intensité.

Si la science est heureusement considérée comme un moyen pour appréhender la nature et l'homme pour le meilleur, il n'en reste pas moins que les problèmes éthiques qui accompagnent cette révolution posent des questions de sens auxquelles les hommes engagés dans l'aventure scientifique ne sauraient rester indifférents sous peine de passer à côté des véritables enjeux de cette révolution scientifique et technologique dont les sociétés espèrent une contribution décisive à la résolution de leurs problèmes de nutrition, de santé et de communication.

Nous essaierons dans un premier temps de partir de la situation actuelle qui prévaut dans le monde musulman aussi bien sur le plan de la recherche scientifique elle-même que sur le plan de ses rapports avec les autres sphères d'activité sociale. Malgré les avancées timides enregistrées dans certains pays et malgré la réussite éclatante de quelques savants prestigieux, le monde musulman continue dans son ensemble à vivre en marge de la science moderne et de ses applications technologiques.

Les questions posées aujourd'hui peuvent paraître très complexes voire nouvelles. Dans la réalité, si certaines d'entre elles sont nouvelles, la plupart des questions qui se posent à ceux qui se destinent à une carrière scientifique dans le monde musulman sont des questions universelles qui se sont déjà posées dans d'autres régions du monde, notamment en Europe, à l'aube de la révolution scientifique moderne. Il est donc important d'y revenir pour mieux appréhender les questions soulevées aujourd'hui dans les milieux des jeunes chercheurs dans le monde musulman.

Nous pouvons résumer toutes les questions qui se posent aujourd'hui en les ramenant à deux questions essentielles de nature universelle : 1) La science peut-elle

tout expliquer ? 2) La science peut-elle résoudre tous les problèmes du monde ? C'est en essayant de répondre à ces deux questions que nous examinerons de manière plus sereine la question des rapports entretenus par la science avec les autres dimensions constitutives de l'humain, et notamment la dimension spirituelle.

La science moderne en question(s)

Mais avant d'aborder ces questions théoriques, essayons de partir de l'état des lieux. Si l'on veut partir d'un diagnostic objectif des rapports entre science et culture, au sens large, dans l'histoire récente de l'humanité, force est de constater que le bilan n'est pas aussi reluisant que le laissent promettre les découvertes scientifiques dans tous les domaines. Celles-ci auraient pu contribuer de manière autrement plus décisive au bien-être des milliards d'humains qui vivent encore aujourd'hui sous le joug de l'ignorance, de la misère et de la maladie. Dans un rapport consacré à la problématique «Science et culture», l'UNESCO n'a pas hésité à tirer la sonnette d'alarme en des termes sans équivoque : *«Depuis plus d'un siècle, le secteur de l'activité scientifique a connu une telle croissance à l'intérieur de l'espace culturel ambiant qu'il semble se substituer à l'ensemble de la culture. Pour certains, il n'y aurait là qu'une illusion produite par la vitesse de cette croissance, mais les lignes de force de cette culture ne tarderaient pas à surgir de nouveau pour la maîtriser au service de l'homme. Pour d'autres, ce triomphe récent de la science lui confère enfin le droit de régenter l'ensemble de la culture qui, d'ailleurs, ne mériterait plus son titre que pour autant qu'elle se laisserait diffuser à travers l'appareil scientifique. D'autres enfin, effrayés par la manipulation à laquelle l'homme et les sociétés sont exposés en tombant sous le pouvoir de la science, y voient se profiler le spectre de la déroute culturelle.»⁽¹⁾*

Bien entendu, ce diagnostic concerne la situation à l'échelle mondiale. Sans doute faut-il beaucoup le nuancer si on veut le transposer à l'échelle des sociétés musulmanes contemporaines. Dans ces dernières, la science est loin d'envahir l'espace social et culturel. Mais le risque de voir certaines applications technoscientifiques compromettre les équilibres naturels et sociaux n'est pas moindre, si l'on y ajoute l'insuffisante maîtrise des découvertes et des procédés techniques auxquels les sociétés ont recours et qui sont pour la plupart importés.

Mais si la diffusion des sciences et des technologies dans les sociétés musulmanes est loin de connaître l'ampleur qu'elle connaît dans les sociétés occidentales, la problématique «science et culture» reste inchangée dans ses termes fondamentaux. Pire, il convient de se demander si, dans les sociétés qui connaissent un déficit réel

(1) UNESCO, La science et la diversité des cultures, PUF, 1974, p.15-16.

en matière scientifique et technologique, comme c'est le cas des sociétés musulmanes, le fait que la science entre dans un rapport conflictuel avec la culture n'est pas un facteur aggravant de la crise systématique que l'UNESCO a cherché à élucider. Dans cette situation, plus la science rencontre des résistances culturelles dans la société, plus elle risque de se développer de manière à contrarier les éléments essentiels de la culture et à devenir, peut-être à son corps défendant, une entreprise coupée de la réalité sociale et culturelle, ce qui ne favorise guère son éclosion souhaitée.

Si on veut résumer de manière lapidaire le diagnostic de l'UNESCO, on peut parler de divorce entre la science et la culture entendue au sens général. En Occident, ce divorce se réfère à une sorte d'«impérialisme» de la science et de la technologie qui semble étouffer toutes les autres dimensions de l'existence humaine. Dans les sociétés musulmanes, au contraire, ce divorce se rapporte à la difficulté, pour ne pas dire l'échec, de la diffusion de la science dans le tissu social. Mais quand on se penche sur les secteurs sociaux où la science et la technologie ont réussi à s'imposer malgré tout, le divorce entre la science et la culture revêt la même figure que celle que nous rencontrons dans les sociétés occidentales, ce qui nous amène à parler d'un phénomène universel, même s'il prend des formes variées suivant les sociétés.

Il s'agit maintenant d'expliquer ce divorce inquiétant, étant entendu que l'avenir de l'humanité dépend en grande partie de la prise en charge de cette problématique «science et culture» telle qu'elle a été posée par l'UNESCO. Pour comprendre ce divorce, il faut remonter aux débuts de la science moderne telle qu'elle s'est affirmée à partir de la Renaissance en Europe. Le divorce entre la science et la culture a commencé sous la forme d'un divorce avec la science aristotélicienne telle qu'elle avait été comprise, appliquée et instrumentalisée par un Moyen Âge dominé par une Eglise toute-puissante qui ne pouvait tolérer la Raison que dans son statut de servante de la Théologie. Il n'est pas étonnant dans ces conditions que l'affirmation moderne de la Raison ait pris la forme d'une revanche sur la Théologie.

Paradoxalement, la science moderne ne rejeta pas le système d'explication du monde aristotélicien dans son ouverture à la vision métaphysico-religieuse. Le «premier moteur» de la physique aristotélicienne s'accommode bien des fondements métaphysiques de la nouvelle science due à Descartes (1596-1650), dont le dualisme peut tout aussi bien fonder une science mécanique que justifier un principe premier d'ordre métaphysique, mais qui serait à l'origine du monde physique comme en témoigne la présence de l'Esprit chez l'Homme. Mais dans cette métaphysique cartésienne, seul l'Homme peut témoigner de la présence de cet Esprit qui semble s'être retiré du monde. C'est pourquoi l'Homme-Sujet peut désormais démonter à sa

guise ce monde réduit à n'être qu'un automate mû par les seules lois de la mécanique.

Ce que la science cartésienne va rejeter dans le système aristotélicien, c'est la présence métaphysique dans le monde physique. La division aristotélicienne du monde en monde supra-lunaire susceptible d'une approche mathématique et un monde sublunaire en proie à la contradiction et à l'incertitude et donc non mathématisable fut rejetée par Galilée (1564-1642) et Descartes comme la dernière superstition freinant la connaissance absolue du Livre du monde qui est, comme on le sait depuis Galilée, un livre écrit en langage mathématique.

Aristote (384-322 av. J.C.) définissait la nature comme à la fois matière et forme. La matière c'est l'ensemble des choses qui trouvent en elles-mêmes un principe de mouvement et de changement. Mais la nature ne se réduit pas à la matière puisqu'elle est aussi forme, c'est-à-dire la spécificité conforme à sa raison d'être. C'est en partant de cette distinction qu'Aristote nous invite à étudier la différence entre le mathématicien et le physicien. Pour lui, seuls les corps naturels possédant des surfaces, des longueurs et des points pouvaient constituer un objet d'investigation pour le mathématicien : *«En effet, les corps naturels possèdent des surfaces et des solides, des longueurs et des points, qui sont objets d'investigation pour le mathématicien. De plus, il faut étudier si l'astronomie est distincte ou est une partie de la physique, car il est absurde qu'il revienne au physicien de savoir ce qu'est le soleil et la lune mais aucun de leurs accidents par soi, d'autant plus que ceux qui s'occupent de la nature paraissent aussi parler de la figure de la lune et du soleil et traitent la question de savoir si la terre et l'univers sont sphériques ou pas. Le mathématicien étudie également ces figures, mais non en tant que chacune est limite d'un corps naturel, pas plus qu'il n'observe leurs accidents en tant qu'ils arrivent aux étants de cette sorte. C'est pourquoi il les sépare, car par la pensée ils sont séparables du mouvement, sans que cela entraîne de différence et sans qu'il résulte aucune erreur de cette séparation. A leur insu, les partisans des Idées agissent de même : ils séparent les étants naturels, qui sont moins séparables que les étants mathématiques. Cela deviendrait clair si l'on tentait d'énoncer les définitions, pour les étants eux-mêmes et pour leurs accidents. D'une part, en effet, l'impair, le pair, le droit, le courbe, et en outre le nombre, la ligne et la figure existeront sans mouvement, mais pas la chair, l'os et l'homme, qui se disent comme le nez camus et non comme le courbe.»⁽²⁾ C'est ce qui a fait écrire au spécialiste de la philosophie grecque, Lombros Couloubaritsis : «Cette analyse est d'une grande*

(2) Aristote, La physique, Librairie philosophique, Paris, J. Vrin, 1999, p.101-102.

importance, car elle fait savoir pourquoi Aristote refuse d'instaurer une physique mathématique. Les objets des mathématiques étant pour lui de l'ordre de l'accident, seule une étude de l'étance en devenir et de ses propriétés (les accidents essentiels ou par soi) sont objets de la science physique. C'est en ce sens que la physique aristotélicienne est plus proche de la métaphysique dont elle est pour ainsi dire le préambule indispensable».⁽³⁾

Certes, en refusant le principe de nécessité à l'ordre sublunaire, Aristote n'a pas seulement rendu ce dernier inaccessible au savoir mathématique, il s'est aussi interdit la possibilité d'une science physico-mathématique comme il l'a admis pour l'astronomie, et comme les Modernes la réaliseront presque vingt siècles plus tard.

C'est cette dichotomie inhérente à la Physique d'Aristote que Galilée et Descartes vont enterrer pour donner naissance à la physique mathématique moderne. Bien entendu, il ne s'agit nullement de sous-estimer l'apport révolutionnaire de ces deux pionniers de la science moderne. Galilée a notamment été parmi les premiers penseurs européens à théoriser la séparation entre la sphère scientifique et la sphère morale en soutenant que «l'intention du Saint-Esprit est de nous enseigner comment on doit aller au ciel, et non comment va le ciel». Galilée a révolutionné les bases épistémologiques de la science en mettant en avant les nouveaux principes : empirisme, espace quantifiable, interrogation de la nature par la médiation des instruments.

Mais Galilée est surtout connu pour avoir introduit l'approche mathématique dans les études physiques. Pour lui, en effet, et c'est la grande différence avec Aristote, la nature a une structure mathématique : «Le livre de la nature est écrit dans le langage des mathématiques». Galilée fonde une science selon laquelle les phénomènes naturels obéissent à des lois mathématiques (les lois du mouvement notamment, qui donnent lieu à la mécanique). Il a jeté les bases d'une physique mathématique qui sera théorisée plus tard par Descartes. Cette mathématisation jouera un rôle dans ce qu'on appelle la dé-symbolisation et la dé-signification du Réel. La science devient opérationnelle en prédisant correctement et non plus représentationnelle. Dans ce schéma, la nature n'a plus rien à nous dire. C'est aux savants de lui faire dire et faire ce qu'ils veulent. La stratégie technoscientifique se met en place.

La mathématisation de l'univers introduite par Galilée convient bien à Descartes qui cherchera à approfondir les recherches de son prédécesseur italien. D'ailleurs, Descartes ne cache pas ses préférences pour la méthode mathématique dont les axiomes ne souffrent aucune discussion. Descartes a cherché à étendre l'empire des

(3)

mathématiques à d'autres sphères du savoir humain. Dans sa cosmogonie, Descartes soutient que l'existence d'un monde dépend uniquement de la volonté créatrice de Dieu, et qu'il suffit de lui imposer quelques lois fondamentales, comme les principes de conservation et d'inertie, pour que le monde soit cette machine parfaite qui fonctionne d'elle-même.

Ce mécanisme cartésien se retrouve y compris dans l'étude scientifique de l'homme : «Au reste, afin que ceux qui ne connaissent pas la force des démonstrations mathématiques, et ne sont pas accoutumés à distinguer les vraies raisons des vraisemblables, ne se hasardent pas de nier ceci sans l'examiner, je les veux avertir que ce mouvement (du cœur et des artères) que je viens d'expliquer suit aussi nécessairement de la seule disposition des organes qu'on peut voir à l'oeil dans le coeur, et de la chaleur qu'on y peut sentir avec les doigts, et de la nature du sang qu'on peut connaître par expérience, que fait celui d'une horloge, de la force, de la situation et de la figure de ses contre-poids et de ses roues.»⁽⁴⁾

Il y a un lien logique entre ce mécanisme cartésien et la vision dualiste d'un monde où la nature est définie comme un objet à approprier par l'Homme-Sujet avec toutes les conséquences anti-écologiques que nous connaissons aujourd'hui. Bien entendu, quand Descartes écrivait que la science et ses applications pourraient rendre l'Homme comme «maitre et possesseur de la nature», il ne l'entendait pas de la manière que la civilisation capitaliste moderne a expérimentée depuis. D'abord, en tant que savant chrétien, Descartes ne pouvait penser un autre «maitre et possesseur de la nature» que Dieu. Mais il n'empêche que le mécanisme cartésien a participé historiquement à l'aventure technoscientifique moderne qui débouchera sur une relation ambiguë entre l'Homme et la nature d'une part, et entre l'Homme et la culture d'autre part.

Gardons-nous de réduire la pensée moderne à ses exagérations mécanistes et à ses dérives anti-écologiques. La philosophie moderne des Lumières a aussi donné naissance à des penseurs qui, tout en militant pour donner à la science le statut éminent qu'elle ne cessera d'avoir depuis, n'en ont pas moins fixé des limites à cette dernière, en établissant notamment un nouveau rapport, plus fécond, entre science et métaphysique. C'est le cas notamment de l'Allemand Emmanuel Kant (1724-1804), ce philosophe rationaliste qui va fonder le savoir sur la raison, mais qui ne tombera pas pour autant dans le piège de la raison dogmatique.

(4) Descartes, Discours de la méthode, cinquième partie.

Pour bien fonder le savoir humain, il faut examiner les capacités de la raison. Kant commence donc par étudier jusqu'où peut aller «le pouvoir de connaître de l'esprit humain». C'est une des questions les plus difficiles, puisqu'il s'agit pour la raison de «se connaître soi-même» avant de pouvoir connaître le monde environnant. Mais Kant ne va pas aborder cette question essentielle dans l'abstrait. Il part des sciences de son époque qui venaient de réaliser des progrès immenses. Puisqu'elles existent, c'est qu'elles sont possibles. Il reste donc à savoir comment ? C'est cette question, celle des conditions de possibilité des sciences, qui va constituer l'œuvre principale de Kant.

Pour cela, Kant va distinguer entre les différents instruments dont dispose le pouvoir humain de connaître que sont les différents *jugements* et entre les différentes *structures* qui sont à sa disposition. Kant commence par distinguer les trois types de jugements que sont les jugements *analytiques* dans lesquels l'attribut explicite ce qui se trouvait déjà dans le sujet (exemple : les corps sont étendus), les jugements *synthétiques a posteriori* qui ont généralement cette particularité que l'attribut ajoute au sujet quelque chose qui n'était pas dans la définition. La synthèse en question ne se justifie que par l'expérience qui me montre que l'attribut appartient bien au sujet (exemple : les corps sont pesants), et enfin les jugements *synthétiques a priori* dans lesquels l'attribut ajoute quelque chose au sujet mais d'une manière strictement nécessaire et universelle (exemple : «Tout ce qui arrive a une cause»). Ces derniers jugements sont problématiques, dans la mesure où ils ne sont pas fondés uniquement sur le principe de contradiction et ne sont pas dérivés non plus de l'expérience. D'où proviennent-ils alors ? Kant répond : de la raison elle-même et de ses propres structures qui sont des conditions *a priori* de la connaissance.

D'où l'importance de distinguer les structures de la connaissance qui sont au nombre de trois selon Kant : la sensibilité, l'entendement et la raison. Par sensibilité ou esthétique transcendantale, Kant entend la couche de connaissance par laquelle les objets nous sont donnés dans l'expérience avant d'être pensés par notre entendement. Kant distingue la connaissance sensible externe par laquelle nous appréhendons les objets et la connaissance sensible interne qui permet la saisie de nos états d'âme. En ce qui concerne la connaissance sensible externe, il nous est impossible de percevoir les corps autrement qu'insérés dans des relations spatiales (distance, proximité, grandeur). Pour Kant, l'espace, condition de nos perceptions, n'est pas une réalité indépendante de nous et des objets (comme chez Newton, 1643-1727), ni l'ensemble des relations que ceux-ci entretiennent entre eux (comme chez Leibniz, 1646-1716), mais une structure de notre sensibilité externe, une forme *a priori* dans laquelle sont coulées les impressions venant du

dehors. D'un autre côté, les états de conscience m'apparaissent toujours dans des relations temporelles, dans la mesure où ils sont soit simultanés soit successifs. Pour Kant, le temps n'est pas non plus une réalité en soi, ni l'ensemble des rapports de succession, mais une structure, une forme a priori de notre sensibilité interne. Pour Kant, il y a donc au départ un donné qui nous affecte. L'homme ne crée pas l'objet de sa connaissance. Seulement, nous n'appréhendons point cette réalité telle qu'elle est en elle-même, mais telle qu'elle apparaît à travers la structure de notre sensibilité spatio-temporelle, c'est-à-dire comme phénomène.

Mais la sensibilité capable de recevoir les impressions du monde extérieur ou intérieur ne suffit pas pour qu'il y ait connaissance. Il faut que l'esprit humain «pense le donné» au moyen de concepts. Le pouvoir de produire ces concepts, Kant l'appelle entendement ou analytique transcendantale. Kant pense que la collaboration de la sensibilité et de l'entendement est nécessaire à la production de la connaissance : *«Aucune de ces deux propriétés n'est préférable à l'autre. Sans la sensibilité, nul objet ne nous serait donné et sans l'entendement nul ne serait pensé. Des pensées sans contenu sont vides, des intuitions sans concepts, aveugles... Ces deux pouvoirs ou capacités ne peuvent échanger leurs fonctions. L'entendement ne peut rien intuitionner, ni les sens rien penser. De leur union seule peut sortir la connaissance.»*⁽⁵⁾

Les concepts produits par l'entendement sont soit «empiriques», c'est-à-dire constituant la matière de nos jugements ; ex : oxygène, arbre, chien, etc, soit universels qui seraient comme les cadres de concepts particuliers et empiriques. Dans la terminologie kantienne, ces derniers sont des catégories. Si pour certains philosophes empiristes, les catégories expriment seulement les aspects les plus généraux des choses, dégagés par l'abstraction, ou sont des habitudes mentales acquises progressivement, pour Kant, les catégories sont des concepts fondamentaux, purs, *a priori*, de l'entendement. Ce dernier ne peut penser sans ces catégories qui lui permettent d'ordonner le monde. Exemple : le principe de causalité.

Cependant, l'entendement ne peut faire de ses principes *a priori* qu'un usage empirique. En d'autres termes, il ne peut les appliquer qu'aux phénomènes qui sont objet d'une expérience possible. Pour Kant, l'entendement «ne peut jamais dépasser les bornes de la sensibilité à l'intérieur desquelles seuls les objets nous sont donnés». Les réalités qui ne pourraient être perçues par les sens et qui seraient appréhendées seulement par une intuition intellectuelle sont appelées par Kant des «noumènes». L'esprit humain, capable seulement d'intuition sensible, n'a

(5) Emmanuel Kant, Critique de la raison pure, Paris, Flammarion, édition 2001.

aucune connaissance déterminée du noumène. En admettant que notre connaissance ne peut atteindre que l'ensemble des phénomènes, structuré à l'aide des formes *a priori* de la sensibilité, des catégories et des principes, Kant a définitivement rompu avec l'illusion du scientisme. Mais la rupture avec le scientisme ne signifie pas l'interdiction pour la Raison de «penser» autrement ce qu'elle ne peut atteindre par la sensibilité et l'entendement. D'où pour Kant la troisième structure qu'il appelle la raison ou dialectique transcendantale.

Pour Kant, la nature constitue un tout. Il s'agit de la totalité des phénomènes dont les parties sont interdépendantes. Pour qu'il y ait connaissance, il faut que le monde constitue non pas une multiplicité indéterminée mais une unité définie, une totalité. Cependant, au niveau de l'entendement, cette totalité est relative, puisqu'elle se situe au plan de l'expérience. Mais il y a une autre forme de totalité qui dépasse n'importe quelle expérience donnée, il s'agit de «la totalité absolue de toute expérience possible» qui permet à la pensée d'atteindre son point le plus haut : la raison.

L'entendement était structuré par les catégories comme on l'a vu plus haut. La raison, elle, «*renferme en soi le principe des idées et par là, j'entends des concepts nécessaires dont l'objet cependant ne peut être donné dans aucune expérience.*» Mais malgré cette différence essentielle, il existe une continuité entre l'entendement et la raison. En effet, la totalité à laquelle aspire la raison recouvre celle qui se trouvait déjà au niveau de l'entendement, mais elle la dépasse en même temps.

Kant avait découvert l'origine des catégories dans les fonctions logiques du jugement et il a recherché l'origine des idées dans les fonctions du raisonnement qui sont au nombre de trois : les «raisonnements catégoriques» auxquels correspondent les idées d'âme, les «raisonnements hypothétiques» auxquels correspondent les idées du monde et enfin les «raisonnements disjonctifs» auxquels correspondent les idées de Dieu.

L'idée d'âme désigne chez Kant la totalité des phénomènes internes (psychologiques). L'idée de monde désigne la totalité des choses existantes et enfin l'idée de Dieu désigne dans notre esprit l'exigence d'une synthèse ultime. En soutenant qu'on ne peut démontrer théoriquement l'existence de Dieu, Kant n'a pas délégitimé toute interrogation métaphysique, mais lui a ouvert de nouveaux horizons en rupture avec les anciennes illusions. En s'émancipant du cadre étroit du dogmatisme scientiste, la Raison critique peut aussi bien libérer les champs de la science expérimentale de toute interférence métaphysique que s'ouvrir à son tour, par le biais d'autres approches, aux questions de sens que la rationalité scientifique ne saurait atteindre.

Le renouvellement de la science contemporaine

La science moderne de Galilée, Descartes et Newton a été l'objet d'une contestation dès la fin du XIX^e siècle et tout au long du XX^e siècle, ce qui a donné lieu à ce qu'on appelle les «nouveaux paradigmes». Pour montrer en quoi consiste la métamorphose de la science contemporaine à la faveur de ces «nouveaux paradigmes», il importe de faire un choix pour illustrer ce processus aux yeux des jeunes chercheurs qui s'appêtent à faire de la recherche scientifique et de l'enseignement des sciences leur activité principale. Notre choix s'est porté sur Ilya Prigogine (1917-2003) pour une raison très simple. Il s'agit, d'une part, d'un savant contemporain qui a marqué la recherche scientifique notamment en chimie par ses travaux originaux qui lui valurent le prix Nobel de chimie en 1977. D'autre part, Prigogine n'a pas hésité à tirer de son expérience scientifique des enseignements épistémologiques et philosophiques très riches qui ont révolutionné notre conception du monde, de la nature et de l'Homme. Il est devenu à ce titre un penseur incontournable pour tous ceux qui voudraient réfléchir sur leur pratique scientifique et sur les enjeux écologiques et sociaux des applications technologiques que la science permet de nos jours.

Prigogine s'est penché sur la science moderne et ses présupposés. Comme la science moderne se confond depuis trois siècles avec l'héritage de la physique newtonienne, Prigogine s'intéressera particulièrement aux conséquences de cet héritage scientifique. «Symbole de la révolution scientifique européenne», Newton peut être différemment interprété. Pour certains, Newton montre l'intérêt scientifique d'un «protocole d'expérience mathématisable». Ce que Newton a fait en physique, Lavoisier (1743-1794) l'a fait à son tour en chimie. Pour d'autres, le plus important dans le système de Newton est le souci épistémologique d'isoler un fait central, irréductible, comme la *force d'attraction*, à partir duquel on peut tout déduire. C'est le rôle joué en chimie par le principe d'*affinité*.

Mais quelle que soit l'interprétation donnée à l'aventure scientifique newtonienne, Prigogine affirme qu'elle a débouché sur une synthèse scientifique et culturelle instable qui se trouve confirmée par le sévère diagnostic posé par l'UNESCO auquel nous nous sommes référés dans l'introduction de cet article. L'inquiétude qui transparait à travers ce texte de l'UNESCO est aujourd'hui partagée par de nombreux scientifiques. Mais pour Prigogine, il importait de savoir comment la science est arrivée à ce paradoxe dangereux. La réponse de Prigogine peut se résumer en deux points : d'une part, la science moderne s'est fourvoyée dans son souci de réaliser une synthèse technoscientifique capable de modifier la nature à des fins économiques. D'autre part, la science moderne s'est trompée en voulant arriver

à une vérité globale de la nature à partir de quelques principes physiques exprimés en langage mathématique.

Prigogine décrit l'activité scientifique comme une tentative de communiquer avec la nature. L'activité scientifique apparaît de ce point de vue comme un ensemble cohérent de questions-réponses. Mais si toutes les traditions de l'humanité ont envisagé par le passé ce genre de dialogue avec la nature, Prigogine se penche sur le dialogue spécifique à la science moderne. Il y a bien une différence fondamentale entre le savant moderne et le mage ou le sorcier des sociétés traditionnelles. Prigogine part de la thèse de l'historien des sciences, Alexandre Koyré (1892-1964), qui définit la science moderne comme un « dialogue expérimental » avec la nature.

Ce « dialogue expérimental » revêt deux dimensions inséparables : comprendre et modifier. L'activité scientifique se distingue donc par une interaction entre théorie et pratique d'où le caractère stratégique de la science moderne. Un autre épistémologue contemporain, Karl Popper (1902-1994), a, lui, reconnu que la science rationnelle doit son existence à son succès pratique qui est un fait historique. Mais justement, selon Prigogine, ce qui fait la spécificité et la force de la science moderne fait en même temps sa faiblesse. Son caractère pratique l'a éloignée des questionnements philosophiques qui pouvaient lui épargner une instrumentalisation techno-économique préjudiciable à l'homme et à la nature.

Le rapport entre connaissance expérimentale et questionnement philosophique du monde a connu une trajectoire particulière dans l'histoire de la science. A ses débuts, la science moderne a posé avec succès des questions qui impliquaient une « nature morte et passive ». C'est la « terrifiante stupidité de l'interlocuteur » dont parlent certains physiciens. Mais le dilemme tragique qui consiste dans le succès de la science et la solitude de l'homme a débouché sur un discrédit de la science qui s'avère ainsi hostile à la nature, d'où la crise écologique.

Or, ce dilemme s'explique selon Prigogine par une illusion : la science moderne a commencé par nier les visions anciennes et la légitimité des questions posées par ces visions sur la nature. La science a engagé un dialogue expérimental, mais à partir de présupposés dogmatiques qui vouaient les résultats de cette recherche (la conception moderne du monde) à être inacceptables par les autres univers culturels. A cet égard, on peut parler d'une idéologie scientifique euro-centriste, mais il ne faut pas confondre cela avec la science proprement dite, qui reste universelle dans sa démarche rationnelle et expérimentale.

Le mécanisme de la physique galiléo-newtonienne qui s'inspire du modèle des constructeurs de machines de la Renaissance renvoie à son tour à des considérations

métaphysiques que Prigogine cherche à élucider. En effet, on aurait pu imaginer que la mathématisation à laquelle appelaient Galilée et Newton s'arrête aux machines sans atteindre leur conception de la nature. Mais si le rêve galiléen d'une nature écrite en langage mathématique a finalement triomphé, c'est qu'il entretenait une résonance avec les croyances religieuses en vigueur chez ces pionniers de la science moderne : *«Nous savons que les constructeurs de machines utilisaient des descriptions et des concepts mathématiques : rapports entre les vitesses et les déplacements des différences pièces agencées, géométrie de leurs mouvements relatifs- mais pourquoi la mathématisation ne s'est-elle pas limitée au fonctionnement des machines ? Pourquoi les mouvements naturels ont-ils été conçus à l'image de la machine rationalisée ? Cette même question peut être posée à propos de l'horloge, qui constitue l'un des triomphes de l'artisanat médiéval et, très rapidement, rythme la vie des premières communautés médiévales : pourquoi est-elle devenue presque immédiatement le symbole même de l'ordre du monde ? On peut voir ici l'indication d'une direction dans laquelle certains éléments pourraient être identifiés. L'horloge est un mécanisme construit, soumis à une rationalité qui lui est extérieure, à un plan que ses rouages réalisent de manière aveugle. Le monde horloge constitue une métaphore qui renvoie au Dieu Horloger, ordonnateur rationnel d'une nature automate.»*⁽⁶⁾

Les enjeux sociaux et écologiques posés par les applications des sciences et des techniques dans le cadre de notre civilisation moderne n'ont pas manqué d'atteindre les fondements de la science moderne elle-même. Il y aurait, selon Prigogine, comme un fil logique entre les dérives techno-économiques de la civilisation moderne et les postures mécanistes de la science galiléo-newtonienne. C'est pourquoi les tentatives de sortie de cette impasse que nous entrevoyons à notre époque sont liées à ce que Prigogine appelle la «métamorphose» de la science contemporaine : *«Partis d'une nature assimilée à un automate, soumise à des lois mathématiques dont le calme déploiement détermine à jamais son futur comme il a déterminé son passé, nous arrivons aujourd'hui à une situation théorique toute différente, à une description qui situe l'homme dans le monde qu'il décrit, et implique l'ouverture de ce monde. Il n'est pas exagéré de parler de cette transformation conceptuelle comme d'une véritable métamorphose de la science.»*⁽⁷⁾

La science contemporaine n'a pas réalisé cette métamorphose du jour au lendemain. C'est un travail de longue haleine, qui a nécessité plusieurs décennies de recherches et de découvertes, et auquel Prigogine a contribué de manière décisive. La physique

(6) Ilya Prigogine, Isabelle Stengers, La nouvelle alliance, Paris, Gallimard, 1979, p.83

(7) Ilya Prigogine, Isabelle Stengers, op. cit, p.29.

de l'atome, la Mécanique Quantique, et la théorie de la Relativité constituent les principales étapes de cette métamorphose de la science contemporaine.

La théorie de l'atome a permis à la science de sortir du causalisme en transformant le concept de loi naturelle, dans la mesure où elle a enlevé au principe de causalité la vigueur qu'il avait dans l'ancienne physique mécaniste. Désormais, on ne peut plus parler d'une détermination stricte des processus physiques selon des lois naturelles. Le déterminisme newtonien postule qu'il y a des lois naturelles fixes qui déterminent rigoureusement l'état futur d'un système d'après son état actuel. C'est le fameux « démon de Laplace (1749-1827) » qui nous explique qu'un démon qui, à un moment donné, connaîtrait la position et le mouvement de tous les atomes, serait alors en mesure de calculer d'avance l'avenir total de l'univers. Cette image déterministe va être contestée par la physique atomique.

Déjà, l'atomisme antique de Démocrite (460-370 av. J.C.) admettait que les processus à grande échelle résultaient de multiples processus irréguliers à l'échelle corpusculaire. La physique atomique moderne a essayé d'expliquer le comportement de la matière par le comportement statistique de ses atomes. Exemple : Robert Boyle (1627-1691) a montré qu'on pouvait comprendre les rapports entre la pression et le volume d'un gaz dès qu'on expliquait cette pression par les nombreux chocs que provoquent des atomes isolés contre la paroi d'un récipient. Sans abandonner complètement le déterminisme, la mécanique statistique de la fin du XIX^e siècle ajouta que les propriétés d'un système n'étaient pas entièrement connues.

La Mécanique Quantique de Max Planck (1858-1947), qui nous apprend qu'un atome rayonnant n'émet pas son énergie de façon continue mais de manière discontinue, a donné lieu à la conclusion que l'émission des rayons est un phénomène statistique. La Mécanique Quantique est arrivée à donner aux lois physiques une formulation probabiliste, et à abandonner le principe du déterminisme. La physique atomique se distingue de la physique mécanique d'autrefois par la relation d'incertitude. Ce dernier postule qu'il est *impossible d'indiquer simultanément la position et la vitesse d'une particule atomique*. (Or, pour la physique newtonienne, pour calculer un processus mécanique, il faudrait connaître simultanément la position et la vitesse du corpuscule à un moment déterminé).

La théorie de la Relativité d'Einstein (1879-1955) a fini par décomposer le déterminisme. La structure «espace-temps» n'est pas aussi simple que nous nous la représentons depuis Newton : une structure suivant laquelle entre deux groupes d'événements passés et futurs, il y aurait un mouvement infiniment court que nous appelons présent. Depuis Einstein, entre le passé et le futur, il y a un intervalle

temporel fini dont la durée dépend de la distance spatiale qui sépare l'événement de l'observateur. La Mécanique Quantique a montré que, plus on précise la position et on délimite l'espace, plus il en résulte une indétermination de la vitesse, ainsi que de l'impulsion et de l'énergie. Il est dès lors impossible d'avoir une formulation mathématique satisfaisante de l'action réciproque des particules. En conclusion, dans des domaines de l'ordre de grandeur des particules, l'espace et le temps ont une imprécision particulière, au point que les concepts d'*avant* et d'*après* deviennent indéfinissables. Or, si le concept de chronologie devient problématique, le déterminisme n'a plus aucun sens.

C'est dans ce cadre scientifique contemporain marqué, par une remise en question radicale du déterminisme qu'on doit comprendre l'apport de Prigogine. La Mécanique Quantique nous fait découvrir un univers fragmenté, riche de diversités qualitatives, une matière complexe et multiple. La physique et la chimie cherchent aujourd'hui à étudier les transformations et les instabilités. On assiste à la fin de la conception mécaniste du monde.

Parti de l'acquis de la Mécanique Quantique suivant laquelle *«nous n'avons accès aux atomes et aux molécules que par l'intermédiaire de nos instruments qui, tous, sont macroscopiques»* et que *«nos théories à leur sujet sont intrinsèquement déterminées par cette médiation»*, Prigogine est allé plus loin, puisqu'il ne voit plus dans ce savoir qu'une portée négative. Prigogine a découvert que *«l'irréversibilité joue dans la nature un rôle constructif puisqu'elle permet des processus d'organisation spontanée.»* Prigogine en tire la conception d'une *«nature créatrice de structures actives et proliférantes.»*⁽⁸⁾

En mettant à l'honneur la notion d'incertitude, la pensée de Prigogine rompt complètement avec le déterminisme et ses conséquences culturelles : *«Nous nous retrouvons dans un monde irréductiblement aléatoire, dans un monde où la réversibilité et le déterminisme font figure de cas particuliers, où l'irréductibilité et l'indétermination microscopiques sont la règle.»*⁽⁹⁾

La science newtonienne a découvert une loi universelle à laquelle obéissent les corps célestes et le monde sublunaire. Un grand nombre de phénomènes obéissent à des lois simples et mathématiques, d'où l'idée d'une «nature automate». Cette découverte a favorisé ce qu'on appelle le «désenchantement du monde». Celui-ci n'a plus rien à nous dire. Nous pouvons lui faire dire ce que nous voulons, et donc nous pouvons le maîtriser et le manipuler à souhait. C'est le vieux rêve cartésien d'une

(8) Ilya Prigogine, Isabelle Stengers, op.cit.

(9) Ilya Prigogine, Isabelle Stengers, op.cit.

nature maîtrisée à des fins humaines, avec les conséquences anti-écologiques qu'on connaît. En se construisant contre cette science, l'œuvre de Prigogine a permis la réhabilitation de la nature.

Au-delà de ses aspects scientifiques et épistémologiques importants, l'œuvre de Prigogine présente une dimension écologique incontournable. La conception d'une «nature créatrice», qui est au centre de ses travaux, représente une rupture avec la conception héritée de la tradition cartésienne qui se représentait la nature comme un robot qu'on peut s'approprier à des fins techniques et économiques. Dans cette conception dualiste Nature/Homme, ce dernier est séparé artificiellement de la nature, dans la mesure où il représenterait une créature privilégiée parce que c'est la seule créature douée de Raison.

Prigogine propose une conception écologique originale. Le processus d'irréversibilité à l'œuvre dans la nature n'obéit à aucun principe déterministe. L'homme est le fruit d'un long processus physique qui a débouché sur la vie. Mais aussi aléatoire soit-il, ce processus qui est arrivé jusqu'à l'homme doué de raison, n'est pas condamné à la solitude ni au non-sens. Quand il s'agit de l'histoire des hommes, la «nature créatrice» signifie notamment liberté. Mais la liberté n'est pas absolue, puisqu'elle se déploie dans une interaction avec d'autres forces de la nature. La connaissance de ces forces et l'anticipation des évolutions statistiques permettent une action sur l'environnement. L'homme est son propre ennemi. Par son action, l'homme peut causer des dégâts autour de lui. Mais c'est aussi par son action qu'il peut limiter et éviter ces dégâts.

Pour mieux mesurer les enjeux philosophiques et écologiques présents dans l'œuvre de Prigogine, il est intéressant d'examiner le débat qu'il a entamé avec un penseur contemporain, qui a tiré des conclusions différentes de la crise ouverte par les découvertes scientifiques contemporaines et leurs applications techniques.

Le divorce avec le déterminisme et la valorisation d'une «nature créatrice» sous le signe de l'incertitude et de la complexité ne risquent-ils pas de dévaloriser, du même coup, la place de l'Homme dans le monde, en le livrant à une logique aléatoire qui risque de déstabiliser ses certitudes philosophiques, à commencer par l'humanisme qui a constitué le socle de la culture européenne moderne ?

A cette question, Prigogine a tenté de répondre dans un dialogue avec le prix Nobel français de médecine, Jacques Monod (1910-1976). Prigogine répond à la question posée par Monod à propos du paradoxe de la science. Celui-ci consiste dans la solitude de l'homme au moment même où la science connaît un succès incontestable. Monod écrit à ce propos : *«L'ancienne alliance est rompue ; l'homme sait enfin qu'il est seul dans l'immensité indifférente de l'Univers d'où il a émergé*

par hasard». Cette conclusion ne peut, selon Prigogine, que favoriser la coupure anti-écologique entre l'homme et la nature.

Prigogine répond à cette position : *«Nous montrerons que, lorsqu'il énonça cette conclusion, Monod donnait voix non seulement à une interprétation possible de certains résultats de la biologie moderne, mais aussi à celle d'un ensemble théorique bien plus vaste, que nous appellerons la science «classique», et que cette science n'a cessé, au cours des trois siècles d'existence, de conclure que l'homme est un étranger dans le monde qu'elle décrit. Or, nous sommes en droit de constater là quelque paradoxe. C'est le cas chez Monod : son récit est celui d'une réussite éclatante, mais il s'achève sur une note qui paraît tragique. La biologie moléculaire a décodé le texte génétique, dont l'existence constituait pour d'aucuns le secret de la vie. Elle a ainsi rencontré un type de succès qui confirme la signification la plus profonde que nous pouvons donner à l'activité scientifique : celle d'une tentative de communiquer avec la nature - d'apprendre à son contact qui nous sommes et à quel titre nous participons de son évolution. Et voilà qu'un échange fécond fait de nous des êtres seuls au monde, Tziganes aux marges de l'Univers.»*⁽¹⁰⁾

Partant de la même prémisse de Monod, le succès de la biologie moléculaire, Prigogine en tire une conclusion diamétralement opposée : ce n'est pas à une solitude totale de l'Homme dans le monde qu'invite la science, mais à l'ouverture d'un dialogue fécond entre l'Homme et la nature. Mais il est clair que le dialogue fécond entre l'Homme et la nature auquel nous invite Prigogine ne peut que renouveler l'interrogation métaphysique qui habite l'Homme depuis les origines. Si le «hasard» de Monod risque de fermer la porte à toute question relative au sens, l'émerveillement qui accompagne la curiosité de Prigogine, même s'il dépasse le cadre strict de la recherche scientifique, est susceptible de déboucher sur une philosophie de la nature.

Bien entendu, on peut toujours discuter des contours et des conditions de cette philosophie de la nature qui devrait se conjuguer au pluriel. Si la dimension épistémologique ne peut plus être ignorée, rien ne permet de conclure que la philosophie de la nature doive se contenter d'un simple discours sur les sciences expérimentales, comme l'a souligné, à juste titre, l'épistémologue Bertrand Saint-Sernin : *«La philosophie de la nature doit être une philosophie des sciences : non pas un discours sur les sciences, mais une interrogation surgie des sciences elles-mêmes, qui, en tant qu'elles sont une recherche de la vérité, sont philosophiques.»*⁽¹¹⁾

(10) Ilya Prigogine, Isabelle Stengers, op.cit, p.30

(11) Bertrand Saint-Sernin, Les philosophies de la nature, in Daniel Andler, Anne Fagot-Largeault, Bertrand Saint-Sernin, Philosophie des sciences, Paris, Gallimard, 2002, p.128.

Questionnement épistémologique et philosophique

La crise du modèle technoscientifique moderne associé aux noms de Descartes et Newton, dont les conséquences écologiques furent décriées, a été l'occasion pour les savants et les penseurs contemporains de réviser une partie de leurs certitudes. Parmi ces penseurs, le chimiste et philosophe Ilya Prigogine a laissé une œuvre importante. C'est à une véritable métamorphose de la science que nous invite la science contemporaine, comme on a l'a vu à travers l'œuvre de Prigogine. Il convient maintenant de rappeler le contexte épistémologique, culturel et scientifique dans lequel a eu lieu cette métamorphose de la science contemporaine, pour en tirer quelques enseignements utiles au moment où l'on doit repenser les rapports entre science et spiritualité dans le monde musulman contemporain.

La science n'est plus ce qu'elle est depuis Newton : partie d'une nature assimilée à un automate, soumise à des lois mathématiques, la science est arrivée aujourd'hui à une situation théorique différente, qui situe l'homme dans le monde qu'il décrit et implique donc l'ouverture du chercheur à ce monde. Il s'agit ici de la problématique qui consiste à voir dans la pratique scientifique une partie intégrante des pratiques sociales et culturelles. On ne peut plus envisager la quête scientifique comme si elle était désincarnée, et sans rapport avec les conditions sociales et historiques qui lui donnent naissance.

Les questions posées par l'activité scientifique ne sont pas toutes d'ordre scientifique. L'activité scientifique établit des rapports étroits avec la culture ambiante. Il faut donc être attentif aux conclusions que l'existence de la science et le contenu des théories scientifiques peuvent entraîner quant aux rapports des hommes avec le monde. Semblables questions ne peuvent être imposées par la science elle-même, mais elles font partie intégrante de son histoire.

Dans son ouvrage classique, *La structure des révolutions scientifiques*, Thomas Kuhn (1922-1996), a révolutionné l'approche épistémologique de la science moderne. A partir d'une expérience d'enseignement universitaire expérimental de la physique pour des non-scientifiques, Kuhn a pu réfléchir sur les conditions de la production des théories scientifiques. Les invraisemblances rencontrées au cours de sa carrière le poussèrent à passer de la physique à l'histoire des sciences, puis il passa des problèmes historiques aux préoccupations philosophiques qui l'avaient conduit à s'intéresser à l'histoire des sciences. Dans ce cadre, il a étudié les œuvres du grand historien des sciences, Alexandre Koyré.

C'est en essayant de comprendre les différences entre les sciences de la nature et les sciences de l'Homme, et notamment cette différence essentielle qui fait que

les spécialistes des sciences de l'Homme soient plus divisés que les spécialistes des sciences de la nature, que Kuhn va s'intéresser à ce qu'il a appelé les paradigmes, c'est-à-dire «*les découvertes scientifiques universellement reconnues qui, pour un temps, fournissent à une communauté de chercheurs des problèmes types et des solutions.*»⁽¹²⁾

Kuhn part des discussions qui animaient les historiens des sciences à son époque. Une conception de l'histoire des sciences consistait à mettre l'accent sur le caractère cumulatif de la science. Dans cette conception, l'historien des sciences cherche à déterminer par quel homme et à quel moment chaque fait, loi ou théorie scientifique a été découvert ou inventé, ainsi que les erreurs, les mythes et les superstitions qui ont freiné l'accumulation de ces savoirs. Mais cette conception butait sur une question essentielle : Où devrait-on ranger les théories qui étaient admises dans le passé : dans la catégorie des mythes ou dans la catégorie des connaissances scientifiques de l'époque ? Si l'historien des sciences choisit la seconde réponse, il devient difficile d'admettre le caractère cumulatif de la science.

Ce problème posé aux historiens des sciences les conduit à reposer autrement la question. Il ne s'agit plus de rechercher dans la science d'autrefois ce qui correspondrait à ce que nous considérons aujourd'hui comme théories scientifiques, mais de la considérer dans son rapport à son époque. Les historiens des sciences remarquent, par exemple, que les stades primitifs du développement des sciences sont généralement caractérisés par une concurrence entre différentes conceptions ou écoles. Or, ce qui différencie ces conceptions, ce n'est pas tant telle ou telle erreur de méthode que ce que Kuhn appelle «*leurs manières incommensurables de voir le monde et d'y pratiquer la science*».

Bien entendu, l'observation et l'expérience permettent de réduire l'éventail des croyances scientifiques admissibles, mais, à elles seules, elles restent insuffisantes. Kuhn nous explique qu'il faut un «*élément apparemment arbitraire, résultant de hasards personnels et historiques*», pour constituer «*l'un des éléments formatifs des croyances adoptées par un groupe scientifique à un moment donné.*» Mais cet «*élément arbitraire*» ne doit pas faire oublier que la recherche scientifique a besoin d'un certain nombre d'«*idées reçues*» plus ou moins fortes. C'est pourquoi Kuhn définit l'activité scientifique comme «*une tentative opiniâtre et menée avec dévouement pour forcer la nature à se ranger dans les boîtes conceptuelles fournies par la formation professionnelle.*»⁽¹³⁾

(12) Thomas Kuhn, *La structure des révolutions scientifiques*, Paris, Flammarion, 1983, p.11.

(13) Thomas Kuhn, *op.cit.*

Les « croyances scientifiques » dont parle Kuhn changent avec le temps. Quand des anomalies minent une tradition « scientifique » établie, des investigations ont lieu pour arriver à de nouvelles convictions et de nouvelles bases pour la pratique scientifique. Les épisodes extraordinaires qui correspondent à ces changements sont qualifiés par Kuhn de « révolutions scientifiques ». Ces dernières sont illustrées par les grands développements que nous connaissons dans l'histoire des sciences (Copernic, Galilée, Newton, Lavoisier, Einstein).

La « révolution scientifique » ne concerne pas seulement les événements relatifs aux inventions de théories nouvelles, mais aussi le monde dans lequel travaillent les savants : *« La découverte inattendue revêt une importance qui dépasse les faits, c'est pourquoi le monde du savant est qualitativement transformé en même temps qu'il est quantitativement enrichi par les nouveautés fondamentales des faits tout autant que des théories. »*

Le « monde des savants » ne se résume pas à un monde de faits et de théories scientifiques. Le savant ne vit pas enfermé dans une tour d'ivoire. Il vit dans un monde fait également de perceptions et de représentations artistiques, culturelles, philosophiques et religieuses. Ces perceptions peuvent influencer le travail de recherche du savant, même si l'application rigoureuse des méthodes scientifiques peut l'aider à prendre la distance nécessaire avec ses représentations et ses préjugés.

Dans son ouvrage *La construction des sciences*, l'épistémologue belge de l'université de Namur, Gérard Fourez, a proposé un regard philosophique et éthique sur la pratique scientifique, inspiré de la démarche socioconstructiviste. Cette dernière insiste sur l'impact de l'interaction sociale dans la construction et la transmission des savoirs. Pour les socioconstructivistes (dont Jean Piaget, 1896-1980), l'apprentissage dépend beaucoup de la collaboration du monde social dans lequel est appelé à se développer l'enfant et l'adolescent. Cette conception, étendue à la recherche scientifique, implique une plus grande attention au contexte socioculturel dans lequel travaillent les chercheurs. Le monde scientifique et le monde social ne sont plus séparés de manière radicale. La communauté scientifique des chercheurs fait partie d'une communauté plus large, à caractère social et culturel.

C'est pourquoi Fourez appelle cette communauté scientifique une « sous-communauté » qui est appelée à exercer sa pratique scientifique dans le cadre d'un « monde » plus large, ce qui aura nécessairement une incidence sur l'« objectivité » supposée caractériser cette pratique selon les normes académiques en vigueur : « J'appellerai « monde » ce dont je parle lorsque je communique avec les autres ; il ne s'agit pas d'abord d'un monde « objectif », mais de mon monde. Dans cette perspective, le « monde » ne se réduit pas aux objets dont je puis parler, mais il

englobe aussi des thèmes liés à la vie sociale et aux autres. Ainsi, selon ce point de vue, une proposition comme : «j'observe le monde», ne présuppose pas que je me considère comme un «sujet» distinct des «objets» que j'essayerais d'observer correctement...La proposition «j'observe le monde» parle de ma situation, projeté que je suis dans un ensemble de significations et de contraintes relatives à tout ce que je pourrais dire. Le «monde» ainsi compris n'est pas un ensemble d'objets, mais ce qui englobe tout objet et toute objectivité. Le monde est mon vis-à-vis, et ce vis-à-vis est à la fois «objet» et «présence» d'autres personnes.»⁽¹⁴⁾

A partir du moment où le «monde» sur lequel se penche la science est à la fois «objet» et «présence» des autres, il ne peut être totalement objectif. La pratique scientifique, malgré les spécificités qui la caractérisent en particulier, ne peut échapper totalement à l'interaction sociale. A ce titre, la pratique scientifique revêt une dimension sociale et culturelle indéniable. Le fait que, dans les sociétés modernes sécularisées, la dimension religieuse se soit effacée - du moins dans la vie publique - ne signifie pas que la science soit arrivée à se débarrasser de toutes les influences culturelles et idéologiques, dans la mesure où ces dernières peuvent prendre d'autres formes moins visibles.

Ce n'est pas seulement le choix d'un objet ou d'une hypothèse qui pourrait être influencé par le contexte social et culturel, mais aussi la recherche elle-même, dans ses méthodes et techniques d'observation et d'expérimentation. Pour le physicien et philosophe Gérard Fourez : «*Une observation scientifique n'est pas une «observation neutre», ni une «observation complète», mais, au contraire, une observation utilisant une grille de lecture et éliminant tout ce que cette sous-communauté scientifique ne trouve pas important à observer.*»⁽¹⁵⁾

Mais on peut aller plus loin dans le sens exploré par Fourez. Ce ne sont pas seulement les choses que la communauté scientifique ne trouve pas important à observer qui risquent d'être éliminées du programme d'observation et d'expérimentation. Ce sont aussi les choses dont les membres de cette communauté scientifique ne sont plus conscients, mais qui ne continuent pas moins à les influencer de manière insidieuse. Ce n'est pas parce qu'on croit qu'on est débarrassé de toute influence spirituelle qu'on est vraiment arrivé à penser et à agir comme un automate. Les rapports entre mécanique et esprit sont autrement plus complexes, surtout quand il s'agit d'explorer l'activité intellectuelle d'une espèce aussi singulière que l'espèce humaine qui est le produit d'une évolution biologique créatrice des plus complexes.

(14) Gérard Fourez, *La construction des sciences*, Bruxelles, De Boeck Université, 2001.

(15) Gérard Fourez, op. cit, p.

Abordant ce sujet, le philosophe français, Henri Bergson (1859-1941), nous a laissé des pages mémorables : *«L'homme ne se soulèvera au-dessus de terre que si un outillage puissant lui fournit le point d'appui. Il devra peser sur la matière s'il veut se détacher d'elle. En d'autres termes, la mystique appelle la mécanique. On ne l'a pas assez remarqué, parce que la mécanique, par un accident d'aiguillage, a été lancée sur une voie au bout de laquelle étaient le bien-être exagéré et le luxe pour un certain nombre, plutôt que la libération pour tous. Nous sommes frappés du résultat accidentel, nous ne voyons pas le machinisme dans ce qu'il devrait être, dans ce qui en fait l'essence. Allons plus loin. Si nos organes sont des instruments naturels, nos instruments sont par-là même des organes artificiels. L'outil de l'ouvrier continue son bras ; l'outillage de l'humanité est donc un prolongement de son corps... Or, dans ce corps démesurément grossi, l'âme reste ce qu'elle était, trop petite maintenant pour le remplir, trop faible pour le diriger. D'où le vide entre lui et elle. D'où les redoutables problèmes sociaux, politiques et internationaux, qui sont autant de définitions de ce vide et qui, pour le combler, provoquent aujourd'hui tant d'efforts désordonnés et inefficaces : il y faudrait de nouvelles réserves d'énergie potentielle, cette fois morale. Ne nous bornons donc pas à dire, comme nous le faisons plus haut, que la mystique appelle la mécanique. Ajoutons que le corps agrandi attend un supplément d'âme, et que la mécanique exigerait une mystique. Les origines de cette mécanique sont peut-être plus mystiques qu'on ne le croirait ; elle ne retrouvera sa direction vraie, elle ne rendra des services proportionnés à sa puissance, que si l'humanité qu'elle a courbée encore davantage vers la terre arrive par elle à se redresser, et à regarder le ciel.»⁽¹⁶⁾*

Quelle «révolution scientifique» dans le monde musulman ?

Si la relation conflictuelle entre la science et la culture commence à préoccuper sérieusement chercheurs et dirigeants dans les sociétés contemporaines confrontées à des défis éthiques immenses, la situation est encore plus complexe dans les sociétés musulmanes. D'un côté, ces sociétés affrontent au quotidien les conséquences d'une gestion des affaires publiques marquée encore par une faible diffusion de la science et des technologies dans le tissu social. D'un autre côté, les élites censées représenter le nouveau cours de la civilisation scientifique sont partagées entre la tentation d'un positivisme d'autant plus dogmatique qu'il bute sur des résistances sociales réelles, et la résurgence d'un concordisme pseudo-scientifique qui s'apparente à une véritable démission devant des croyances populaires anachroniques.

(16) Henri Bergson, Les deux sources de la morale et de la religion, Paris, PUF, édition de 1984, p.329-331.

Les défis à relever par les jeunes chercheurs qui s'apprêtent à faire de la science leur profession et leur passion, en sont d'autant plus difficiles, dans la mesure où il s'agit de lutter en même temps sur plusieurs fronts : contre le concordisme et contre le positivisme. Dans cette lutte multiforme, les aspects sociologiques, philosophiques et épistémologiques s'enchevêtrent. Pour plus de clarté, nous essaierons de les distinguer.

Comme ce fut le cas en Europe à l'aube des temps modernes, la révolution scientifique dans le monde musulman a besoin de conditions sociologiques favorables. Le «dialogue expérimental» avec la nature auquel a donné lieu la science moderne s'est opéré dans le cadre d'un paradigme opérationnel, appelé depuis «technoscience». Une proposition est dite scientifique si elle peut donner lieu à une reproduction et à une transformation de l'objet considéré. C'est le modèle des ingénieurs qui a triomphé et ce modèle coïncide avec celui de la civilisation capitaliste en quête d'efficacité et de rentabilité.

Comment penser la «révolution scientifique» dans des sociétés musulmanes condamnées à consommer les gadgets conçus et produits par les ingénieurs des sociétés industrielles avancées ? La «révolution scientifique» restera, dans ces conditions, suspendue à la politique globale décidée par les gouvernements en place. La science restera isolée dans la société tant que le «dialogue expérimental» avec la nature qui la définit ne sera pas dopé par les applications technologiques et industrielles qui lui ont été déterminantes dans l'aventure européenne moderne.

Mais les considérations sociologiques, aussi importantes soient-elles, n'expliquent pas tout. Il est faux d'attribuer la révolution scientifique moderne en Europe aux seuls facteurs économiques de la nouvelle civilisation capitaliste qui a commencé à émerger à partir de la Renaissance. Ce serait vraiment injuste de diminuer ainsi les mérites des savants qui ont consacré leur vie, et pris des risques énormes dans le contexte répressif de l'Inquisition, pour aller jusqu'au bout de leurs interrogations et de leurs doutes. La science se fait en société et, à ce titre, elle ne saurait échapper au contexte sociohistorique qui lui donne naissance. Mais la science est aussi affaire d'hommes spécialisés et passionnés, qui échangent leurs curiosités et leurs conclusions dans le cadre d'une communauté savante obéissant à une logique intellectuelle complexe.

Il est difficile d'imaginer l'essor de la science dans une société où ne se posent pas avec acuité des questions philosophiques en rapport avec le sens des choses et du monde. La question du sens ne vient pas seulement à la conclusion des recherches scientifiques comme se l'imaginent certains, elle précède souvent les grandes aventures scientifiques, même si elle reste à l'état implicite.

Dans une société occupée à devoir satisfaire les besoins croissants de ses populations dans le respect de l'environnement, gardons-nous de sous-estimer la dimension utilitaire de la recherche scientifique et de ses applications techniques. Mais paradoxalement, c'est parfois la passion intellectuelle de répondre à une question restée en suspens dans un programme précédent, quand ce n'est pas le ressort métaphysique de la quête du sens, qui se trouve être à l'origine de l'intérêt du chercheur.

Dans les sociétés musulmanes contemporaines, la passion intellectuelle pour les questions restées sans réponse et l'intérêt pour la recherche scientifique ne sauraient être séparés de la culture ambiante dans son ensemble. Quand on sait que près d'un huitième des versets coraniques invitent à s'interroger et à connaître les phénomènes de la nature qui sont autant de «signes» divins à rechercher et à contempler, on a du mal à expliquer l'état dans lequel se trouve la recherche scientifique dans cette partie du monde.

Sans doute, une analyse anthropologique plus fine nous renseignerait mieux sur le rapport entre la culture et la science dans les sociétés musulmanes contemporaines. La religion que d'aucuns accuseraient trop facilement de tous les maux mérite à son tour d'être interrogée. Ce que certains analystes visent, en parlant de religion, s'avère en fin de compte être une forme de religiosité qui est loin d'épuiser la dimension spirituelle inscrite dans la longue histoire de cette civilisation. La religion, réduite à ses rituels extérieurs et à ses interprétations rigoristes les plus superficielles, ne peut que paralyser l'esprit de questionnement et de doute qui est au cœur de la démarche scientifique. Dans ce contexte, il n'est pas étonnant d'assister au triomphe des discours concordistes les plus paresseux et les plus démagogiques.

Invité en 1984 par l'UNESCO à donner une conférence sur le thème «L'Islam et la science», le prix Nobel de physique Abdus Salam (1926-1996) a pourtant exprimé clairement comment le message spirituel du Coran pouvait encourager la quête scientifique : *«Je suis musulman parce que je crois au message spirituel du Saint Coran. Ce livre m'interpelle, en tant que scientifique, à réfléchir et à méditer profondément sur les lois de la nature, et il cite à titre d'indices pour l'humanité des exemples tirés de la cosmologie, de la physique, de la biologie et de la médecine»*⁽¹⁷⁾. Et Abdus Salam d'illustrer ses propos par la citation de deux versets coraniques qui mettent en exergue le questionnement de la nature : *«Ne regardent-ils donc pas les chameaux, comment ils sont créés ? Et le ciel, comme il est élevé haut ? Et les montagnes, comme elles sont enfoncées solidement dans la terre ?*

(17) Abdus Salam, conférence sur «L'Islam et la science», UNESCO, Paris, avril 1984.

Et la terre, comme elle est étendue ?»⁽¹⁸⁾ et «Dans la création des cieux et de la terre et dans l'alternance de la nuit et du jour, il y a effectivement des signes pour les hommes doués de compréhension. Ceux qui se souviennent d'Allah, qu'ils soient debout, assis ou couchés sur le côté, et qui méditent sur la création des cieux et de la terre et disent : Notre Seigneur, Tu n'as pas créé cela en vain.»⁽¹⁹⁾

Dans le discours de Abdus Salam, il n'y a aucune place pour un quelconque concordisme. Il ne s'agit pas de rechercher les vérités scientifiques dans le Coran. Il s'agit de partir de la quête de sens qui habite le Coran pour l'étendre au Livre du monde. Comme le soulignait le penseur musulman contemporain Malek Bennabi (1905-1973), *«Il ne s'agit pas de rechercher dans les versets coraniques ce qui y aurait trait à la conquête spatiale ou à l'atome, mais de s'interroger s'il y a dans leur esprit ce qui pourrait entraver ou, au contraire, favoriser et dynamiser le mouvement de la science»⁽²⁰⁾* La quête de sens, qui précède et prolonge à la fois la recherche scientifique même si elle ne s'y confond pas, rejoint, de ce point de vue, l'adoration du croyant ou la contemplation du philosophe.

Si le « dialogue expérimental » avec la nature s'opère généralement au moyen du langage universel des mathématiques, il est évident que la recherche scientifique, dans chaque région du monde, ne peut que se ressentir de l'ambiance culturelle et religieuse qui y règne. Dans le contexte des sociétés musulmanes contemporaines, la redécouverte du riche patrimoine de la civilisation islamique, si elle sait dépasser le seuil des discours nostalgiques, pourrait favoriser l'éclosion d'une ambiance propice à la recherche scientifique.

La quête de sens philosophique qui habitait les nuits d'Avicenne (980-1037) et d'Averroès (1126-1198) ne les a pas empêchés de s'adonner à leurs recherches scientifiques dans des domaines aussi divers que la médecine et le droit. Au contraire, c'est cette quête philosophique et spirituelle qui les a encouragés à se jeter passionnément sur le legs grec, et à questionner de manière critique les productions de leurs prédécesseurs musulmans, pour arriver à produire de nouvelles conceptions révolutionnaires pour leur époque. S'ils s'étaient contentés de dire avec paresse que toutes les vérités étaient déjà inscrites dans le Coran, ou de consommer passivement les vérités des sages grecs, ou les techniques des Romains ou des anciens Egyptiens, ils ne seraient jamais arrivés au degré de créativité auquel ils ont hissé la civilisation islamique classique.

Le chercheur contemporain, qui travaille en vue de faire avancer les connaissances dans des domaines aussi divers que les biotechnologies et les

(18) Coran 88 :18-21.

(19) Coran 3 :191-192.

(20) Malek Bennabi, La production des orientalistes, Alger, Librairie Amar, 1970, p.34.

énergies renouvelables, sait qu'il est en train de contribuer de manière décisive à améliorer le sort de millions de ses semblables et à sauvegarder la nature ambiante. Mais, pour aller le plus loin possible, cette œuvre, grandiose en elle-même, a besoin d'être accompagnée de questionnements philosophiques et éthiques plus profonds. D'ailleurs, sans ce questionnement aujourd'hui décisif, les sociétés musulmanes contemporaines seraient tentées d'attendre les conclusions des recherches effectuées sous d'autres cieux, et d'importer tout simplement leurs applications techniques et industrielles.

Chapitre 3

La structure de la matière

Inès Safi

De l'antiquité jusqu'au Moyen Âge, le questionnement sur la nature de la matière et de la lumière fut l'un des volets de l'ontologie, c'est-à-dire de la question de l'être en tant qu'être. Ces concepts de matière et de lumière avaient alors, par ailleurs, plusieurs niveaux d'interprétation et d'usage, ceux du monde sensible étant le niveau primitif, et servant de support symbolique à des enseignements de nature spirituelle sur les mondes supérieurs. L'ontologie était intimement reliée à la métaphysique, c'est-à-dire, à la vision globale des principes qui puisait son sens et son unité en Dieu. Ce fut le cas, en particulier, au sein de la civilisation islamique. La science de la nature (*'ilm at-tabî'ah*) s'y développa, fut accompagnée de l'émergence inédite de l'expérimentation et de la mathématisation, donc de la méthode scientifique, et connut des sauts conceptuels majeurs. Cependant, les limites de la science de la nature étaient bien reconnues, et ses prétentions demeuraient modestes : ni ses outils ni ses résultats ne lui permettaient d'accéder à la connaissance certaine et ultime. C'était, en quelque sorte, une servante au service de la métaphysique qui était la reine, et qui seule pouvait dire ce qu'était l'être «en tant qu'être».

Or, l'héritage que cette science arabo-musulmane de la nature a légué à l'Europe a déclenché une révolution scientifique, associée d'ailleurs à la révolution industrielle (un fait loin d'être anodin), qui fut construite sur les ruines de la symbiose entre ontologie et métaphysique. A partir du XVII^{ème} siècle, les scientifiques européens ont voulu purifier la science de tout questionnement métaphysique, afin d'étudier, d'une façon objective, la nature, tout en opérant la séparation entre objet et sujet. Pire, au cours du XIX^{ème} siècle, la science jadis servante renversa la reine pour lui dérober son trône : la servante prétendit alors dicter ce qu'était la vérité, et comment cheminer vers celle-ci.

Les doctrines dominantes dans l'Europe du XIX^{ème} siècle donnaient à la science la mission de fournir une description fidèle et intégrale d'une réalité indépendante de nous et de nos méthodes d'investigation. Pour le *réalisme* scientifique naïf, l'observation des phénomènes nous donne accès à la réalité *en soi*. Pour le *positivisme*, chercher une réalité en soi au-delà des phénomènes est sans objet, et le sens d'un énoncé se réduit à son mode de vérification expérimentale ; ce qui conduit de *facto* à refuser toute assertion de type métaphysique. Le *matérialisme*, quant à lui, se fonde sur une vision

réductionniste dont des prémisses apparaissent déjà dans la Grèce antique : celle qui consiste à réduire la réalité en soi à un assemblage de structures matérielles soumises au gré du hasard et de lois immanentes.

Ces doctrines, malgré leurs différentes thèses sur la nature du réel, défendaient en général l'idée que la science devait être en mesure de faire des prédictions *déterministes* sur l'état futur de n'importe quel système, dès lors qu'elle connaissait les lois auxquelles il était soumis, et les conditions initiales. En nous révélant les mécanismes sous-jacents à ces prédictions, la science pouvait donc nous offrir une explication complète du monde. Nous avons été ainsi amenés à croire que nous pouvions élaborer des théories d'un côté, et les soumettre à l'expérimentation de l'autre, afin de les confirmer, de les éliminer, ou de les modifier pour tenir compte des observations. Nous avons ainsi une sorte de schéma fonctionnant sur des correspondances univoques : réalité en soi - réalité phénoménale -expérience- théorie.

Or la situation, au XX^{ème} siècle, évolua dans un sens tout différent, orienté en particulier par la naissance de la Mécanique Quantique, une théorie physique qui rassemble des postulats et lois s'appliquant à la connaissance de l'infiniment petit -le «monde microscopique»- mais aussi, en principe, celle des systèmes «macroscopiques» pourvu qu'ils soient isolés ; il n'est d'ailleurs pas aisé de délimiter la frontière entre ces deux «mondes». Malgré ses succès pratiques impressionnants, la Mécanique Quantique ne nous permet pas de donner une image de la matière et de la lumière qui soit indépendante du sujet et de ses moyens d'investigation, ni de trancher quant à leur réalité et leur nature. Ses énigmes à l'encontre du sens commun ont amené les scientifiques à avoir recours à des interprétations multiples et diverses, dont la véracité est dès lors indécidable dans le cadre de la méthode scientifique, et qui deviennent ainsi analogues à des assertions d'ordre métaphysique. Nous pourrions même affirmer que leur fondement est encore plus incertain, si l'on se rappelle que la métaphysique traditionnelle, loin d'être associée au scepticisme et à l'arbitraire, chemine, par sa propre cohérence et son expérience vécue, vers une vérité unique. Cette indécidabilité fournit aussi une illustration remarquable de la *sous-détermination* des théories par l'expérience, qui brise le schéma univoque mentionné ci-dessus. La connaissance ultime de la nature de la réalité (sensible) reste ainsi en suspens, mais nous pouvons cependant affirmer ce qu'elle ne doit pas être, donc nous contenter d'une approche de type négatif, ou «apophatique». Et nous sommes amenés à distinguer la réalité empirique de la réalité en soi, qui nous serait inaccessible. Il est donc très important de connaître ces bouleversements conceptuels pour aborder la question du dialogue entre science et religion à propos de la réalité.

Face à de tels mystères, certains fondateurs de la Mécanique Quantique avaient cherché des éclairages provenant des traditions d'Orient, comme le bouddhisme et l'hindouisme, afin de dépasser le modèle proposé par René Descartes (1596-1650) dans lequel la matière était de l'étendue spatiale soumise à des lois mécaniques, et afin de clarifier les bouleversements conceptuels de leurs découvertes. D'une façon analogue, nous allons suggérer (d'une façon limitée certes) que certains aspects de la tradition spirituelle islamique nous permettraient de mieux appréhender les mystères de la Mécanique Quantique, qui ne sont en fin de compte déstabilisants que pour ceux qui s'acharnent à s'enfermer dans un esprit cartésien.

Ce type de dialogue peut rencontrer des réticences, vu le conditionnement au positivisme qui demeure encore très répandu. D'autant plus que le rapport naguère conflictuel entre l'Eglise romaine et la science, dans le passé, a produit une tendance à la généralisation dans l'inconscient occidental, et même au-delà, qui conclut à l'inconciliabilité de la science et de la métaphysique, *a fortiori* quand celle-ci s'est développée dans un contexte religieux. Or, l'histoire de ce rapport fut bien différente pour l'Islam. La quête du savoir, située sur tous les plans, eut une place primordiale dans le cheminement spirituel ; elle a produit la première révolution des sciences de la nature, dont les motivations étaient, par ailleurs, loin de se confiner aux applications rituelles, ludiques ou pratiques. De surcroît, il est reconnu que la théologie, la linguistique, ou la science du hadîth, par exemple, incitèrent au développement de la logique et des méthodes rationnelles, ouvrant la voie à leur extension au domaine des sciences de la nature. Et il semble même que les questionnements et motivations d'ordre métaphysique stimulèrent et déclenchèrent des ruptures conceptuelles scientifiques majeures, qui produisirent, à leur tour, la naissance de la science occidentale.

Bien évidemment, l'émergence de nouveaux paradigmes, tels que celui qui est associé à la Mécanique Quantique, s'est opérée à l'extérieur du monde islamique. Il est cependant important de les y diffuser. En effet, la science y est actuellement conçue comme garante d'une vérité limpide, portant sur une réalité objective. Or, cette perception semble aussi affecter le rapport au religieux : on a une confiance démesurée dans la logique rationalisante, qui aboutit à un littéralisme desséché, mais aussi à l'intolérance, sous-tendue par la logique du *tiers exclu*. D'où la double nécessité de replacer la science dans le contexte plus large de la recherche du savoir (*'ilm*), et de la séparer de son interprétation positiviste qui risque de contaminer tous les autres domaines, y compris la pensée philosophique et théologique.

La naissance de l'atomisme

L'atomisme est né à partir de concepts formulés dans des contextes métaphysiques. Nous en retrouvons des versions au VIII^{ème} siècle avant notre ère, dans le traité chinois du Hong Fan, et au VI^{ème} siècle, chez le sage hindou Kanada. Chez les Grecs puis les Romains, l'atomisme avait permis de concilier l'immutabilité de l'être avec le changement et le mouvement. Il fut initié par Anaxagore (500-428 av. J.C.), développé par Leucippe (490-430 av. J.C.) et son élève Démocrite (469-370 av. J.C.), et diffusé par Epicure (342-270 av. J.C.) et Lucrèce (1^{er} siècle avant J.C.). Au sein de certaines doctrines islamiques, comme celles de la pensée théologique ou *kalâm*, l'atomisme a pu être exploré et concilié avec la foi, ou «islamisé», pour reprendre l'expression de Bernard Pullman.⁽¹⁾ Dans la perspective théologique des Mu'tazilah et des Ash'arites, l'atomisme est compatible avec la foi, puisque Dieu ne cesse de recréer de nouveau les atomes (et leurs «accidents» ou propriétés) à chaque instant (*tajdîd al-khalq*). L'atomisme témoigne donc de la puissance du Créateur. Le modèle atomique fut aussi à la base de la cosmologie de Nasîr al-Dîn Al-Tûsî (1201-1274), considéré comme l'un des principaux représentants chiites du kalâm. En particulier, selon lui, l'univers a évolué à partir de particules semblables. Cette tendance à l'unification des origines l'a aussi conduit à formuler une version de la loi de conservation de la masse, énonçant qu'«un corps de matière ne peut pas disparaître complètement. Il change seulement de forme, condition, composition, couleur et d'autres propriétés matérielles (complexe ou élémentaire).» Nous y reconnaissons la fameuse maxime attribuée au grand chimiste Antoine Lavoisier (1743-1794) : «Rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme ». Fakhr al-Dîn Al-Râzî (1149-1209) avait étendu l'existence du vide entre les atomes à l'espace entre les planètes et constellations, pour aboutir à la possibilité d'une infinité d'univers. L'alchimiste Jâbir Ibn Hayyân (721-815), dont le nom fut latinisé en Geber, est qualifié de père de la chimie, avec Fakhr al-Dîn Al-Râzî (1149-1209) ; Lavoisier disposait de ses oeuvres. Jâbir avait postulé que les substances étaient formées à partir de combinaisons infinies de «soufre» et de «mercure», termes qui ne se réfèrent pas nécessairement aux produits que l'on connaît actuellement. Il avait aussi élaboré une nomenclature des substances, ce qui correspond à l'un des germes de la classification des éléments. Il énonça que les réactions chimiques faisaient agir des substances en quantités finies, ce qui représenta une version préliminaire de la loi des proportions multiples qui interviendra en faveur de l'atomisme, un millénaire plus tard.

(1) Bernard Pullman, L'atome dans l'histoire de la pensée humaine, 1995, Fayard, Paris.

La situation fut bien différente en Europe : l'atomisme semblait confondu avec un matérialisme excluant l'intervention d'un agent créateur. L'Eglise s'y était farouchement opposée, comme en témoigne l'arrestation d'Etienne de Clave en 1624, qui déclarait «tout est composé d'atomes». Ainsi, certains penseurs, restant toutefois marginaux, cherchèrent à concevoir un atomisme en accord avec la foi. Ce fut le cas, par exemple, de Gassendi (1592-1655) qui y trouva un modèle d'organisation du monde compatible avec l'action divine. La question reste ouverte de savoir si ces essais de réconciliation de l'atomisme avec la foi furent influencés, ou non, par la connaissance du kalâm en Occident, qui fut amorcée dès le XII^{ème} siècle grâce aux premières traductions des ouvrages de philosophie islamique en latin.

De la matière à la lumière

L'atomisme commença à s'imposer dans les sciences dures dans le courant du XIX^{ème} siècle. La cinétique des gaz fut étudiée, en se fondant sur des lois statistiques d'un très grand nombre de molécules, et permit de comprendre les propriétés macroscopiques des gaz. Mais on savait que ces molécules n'étaient pas indivisibles, car formées d'atomes. L'œuvre de Dalton (1766-1844) fut décisive : sans savoir encore quels atomes entraient dans la composition des molécules, il détermina leurs masses relatives et développa la première table de poids atomiques. Au sein de l'ensemble des observations empiriques auxquelles il pouvait apporter une explication cohérente, figure la loi des proportions multiples - énoncée d'une façon préliminaire par Jâbir ibn Hayyân comme noté auparavant, puis élaborée par Joseph Proust (1754-1826) en 1794 et Lavoisier - qui put alors être interprétée comme étant due à des échanges d'atomes. Pour compléter la liste des 14 éléments chimiques déjà connus depuis l'antiquité ou par les scientifiques arabo-musulmans, une longue traque de nouveaux éléments fut entreprise dès le XVII^{ème} siècle. Lavoisier offrit une définition plus concise et une classification préliminaire des 23 éléments connus en 1789. Une table plus proche de celle utilisée actuellement fut proposée par Dmitri Mendeleev (1834-1907) en 1869, et comportait alors 63 éléments. Cependant, la charte d'organisation de ces éléments n'avait pas encore été élucidée, car c'est la distribution des électrons au sein de chaque atome qui sera la clé de ses propriétés chimiques. Même si une notion vague des électrons existait préalablement, c'est avec Joseph Thomson (1856-1940) qu'ils furent mis en évidence, en 1897. Nous pourrions dire que la fin du XIX^{ème} siècle fut confortée dans le schéma d'une matière formée de particules matérielles obéissant aux lois de la mécanique classique.

Voilà pour la matière au XIX^{ème} siècle. Mais qu'en est-il de la lumière ? Un saut conceptuel majeur s'était d'abord opéré avec Ibn Al-Haytham (965-1039), qui,

tout en lui accordant un statut indépendant de l'observateur avec sa théorie de l'intromission,⁽²⁾ lui attribua une nature *corpusculaire*, expliquant ainsi sa vitesse de propagation finie, et n'affectant pas aux corpuscules d'autre propriété que «l'énergie». Kamâl al-Dîn Al-Fârisî (1267-1320) conçut l'expérience de décomposition de la lumière blanche sur une sphère en verre, et donna l'explication de l'arc-en-ciel ainsi qu'une première théorie des couleurs. Taqî al-Dîn Muhammad Ibn Ma'rûf (1526-1585) poursuivit dans cette direction, et posa les bases d'une théorie de propagation de la lumière. Ce fut Christian Huygens (1629-1695) qui formula la théorie *ondulatoire* de la lumière. Isaac Newton (1643-1727), influencé par les œuvres d'Ibn Al-Haytham (connu comme Alhazen au Moyen Âge), adopta, quant à lui, la théorie *corpusculaire*, qui put ainsi vaincre sa rivale pendant un siècle grâce à la notoriété de son défenseur, et ne se laissa abattre qu'au début du XIX^{ème} siècle, avec les expériences de Thomas Young (1773-1829) - notamment, en 1801, les fameuses «fentes de Young» qui créent des *interférences*, les «crêtes des vagues» des deux ondes issues des fentes s'additionnant de façon constructive ou destructive - et d'Augustin Fresnel (1788-1827). Ainsi, durant les XVIII^{ème} et XIX^{ème} siècles, la conception de la lumière en terme d'ondes fit l'unanimité, et la propagation de cette onde fut décrite par les équations de l'électromagnétisme de James Clerk Maxwell (1831-1879), l'un des piliers de la physique classique. Or, à la grande surprise et perplexité de tous les physiciens, ces deux conceptions, *corpusculaire* et *ondulatoire*, durent se réconcilier au début du XX^{ème} siècle. Elles ne cohabiteront pas pour autant, car la présence de l'une exclut tout de même l'autre ! Le retour sur scène des corpuscules fut imposé par des faits expérimentaux défiant les lois de Maxwell. En effet, le château majestueux de la physique classique dut faire face à des fissures, causées par des faits qui s'en étaient échappés : ils ne pouvaient trouver de place entre ses murs.

Les débuts de la Mécanique Quantique

Le problème du rayonnement dit «du corps noir» fit partie de ces faits rebelles. Ce rayonnement est émis par un corps chauffé avec lequel il doit être en équilibre. La théorie classique, appliquant l'électromagnétisme de Maxwell, où les échanges d'énergie entre les parois du corps se font continument, est en désaccord total avec les observations expérimentales. Celles-ci furent plutôt expliquées par Max Planck (1858-1947), qui, avec ingéniosité, proposa que ces échanges d'énergie entre matière et lumière s'effectuaient selon des «portions» quantifiées, qu'il baptisa

(2) La théorie aristotélicienne classique est celle de l'*émission*, dans laquelle l'œil envoie son regard pour saisir les images. Dans la théorie de l'*intromission*, l'œil est un récepteur qui capte la lumière émise par les objets.

quanta (dont le singulier, *quantum*, signifie quantité en latin), proportionnelles à la fréquence⁽³⁾ de la lumière émise f (qui est pourtant une caractéristique associée à sa nature ondulatoire). Le facteur de proportionnalité fut dénommé constante de Planck, et noté par h . Il s'agit alors d'un premier pas quantitatif vers la réconciliation : l'énergie d'un quantum est reliée à une caractéristique de l'onde.

Un autre fait en désaccord avec l'électromagnétisme de Maxwell, fut l'effet photo-électrique, découvert par hasard par Heinrich Hertz (1857-1894) en 1887, sans que celui-ci s'y intéresse, et étudié ensuite par son élève Philipp Lenard (1862-1947) - une application de cet effet se trouve dans les panneaux solaires. Quand on éclaire une plaque de métal par un faisceau de lumière, on s'attendrait, selon la théorie de Maxwell, à ce qu'une augmentation de l'intensité lumineuse augmente la vitesse des électrons arrachés aux atomes (sachant que l'énergie des électrons se comporte comme leur vitesse au carré). Or, selon l'expérience, une intensité plus grande conduit seulement à accroître le nombre des électrons, sans changer leur vitesse. C'est la fréquence de la lumière incidente f qui contrôle leur vitesse. Albert Einstein (1879-1955) proposa une explication audacieuse : pour lui, la quantification ne s'applique pas seulement à l'énergie échangée entre matière et lumière, mais concerne d'une façon intrinsèque la particule de lumière, qu'il appela *photon*, chaque photon étant porteur d'une énergie hf . Il s'agit là d'une étape cruciale pour la construction de la Mécanique Quantique. Il fallut tout de même accepter un nouveau fait bien troublant et intrigant : la lumière préserve sa nature ondulatoire, tout en étant composée de photons, et ces corpuscules n'ont rien à voir pourtant avec des «billes».

L'extension de la dualité onde-corpuscule à la matière fut le moment déterminant dans l'émergence de la Mécanique Quantique. Ce saut ingénieux fut inspiré à Louis de Broglie (1892-1987) par la dualité adoptée pour la lumière : puisque la lumière emprunte une nature corpusculaire à la matière, il est judicieux de rétablir la symétrie (un critère esthétique) en attribuant aussi une nature ondulatoire à la matière. Cette étape révolutionnaire que fut l'unification de la description de la matière et de celle de la lumière se trouva ensuite couronnée par Erwin Schrödinger (1887-1961), lorsqu'il proposa une équation contrôlant l'évolution dans le temps de l'amplitude de l'«onde» correspondant à une «particule», ψ appelée aussi «fonction d'état». Une interprétation, sur laquelle nous reviendrons, fut proposée par Niels Bohr (1885-1962) : le module de la fonction d'état⁽⁴⁾ noté $|\psi(x)|^2$ représenterait la probabilité de présence de la particule en une position de l'espace x . Werner

(3) La fréquence f d'une onde est le nombre de crêtes qui arrivent en un point par seconde.

(4) Le module représente l'intensité de l'onde, reliée, dans exemple d'une onde à la surface de la mer, à la hauteur des vagues.

Heisenberg (1901-1976) proposa par la suite une approche matricielle, et Paul Dirac (1902-1984) unifia les deux approches (et réconcilia les deux adversaires). C'est ainsi que naquit le formalisme sous-jacent à la Mécanique Quantique. La nature ondulatoire de la matière fut aussi confirmée expérimentalement : Clinton Davisson (1881-1958) et Lester Germer (1896-1971) purent observer, en 1927, une figure de diffraction obtenue en bombardant un métal avec des électrons, d'une façon analogue aux figures de diffraction des rayons X (des ondes lumineuses de haute fréquence). Une expérience de type fentes de Young fut réalisée pour les électrons, donnant lieu à des franges d'interférences analogues à celles qui sont obtenues pour des ondes lumineuses.

Il devint alors difficile de garder le concept d'une particule selon le sens commun, comme une quantité de matière localisée, d'où l'usage du mot «quanton» dans certains ouvrages. L'image ondulatoire peut s'avérer plus adéquate. Cependant, l'onde ne sera pas non plus assez éclairante pour nos sens communs : nous savons, par exemple, qu'une vague est une ondulation de la surface de l'eau, qu'une onde sonore est une variation de la pression de l'air. Dans le cas des ondes associées aux quantons, nous ne saurions dire ce qui «ondule» vraiment.

La Mécanique Quantique, une théorie énigmatique

Étayons maintenant certains caractères troublants de la Mécanique Quantique, tout en exploitant l'analogie de la matière avec les ondes lumineuses.

Premier fait contraire au sens commun : *l'indiscernabilité*. Celle-ci s'intègre mieux dans l'image ondulatoire. Attribuée à Heisenberg, elle postule que nous ne pouvons pas distinguer des particules de même nature. Nous pouvons alors emprunter l'image donnée par S. Ortoli et J.P. Pharabod⁽⁵⁾ : quand deux vagues de même amplitude et de directions opposées se rencontrent en un point, se forme instantanément une vague d'amplitude double, qui se sépare à nouveau en deux vagues qui s'éloignent l'une de l'autre. Nous ne pouvons toutefois pas identifier chacune de ces dernières à l'une des deux vagues incidentes. Armés de ce principe, considérons maintenant deux «particules» indiscernables (deux photons, ou deux électrons, par exemple) décrites par une fonction d'état commune dépendant de leurs positions x_1 et x_2 : $\psi(x_1, x_2)$. L'indiscernabilité impose que le module de ψ soit invariant par échange des positions, donc soit ψ est invariant, et on a affaire alors aux bosons, dont font partie les photons, soit ψ change de signe, et il s'agit alors de *fermions*, dont font partie les électrons. Si nous essayons maintenant de mettre deux fermions au même endroit, donc $x_2 = x_1 = x$, cela conduit à l'annulation de la fonction d'état. Nous n'avons aucune chance de trouver les deux fermions au même endroit. C'est le principe d'exclusion

(5) Sven Ortoli et Jean-Pierre Pharabod, *Le Cantique des quantiques*, 1998, La Découverte, Paris.

de Wolfgang Pauli (1900-1958). Ce principe permet alors de mieux déchiffrer le tableau de Mendeleev. Ses éléments atomiques sont classés en «remplissant» les orbites stationnaires quantifiées, nommées maintenant couches, par des électrons. Nous pourrions nous demander : pourquoi les électrons ne peuvent-ils pas s'accumuler tous ensemble dans la couche la plus profonde ? C'est parce qu'ils s'excluent. Une fois qu'une couche est «pleine», il faut nécessairement passer à la couche «du dessus». Comme les propriétés chimiques des électrons proviennent de la seule couche externe, on comprend donc qu'au fur et à mesure que l'on progresse dans la classification, en ajoutant un électron (et un proton) pour passer d'un élément à un autre, on trouve une périodicité des propriétés. Un concept aussi abstrait que l'indiscernabilité a donc pour résultat les propriétés chimiques des 92 atomes des éléments naturels, ceux de la classification périodique de Mendeleev, propriétés chimiques qui conditionnent ensuite la formation de toutes les molécules existantes.

Evoquons ensuite un autre caractère essentiel, la *linéarité*, c'est-à-dire le fait que la superposition de deux fonctions d'état est une autre fonction d'état possible. Richard Feynman (1918-1988) dit un jour que la superposition était le seul mystère de la Mécanique Quantique. Le fait de savoir si c'est vraiment le «seul» est encore sujet de débat, mais il s'agit d'insister sur son importance. Nous avons vu que les interférences en sont une conséquence. La linéarité provoque une grande perplexité chez les scientifiques. Nous pourrions en donner une image dans notre monde macroscopique en empruntant l'exemple du «chat de Schrödinger». Puisque la fonction d'état du chat mort et celle du chat vivant sont possibles, la superposition de la fonction d'état associée au chat mort et de celle associée au chat vivant est une fonction d'état tout à fait acceptable. Mais à quoi correspond-elle alors ? La fonction d'état s'avère être un outil qui nous donne seulement des prédictions probabilistes sur le résultat que la mesure d'une propriété va donner. Nous sommes étrangement invités à renoncer à une attente : attribuer une propriété définie à une fonction d'état, avant que la mesure ne soit effectuée. Un tel renoncement est associé à l'un des postulats fondamentaux de la Mécanique Quantique : l'indéterminisme. Pour reprendre l'exemple ci-dessus énoncé par Schrödinger, en l'absence de connaissance sur l'état du chat (dans sa boîte), sa fonction d'état est une superposition de l'état «mort» et de l'état «vivant», avec une certaine probabilité d'attribuer au chat l'une ou l'autre de ces deux propriétés une fois la mesure faite.

Une illustration de cette absence de propriétés du système est le *principe d'incertitude*⁽⁶⁾ énoncé par Heisenberg, en 1925. Nous ne pouvons jamais connaître,

(6) On dit aussi «principe d'indétermination». Ce terme est plus juste qu'incertitude, car il s'agit d'une ignorance de principe, et non d'une ignorance provisoire liée à l'insuffisance de nos appareils de mesure. Nous gardons toutefois le terme incertitude car il reste encore le plus répandu.

simultanément et avec une précision aussi grande que souhaitée, l'impulsion et la vitesse d'une particule, ce qui est contraire au sens commun. Cela n'est pas dû à la limite de nos moyens d'investigation, mais bien à une information simultanée impossible à acquérir. Ce type d'incertitude concerne tout couple de propriétés qu'on nomme «incompatibles». Cette incompatibilité entre une impulsion bien définie et une position bien définie traduit, comme le montre la discussion menée à l'époque, l'incompatibilité entre une onde plane et un corpuscule : ceux-ci ne peuvent effectivement pas *coexister*. Max Born (1882-1970) évoque un mot plus positif, celui de «complémentarité» entre les deux images.

Comment se familiariser avec une telle complémentarité exclusive ? Cet aspect fondamental de la Mécanique Quantique s'appelle la *contextualité* : les résultats de mesure de deux ou plusieurs observables incompatibles dépendent du contexte, ce qui veut dire, précisément, de l'ordre temporel dans lequel nous les mesurons. C'est comme s'il existait des corrélations temporelles entre les résultats des mesures. La contextualité est un fait établi et indépendant de toute théorie ou interprétation, qui doit lui obéir.

Un autre aspect de la contextualité a un rapport avec l'espace, et représente l'un des phénomènes les plus troublants de la physique : la *non-séparabilité*, qui est aussi une contrainte inébranlable sur toute théorie. La motivation initiale sous-jacente à son émergence est la controverse à propos du problème de la mesure. Nous pouvons distinguer deux écoles qui se sont affrontées, chacune ayant des ramifications et des variantes.

D'une part, l'école qui prône que les propriétés d'un système sont indéterminées tant qu'aucune mesure n'est effectuée. La fonction d'état, même si elle obéit à une équation déterministe entre deux mesures, se trouve réduite d'une façon irréversible et imprévisible au moment de la mesure. Il est remarquable qu'avant la mesure, nous ne sachions pas parler de l'état d'un quanton. Schrödinger avait écrit : «Il est plutôt inconfortable que la théorie permette à un système d'être guidé ou piloté dans l'un ou l'autre type d'état à la merci de l'expérimentateur, en dépit du fait que celui-ci n'y ait pas accès»⁽⁷⁾.

D'autre part, l'école qui affirme que les propriétés de la mesure préexistent à la mesure elle-même (ce qui est le sens commun). Dans ce cadre, la réduction de la fonction d'état est simplement analogue à l'acte de pêcher, où le poisson est bien localisé à l'endroit où se trouve l'hameçon. Si nous ne sommes pas capables de

(7) "It is rather discomfoting that the theory should allow a system to be steered or piloted into one or the other type of state at the experimenter's mercy in spite of his having no access to it".

prévoir à quel endroit exactement nous le trouvons, c'est qu'il nous manque d'autres variables dont la prise en compte permettrait de préciser, d'une façon déterministe, cet endroit : c'est ce qu'on appelle des variables «cachées», car non incluses dans le formalisme orthodoxe de la Mécanique Quantique, soupçonnée ainsi d'être incomplète.

Dans un fameux article (dit «du paradoxe EPR») publié en 1935, Einstein et ses collaborateurs, Boris Podolsky (1896-1966) et Nathan Rosen (1909-1995), proposèrent une situation où deux quantons ayant été produits au même endroit s'éloignent tout en étant obligés, pour obéir à des lois de conservation (ne subissant aucune force extérieure), d'avoir des vitesses opposées (en cela, ces deux quantons sont dits *intriqués*). Ils ont alors considéré la mesure de la vitesse de l'un seulement des deux quantons.

Selon la première école, cette mesure réduit ce quanton à un état où sa vitesse est bien déterminée, sa vitesse étant indéterminée auparavant ; mais l'intrication avec le partenaire induit la même réduction à un état de vitesse opposée, aussi loin ce partenaire soit-il ! Ainsi, celui-ci se trouve affecté d'une vitesse «décidée» par une mesure qui peut avoir lieu à des kilomètres (comme lors des expériences les plus récentes portant sur des photons à Genève). Voilà de quoi troubler notre sens commun. Car il est unanimement accepté qu'aucun signal ne se propage plus vite que la lumière : le quanton *ne peut donc* pas envoyer instantanément l'information à son partenaire sur la valeur de la vitesse «qu'il a choisie» de prendre lors de la mesure (on ne sait pas en fait *qui a choisi*). C'est ce qui a amené Einstein et ses collaborateurs à défendre l'idée qu'il existait des variables cachées qui prédétermineraient cette vitesse indépendamment de la mesure, c'est-à-dire à défendre l'option de la seconde école.

Face à ce paradoxe, Bohr proposa de faire l'expérience avec des observables qui prenaient des valeurs discontinues (comme le spin, un analogue du moment magnétique, mais qui ne prend que deux valeurs $1/2$ et $-1/2$ pour les électrons). En 1964, John Bell (1928-1990) inventa une inégalité qui rendait possible un test conduisant à trancher en faveur de l'une ou l'autre des deux écoles. Les expériences d'Alain Aspect (1947-) permirent de faire ce test, et d'exclure la possibilité de variables cachées *locales*, c'est-à-dire d'affaiblir grandement l'option de la seconde école. La conclusion de cette expérience (et des nombreuses, toujours plus raffinées, qui ont suivi) est la suivante : soit la Mécanique Quantique est complète, et il faut accepter qu'elle est alors *non-séparable*, un concept plus complexe à appréhender que l'existence de corrélations entre particules ayant interagi, quelle que soit la distance qui les sépare, soit il existe des variables cachées qui devraient alors être *non-locales*, ce

qui est bien loin de l'accord avec le sens commun que cette interprétation ontologique était censée restaurer. La non-séparabilité semble bien résister à tous les tests observationnels qui la mettent à l'épreuve.

Théorie quantique des champs

Indéterminisme, linéarité, contextualité, incertitude, non-localité : ces traits de la Mécanique Quantique défient le sens commun, celui selon lequel les phénomènes sont soit ondulatoires, soit corpusculaires, et les ondes et les corpuscules sont bien définis : une onde se propage dans un milieu qui «ondule» (comme des vagues à la surface de la mer, ou des ondes sonores dans l'air), et les corpuscules sont des petites billes bien dures qui entrent en collision les unes avec les autres, ou s'accrochent les unes aux autres, pour former la matière (la vision de Descartes par exemple). Rien de tout cela en Mécanique Quantique : il n'y a pas de milieu qui «ondule», et les corpuscules ne sont pas des billes... La matière n'est ni onde ni corpuscule, ou plutôt elle est à la fois l'une et l'autre.

C'est avec cette théorie que les physiciens ont entrepris d'enquêter sur la nature intime de la matière, en développant ce qu'on appelle la Théorie quantique des champs. Il s'agit là d'un domaine de la physique qui a pris son élan dans les années 1950, en se séparant de la physique nucléaire (qui s'intéresse uniquement aux noyaux des atomes). Le point de démarrage de ce domaine a été l'étude du proton qui s'est avéré, à cette date, ne pas être l'analogue de l'électron, bien que portant une charge électrique opposée. Le proton possède une structure interne complexe. C'est grâce au développement des accélérateurs de particules que cette étape fut franchie. Dans un accélérateur, les protons et les électrons qui sont accélérés à de grandes vitesses et entrent en collision les uns avec les autres ne sont guère des entités figées ni stables : ils peuvent changer de nature et se convertir en d'autres particules bien distinctes (nous en dénombrons 200 actuellement). Enrico Fermi (1901-1954) avait annoncé à son étudiant (et futur Prix Nobel) Leon Lederman (1922-) : Jeune homme, si j'avais pu me rappeler les noms de ces particules, j'aurais été botaniste !⁽⁸⁾ De telles transformations peuvent être appréhendées grâce à la physique relativiste qui établit l'équivalence entre masse et énergie. L'énergie peut prendre différentes formes, et les particules ont la possibilité de se transformer en d'autres particules. Citons encore cette assertion d'Arthur Eddington (1882-1944) : «Le terme *particule* survit en physique moderne, mais il lui reste très peu de son sens classique. Une particule peut désormais être le mieux définie comme le porteur conceptuel d'un jeu de variables... Elle est aussi conçue comme l'occupante d'un

(8) "*Young man, if I could remember the names of these particles, I would have been a botanist!*"

état défini par le même jeu de variables ... Il pourrait sembler désirable de distinguer les *fictions mathématiques des particules réelles*, mais il est difficile de trouver une quelconque base logique pour une telle distinction. *Découvrir* une particule signifie observer certains effets qui sont acceptés comme preuve de son existence.»⁽⁹⁾

Une particule qui entre en collision avec son anti-particule s'annihile en énergie, sous forme de photons par exemple. Cependant, même si le nombre de particules de même nature n'est pas conservé, il existe d'autres lois de conservation cruciales qui interviennent. Ces lois sont intimement liées aux forces de la nature qui sont mises en jeu lors de ces collisions, et qui sont étudiées dans le cadre de ce qu'on appelle le Modèle Standard (utilisant la Théorie quantique des champs).

Le Modèle Standard

Le Modèle Standard est actuellement le résultat consensuel de l'enquête débutée dans les années 1950 pour comprendre la structure intime de la matière, et les forces d'interaction. Ces forces se manifestent comme des *champs*, c'est-à-dire qu'en tout point de l'espace et du temps, est définie une grandeur physique décrivant cette force. On distingue actuellement trois forces d'interaction, sans toutefois savoir si ce sont les seules. D'abord, la force électromagnétique, qui intervient dans tous les aspects de notre vie courante (électricité, magnétisme, et aussi la lumière). Cette force n'agit que sur des particules portant des charges électriques, et le bilan de celles-ci est le même avant et après une collision électromagnétique. Lors d'une interaction entre deux particules chargées, la force est portée par un échange de photons. Deux autres forces d'interaction ont été mises en évidence (bien que d'effet moins évident dans la vie courante que la force électromagnétique). Alors que la force électromagnétique est portée par les photons (un type particulier de bosons), ces deux forces sont véhiculées par d'autres sortes de bosons. La force nucléaire forte est responsable de la cohésion des protons et neutrons, appelés communément nucléons, dans le noyau. Elle n'agit que sur des particules portant un autre type de charge, appelé *couleur*, qui se trouve conservée. Elle est véhiculée par des *gluons* (il y en a huit, et le mot provient de *glue*, qui désigne la colle en anglais). La force nucléaire faible est

(9) *The term "particle" survives in modern physics but very little of its classical meaning remains. A particle can now best be defined as the conceptual carrier of a set of variates. ... It is also conceived as the occupant of a state defined by the same set of variates... It might seem desirable to distinguish the "mathematical fictions" from "actual particles", but it is difficult to find any logical basis for such a distinction. "Discovering" a particle means observing certain effects which are accepted as proof of its existence. A. S. Eddington, Fundamental Theory, 1942, Cambridge University Press, Cambridge, England, p. 30.*

responsable de la désintégration radioactive ; elle n'agit que sur des particules portant ce qu'on appelle un *iso-spin*, une sorte de «charge» qui est elle-même conservée lors de ces processus. Elle est véhiculée par des bosons appelés W^+ , W^- et Z^0 . Ces deux dernières forces (forte et faible) sont à courte portée, alors que la force électromagnétique a une portée infinie.

Le lien de ces forces avec des lois de conservation est dû à l'une des démarches les plus élégantes et puissantes de la physique. En fait, leur structure, et même l'existence et la caractéristique des bosons qui les véhiculent, sont dictées par les symétries qui sont en jeu. Il s'agit là d'une sorte de «géométrisation» des lois de la physique. Une symétrie est l'invariance d'un système sous une transformation qui peut agir sur l'espace, sur le temps, sur des propriétés géométriques ou sur les lois régissant le système. Les symétries peuvent être discrètes ou continues.⁽¹⁰⁾ En plus de ce lien essentiel, existe un autre lien qui a permis de stipuler des lois simples et universelles indépendantes des détails des systèmes étudiés. Il s'agit d'un théorème qui permet d'associer à chaque symétrie une quantité physique conservée. Il est dû à une mathématicienne allemande, Emmy Noether (1882-1934), qu'Einstein décrivait comme «le génie mathématique créatif le plus considérable produit depuis que les femmes ont eu accès aux études supérieures». Ainsi, de l'invariance par translation dans le temps découle la conservation de l'énergie, et de l'invariance par translation de tous les corps dans l'espace découle la conservation de l'impulsion. Le théorème de Noether joue un rôle déterminant au-delà de la mécanique classique, et au sein du Modèle Standard. Nous avons évoqué la loi de conservation des trois différents types de charge par les trois forces d'interaction : elles sont bien associées à des symétries imposées. Le théorème de Noether illustre encore le rôle central des mathématiques dans la construction des concepts physiques.

Nous avons déjà mentionné les bosons qui véhiculent les trois interactions, et qui sont au nombre de douze : le photon pour la force électromagnétique, huit gluons pour la force nucléaire forte, les bosons W^+ , W^- et Z^0 pour la force nucléaire faible. Parmi les particules produites dans les accélérateurs de particules ou observées dans les rayons cosmiques, il y a aussi douze fermions considérés comme «fondamentaux», et qui sont prompts à subir une ou plusieurs forces à la fois, selon le type de charges qu'ils portent.

(10) Un exemple simple de symétries discrètes est l'ensemble de celles qui laissent invariant le carré : les rotations dont le centre est au milieu du carré et dont les angles sont 0 (l'identité), 90, 180, et 270 degrés, et quatre retournements (horizontal, vertical, et les deux diagonales).

Ces fermions sont à leur tour classifiés en six *leptons* (dont l'électron), et six *quarks*, dont deux entrent dans la composition des nucléons. Il est toutefois inexact de dire que ces nucléons sont formés de quarks : une grande partie de leur masse est due aussi à l'énergie des gluons, les bosons qui véhiculent l'interaction nucléaire forte entre quarks ; ceux-ci portent des charges de *couleur* en plus de leur charge électrique (qui sont des fractions de la charge d'un électron, $-1/3$ et $2/3$). A chacun de ces douze fermions, il faut associer son anti-particule. Enfin, le fait que des particules aient une masse (pas toutes : le photon est sans masse) est «expliqué» par l'existence d'un treizième boson, appelé boson de Higgs. Il semble avoir été mis en évidence récemment au *Large Hadron Collider* du CERN à Genève, une découverte très médiatisée, vu le rôle crucial qu'il joue dans la cohérence du Modèle Standard.

Personne ne sait pourquoi il y a vingt-cinq particules, les douze fermions et les treize bosons. Dans le Modèle Standard, ces fermions et bosons sont traités comme fondamentaux, donc sans structure interne. Mais le sont-ils vraiment ? Il est possible que les moyens d'investigation actuels ne donnent pas assez de résolution (et d'énergie) pour révéler (et casser) leurs éventuelles structures internes. D'ailleurs la signification même des termes «fondamental» ou «élémentaire» n'est pas bien établie. C'est ce qu'exprime le physicien Steven Weinberg (1933-), l'un des lauréats du prix Nobel de Physique en 1979 : «Quand un inconnu, entendant que je suis un physicien, me demande dans quel domaine de la physique je travaille, je réponds généralement que je travaille sur la théorie des particules élémentaires. Donner cette réponse me rend toujours nerveux. Et si l'inconnu demandait : «Qu'est-ce que c'est qu'une particule élémentaire ?», je devrais admettre que personne ne le sait réellement.»⁽¹¹⁾

Au-delà du Modèle Standard

Il est même possible que non seulement ces éventuelles structures internes cachent de nouvelles particules, mais que bien d'autres, d'un nombre inconnu, soient encore inaccessibles, ou nécessitent de nouvelles théories, peut être plus précises. Il faut rappeler à ce propos que, malgré ses succès, le Modèle Standard reste une théorie approximative. En effet, il y a plusieurs faits observationnels qui ne rentrent pas bien dans ce modèle. Premier problème, la quatrième interaction observée, la force de gravitation qui s'exerce entre les masses, n'est

(11) *“The Standard Model itself is probably only an effective quantum field theory, which serves as an approximation to some more fundamental theory whose details would be revealed at energies much higher than those available in modern accelerators, and which may not involve quark, lepton, or gauge fields at all.”*

pas incluse dans ce modèle. Elle serait hypothétiquement portée par un autre boson, le *graviton*, qu'on cherche encore à mettre en évidence. Et la théorie qui décrit la gravitation, c'est-à-dire la Relativité générale énoncée par Albert Einstein en 1919, ne peut pas bien s'allier à la Mécanique Quantique. Ensuite, la *matière noire*, qui représente 23 % de la densité de l'univers, est constituée de particules élémentaires qui ne sont pas encore identifiées, et qui ne peuvent pas être la matière «normale» décrite par le Modèle Standard. De même, l'*énergie noire*, qui représente 75 % de la densité de l'univers et en accélère l'expansion, n'est pas décrite dans le Modèle Standard. En fin de compte, celui-ci ne s'applique qu'aux 2 % de matière «normale» qui composent l'univers (mais qui, bien évidemment, ont une importance considérable puisqu'ils sont la matière des étoiles et des planètes, des roches et de la vie).

Il faut donc aller au-delà du Modèle Standard. D'où cette autre quête qui obsède les physiciens, celle de l'unification des forces fondamentales, qui se trouve encore confrontée à plusieurs barrières. Une étape a été franchie pour l'unification de l'électromagnétisme et de l'interaction nucléaire faible, donnant lieu à la théorie des interactions électrofaibles, ce qui a valu le prix Nobel à Steven Weinberg, Abdus Salam (1926-1996) et Sheldon Glashow (1932-) en 1979. Cependant, les constantes d'interaction restent indépendantes, et l'unification demeure partielle. En plus d'une recherche de type esthétique, plusieurs motivations sont sous-jacentes à la quête d'unification. Par exemple, la recherche d'une simplicité qui permette de réduire le nombre de théories possibles susceptibles d'expliquer des manifestations multiples. Ou encore la compréhension de l'évolution de l'univers, qui serait décrit par une seule théorie à ses premiers instants, ou par un seul groupe primitif de symétries. D'une façon très simplifiée, en se refroidissant, l'univers aurait subi ce qu'on appelle des «brisures de symétrie», ou «transitions de phase», lors desquelles ses différents composants seraient décrits par des sous-groupes de ce groupe primitif. Ce serait l'analogie de l'eau qui gèle, donc subit une *transition de phase* de l'état liquide à l'état solide : à l'état liquide, l'eau est invariante sous le groupe de toutes les rotations spatiales (c'est-à-dire qu'il n'y a aucune direction privilégiée dans sa structure). Lorsque l'eau se refroidit et gèle, seul un petit sous-groupe de ces rotations décrit la glace cristallisée, les autres symétries de rotation étant donc «brisées». Les groupes de symétrie associés aux trois forces fondamentales (quatre avec la gravitation) seraient alors des sous-groupes de ce groupe primitif, que les physiciens rêvent tant de trouver.

La Supersymétrie vise à unifier fermions et bosons au-delà du Modèle Standard (au prix de l'existence de nouvelles particules), et sa première version fut proposée en 1981 par Howard Georgi (1947-) et Savas Domopoulos (1952-). Les

nouvelles particules de la Supersymétrie sont des candidats naturels pour expliquer la matière noire observée en cosmologie. La Théorie des cordes est la tentative la plus poussée pour aboutir à une réconciliation du Modèle Standard, qui décrit la matière et ses interactions, avec la Théorie de la Relativité générale, qui décrit la dynamique, les propriétés de l'espace et du temps, et la gravitation. La Théorie de cordes a connu un pas décisif avec Joel Scherk (1946-1980) et John H. Schwarz (1941-) en 1974, qui conçurent des cordes vibrantes uni-dimensionnelles, ouvertes ou fermées, qui voyagent dans l'espace-temps. Il s'avère que leurs modes de vibration correspondent aux particules élémentaires, et semblent expliquer leurs propriétés. Un mode de vibration particulier paraît correspondre au graviton recherché : en effet, lorsque les équations mathématiques associées à ce mode sont développées à grande échelle, elles redonnent celles de la Relativité générale. Ces cordes peuvent se scinder et s'unir d'une façon continue pour interagir, et leur extension ne laisse plus de place à la *localité*. La théorie concurrente la plus célèbre est appelée Gravitation quantique à boucles (*Loop Quantum Gravity*), et a connu des progrès significatifs depuis 1988, avec Abhay Ashtekar (1949-), puis Carlo Rovelli (1956-) et Lee Smolin (1955-). Cette théorie vise, non à unifier les particules et les interactions, mais à prendre un autre chemin, celui de l'unification des deux grands paradigmes de la physique contemporaine, la Mécanique Quantique et de la Théorie de la Relativité générale, jusqu'à présent inconciliables. Une telle unification, pour se faire, doit postuler que l'espace et le temps sont discontinus. Cependant, une validation expérimentale de ces deux théories, la Théorie de cordes et la Gravitation quantique à boucles, semble se situer bien au-delà des moyens expérimentaux qui sont actuellement disponibles.

Les tentatives de «Grande Unification» des quatre forces d'interaction ne cessent de proliférer. Même si certaines peuvent être vérifiées dans leur cohérence interne, d'autres échappent à toute possibilité de test expérimental, non seulement par limite de moyens, mais même par principe. Dans cette quête d'unification, nous nous retrouvons devant une grande inflation : celle des modélisations mathématiques qui ne peuvent être ni réfutées ni confirmées. Nous pouvons résumer cette section par une dernière citation de Weinberg : « Il y a en cela une leçon. La tâche de la physique n'est pas de répondre à un jeu de questions fixées au sujet de la Nature, telles que décider quelles particules sont élémentaires. Nous ne savons pas à l'avance quelles sont les bonnes questions à poser, et souvent nous ne les trouvons pas avant d'être près de la réponse.»⁽¹²⁾

(12) *"There is a lesson in all this. The task of physics is not to answer a set of fixed questions about Nature, such as deciding which particles are elementary. We do not know in advance what are the right questions to ask, and we often do not find out until we are close to an answer."*

Lectures philosophiques et théologiques de la Mécanique Quantique

Atomisme et réductionnisme

Au vu des éléments apportés par la physique moderne, nous sommes en droit de douter de la pertinence même de questions aussi simples que : «Qu'est-ce que la matière et la lumière ?» ou «De quoi sont-elles composées ?» Au lieu de réponses affirmatives, nous devons nous contenter d'assertions qui sont soit négatives (c'est-à-dire que l'on peut dire ce que la matière et la lumière *ne sont pas*), soit indécidables (c'est-à-dire que les questions n'ont pas de réponse, comme la question de savoir si la matière et la lumière sont onde, ou corpuscule, ou «à la fois» onde et corpuscule : aucune de ces propositions n'est satisfaisante).

Où en est aujourd'hui l'hypothèse atomiste, après les révolutions conceptuelles de la Mécanique Quantique et de la Théorie quantique des champs ? Si l'on veut que l'atomisme soit une description du monde en termes de particules discontinues et irréductibles, et de vide, la Mécanique Quantique *n'est pas* un atomisme. Les particules ne sont pas discontinues (leur fonction d'état est étendue), ni irréductibles (elles se transforment les unes dans les autres), et il n'y a pas de «vide». Dans la Théorie quantique des champs, il y a toujours «quelque chose» qui subsiste du champ, même quand il y a zéro particule dénombrable. Bien sûr, de façon pratique, les physiciens font comme si l'atomisme était une description commode de la réalité, et ils l'enseignent à leurs étudiants des premières années, et dans les ouvrages les plus simples de vulgarisation. Mais lorsqu'ils approfondissent la théorie et ses implications conceptuelles, ils se trouvent face à des difficultés qui les conduisent à renoncer à cette description atomiste.

Le schéma réductionniste naïf est encore -trop souvent !- exposé dans les manuels de vulgarisation, et n'est qu'une représentation simpliste et tronquée des résultats de la Théorie quantique des champs. Ce schéma réductionniste de la matière stipule qu'en descendant à des échelles de plus en plus petites, des blocs sont réduits en leurs constituants «élémentaires». Les molécules se composent d'atomes, les atomes, d'un noyau et d'électrons, et le noyau, de nucléons, eux-mêmes composés de quarks. Notons que la dernière assertion, bien qu'inexacte, est à l'origine d'une autre affirmation : que seuls les électrons et deux types de quarks seraient les briques élémentaires de toute la matière, des galaxies jusqu'aux bactéries. C'est ce genre d'énoncé qui conférerait une sorte de «supériorité» à la physique, parce qu'elle serait ainsi perçue comme «plus fondamentale» que les autres sciences...

Si elle n'est plus atomiste, la Mécanique Quantique et la Théorie quantique des champs n'en accomplissent-elles pas quand même le programme réductionniste,

c'est-à-dire l'explication du complexe par un petit nombre d'entités simples (qui ne seraient plus des «atomes» au sens de particules discontinues et irréductibles) ? Ici la réponse doit être plus nuancée. Oui, la Mécanique Quantique et la Théorie quantique des champs représentent, d'un certain point de vue, un triomphe du réductionnisme, dans la mesure où l'extraordinaire complexité de la matière est bien réduite à un petit jeu de *règles* et de *principes*. Mais ces règles et ces principes sont mathématiques, hautement non intuitifs, et ne permettent pas d'atteindre des entités fondamentales. Il y a bien, pour l'instant, les particules dites «élémentaires» du Modèle Standard. Toutefois, nul ne sait si ces particules ne sont pas composées d'entités plus élémentaires (en fait, il y a bien des indications qu'il faille aller au-delà du Modèle Standard). Et par ailleurs, ces entités peuvent elles-mêmes se transformer en d'autres entités. Par exemple, quark et antiquark sont deux des particules «élémentaires» du Modèle Standard. Mais s'ils se rencontrent, ils peuvent se transformer en deux photons. Cela ne signifie pas, bien sûr que les quarks et antiquarks soient «faits» de photons. Citons encore Weinberg : «Dans les expériences des années 1950 et 1960... de nombreuses nouvelles particules ont été découvertes avec des durées de vie longues ou courtes, et aucune réponse non-ambiguë ne put être donnée à la question de savoir de quoi ces particules étaient faites, puisque la question n'a plus eu de sens rationnel. Un proton, par exemple, pourrait être fait d'un neutron et d'un pion, ou d'un Lambda-hypéron et d'un kaon, ou de deux nucléons et d'un antinucléon ; il serait le plus simple de dire qu'un proton consiste juste en matière continue, et toutes ces affirmations sont également correctes ou également fausses. La différence entre les particules composites et élémentaires a ainsi fondamentalement disparu. Et c'est sans doute la plus importante découverte expérimentale des cinquante dernières années.»⁽¹³⁾

Cela nous amène à discuter du problème épineux de la mesure, sachant que nous évitons, par souci de simplicité, d'aborder une autre question elle-même très délicate : définir ce qu'est une mesure. Aucun autre domaine des sciences ne donne un statut aussi central au rôle de l'observation que la Mécanique

(13) *"In the experiments of the fifties and sixties . . . many new particles were discovered with long and short lives, and no unambiguous answer could be given any longer to the question about what these particles consisted of, since this question no longer has a rational meaning. A proton, for example, could be made up of neutron and pion, or Lambda-hyperon and kaon, or out of two nucleons and an antinucleon; it would be simplest of all to say that a proton just consists of continuous matter, and all these statements are equally correct or equally false. The difference between elementary and composite particles has thus basically disappeared. And that is no doubt the most important experimental discovery of the last fifty years."*

S. Weinberg, *What is an elementary particle?*, 1996, Beam Line, Vol. 27, N. 1.

Quantique. Un des paradoxes qu'elle soulève est que la fonction d'état obéit à une équation déterministe, pour se trouver subitement *réduite*, lors de la mesure, à une fonction d'état propre de l'observable mesurée. Nous ne savons pas expliquer, non seulement pourquoi cette réduction a lieu, mais aussi pourquoi un choix d'une fonction d'état propre, et donc de la valeur propre associée, est fait parmi plusieurs fonctions possibles. L'acte de la mesure induit donc simultanément la réduction et l'indéterminisme. Cependant, cet indéterminisme n'est pas lié à une limite des moyens de connaissance ; elle est inhérente à l'observation. Pourrions-nous en déduire l'assertion que le monde est indéterministe ? Trois difficultés limitent la valeur de vérité indiscutable d'une telle affirmation. D'abord, se pose de nouveau le problème d'utiliser le verbe *être* : nous ne savons pas ce qu'*est* un système tant qu'il n'est pas mesuré. Ensuite restent possibles les théories à variables cachées non-locales qui, malgré les nouvelles énigmes qu'elles introduisent, résolvent le problème de la mesure (le résultat de la mesure serait déterminé par ces variables cachées). Tant que ces théories de variables cachées restent impossibles à réfuter, elles demeurent comme une solution «possible», et nous ne pouvons donc pas affirmer *avec certitude* que la mesure soit fondamentalement indéterministe. Enfin, nous devons prendre la précaution de nous restreindre à un domaine plus étroit que le «monde» ; appelons ce domaine le «monde quantique» : c'est celui auquel s'applique la Mécanique Quantique, quoique ses frontières soient encore bien floues, malgré la tentation de certaines écoles de l'étendre à tout le réel...

La non-séparabilité est l'une des propriétés « négatives » les mieux établies et les plus troublantes. Rappelons qu'il ne s'agit pas d'une conséquence du formalisme de la Mécanique Quantique, qui, bien entendu, y conduit, mais de celle d'observations expérimentales qu'il est difficile de contredire, du moins au stade actuel de notre connaissance. C'est donc un *fait* indépendant de la Mécanique Quantique, mais aussi de ses diverses interprétations. Même quand celles-ci s'efforcent de donner un statut ontologique à la fonction d'état, donc d'inventer une réalité qui existe avant la mesure (en introduisant des variables cachées), cette contrainte persiste et s'appelle la non-localité, ce qui aussi un concept bien exotique.

La non-séparabilité donne un coup fatal à la conception réductionniste naïve. Des quarks qui entrent dans la composition d'un nucléon interagissent et ne peuvent être conçus comme des entités à part. Mais cette complexité ne se résume pas à la difficulté de les séparer. Imaginons qu'on puisse procéder à leur séparation spatiale, comme lors d'une expérience d'Einstein-Podolsky-Rosen avec deux photons (une étape pour l'instant insurmontable pour des raisons encore mal comprises, et différentes de celles que nous discutons). Lors de cette expérience, nous ne devrions même pas évoquer une fonction d'état séparément pour chacun

des quarks avant d'effectuer la mesure. C'est le mode d'existence même de ces quarks qui pose problème au sein du schéma réductionniste. L'assertion «le nucléon est composé de trois quarks» ne pose pas uniquement le problème de l'oubli de son autre «partie» due aux gluons, mais surtout de l'usage fait du verbe *être*. Car nous ne devrions même pas parler de ces quarks comme *existant déjà* dans le nucléon, d'une façon indépendante de nos observations !

Interprétations philosophiques

Ces conceptions ne donnent toutefois pas satisfaction à certains scientifiques ou philosophes des sciences, qui tiennent à mieux connaître la réalité, voire même à s'assurer qu'il y ait sens à en parler. Ainsi, d'autres façons d'aborder ce dilemme ont produit un nombre considérable d'interprétations de la Mécanique Quantique, sans nécessairement rétablir l'ontologie (c'est-à-dire clarifier la notion d'*être*). Toutes respectent la non-localité et la contextualité, et sont en accord avec les observations expérimentales. Il n'est pas possible d'en sélectionner une seule qui soit gagnante en ayant recours au critère empirique, comme le prévoyait le programme positiviste. De surcroît, plusieurs représentations abstraites de ce qu'est une particule (on devrait encore dire un quanton) sont possibles : une onde et un corpuscule simultanément, un corpuscule guidé par une onde dans les théories à variables cachées, des états propres d'un champ quantique au sein de la Théorie quantique des champs, ou plus précisément d'un opérateur se trouvant dans la représentation des groupes de symétries, un mode de vibration d'une supercorde, etc... Et d'autres interprétations encore de la Mécanique Quantique, qui s'accordent toutes avec les observations expérimentales, continuent à foisonner de nos jours. Dans tous ces cas, nous sommes confrontés à la *sous-détermination* des théories par l'expérience : nous avons «trop d'explications» possibles des faits que nous constatons, et nous n'avons pas de test qui permette de faire le tri parmi elles.

Est-il possible alors d'avoir recours à la Mécanique Quantique pour valider rigoureusement une doctrine philosophique aux dépens des autres ? Là aussi, nous sommes obligés de nous restreindre à des conclusions d'ordre négatif. Car nous pouvons seulement éliminer certaines doctrines extrêmes. Cette étape est néanmoins unique dans l'histoire de la philosophie. Les doctrines qui échappent à une telle réfutation ne peuvent pas pour autant être validées : elles ont leurs points forts, mais aussi leurs fragilités, et choisir entre elles dépend des inclinations et des croyances de chacun. La logique philosophique semble atteindre ici ses limites.

Le positivisme, qui défendait l'idée que la question d'une éventuelle réalité en dehors des phénomènes observés soit dénuée de sens, a dû faire des concessions et se transformer en une variante de type *néo-positiviste*, généralement appelée *opérationnaliste* ou *instrumentaliste*. Cette option fut défendue par certains des

acteurs principaux de l'aube de la Mécanique Quantique (Bohr, Heisenberg, Born). C'est l'école dite «de Copenhague», qui considère que se poser la question sur ce qui passe avant la mesure n'a aucun intérêt. «Tais-toi et calcule !»⁽¹⁴⁾. C'est aussi l'attitude implicitement adoptée, jusqu'à nos jours, par une majorité des scientifiques qui ne cherchent pas à se poser la question de la *réalité* de ce qu'ils sondent, ou de son existence. Ces scientifiques ont donc abandonné toute prétention à la métaphysique, fût-elle matérialiste. Ici une assertion métaphysique se définit comme une proposition échappant à la méthode scientifique, où l'observation empirique et la logique sont les juges ultimes. On pourrait leur dire que «ne pas avoir de métaphysique, c'est encore en avoir une». D'ailleurs, leur langage courant les fait souvent glisser vers une croyance dans une réalité en soi, illustrée selon la représentation atomiste la plus naïve.

Cependant, le foisonnement des interprétations autres que celles de Copenhague trahit l'insatisfaction que le projet positiviste, et sa version néo-positiviste, causent à ceux qui se posent des questions ontologiques. Et ce projet se trouve contesté dans son objectif d'écarter du champ scientifique toute assertion métaphysique. Or le matérialisme le plus simple «ne marche pas», comme on l'a abondamment montré, et les interprétations alternatives de la Mécanique Quantique prennent une connotation métaphysique qui peut devenir très prononcée, même lorsqu'elles sont publiées dans des revues scientifiques reconnues par la communauté. Notons que la *croyance* dans la possibilité d'une Grande Unification est, en soi, un choix d'ordre métaphysique. Il est intéressant d'évoquer des interprétations, qui, tout en s'acharnant à restaurer le réalisme et le déterminisme, peuvent glisser vers des conceptions de type métaphysique. C'est le cas de Hugh Everett (1930-1982) et Bryce DeWitt (1923-2004), qui prennent la théorie de la mesure de la Mécanique Quantique en quelque sorte «au pied de la lettre», et stipulent que tous les résultats possibles de chaque mesure existent effectivement, chaque mesure provoquant l'apparition d'autant de branches d'univers qu'il y a de résultats possibles ! La question énigmatique de la réduction de la fonction d'état lors de la mesure se trouve donc «résolue», puisque tous les possibles existent. Le caractère tout à fait extrême de cette interprétation illustre le désarroi des physiciens quand il s'agit de réconcilier la Mécanique Quantique avec une théorie déterministe de la mesure.

Une autre doctrine extrême, évoquée au début de ce texte, peut être écartée par la Mécanique Quantique. Il s'agit du réalisme scientifique naïf. Cette doctrine postule une relation *univoque* entre une réalité *objective et intelligible*, indépendante de nos

(14) «Shut up and calculate!», David Mermin (1935-).

moyens d'observation, et une théorie qui la décrit. Le développement de théories à variables cachées est venue d'une volonté de sauver le réalisme naïf, mais ces théories ont échoué : en cherchant à résoudre des énigmes, elles en ont fait émerger de nouvelles, que nous n'explicitons pas ici. Par ailleurs, ces théories, parce qu'elles supposent aussi l'existence d'entités qu'il est impossible de sonder, non par limitation de moyens mais par principe, ne sont donc pas *intelligibles*. Comme nous l'avons rappelé, la contextualité, spatiale et temporelle, à laquelle est soumise toute interprétation, indique qu'un réel indépendant ne peut être défendu, et que parler de propriétés d'un système est généralement inadapté. La relation univoque entre un «réel» (ici mal défini) et la théorie se trouve aussi fragilisée par la sous-détermination des théories par l'expérience.

Au réalisme naïf s'oppose l'idéalisme radical, qui consiste à réfuter sans détour l'existence de toute réalité en dehors de nous, et à affirmer que toutes nos perceptions sont, en quelque sorte, internes à notre conscience. Il s'agit là d'une version moderne de l'idéalisme cher à George Berkeley (1685-1753). Parmi les arguments qui fragilisent l'idéalisme radical en physique, figurent l'intersubjectivité (c'est-à-dire, le fait que nous soyons tous d'accord sur ce que nous mesurons), la relation entre cause et effet, l'existence de l'univers avant ses observateurs, et la préexistence de celui qui connaît par rapport à la connaissance. Cependant, la Mécanique Quantique consolide un argument supplémentaire : si l'idéalisme radical était vrai, nos perceptions devraient nous amener à des théories dans le prolongement de notre sens commun, qui s'est forgé dans l'espace euclidien et le temps uniforme. Or il n'en est rien.

Si l'on appliquait la maxime «les ennemis de mes ennemis sont mes amis», les arguments à l'encontre de l'idéalisme radical plaideraient en faveur du réalisme. Certes, non en faveur du réalisme scientifique naïf, mais plutôt d'une composante «minimaliste» de celui-ci, bien que l'adopter relève aussi d'une décision d'ordre métaphysique. Il s'agit de croire qu'il existe tout de même une réalité «indépendante» de nous. Mais plusieurs ramifications en doctrines variées sont alors possibles, que nous n'exposerons pas en détail ici. Car affirmer l'existence de cette réalité ne nous dit pas quelle est sa nature ni même son mode d'existence, sur lesquels la Mécanique Quantique ne se prononce pas. Certains font une distinction entre le réel en soi et la réalité empirique, mais peuvent décider ensuite si le premier affecte la seconde ou si celle-ci en est indépendante. Ensuite, la définition de la réalité empirique ne fait pas l'unanimité, puisqu'elle fait référence aux moyens d'observation (qui peuvent être contingents ou de principe), et elle peut être définie comme unique, ou bien scindée en une réalité inaccessible et une autre apparente.

Plusieurs interprétations de la Mécanique Quantique ont emprunté ces ramifications du réalisme «minimaliste». Citons ici celle de Bernard d'Espagnat (1921-), qui évoque le *réel voilé*, un réel dont la nature profonde nous échappe, mais que nous pouvons approcher sous le voile de nos théories.⁽¹⁵⁾ Et, pour lui, ce réel voilé affecte les phénomènes. En choisissant une position métaphysique qui affirme qu'il y a effectivement un réel, nous devons accepter que le réel soit radicalement différent de nos conceptions usuelles, mais que nous puissions en avoir seulement quelques lueurs par l'approche de la Mécanique Quantique. Une telle position du réel voilé évoque, bien évidemment, des positions de philosophie théiste et de théologie dans lesquelles il y a effectivement le réel, quoique celui nous échappe en partie parce qu'il s'ancre dans le mystère de la création, et de Dieu qui en est la Source. Ce réel inaccessible pourrait être assimilé à l'essence des choses.

Cependant, toutes ces interprétations sont confrontées au rôle de l'observateur, relié à la question de l'objectivité, un défi qui ne se présente nulle part ailleurs d'une façon si imposante. Une position extrême due originellement à John Von Neumann (1903-1957), et reprise par John Wheeler (1911-2008), consiste à résoudre le problème de la réduction de la fonction d'état lors de la mesure, en supposant que c'est la conscience de l'observateur qui provoque cette réduction. Cependant, une mesure peut être effectuée par un appareil, et le résultat qui est affiché, et révèle par exemple la réduction de la fonction d'état, peut être lu de la même façon par deux personnes, même longtemps après la mesure. Ces interprétations extrêmes se heurtent donc à deux difficultés : le fait que la mesure ne fasse pas appel nécessairement à la conscience d'un observateur, mais à un robot ou une machine automatisée, et le problème de l'intersubjectivité. Toutefois, ces contre-arguments, dont l'intersubjectivité, ne garantissent pas l'objectivité, qui, selon d'Espagnat, par exemple, se trouve affaiblie par le fait que la Mécanique Quantique fasse intervenir l'observateur. La conscience de l'observateur n'agirait pas directement sur le réel, mais limiterait sa propre connaissance de ce réel. Et il ne peut pas démontrer que le réel présupposé coïncide avec les perceptions qu'il en a eues. Hervé Zwirn affirme même que l'intersubjectivité ne pourrait être qu'apparente, et choisit une voie intermédiaire entre le réalisme et l'idéalisme. Il fait sienne une partie de l'idée contenue dans la citation du philosophe Hilary Putnam (1926-) : «L'esprit et le monde construisent conjointement l'esprit et le monde.»⁽¹⁶⁾

(15) Voir Bernard d'Espagnat, *A la recherche du réel : le regard d'un physicien*, 1979, Gauthier-Villars, Paris, et *Traité de physique* et de philosophie, 2002, Fayard, Paris.

(16) *Reason, Truth and History*, 1981, Cambridge University Press, 1981, Trad. Fr., *Raison, Vérité et Histoire*, 1984, Minit, Paris.

Ces interprétations d'ordre métaphysique donnent du grain à moudre au *constructivisme*, qui montre, en particulier, à quel point la pratique scientifique se fonde aussi sur des croyances, malgré «un réel» qui résiste et la guide. Comme l'écrit le philosophe des sciences Karl Popper (1902-1994) : «Les théories scientifiques sont comme des filets créés par nous et destinés à capturer le monde... Ce sont des filets rationnels créés par nous et elles ne doivent pas être confondues avec une représentation complète de tous les aspects du monde réel, pas même si elles sont très réussies, ni même si elles semblent donner d'excellentes approximations du réel.»⁽¹⁷⁾

La Mécanique Quantique reconnaît d'elle-même sa propre incapacité à fournir une définition et une description du réel qui fasse consensus, ce qui contraste avec ses prédictions qui sont testées expérimentalement avec une grande précision, et qui peuvent être considérées comme un éclatant succès opérationnel, mais non fondamental. Peut-être la recherche du «fondement» de la matière, héritée du projet réductionniste, serait-elle, en fin de compte, la barrière la plus hermétique pour appréhender la Mécanique Quantique, ou relever les défis du Modèle Standard ? Et si la matière n'avait pas de structure ultime ?

Atomisme et kalâm

Qu'en est-il alors des perspectives que peut ouvrir la pensée musulmane sur de telles révolutions ? La Mécanique Quantique, par ses énigmes, voire ses «mystères», nous oblige à dépasser le cadre positiviste et le réductionnisme cartésien. C'est la raison pour laquelle certains des principaux fondateurs de la Mécanique Quantique, qui furent pris d'une perplexité totale face aux énigmes que celle-ci posait, se sont tournés vers des traditions d'Orient, hindoue, bouddhiste, ou taoïste, afin d'y chercher des conceptions les aidant à sortir du moule positiviste et cartésien qui les avait façonnés, celui selon lequel une chose doit avoir des propriétés bien définies, et être à un endroit localisé de l'espace, à un temps déterminé. Mais attention donc au *concordisme* : une attitude est de se rendre compte que les concepts de certaines philosophies occidentales sont insuffisants pour faire une lecture de la Mécanique Quantique qui satisfasse les légitimes aspirations métaphysiques des physiciens, une tout autre attitude est d'affirmer, comme certains n'ont pas hésité à le faire, que Mécanique Quantique et traditions orientales parlent de la même chose, ou que ces mêmes traditions orientales ont anticipé la Mécanique Quantique, et sont prouvées par celle-ci.

(17) Karl Popper, *L'univers irrésolu. Plaidoyer pour l'indéterminisme*, pp 36 et 135, 1984, Hermann, Paris.

Une tradition métaphysique se rapporte à des réalités qui dépassent le monde que nous sondons par les sciences dures. Le langage des traditions religieuses ne peut être ni réduit ni comparé à celui dont nous faisons usage dans les sciences (même s'il est facile d'emprunter des mots dans l'autre sens, comme appeler «particule de Dieu» le boson de Higgs parce que ce boson représente l'accomplissement du Modèle Standard). La science moderne simplifie et découpe le monde sensible pour en étudier des domaines bien restreints : elle ne peut pas prétendre remonter de ces morceaux infimes écartelés, simplifiés et traités avec des préjugés, vers une vision globale de la réalité. Il semble donc injustifié de réduire les concepts métaphysiques à des assertions relevant de la physique, qui ne donne que des lueurs quantifiées, inachevées et limitatives du «réel».

C'est ce qu'exprime si bien Abd-al-Karîm Al-Jîlî (1366-1424) dans son ouvrage *Al-Insân al-Kâmil* :

«Tout ce que l'on voit dans le monde visible est comme un reflet du soleil de ce monde...Quand ces mots imagés sont entendus par l'oreille sensorielle, tout d'abord ils désignent des objets sensibles. Le monde spirituel est infini, comment des mots finis peuvent-ils l'atteindre? Comment les mystères contemplés dans la vision exatique peuvent-ils être interprétés par des mots ?»⁽¹⁸⁾

Tout en ayant en mémoire ce rappel sur les dangers du concordisme, nous proposerons une perspective interprétative analogue à cette démarche des premiers physiciens quantiques, en suggérant que les conceptions philosophiques et théologiques au sein de la tradition islamique peuvent nous aider à accepter les énigmes de la Mécanique Quantique, et la pluralité de ses interprétations. C'est aussi parce que ces conceptions nous invitent à dépasser notre sens commun que l'analogie peut être fructueuse. Ce dialogue peut aussi prendre sens si l'on accepte que le monde sensible soit une manifestation en correspondance avec d'autres niveaux de réalité, dont il nous reflète des lueurs.

Une thèse complémentaire, qui peut renforcer ce champ d'interaction entre science et spiritualité, mais qui demanderait une plus profonde investigation, est que les quêtes d'ordre métaphysique ont bel et bien stimulé et facilité l'émergence de ruptures scientifiques cruciales. Si les savants musulmans ont été durablement intéressés par les sciences expérimentales, c'est en raison de l'incitation coranique maintes fois répétée à aller contempler les signes divins (*âyât Allâh*) dans la Création. C'est pourquoi ces savants furent à l'origine de la méthode expérimentale. Ainsi, Jâbir Ibn Hayyân écrivait :

(18) Abd-al-Karîm Al-Jîlî, traduction Titus Burckhardt, *De l'Homme universel*, p. 3, Dervy-Livres, Paris.

«La première chose essentielle en chimie est que tu doives accomplir du travail pratique et mener des expériences, car celui qui n'accomplit pas de travail pratique et ne fait pas d'expériences n'atteindra jamais les derniers degrés de la maîtrise. Mais toi, mon fils, fais des expériences de façon à acquérir la connaissance. Les savants ne se ravissent pas de l'abondance des matériaux ; ils se réjouissent seulement de l'excellence de leurs méthodes expérimentales.»⁽¹⁹⁾

Cependant, contrairement au programme positiviste, les savants musulmans n'excluaient pas les questionnements métaphysiques, qui, comme dans le cas de Jâbir pour l'alchimie, nourrissaient la motivation essentielle de leur recherche. Ils pouvaient aussi accepter l'existence de plusieurs niveaux de réalité. Il est même intéressant de noter que la question de la sous-détermination des théories par l'expérience n'était guère étrangère à leurs réflexions épistémologiques. Ainsi George Saliba remarque, par exemple, que les astronomes arabo-musulmans étaient pleinement conscients que *«toute modélisation mathématique n'a pas par elle-même de sens physique, et qu'elle n'est qu'un langage parmi d'autres pour décrire la réalité physique.»⁽²⁰⁾*

La question de l'atomisme illustre le dialogue entre science et métaphysique. Malgré sa réfutation dans sa version naïve par la Mécanique Quantique et la Théorie quantique des champs, l'atomisme a représenté un passage fructueux dans le développement de la physique moderne, et marque encore les représentations actuelles des physiciens. Or, comme on l'a exposé brièvement, l'atomisme a été initialement conçu pour répondre à un questionnement d'ordre métaphysique : l'appréhension de la complexité du monde des apparences par la découverte des éléments «fondamentaux» dont il est composé (lesquels sont définis de multiples façons). Il est possible que son intégration dans la science arabo-islamique, et donc occidentale par héritage, ait été conditionnée par celle au sein du kalâm. Il est intéressant, à ce propos, de rappeler que, dans le kalâm, la discontinuité du temps, de l'espace et de la matière permet de distinguer chaque «accident» qui est contrôlé par la volonté divine. Dieu recrée les atomes et leurs accidents (c'est-à-dire, leurs propriétés) à chaque instant (*tajdîd al-khalq*). On ne peut donc pas dire que les atomes possèdent en propre leurs accidents. Certes, cette position du kalâm avait déjà ses détracteurs à l'époque, en particulier parmi les philosophes musulmans

(19) *«The first essential in chemistry is that you should perform practical work and conduct experiments, for he who performs not practical work nor makes experiments will never attain to the least degrees of mastery. But you, O my son, do experiment so that you may acquire knowledge. Scientists delight not in abundance of material; they rejoice only in the excellence of their experimental methods.»* Cité par E.J. Holmyard, *Makers of Chemistry*, 1931, Clarendon Press, Oxford, p. 60.

(20) George Saliba, *A History of Arabic Astronomy*, 1995, NYU Press, New York.

d'inspiration aristotélicienne. En tout état de cause, l'absence de propriétés attachées aux atomes oblige les observateurs à «aller voir» dans le monde le résultat de l'«habitude» de Dieu (*la sunnah ou 'âdah*) pour y lire les accidents décidés par Dieu, et saisir la connaissance que Dieu nous transmet par leur intermédiaire. Une telle métaphysique a, bien sûr, constitué une forte incitation à l'observation et à l'expérimentation.

On voit donc que ces caractéristiques générales de l'atomisme du kalâm ne sont pas celles de l'atomisme grec classique, ni celles de l'atomisme moderne tel qu'il apparut dans le projet positiviste et réductionniste. Il est donc intéressant de comparer cette version spécifique de l'atomisme et la façon dont la Mécanique Quantique a, plus tard, retiré aux systèmes microscopiques le fait qu'ils avaient des propriétés qui préexistaient à la mesure.⁽²¹⁾ Ainsi, l'accident «aurait lieu» au moment de l'observation, et le choix de l'état vers lequel se réduirait la fonction d'état serait induit par la volonté divine. Une telle possibilité qui permettrait de comprendre un mode d'action de Dieu dans le monde, tout en étant parfaitement compatible avec les principes de la Mécanique Quantique (puisque rien n'y indique comment la réduction de la fonction d'état se produit), a été envisagée récemment par des physiciens et philosophes théistes.⁽²²⁾ Certains voient la fonction d'onde comme une puissance, au sens de la *matière* aristotélicienne, qui prend sa *forme*, ou sa propriété, par un passage à *l'acte* au moment de la mesure.⁽²³⁾ D'autre part, il existe des théories de grande unification en physique des particules, comme la Gravitation quantique à boucles, qui adoptent la discontinuité de l'espace et du temps comme principe constitutif. Ces théories dépassent ainsi la vision aristotélicienne et cartésienne de l'espace et du temps continus, et retrouvent, par d'autres chemins, certaines intuitions des théologiens musulmans. Comme les physiciens actuels, ces théologiens de l'islam eurent souvent la capacité de dépasser le sens commun, un acte d'audace qui traduisait leur créativité intellectuelle.

Grande Unification et tawhîd

En quoi ces réflexions sur les fondements de la physique contemporaine sont-ils intéressants pour le dialogue entre science et foi ? D'abord parce que l'approfondissement du caractère surprenant de la Mécanique Quantique, au

(21) Pour une telle étude, voir par exemple Karim Meziane, in *Science et religion en islam*, (sous la direction de Abd-al-Haq Guiderdoni), 2012, Albouraq, Paris.

(22) Voir par exemple Robert J. Russell, Philip Clayton, Kirk Weqter-McNelly et John Polkinghorne (sous la direction de) : *Quantum Mechanics: Scientific Perspectives on Divine Action*, Volume 5, 2002, Vatican Observatory and Center for Theology and the Natural Sciences.

(23) Wolfgang Smith, *The Quantum Enigma : Finding the Hidden Key*, 1995, Sherwood Sugden and Company, Peru, Illinois.

cours de ces dernières décennies, a contribué à affaiblir la position du positivisme et du réductionnisme militants, qui prétendaient que la science avait vocation à connaître l'ensemble de la réalité, réduite à une matière dont les propriétés pouvaient être appréhendées par le sens commun (éventuellement à travers un appareillage mathématique élaboré). Nous savons maintenant que ce n'est pas le cas : nous sommes impuissants à expliquer clairement ce qu'est la matière, et les mathématiques auxquelles nous avons recours, comme les symétries, loin de constituer des outils pour mieux comprendre la matière, semblent constituer la définition même de cette matière, sans en élucider la nature. Du même coup, réduire toute la réalité (y compris la vie et l'intelligence) à de simples phénomènes matériels de nature physico-chimique paraît un peu hasardeux, puisque la définition même de la matière implique aujourd'hui un débat savant sur des concepts théoriques subtils, et même sur des options métaphysiques. Le réductionnisme s'enferme donc dans une sorte d'argument circulaire, au moins quand il s'affirme de façon *ontologique* (c'est-à-dire quand il prétend expliquer l'être). Cela n'empêche pas, évidemment, les grands succès du réductionnisme *méthodologique*, parce que décomposer un système complexe en ses constituants demeure l'une des façons de comprendre les choses, pourvu que cette analyse n'oublie pas l'opération inverse, qui est la synthèse.

La perspective de l'islam est fondée sur le *tawhîd*, l'affirmation de l'unicité de Dieu, et, en conséquence de cette affirmation, sur l'effort d'unification qui doit être mené par chaque croyant, en lui-même, dans la communauté musulmane (et, au-delà, dans toute l'humanité), et enfin dans le monde, par la contemplation des signes de Dieu (*âyat Allâh*) qui doivent être reconduits à la connaissance de Dieu. Les musulmans attestent fermement que le monde qu'ils voient prend son sens par rapport à son Créateur, qui en est l'origine et le terme métaphysiques (*Al-Awwal wa-l-Âkhir*). Cela signifie que tout dans le monde est interdépendant, puisque tout y est fondamentalement dépendant de Dieu, qui ne cesse de créer le monde à chaque instant, dans le renouvellement de la création (*tajdîd al-khalq*). Des aspects de la Mécanique Quantique comme la contextualité ou la non-localité ne posent pas de problème à cette vision du monde qui professe l'unité fondamentale de celui-ci et la présence permanente de Dieu, alors qu'ils heurtent une autre vision, née en Occident à la Renaissance et surtout au XVII^{ème} siècle, celle d'un monde séparé de Dieu, et peuplé de systèmes comme les atomes et les groupes d'atomes, clos et refermés sur eux-mêmes, et ontologiquement suffisants après un seul acte initial de création, voire sans acte de création du tout.

Il y a débat actuellement entre les penseurs musulmans pour savoir dans quelle mesure le programme moderne d'unification des particules et interactions fondamentales, vers une théorie globale dite de «Grande Unification», peut

entrer en résonance avec la démarche du *tawhîd*.⁽²⁴⁾ Il est incontestable que la découverte par la physique de l'unité sous-jacente du monde, derrière la multitude des phénomènes, et de l'intelligibilité associée aux lois de la nature qui régissent cette unité, est un support de contemplation pour le scientifique croyant, comme pour le croyant qui s'intéresse aux sciences. Le fait que la nature soit régie par un nombre si restreint de principes doit faire grandir l'émerveillement devant les œuvres du Créateur, au même titre que les vastes étendues d'espace, ou les grandes durées de temps, qui sont dévoilées par l'astronomie, la géophysique ou la biologie. Mais avons-nous vraiment la garantie que l'ensemble du monde soit vraiment intelligible par les menées de la raison (même aidée de mathématiques sophistiquées) et de l'observation (même aidée par les accélérateurs de particules, les microscopes et les télescopes) ? Si le monde physique est, comme l'atteste la tradition islamique, plongé dans une création plus vaste, avec une hiérarchie de plans ou de niveaux d'existence plus ou moins proches de Dieu, le programme de la physique ne pourra jamais aboutir et sera, par là même, une quête sans fin.

Selon cette dernière perspective, la science de la nature ne serait qu'une première étape de la contemplation, qui resterait bien insuffisante pour l'accès à la connaissance métaphysique laquelle nécessiterait des facultés d'un autre ordre, celles de la «vision intérieure» (*al-baṣīrah*) et du «goût» (*dhawq*). Cela pourrait offrir l'une des voies possibles à la question essentielle du sens, ou des sens, que l'on pourrait attribuer à la science «profane-». Tout ce qui est, vivant ou inanimé, n'est-il pas habité par le souffle divin, et ne se trouve-t-il pas être un symbole de réalités métaphysiques ? Ainsi, le mot «profane» ne devrait pas vraiment avoir de place. «Dieu n'a pas de gêne à prendre comme symbole un moustique.»⁽²⁵⁾ Chaque entité est un lieu de manifestation des noms divins, et porte des qualités qui ne sauraient être réduites à la pure quantité. Tout en évitant le piège du concordisme, ne serait-il pas possible, dans cette quête de sens, de donner place aux *convergences* ? La mélodie céleste des versets du livre coranique chante les versets du livre cosmique, appelant à la contemplation et à la pénétration de leurs mystères symboliques. On peut se poser la question de savoir s'il est possible de réinsérer la science, malgré son insuffisance et sa relativité, dans une ontologie holistique⁽²⁶⁾ ; ce qui nécessiterait sans doute de dépasser sa rationalité

(24) Voir, par exemple, deux positions antagonistes sur les relations entre le *tawhîd* et le programme d'unification de la physique contemporaine : Jamal Mimouni d'une part, Abdalhak Hamza d'autre part, dans *Science et religion en Islam*, (sous la direction de Abdal-Haq Guiderdoni), 2012, Albouraq, Paris.

(25) Coran 2:26.

(26) C'est-à-dire, expliquant les parties à partir du tout, contrairement au réductionnisme qui explique le tout à partir des parties.

«ratiocinante»⁽²⁷⁾ par des moyens se situant hors de sa portée, mais pas de la nôtre, car nous ne sommes pas uniquement notre raison. Au vu des impasses où la physique moderne se trouve enfermée pour saisir le «réel», ou pour en éclairer la nature, ne serait-il pas légitime d'y voir la nécessité d'une voie vers une connaissance bien plus édifiante ?

(27) C'est la rationalité abusant d'elle-même, et enfermée dans ses opérations algorithmiques, comme une machine de calcul.

Chapitre 4

L'histoire du cosmos

Nabila Aghanim

Depuis toujours, l'homme a été fasciné par le ciel nocturne, où il chercha à déchiffrer le mouvement apparent des planètes, des étoiles, de la lune et du soleil, y projetant croyances, craintes et espoirs. Il n'est donc pas étonnant que les premiers développements de la science se soient dirigés vers le ciel, donnant naissance à l'astronomie. Nos télescopes sont les lointains descendants de cette aventure scientifique construite pour comprendre et explorer l'univers. Cette révolution astronomique a bouleversé la pensée humaine, car elle a profondément modifié notre représentation du monde, désormais pensé comme un univers observable et explorable. Quelles sont les étapes de cette révolution, et quelle signification peut-on y trouver dans le cadre du dialogue entre science et religion ?

La naissance de la cosmologie moderne : du monde clos à l'univers infini

Du monde médiéval à l'époque moderne

L'idée selon laquelle les astres étaient placés sur des sphères de cristal, donc matérielles, dans un univers clos et fini avec pour centre la Terre, date d'Aristote (384-322 av. J.C.). Ptolémée (90-168), et peut-être Hipparque (190-120 av. J.C.) avant lui, imaginent, quant à eux, les astres «nageant» dans un «fluide» proche de la notion du vide. Les astronomes grecs, tels Hipparque, avaient intégré dans des modèles géométriques les observations des babyloniens (positions des astres, éclipses, etc). Les sphères emboîtées («déférents» et «épicycles») qui sont requises dans ces modèles permettent de calculer les mouvements des astres. Dans son traité, l'Almageste, Ptolémée reprend ces modèles astronomiques et les perfectionne. Cet ouvrage fondamental de l'astronomie de l'Antiquité est parvenu en Europe via les traductions et corrections faites dans le monde arabo-musulman, et y prévaudra durant tout le Moyen Âge.

Pendant des siècles, l'astronomie se développe peu en Europe, alors qu'elle est florissante dans le monde arabe. Le modèle de Ptolémée y est adopté, mais aussi modifié en profondeur (notamment, à Damas, par Ibn al-Shatir, 1304-1375), pour satisfaire les besoins des astrologues et des navigateurs puis des astronomes. L'astronomie ne progressa plus réellement jusqu'à ce que les progrès des instruments d'observation, et la théorie élaborée par Copernic (1473-1543),

Kepler (1571-1630) et Galilée (1564-1642), n'entraînent l'abandon définitif du modèle géocentrique de Ptolémée pendant le XVII^{ème} siècle.

L'astronomie moderne marque la transition entre un univers clos aristotélicien centré sur la Terre, et un espace agrandi, dans lequel la Terre n'occupe plus la place centrale. Elle est basée sur un ensemble de découvertes, étalées sur environ un siècle. En 1543, Nicolas Copernic publie *De Revolutionibus orbium coelestis* dans lequel il remplace, au centre du monde, la Terre par le Soleil. Ainsi, ce n'est pas l'univers qui tourne autour de la Terre, mais bien la Terre qui tourne sur elle-même et autour du Soleil. En 1572, une étoile nouvelle⁽¹⁾ apparaît dans le ciel, dans la constellation de Cassiopée, et est observée par Tycho Brahé (1546-1601). Ce phénomène jette le doute sur l'immutabilité des étoiles. En 1600, Giordano Bruno (1548-1600), grand défenseur de Copernic, est condamné au bûcher par l'Inquisition catholique pour avoir affirmé que l'espace est infini et qu'il contient une infinité de mondes. En 1609, Johannes Kepler analyse les observations planétaires de Tycho Brahé, dont il est l'assistant, et remplace les trajectoires circulaires «parfaites» des planètes par des ellipses dont le Soleil occupe l'un des foyers ; c'est la première loi de Kepler. La deuxième loi met fin au mouvement uniforme des planètes, en montrant que la vitesse n'est pas constante le long de l'orbite. La troisième loi, découverte en 1618, offre la possibilité de comparer les mouvements de différentes planètes. La publication des trois lois de Kepler, en 1609 et 1619, marque le début de l'astronomie moderne. Enfin, en 1610, Galilée révolutionne à nouveau l'astronomie, en utilisant une lunette grossissante le ciel. Il observe les phases de Venus, les cratères lunaires, les taches et la rotation du soleil, et les satellites de Jupiter.

Du point de vue de la physique, la révolution copernico-galiléenne jette les fondements des lois du mouvement planétaire marquant ainsi la naissance de la *mécanique*. Galilée montre en effet que la vitesse d'un corps en chute libre augmente proportionnellement au temps, quand le frottement de l'air est négligeable (c'est donc l'accélération, la variation de vitesse par unité de temps, qui est constante). Galilée pressent aussi la loi de composition des vitesses qui permet de comparer des mouvements mesurés par des observateurs en mouvement l'un par rapport à l'autre.

(1) C'est une explosion de supernova, dernier stade de la vie d'une étoile massive se caractérisant par une grande luminosité dans un très bref laps de temps.

La physique newtonienne

C'est finalement à Isaac Newton (1642-1727) que l'on doit la formulation définitive des lois du mouvement des corps. Ces lois reprennent les acquis galiléens, et y ajoutent une définition de la force. Pour Newton, la force est la cause du changement du mouvement. Dans cette loi, la deuxième des trois lois de Newton, l'écart au mouvement rectiligne à vitesse constante, fournit une mesure directe de la force. Ainsi le mouvement continuellement accéléré, celui que Galilée avait observé dans la chute des corps, peut s'interpréter comme le résultat d'une force constante qui change continuellement le mouvement. La définition newtonienne de la force donne au concept de force un caractère universel permettant ainsi à la mécanique terrestre, celle de Galilée, de rencontrer la mécanique céleste, celle de Kepler. Newton renouvelle les mathématiques, la physique et l'astronomie de son époque. Sa théorie de la lumière constitue la première théorie moderne où il attribue à la lumière une structure corpusculaire, contrairement à Huygens qui favorise l'explication ondulatoire (1629-1695). Toutes ces découvertes lui permettent de publier en 1687 son œuvre maîtresse, les *Philosophiae naturalis principia mathematica*, dans laquelle est exposée sa théorie de l'attraction universelle, unifiant physiques céleste et terrestre. La révolution newtonienne, avec son espace infini absolu et son temps éternel dans lequel se déplacent les astres soumis à l'attraction universelle, marque, du point de vue de la physique, les principes fondamentaux de la dynamique et la définition des forces. La théorie newtonienne règnera incontestée jusqu'au début du XX^{ème} siècle, avant la révolution relativiste.

Des travaux de Newton et de Kepler, naît la mécanique céleste qui permet la prévision mathématique des mouvements des astres, en particulier les objets du système solaire, sous l'action de la gravitation. Au-delà de l'astronomie, la mécanique est le domaine de tout ce qui produit ou transmet un mouvement, une force, ou une déformation et l'on retrouve donc ses applications à tous les niveaux (moteurs, poulies, courroies, etc).

La révolution relativiste

La révolution relativiste, à savoir la découverte de l'expansion de l'univers et la reconnaissance de l'évolution de l'univers à partir d'une *singularité*, se fonde sur la théorie de la Relativité générale d'Albert Einstein (1879-1955), publiée entre 1915 et 1919. Cette dernière modifie les concepts d'espace, de temps, de lumière et de gravitation. Par delà cette dimension physique, la révolution relativiste transforme l'univers en un système physique comme un autre, soumis aux lois de la physique et confronté aux observations expérimentales. La Relativité

restreinte, en réunissant le concept de référentiel galiléen/inertiel et l'invariance de la vitesse de la lumière, postule que les lois de la physique sont les mêmes pour les observateurs dans différents référentiels. Elle conduit à redéfinir espace et temps, et à poser l'équivalence entre masse et énergie. D'un point de vue philosophique, la Relativité restreinte élimine la notion d'un temps et de durées absolus dans l'ensemble de l'univers. Néanmoins le plus grand bouleversement dû à la Relativité restreinte tient à la nécessité de reformuler la gravitation, car cette force est instantanée dans le cadre newtonien, alors qu'en Relativité restreinte aucune information ne peut voyager plus vite que la vitesse de la lumière. La théorie de la Relativité *générale* qui répond à cette nécessité de reformulation de la gravité, énonce notamment que la gravitation n'est pas une force, mais la manifestation de la *courbure* de l'espace-temps, courbure produite par la distribution de l'énergie et de la masse. Les impacts de la Relativité sont très divers. Cette théorie intervient dans l'électromagnétisme, dans la mesure des trajectoires des sondes spatiales, dans le GPS. Elle est aussi à la base de la physique nucléaire.

L'univers des galaxies

L'expansion de l'univers

Les grands télescopes, la photographie et les méthodes d'analyse statistique dont disposaient les astronomes au début du vingtième siècle avaient apporté la preuve, vers 1920, que notre Galaxie (la Voie Lactée) est un amas d'étoiles en forme de disque, plus aplati au bord qu'au centre, et dont le soleil fait partie, y occupant une place quelconque. Le monde stellaire n'occupe donc qu'un domaine borné, comme une île dans l'univers. Le «Grand Débat» oppose alors les défenseurs des «univers îles» comme Heber Curtis (1872-1942), selon lesquels les «nébuleuses stellaires»⁽²⁾ observées dans le ciel sont d'autres galaxies similaires à la nôtre (hypothèse proposée par Emmanuel Kant (1724-1804) au XVIII^{ème} siècle), et les adversaires d'une telle conception, tels Harlow Shapley (1885-1972). C'est à la fin de 1923 que Edwin P. Hubble (1889-1953), grâce au télescope du Mont Wilson, apporta la preuve que les nébuleuses stellaires étaient des galaxies comme la nôtre, en identifiant, dans une série de photographies de la spirale Andromède, l'image certaine d'une étoile de type bien connu dans notre galaxie et dans les nuages de Magellan (deux petites «nébuleuses stellaires» qui

(2) C'est-à-dire les «nuages» composés d'étoiles, à ne pas confondre avec les nébuleuses gazeuses.

seront plus tard identifiées comme deux petites galaxies orbitant autour de la nôtre), une géante de la classe des Céphéides⁽³⁾. Cette étoile, et *a fortiori* la spirale d'Andromède, se trouvait à plusieurs centaines de milliers d'années-lumière⁽⁴⁾ du Soleil, bien au delà des "frontières" de notre galaxie. Cette découverte ouvrit les portes de l'exploration intellectuelle de l'univers extragalactique, et modifia radicalement la vision qu'on avait alors de la taille de l'univers observable.

Au-delà de la découverte de l'existence de galaxies en dehors de la nôtre, un second bouleversement majeur est la loi d'expansion de Hubble. Les fondements de cette découverte remontent à 1917. En étudiant les spectres émis par les galaxies (à l'époque, encore considérées comme des nébuleuses), Vesto Slipher (1875-1969) remarqua un allongement des longueurs d'onde de la lumière émise ou absorbée par différents éléments chimiques, par rapport à celles mesurées en laboratoire. Cet allongement fut interprété à partir des travaux théoriques menés dès 1922 par Alexandre Friedmann (1888-1925), comme un «effet Doppler»⁽⁵⁾ résultant de la composante radiale du déplacement de la source de lumière par rapport à l'observateur. En 1927, Georges Lemaître (1894-1966) arriva à la conclusion que l'univers n'était pas statique, mais en expansion. Les galaxies entraînées par l'expansion de l'univers s'éloignent les unes des autres, à une vitesse proportionnelle à leur distance les unes des autres. La preuve observationnelle de l'expansion fut apportée en 1929 par Hubble qui confirma les travaux de Slipher. Les spectres des galaxies montrent systématiquement un «décalage vers le rouge» (en anglais : *redshift*), preuve de leur éloignement de notre Galaxie. Hubble montra alors que la récession des galaxies est proportionnelle à leur distance (la fameuse loi de Hubble).

L'univers apparaît donc comme formé d'un grand nombre de galaxies qui deviennent ainsi comme les éléments cosmiques «de base», l'ensemble des galaxies présentant sur la sphère céleste une apparence isotrope c'est-à-dire qu'aucune direction n'est privilégiée. Les galaxies sont distribuées de façon uniforme, c'est-à-dire que l'ensemble des galaxies est partout identique, qu'il n'y a donc pas de centre privilégié. Le Soleil et la Terre y occupent une position quelconque⁽⁶⁾. Cette

(3) Les Céphéides, étoiles variables avec une période très régulière, indiquent la luminosité intrinsèque. En mesurant le flux lumineux qui arrive sur Terre, on peut donc estimer la distance de ces étoiles.

(4) Une année-lumière est la distance parcourue par la lumière en une année, soit environ 10 000 milliards de kilomètres.

(5) L'effet Doppler touche toutes les ondes émises par un corps en mouvement : la longueur d'onde reçue est plus petite que celle émise si le corps se rapproche de l'observateur, elle est plus grande si le corps s'en éloigne.

(6) Cette homogénéité n'est toutefois vraie qu'aux grandes échelles cosmiques. Aux plus petites échelles, les galaxies se regroupent en amas de galaxies.

homogénéité géométrique n'exclut pas une diversité des propriétés physiques ou observationnelles des galaxies.

La révolution de la cosmologie physique moderne est sous-tendue, d'une part par l'hypothèse d'homogénéité et d'isotropie (ou le Principe cosmologique), et, d'autre part, par la possibilité d'une représentation mathématique de l'univers dans son ensemble. Cette révolution, rendue possible grâce à la théorie de la Relativité générale, a pour toile de fond le caractère évolutif et mouvant de l'univers, attesté par l'observation de l'éloignement des galaxies. A cette même époque, vers la fin des années 1930, les progrès en physique nucléaire et leurs applications dans le cadre de la synthèse des éléments au sein des étoiles jettent les premiers ponts entre l'infiniment petit et l'infiniment grand. Plus tard, le modèle cosmologique standard se basera, d'un point de vue théorique, sur la Mécanique Quantique pour proposer une cosmogonie physique et décrire les premiers instants de l'univers.

Le modèle du Big Bang : l'univers a une histoire

Le paradigme du *Big Bang* communément admis aujourd'hui, et à la base du modèle cosmologique standard des physiciens et astrophysiciens, est une construction qui s'est élaborée au cours d'un siècle, sur la base d'observations astronomiques et d'avancées, voire de révolutions, en physique. En vérité, c'est en 1915, avec la théorie de la Relativité générale d'Einstein permettant pour la première fois de considérer l'univers dans son ensemble en tant qu'objet d'étude, que sont posés les fondements de la cosmologie moderne, ou cosmologie physique. Deux ans plus tard, commence à poindre pour ainsi dire le *Big Bang* : A. Einstein étudie, dans *Considérations cosmologiques sur la théorie de la relativité générale*, le lien entre gravité et propriétés de l'univers. Pour cela, il faut supposer l'homogénéité de l'univers c'est-à-dire que celui-ci est, à un temps donné, partout identique dans sa forme et dans sa composition. Le Principe cosmologique implique aussi que les lois de la physique sont les mêmes en tout point de l'espace et du temps.

L'idée d'*évolution* globale de l'univers, au cœur du futur scénario du *Big Bang*, fait son apparition dès la fin des années 1920, même si elle reste encore peu confortée par des observations astronomiques. Ce n'est que vers 1931 que le scénario du *Big Bang* est réellement introduit par Lemaître. Ce dernier extrapole l'idée d'expansion, non plus dans l'espace pour expliquer les décalages spectraux des galaxies, mais dans le temps et plus précisément dans le passé. Il propose l'idée d'un "atome primitif" pour symboliser le moment où l'expansion de l'espace a "débuté". Les métaphores et les images pour décrire ce "début" de

l'univers poussent l'un des plus farouches *détracteurs* de cet univers qui évolue, le physicien Fred Hoyle (1915-2001), à employer pour la première fois, lors d'une émission radio, le terme "Big Bang", en ironisant sur l'idée selon laquelle l'univers a été plus condensé par le passé. Selon lui l'univers est «stationnaire», avec une expansion certes observée, mais compensée par l'apparition continue de matière en tout point.

Le triomphe du modèle du Big Bang

Dès les années 1940, les astronomes, grâce à la mesure des spectres d'objets astronomiques, font un pas de plus vers la caractérisation physique de l'univers dans son ensemble, en mesurant sa composition chimique. Ils constatent que l'hydrogène est prédominant, et représente, en masse, environ 75% du mélange cosmique. Ils constatent aussi la présence de grandes quantités d'hélium (environ 25%), et seulement des «traces» d'éléments plus lourds. En 1948, George Gamow (1904-1968) et Ralph Alpher (1921-2007) proposent que l'hydrogène et surtout l'hélium, ont été fabriqués lors d'une "nucléosynthèse primordiale" survenue au moment du Big Bang, lorsque l'univers était extrêmement dense et chaud. L'existence de cette phase chaude et dense, nécessaire à la fabrication de l'hydrogène et de l'hélium, implique celle d'un rayonnement lumineux réparti uniformément sur la route céleste. Gamow prédit donc qu'il existe un «rayonnement fossile» de quelques degrés kelvin⁽⁷⁾ autour de nous. La température d'un rayonnement mesure celle du corps parfaitement absorbant et émetteur qui serait en équilibre avec lui : c'est le rayonnement (paradoxalement) appelé «de corps noir». Par exemple, la surface du soleil émet à une température de 5800 degrés kelvin.

C'est en 1965, en réglant leur antenne radio des Bell Telecom, qu'Arno Penzias (1933-) et Robert Wilson (1936-) mesurent un excès de signal isotrope, avec la même intensité quelle que soit la direction. Ils n'arrivent pas à interpréter leur mesure. A deux pas de là, au Massachusetts Institute of Technology, des physiciens tentent, depuis quelques années, de mesurer le fond de rayonnement cosmique de quelques degrés kelvin prédit par Gamow comme le reliquat de la phase dense et chaude ayant suivi le *Big Bang*. Le «bruit de fond» détecté par Penzias et Wilson, à trois degrés kelvin, n'est autre que le signal du rayonnement fossile tant recherché par les physiciens. Ce rayonnement «uniforme» baignant l'ensemble de la voûte céleste ne peut s'expliquer que s'il y a eu un moment dans le passé de l'univers où l'équilibre thermodynamique était parfait, et où la matière et le rayonnement avaient des températures identiques. Pour s'assurer de la nature "cosmologique" du

(7) Le degré kelvin est une mesure de température à partir du zéro absolu, qui correspond à -273.15 degrés Celsius.

rayonnement mesuré par Penzias et Wilson, il faut donc en mesurer le spectre d'émission, et s'assurer que c'est bien celui d'un corps noir.⁽⁸⁾

Une succession d'expériences embarquées sur des ballons, ou au foyer des télescopes au sol, tentent alors, durant de nombreuses années et dans le monde entier, d'effectuer cette mesure. Ce n'est qu'avec le lancement, en 1990, du satellite de la NASA *Cosmic Background Explorer* (COBE) et la publication de ses résultats en 1992, qu'on obtient la preuve définitive et irréfutable de la nature de corps noir de l'émission du rayonnement fossile. Le spectre mesuré par COBE s'accorde en effet, à 1/100000^{ème} près, avec celui d'un corps noir à une température de 2.728 degrés kelvin. Un tel spectre suggère fortement que, dans le passé, l'univers a connu un moment extrêmement dense et chaud, comme c'est prédit par le modèle du *Big Bang*. L'observation du rayonnement fossile, par ce fait, est la preuve la plus convaincante de ce *Big Bang*, et a imposé sa victoire sur ses concurrents, comme le modèle stationnaire de Hoyle.

L'un des résultats marquant de COBE est sa mesure de la température du rayonnement fossile dans toutes les directions du ciel, qui montre qu'un certain degré d'inhomogénéité existe : des zones du ciel ont des brillances ou températures différentes de la moyenne. Ces faibles inhomogénéités de température, d'environ 1/100000^{ème} de la température moyenne, ont des tailles angulaires de l'ordre de la dizaine de degrés (20 fois la taille de la pleine lune). Elles doivent être reliées aussi bien aux germes ayant donné naissance aux galaxies, qu'aux processus physiques dans l'univers primordial. Pour en avoir le cœur net, et pour comprendre encore mieux l'univers, une série d'expériences spatiales, au sol ou embarquées sur des ballons stratosphériques, se sont attachées, durant les quinze dernières années, à observer le rayonnement fossile avec des précisions et des sensibilités grandissantes. En 2009, le satellite Planck de l'ESA (Agence Spatiale Européenne) a été lancé pour effectuer la mesure ultime de ces inhomogénéités. Toutes les expériences fournissent une image d'une précision inégalée du rayonnement fossile.

Les premiers instants de l'univers

A partir de ces mesures, les avancées théoriques lèvent un peu le voile sur l'origine des inhomogénéités de température mesurées avec COBE. Les scientifiques s'accordent aujourd'hui à penser qu'elle est liée aux premiers instants de l'univers : l'inflation. En 1970, Stephen Hawking (1942-) et Roger Penrose (1931-) stipulent que le *Big Bang* est issu d'une courbure infinie de

(8) Un système physique, ici l'univers, coupé de toute influence extérieure peut être caractérisé par l'étude de sa température rayonnée. On parle alors de rayonnement de corps noir.

l'espace-temps appelée singularité gravitationnelle, qu'on retrouve aussi au cœur des trous noirs.⁽⁹⁾ Une dizaine d'années plus tard, Alan Guth (1947-) suggère qu'environ 10^{-35} seconde après le *Big Bang*, l'univers est dominé par l'énergie du vide quantique.⁽¹⁰⁾ Ce vide possède un effet répulsif foudroyant, qui induit une expansion exponentielle, *l'inflation cosmique*, permettant de multiplier la taille de l'univers par un facteur 10^{30} environ. L'inflation produit, à partir des fluctuations du vide quantique, et donc de façon naturelle, des perturbations de matière, ou "germes", qui sont amplifiées, et à partir desquelles les galaxies vont pouvoir se former. Les inhomogénéités de température, observées par COBE et par les expériences qui ont suivi, sont les traces lumineuses de ces perturbations de matière permettant d'enclencher le processus de formation des galaxies.

Une question se pose naturellement : qu'y avait-il avant le *Big Bang* ? Les physiciens en sont réduits aux spéculations. Tous les modèles du *Big Bang*, comme l'ont montré Hawking et Penrose dans les années 1970, parviennent à une singularité, c'est-à-dire à un événement indescriptible par la physique actuelle, car toutes les grandeurs physiques et géométriques présentent des termes infinis. Certains chercheurs, comme Gabriele Veneziano (1942-), proposent néanmoins qu'au niveau de la singularité, la notion d'espace disparaît, mais pas celle de temps. Sur cette base, la Théorie des cordes propose alors une notion de surface multi-dimensionnelle analogue à une membrane, sur laquelle sont fixées les cordes modélisant les particules. Notre univers perceptible et observable, à quatre dimensions (trois d'espace, une de temps), serait donc plongé dans un univers multi-dimensionnel. La phase d'inflation est alors remplacée par la collision de deux surfaces multi-dimensionnelles pouvant donner lieu à un «Big Bang». Selon une autre approche proposée par Andrei Linde (1948-), l'univers lui-même serait né d'une fluctuation du vide quantique. Cette fluctuation aurait donné naissance à une «bulle» formant notre espace-temps. D'autres espaces-temps auraient pu se former, avec d'autres constantes physiques et donc d'autres évolutions possibles. C'est ainsi qu'émerge l'idée d'un *multivers* composé d'un très grand nombre, voire d'une infinité, d'univers.

Ces propositions sont intellectuellement attractives. Néanmoins, il faut être à même de développer à nouveau, dans ces nouveaux contextes qui sont proposés

(9) Un trou noir est un astre si dense que même la lumière est incapable de s'en échapper. L'existence des trous noirs est prédite par la Relativité générale, et observée «indirectement» par les astronomes.

(10) Ce vide en physique ne correspond pas au néant. Des particules et antiparticules y apparaissent et s'y désintègrent constamment, et correspondent à des fluctuations de la densité d'énergie.

par les théoriciens, un modèle cosmologique complet, capable d'aboutir aux objets astrophysiques que nous observons pour au moins l'un des univers «bulle», le nôtre. Il est aussi nécessaire d'avoir des prédictions observationnelles dont on peut vérifier l'exactitude, et qui seraient donc des preuves ou des réfutations de ces théories.

3. La formation des structures

La formation des galaxies et l'évolution cosmique

Le cadre standard de la cosmologie moderne propose donc une origine aux perturbations de matière, l'inflation, liée aux premiers instants de l'univers. Au fur et à mesure que l'univers évolue, sous l'effet de la gravité, les petites perturbations initiales de densité attirent la matière qui se trouve autour d'elles et croissent. Les perturbations de matière grandissent par fusions successives, et s'organisent sous la forme de filaments, voire d'un réseau cosmique complexe. Ce réseau est construit essentiellement à partir d'une trame constituée d'un matériau inconnu qui ne se manifeste que par sa gravité, et qui représente 23% du contenu de l'univers : la matière noire. Par ailleurs, une «énergie noire» ayant un effet répulsif similaire à celui de l'inflation, mais beaucoup plus faible, et constituant environ 75% du contenu de l'univers, étire l'espace et affecte l'évolution du réseau cosmique, et donc la formation des structures. Les galaxies et les amas de galaxies, constitués pour leur part des 2% de matière «ordinaire», se forment au sein de ce réseau, dans les filaments ou à leurs intersections. En effet, lorsqu'elles sont assez denses, les perturbations de matière produisent en leur sein les premières étoiles pour donner naissance aux toutes premières galaxies qui continuent leur évolution sous la forme des structures cosmiques (galaxies, amas de galaxies, etc.) que nous connaissons et observons aujourd'hui.

Les chercheurs tentent de visualiser le réseau de filaments de matière noire, en observant comment les galaxies se distribuent dans l'espace (et dans le temps), ou comment la gravité induite par la matière noire dans les filaments courbe les rayons lumineux des galaxies distantes, et distord leurs images. Cette distorsion est appelée «effet de lentille gravitationnelle faible»⁽¹¹⁾. A cause de cet effet, les images distordues des galaxies ont tendance à s'aligner, et l'on peut donc, en analysant cet alignement, visualiser l'effet des accumulations de matière noire, puis en calculer les propriétés et leurs variations sous l'effet de l'énergie noire.

(11) Cet effet faible est à distinguer de l'effet de lentille gravitationnelle fort, induit par les concentrations de matière noire, par exemple dans les amas de galaxies. Les déformations des images produisent des motifs aussi impressionnants que les «arcs gravitationnels».

Cette technique, appliquée aujourd'hui à des zones du ciel relativement peu étendues, qui sont observées, par exemple depuis le télescope Canada-France-Hawaii ou depuis le télescope spatial Hubble, a déjà donné des résultats inédits sur l'énergie noire. A l'avenir, des zones de plus en plus étendues du ciel seront observées, jusqu'à ce que le futur satellite *Euclid* de l'ESA effectue une cartographie complète des galaxies dans le domaine visible et infrarouge, pour mesurer, en même temps, la distribution des galaxies et l'effet de lentille gravitationnelle faible.

Néanmoins, le fait d'observer et de compter les galaxies ou les amas de galaxies ne révèle qu'une faible partie de la quantité de matière ordinaire dans l'univers. La grande majorité est en effet sous la forme de nuages peu denses de gaz neutre ou ionisé, que les astronomes traquent pour compléter leur comptabilité cosmique. Les gigantesques nuages neutres peuvent être observés et étudiés en regardant dans la direction de quasars.⁽¹²⁾ Une partie de la lumière que ceux-ci émettent est absorbée par les nuages neutres, ce qui produit des raies d'absorption dans le spectre reçu. La longueur d'onde de ces raies révèle le décalage spectral, donc la distance, du nuage de gaz, la largeur des raies indique sa température, et la profondeur des raies renseigne sur la quantité de gaz dans le nuage. Encore plus tôt dans l'histoire de la formation des structures, les atomes d'hydrogène émettent des ondes radio à la longueur d'onde de 21cm, décalée vers le rouge. Ce rayonnement, lorsqu'il sera mesuré par le futur radiotélescope SKA (*Square Kilometer Array*), permettra de mesurer la répartition de l'hydrogène neutre, réservoir de la formation des étoiles, quand l'univers avait moins d'un milliard d'années, à l'époque de la formation des toute premières étoiles.

Au-delà de cette description simple des «grandes lignes» de la formation des structures cosmiques (galaxies et amas) à partir de perturbations initiales produites durant l'inflation, de nombreuses questions fondamentales restent posées : comment se forment les premières étoiles qui définissent par là même les galaxies ? Quelles sont les conditions nécessaires à la transformation d'un assemblage de matière noire en assemblage de galaxies ? Comment les galaxies interagissent-elles entre elles et quels sont les effets de ces interactions ? Les réponses à ces questions passent par la reconstitution du réseau cosmique du plus proche au plus lointain (c'est-à-dire, du présent au passé) par la cartographie des galaxies et des amas à différentes longueurs d'onde. Elles requièrent aussi l'étude

(12) Un quasar est un phénomène d'émission très intense, concentrée dans une petite zone au centre d'une galaxie. Il est produit par l'existence d'un trou noir, un astre si dense que sa gravitation empêche même la lumière de s'échapper. La matière environnante (étoiles, nuages de gaz) qui tombe dans le trou noir est chauffée à des très hautes températures et rayonne donc fortement avant d'être engloutie.

détaillée des galaxies qui nous sont les plus accessibles, à commencer par la nôtre. Pour finir, les simulations numériques sophistiquées permettent de reconstituer une partie de l'histoire de la formation des galaxies et des amas de galaxies, et jouent le rôle de véritables «laboratoires virtuels» pour tester les différentes hypothèses physiques.

L'ensemble de ces découvertes sur l'expansion, le refroidissement et la structuration de l'univers, et sur la formation des galaxies contribue à écrire un scénario global d'une *évolution cosmique*. La mesure fine de l'expansion de l'univers permet de déduire l'âge de cette phase : 13.7 milliards d'années. Les premières étoiles se sont formées quelques centaines de millions d'années après le Big Bang, et des galaxies sont déjà en place moins d'un milliard d'années après celui-ci. Un point très important de la cosmologie physique est constitué par notre capacité à tester cette évolution par les observations. En effet, en raison de la vitesse finie de propagation de la lumière, regarder loin, c'est regarder dans le passé. Les sondages profonds permettent d'observer les galaxies telles qu'elles étaient il y a 1, 5, 10 milliards d'années, au moment où leur lumière a été émise, et ces galaxies sont bien différentes des galaxies proches actuelles, parce qu'elles apparaissent beaucoup plus jeunes. Les régions de l'univers qui sont suffisamment proches de nous pour que la lumière qu'elles ont émise ait eu le temps de nous parvenir depuis 13.7 milliards d'années, constituent l'univers *observable*, qui est fini : c'est une sphère dont nous sommes le centre, et qui est limitée par notre *horizon cosmologique*, mais toute autre galaxie a aussi son univers observable autour d'elle. Les sondages profonds, notamment ceux effectués par le *Hubble Space Telescope* de la NASA et de l'ESA depuis 1995, montrent que l'univers observable contient environ 100 milliards de galaxies, chaque galaxie contenant environ 100 milliards d'étoiles. Il y a sans aucun doute de nombreuses galaxies au-delà de l'horizon cosmologique, mais elles sont, par définition, inobservables.

La formation des étoiles et des planètes

Dans ce contexte, comprendre comment naissent les étoiles est un élément clef, car les étoiles sont les briques de base des galaxies. La compréhension de la genèse des étoiles et de leurs systèmes planétaires nous renseigne aussi, et surtout, sur l'histoire du Système solaire, et sur la chimie primitive lors de la formation de la Terre. Pour étudier la formation des systèmes planétaire, deux approches sont combinées : d'une part, «remonter le temps» en utilisant des modèles d'évolution physico-chimique, pour en déduire, à partir des abondances des éléments chimiques dans le système solaire, les conditions de sa formation, et, d'autre part, observer des systèmes stellaires et planétaires à différents stades

de leur évolution, afin de déduire quels types de systèmes en formation aboutissent à des systèmes planétaires comparables au nôtre. Malgré les importants progrès en simulation numérique et en observations, la formation des étoiles et de leurs systèmes planétaires reste une question ouverte. Les processus en jeu sont nombreux et complexes, et certains phénomènes clefs ne sont pas encore maîtrisés, tels la turbulence, ou l'influence des champs magnétiques. D'autres processus, bien que mieux compris, ne sont pas encore accessibles dans toute leur complexité aux ordinateurs actuels. Enfin, les plus proches régions stellaires de formation se situent à une distance typique 300 années-lumière, ce qui rend difficile l'observation directe des étoiles jeunes et de leur environnement proche.

L'étude de la formation stellaire, sous sa forme moderne, est récente, mais les idées principales remontent au XVII^{ème} siècle. René Descartes (1596-1650) dans le *Traité du monde et de la lumière* (publié en 1664), suggéra que le Soleil et les planètes ont eu une même origine et se sont formés à partir d'une nébuleuse de gaz qui se serait contractée. Le soleil se serait condensé au centre de la nébuleuse, et les planètes dans la périphérie de la nébuleuse, aplatie en un disque de gaz. L'idée fut reprise par Emmanuel Kant en 1755. Laplace (1749-1827) améliora le scénario : la nébuleuse solaire primitive voit sa rotation accélérer avec la contraction, ce qui produit un disque tournant autour d'un cœur dense en son centre, qui deviendra le Soleil. Le disque, en se refroidissant, est le siège d'instabilités, et se divise en anneaux qui forment, par la suite, les planètes. Toutefois cette théorie, proche de notre vision actuelle de la formation des systèmes planétaires, prédit un Soleil tournant trop rapidement. Il faut évacuer le moment cinétique (correspondant à l'énergie de la rotation), sans doute grâce à l'effet des champs magnétiques. Dans cette hypothèse, la plupart des étoiles doivent avoir, à l'instar du Soleil, un cortège de planètes. L'hypothèse concurrente, suggérée au XVIII^{ème} siècle par Buffon (1707-1788), propose que le passage d'une étoile au voisinage du Soleil en aurait arraché un filament de matière générant les planètes. Si cela est le cas, les systèmes planétaires doivent être aussi rares que les collisions. A la fin des années 1940, les astronomes montrèrent que qu'une collision avec les vitesses stellaires observées ne permet pas d'arracher au Soleil de la matière possédant suffisamment de moment cinétique⁽¹³⁾ pour former des planètes.

Ces études marquèrent un retour vers la théorie de l'origine nébulaire, qui s'impose alors comme le scénario de formation des systèmes stellaires et planétaires. Une

(13) Le moment cinétique (produit de la masse par la vitesse et le rayon qui sépare le corps d'un point), est une grandeur conservée qui mesure le mouvement de rotation ou de révolution d'un astre.

fois formée, l'étoile s'entoure d'un disque de gaz et de poussières de quelques kilomètres d'épaisseur, dans lequel les poussières se rassemblent en grumeaux, dont la taille est de l'ordre de quelques centimètres. Ces grumeaux, à leur tour, s'agrègent en «planétésimaux», de petits corps solides de 5 à 10 km de diamètre. Ces milliards de planétésimaux commencent par évoluer sur des orbites circulaires, mais les perturbations par interactions gravitationnelles mutuelles modifient les trajectoires et rendent elles-ci de plus en plus elliptiques, ce qui favorise les collisions et le regroupement en corps de plus en plus massifs. Une fois atteinte une masse critique, ces planétésimaux se mettent, à leur tour, à attirer la matière environnante pour former des planètes. Lors de cette phase d'agrégation, les planétésimaux font le vide autour d'eux, et «nettoient» le disque de gaz et de poussières. L'étoile finit alors «nue», et entourée d'un système planétaire.

Dans les années 1940, les astronomes découvrent des étoiles possédant un type spectral caractéristique d'étoiles froides et de très faible masse. Elles présentent des raies d'émission, de fortes variations de luminosité, et une connexion avec des nébuleuses en absorption ou en émission. Mais ce n'est que dans les années 1960 que ces objets furent considérés comme des systèmes planétaires en formation. A cette même époque, le progrès des détecteurs infrarouges permit la découverte d'un excès infrarouge important dans la lumière de certaines étoiles. Cet excès fut interprété comme la présence de disques protoplanétaires autour de ces étoiles. Cette hypothèse fut confirmée, dans les années 1990, avec l'obtention d'images de ces disques grâce au télescope spatial Hubble de la NASA et de l'ESA, au *Very Large Telescope* de l'ESO (Observatoire Européen Austral) au Chili, et dans d'autres observatoires. La théorie de l'origine nébulaire se trouva donc pleinement confirmée par les observations.

Notre système solaire

Notre système solaire s'est formé selon ce même scénario. On sait aujourd'hui que, dans un disque protoplanétaire avec une masse d'un millième de masse solaire, une planète *tellurique* ou rocheuse, telle que la Terre, Mars, Vénus ou Mercure, peut se former en un temps de 10 à 100 millions d'années. Les planètes géantes gazeuses, telles Jupiter, Saturne, Uranus ou Neptune, se sont formées probablement à partir d'un cœur solide dont la masse était suffisamment élevée pour capturer par gravité une enveloppe gazeuse. L'accroissement de la masse de la planète géante se poursuit tant qu'il y a du gaz disponible dans son environnement. Dans la région du système solaire où se trouvent les planètes géantes, la masse critique du cœur solide est de l'ordre de quinze masses terrestres, et les géantes gazeuses formées en attirant du gaz, comme Saturne et Jupiter, ont des masses de l'ordre de quelques centaines de masses terrestres. En

se contractant sous la gravité, l'atmosphère des planètes géantes est réchauffée, et ces dernières rayonnent de l'énergie en quantité plus importante qu'elles n'en reçoivent du Soleil. Quant aux planètes telluriques, sous l'effet de leur contraction gravitationnelle, de la désintégration de leurs éléments radioactifs et des impacts de météorites, elles voient les éléments les plus lourds, comme les métaux, se rassembler en leur centre pour former, en quelques dizaines de millions d'années, un noyau. Celui-ci sera surmonté d'un manteau fluide et d'une croûte qui se solidifiera au cours du temps. Cette époque reculée de l'histoire de la terre est abordée en étudiant les météorites, les roches provenant de la Lune et de Mars, et les premiers minéraux terrestres, qui sont presque aussi vieux que la Terre elle-même. Ces études permettent de dater précisément l'âge de la Terre (4,54 milliards d'années) et les principales étapes de sa formation.

Enfin, les scientifiques affirment que le dégazage du magma du manteau a dû être très important, et produire une atmosphère primitive dont le rôle dans le développement de la biosphère est à explorer. Dans ce scénario, la nature de l'atmosphère est donc intimement liée à la composition chimique du magma, principale source du gaz atmosphérique. Quant aux premières formes de vie sur la Terre, elles dépendent fortement de la composition de l'atmosphère primitive qui pourraient être un mélange de méthane, de monoxyde de carbone, d'hydrogène sulfuré et d'ammoniac, ou bien qui pourrait contenir déjà des composants riches en oxygène comme l'eau, le dioxyde de carbone et le dioxyde de soufre. Ces deux possibilités se traduisent par deux approches différentes concernant l'apparition de mécanismes biologiques sur Terre : l'une considère que les premières molécules biologiques ont été apportées sur notre planète par des comètes et des météorites, l'autre cherche à déterminer quantitativement à quelles étapes de l'histoire précoce de la Terre on peut commencer à espérer trouver des traces de vie, en étudiant la vie dans les conditions extrêmes (température, pression, radioactivité, acidité, sécheresse). La vie est apparue très tôt sur Terre. Des fossiles d'organismes monocellulaires laissent penser qu'elle était déjà présente il y a 3,8 milliards d'années, et peut-être même il y a 4 milliards d'années.

Planètes extrasolaires

La découverte, en 1995, par Michel Mayor (1942-) et Didier Queloz (1966-), de la première planète extra-solaire, ou «exoplanète» (une planète géante, orbitant autour de l'étoile 51 Peg située à 48 années-lumière) a constitué une nouvelle révolution, tant d'un point de vue scientifique que philosophique. En effet même si la présence de planètes orbitant autour d'autres étoiles avait été proposée dès le XVII^{ème} siècle, ce n'est qu'avec l'avènement de techniques de mesure sophistiquées que la recherche de planètes extrasolaires a abouti.

Depuis la détection de la première planète extrasolaire, on dénombre plus de 800 planètes extrasolaires dont certaines d'une taille voisine de celle de la Terre. Aujourd'hui, on compte, grâce au télescope spatial Kepler de la NASA, environ 2000 candidats supplémentaires possibles (un nombre en constante augmentation). Ce sont donc autant de nouveaux mondes vers lesquels se tourneront les télescopes du futur, pour étudier leurs propriétés (masse, densité, température), leur atmosphère et leur composition chimique, et pour y chercher des traces de mécanismes biologiques. En tout état de cause, il apparaît que les planètes sont très nombreuses dans l'univers (un étude suggère qu'il y a au moins autant de planètes que d'étoiles dans notre Galaxie, la Voie lactée), et qu'il en existe de très nombreux «types», depuis les «super-Jupiters» gazeux jusqu'aux «exo-Terres» rocheuses semblables à la Terre, en passant par les «planètes-océans» de quelques masses terrestres, entièrement recouvertes d'eau (liquide ou sous forme de glace). Les prochaines investigations cibleront les planètes dites «dans la zone habitable», à une distance de leur étoile centrale telle qu'elles ne sont ni trop chaudes, ni trop froides, et peuvent ainsi abriter de l'eau liquide, une condition qui apparaît nécessaire à l'apparition de la vie.

Quelques points de dialogue avec la pensée musulmane

Création et origines

La cosmologie actuelle envisage le Big Bang comme origine de la phase d'expansion de l'univers, qui a donné naissance aux structures que nous observons autour de nous : matière et énergie noires, galaxies, nébuleuses, étoiles et planètes. Dans la mesure où le modèle du Big Bang est incomplet, les travaux portent sur l'avant Big Bang : il s'agit de comprendre quelles étaient les conditions de la matière et de l'énergie, dans une phase extrêmement dense et chaude, qui ont produit le Big Bang, de façon *causale*. On est encore loin d'avoir les idées claires sur le sujet, mais de nombreux travaux sont actuellement menés, comme ceux qui mettent en jeu un univers multi-dimensionnel (dans le cadre de la théorie des cordes). En tout état de cause, la «matière» a toujours été là, disent les cosmologistes, pour la bonne raison que les lois de la physique sont essentiellement des lois de conservation. La physique et la cosmologie ne peuvent donc tout simplement pas «penser» l'apparition de «quelque chose» à partir de «rien». La physique et la cosmologie ont donc un discours sur les *origines*, c'est-à-dire sur les changements d'«état» de l'univers : origine de la matière et de l'énergie, du temps et de l'espace pour les questions fondamentales, origine des galaxies, des étoiles et des planètes. Mais quelque chose a toujours été là. Comment articuler cette «éternité du monde» (ou, au moins, de la matière

et de l'énergie) avec la doctrine de la création ? Cette interrogation se posait déjà au moment du débat entre Al-Ghazâlî (1058-1111) et Ibn Rushd (1126-1198). La solution proposée par Ibn Rushd était de comprendre que la doctrine de la création (*al-khalq*) faisait référence à un événement métaphysique : la totale dépendance du monde envers Dieu. Dieu ne cesse de recréer le monde à chaque instant (*tajdîd al-khalq*), rappelaient pour leur part les théologiens ash'arites. Dieu peut très bien créer un monde très vieux, voire éternel, qui ne lui est pas plus une charge qu'un monde très grand, voire infini. Ce qui compte, c'est le fait que le monde ne pourrait pas exister sans la volonté divine, et qu'il retomberait immédiatement dans le néant si Dieu lui retirait son secours.

On a rappelé plus haut les interrogations philosophiques sur l'existence des lois de la nature et l'intelligibilité du monde. Dans une perspective religieuse, l'intelligence que Dieu a placée en nous rencontre l'intelligence qu'il a mise dans le monde, du fait même de l'acte éternel de la Création. Explorer l'intelligibilité du monde, notamment par la science, permet ainsi de reconnaître Dieu comme le Créateur (*al-Khâliq*) et de Le glorifier en contemplant ses signes (*âyat*). Les grandes échelles de temps et d'espace, la très grande diversité des objets décrites dans l'évolution cosmique, doivent nous aider à nous faire de Dieu «l'idée la plus haute» en comprenant la majesté du Créateur à la splendeur de ses œuvres.

Le Big Bang n'est qu'un modèle, et il est incomplet

Du point de vue de la cosmologie, le modèle du Big Bang, malgré son succès incontestable pour expliquer l'apparence actuelle du cosmos et son histoire pendant des milliards d'années, n'est qu'un modèle qui permet de décrire l'univers, et son évolution, en utilisant les lois de la physique. Il reste incomplet sur un certain nombre de points, qui à ce jour, sont des sujets de recherche actifs, mais suscitent aussi de nombreux questionnements.

Aller au-delà du modèle du *Big Bang* actuel nécessite l'unification de la Relativité générale, qui décrit l'univers macroscopique (à grande échelle) et de la Mécanique Quantique, qui décrit l'univers microscopique (à petite échelle). Ces deux théories fondatrices de la physique moderne sont couronnées de succès et ne sont contredites par aucun phénomène. Il est donc difficile de trouver une piste qui permettrait de les révolutionner en les unissant. Une unification permettrait de comprendre les problèmes invoquant les très grandes densités de matière et d'énergie, et les très petites dimensions d'espace, et donc, par exemple, la physique à l'intérieur des trous noirs ou «avant» le *Big Bang*. Des théories de la *gravité quantique* sont proposées, mais les énergies où ces théories pourraient être vérifiées sont inaccessibles aux instruments de mesure actuels, et même à

ceux qui sont prévisibles pour le futur, ce qui rend malaisé le choix entre les différentes possibilités. Cette unification de la Relativité générale et de la Mécanique Quantique reste donc encore inaccomplie, et nul ne sait si, malgré les efforts actuels, elle pourra aboutir.

En particulier, le *Big Bang* ne répond pas à la question de ce qu'il y avait «avant» la «singularité» dans l'espace-temps, où toutes les grandeurs physiques et géométriques présentent des termes infinis dans le modèle actuel. Une démarche scientifique et physique ne peut se satisfaire de l'apparition de quelque chose «à partir de rien», parce que les lois de la nature sont essentiellement des lois de conservation. L'état actuel de la matière ne peut donc résulter que d'un état antérieur, qui reste à définir. La Théorie des cordes permet d'aborder la question de l'«avant» sous un angle intellectuellement satisfaisant, en proposant que notre univers perceptible et observable, à quatre dimensions, serait en fait plongé dans un univers multi-dimensionnel, et que le *Big Bang* lui-même serait la manifestation d'une collision de deux structures de cet univers multi-dimensionnel, appelées «branes». D'un point de vue philosophique, cette théorie prolonge la révolution de notre perception du monde débutée avec la découverte de nouvelles galaxies dans les années 1920 et celle, plus récente, de nouvelles planètes. Maintenant, il pourrait y avoir d'autres espaces-temps qui auraient pu se former avec d'autres constantes physiques et donc d'autres évolutions possibles dans d'autres univers qui ne demandent qu'à être découverts ... mais comment ?

Une autre question ouverte dans le modèle du *Big Bang* est liée au contenu de l'univers. Environ 98% du contenu de l'univers nous est inconnu ; il est constitué de matière noire⁽¹⁴⁾ (environ 23%) observée indirectement par ses effets gravitationnels (par exemple les lentilles gravitationnelles) et d'une source d'énergie répulsive, l'énergie noire (environ 75%) qui est responsable de l'accélération de l'expansion. Aujourd'hui encore, et malgré des expériences dédiées, nous ignorons la nature de cette matière noire. Quant à l'énergie noire, certains physiciens y voient la signature de l'effervescence quantique ou «énergie du vide». Ce vide n'est pas néant, car les particules et les antiparticules y apparaissent et se désintègrent continuellement. La encore, des expériences tentent d'en mesurer les propriétés, et de relier cette énergie du vide à des processus fondamentaux tels de possibles écart à la Relativité générale.

(14) La notion de matière noire (ou sombre) a été introduite par Fritz Zwicky (1898-1974) en 1934 pour expliquer la cohésion des amas de galaxies qui, au vu des masses visibles mesurées, devraient se disloquer. Seule une matière invisible qui n'agirait que par sa gravité peut expliquer la cohésion dynamique.

Les dangers du concordisme

La cosmologie, comme les autres sciences modernes, cherche à décrire l'univers observable, et à le rendre intelligible en proposant de comprendre *a posteriori* quelles sont les lois qui régissent l'univers (et les phénomènes naturels), et non en cherchant *a priori* quels principes l'univers doit respecter (ce qui était le point de vue, par exemple de la physique et de la cosmologie d'Aristote). La construction physique et mathématique de la cosmologie est fondée sur ce qui est accessible (même indirectement, via la lumière émise par les objets célestes), en effectuant des allers et retours entre théorie et observations.

Bien que la cosmologie physique ne résolve pas toutes les énigmes et ne réponde pas à toutes les questions -mais est-ce vraiment son ambition ?- il demeure inutile, voire contre-productif, d'aller chercher dans les vérités religieuses ou théologiques les réponses aux questions de la cosmologie qui ne sont pas encore résolues. Une telle démarche, appelée «concordisme», fait encourir un double danger : d'une part, elle détourne les significations des textes religieux de leur objectif premier : l'élévation spirituelle et morale de l'être humain dans la perspective du salut ; d'autre part, en voulant boucher les trous de la science par les vérités théologiques, on risque fort, plus tard, de devoir battre en retraite quand la science aura éventuellement bouché certains de ces trous. Ce second danger est appelé par les anglo-saxons *God-of-the-gap* (le «Dieu du trou» ou «du fossé»). Dans la perspective religieuse, Dieu est bien trop élevé pour être convoqué uniquement afin de répondre aux questions de cosmologie qui n'ont pas, dans l'état actuel de nos connaissances, de réponse.

Une pleine distinction de la démarche de la science et de l'approche religieuse a un bénéfice double. Elle permet à la science, en général, et à la cosmologie en particulier, d'évoluer en fonction des développements mathématiques et physiques. Elle permet à la religion d'être à l'abri des changements et variations inhérents au développement des sciences. Comme nous l'avons vu, les principes à la base de notre conception de l'univers ont totalement changé depuis le Moyen Âge où l'univers était considéré comme clos et fini, La représentation aristotélicienne du monde constitua le berceau de l'élaboration des interprétations théologiques des textes sacrés juifs, chrétiens et musulmans où, par exemple, les sept cieux de la Bible et du Coran étaient identifiés par certains commentateurs, déjà dans une démarche de type concordiste, aux sept sphères planétaires de la cosmologie d'Aristote et de l'astronomie de Ptolémée. Devrait-on aujourd'hui refaire une interprétation concordiste des sept cieux de la Bible ou du Coran, dans laquelle ceux-ci seraient associés à sept types de structures cosmiques ? Ou à sept dimensions ? Ou à sept univers ? On voit bien le danger de se lancer dans de telles extrapolations.

Les lois de la nature (déterministes ou statistiques) expliquent *raisonnablement* l'univers et son évolution, sans pour autant expliquer *pourquoi* l'univers est soumis à ces mêmes lois. Une grande majorité des physiciens acceptent les lois fondamentales de la physique telles qu'elles sont, c'est-à-dire comme une description «compacte» du monde physique (ou une description qui résume le comportement régulier du monde physique). Elles permettent, en mettant en œuvre des relations mathématiques, des constantes numériques, et des conditions initiales, de dire quels phénomènes se produisent, et comment. Mais elles ne donnent pas le *sens* de ces phénomènes, ce qui est du ressort de l'approche religieuse.

Pourquoi l'univers peut-il être décrit par les lois de la physique ?

La cosmologie (et plus généralement la physique) est une science qui explique l'univers sur la base des lois physiques. En adoptant la Relativité générale comme base pour le modèle cosmologique, nous postulons implicitement que les lois de la physique sont valables en tout lieu et en tout temps de l'univers. Reste que, comme le disait Albert Einstein, «la chose la plus incompréhensible au monde, c'est que le monde soit compréhensible». En d'autres termes, nous pourrions nous poser des questions sur «nos» lois fondamentales de la physique : d'où viennent-elles ? Pourquoi ces lois là plutôt que d'autres lois qui paraissent également «possibles», dans la mesure où elles semblent tout aussi «cohérentes» mathématiquement ?

Certains scientifiques se contentent d'accepter ces lois sans plus de questions. D'autres suggèrent que les lois que nous observons répondent à une nécessité logique. D'autres encore proposent l'existence du «multivers», regroupant une infinité d'univers, et donc d'une infinité de lois parmi lesquelles seules certaines favoriseraient l'émergence de la vie. Par exemple, il suffirait que la force nucléaire forte liant protons et neutrons soit supérieure de 1% à la valeur qui est mesurée pour que les étoiles ne vivent pas plus de quelques minutes, au lieu des quelques milliards d'années que nous observons. Un tel univers apparaît peu propice à l'apparition de la vie, et donc des observateurs conscients que nous sommes. En invoquant le «multivers» (c'est-à-dire une infinité d'univers possibles), la notion de «finalité» (un seul univers permettant l'apparition de la vie) est, en quelque sorte, remplacée par la notion de «probabilité» : dans une infinité d'univers possibles se trouvera statistiquement un univers qui aura les lois fondamentales du nôtre, donc les propriétés permettant l'apparition de la vie.

La question du fine-tuning apparent dans l'univers

Il a été rappelé plus haut que l'apparition de la complexité dans l'univers, à travers celle des galaxies, des étoiles, des planètes et de la vie, requiert des

conditions tout à fait particulières, et notamment des valeurs des constantes de la physique qui doivent être assez précisément celles que nous observons. C'est ce qu'on appelle le problème du *fine-tuning* (ou «ajustement fin» des constantes).⁽¹⁵⁾ Il y a trois lignes d'interprétations de ce qui est un *fait* scientifique incontestable et très documenté. D'abord, nous pourrions bien avoir atteint les limites de notre capacité d'explication du monde. Ensuite, ce *fine-tuning* pourrait être la preuve d'une finalité à l'œuvre dans le cosmos. On pense bien sûr à l'action directe du Créateur, mais il y a d'autres familles de pensée que les monothéistes, qui invoquent cette explication (par exemple, *les panthéistes* qui affirment que la matière possède une tendance naturelle à s'organiser). Enfin, notre univers pourrait être une réalisation d'un ensemble plus vaste de possibilités, appelé multivers. Nous serions alors juste dans un univers qui a, par hasard, les bonnes propriétés pour héberger la vie. En fait, chacune de ces trois positions peut se comprendre du point de vue de la pensée musulmane : La première attire notre attention sur notre petitesse : qui sommes-nous en effet pour comprendre l'ensemble des œuvres du créateur. La seconde met en lumière la bonté du Créateur qui a tout placé pour que des êtres intelligents comme nous puissent apparaître. Quant à la troisième, elle met davantage l'accent sur la puissance du Créateur capable de créer non seulement un univers infini, peuplé des mêmes types de choses (des galaxies, des étoiles) issues d'un jeu de lois déterminées, mais un multivers infini, peuplé de différents types de choses issues de nombreux jeux de lois. Méditer sur ces questions, sans chercher à trancher à l'avance, permet donc un fructueux dialogue avec la cosmologie contemporaine.

La vie existe-t-elle en dehors de la Terre ?

La cohérence générale du modèle physique à l'échelle de l'univers laisse totalement ouverte la question de l'existence, ou non, de mécanismes biologiques en dehors de la Terre. On sait que les premières formes de vie sur la terre dépendent de la composition de l'atmosphère primitive (mélange de méthane, de monoxyde de carbone, d'hydrogène sulfuré et d'ammoniac, ou bien des composants riches en oxygène comme l'eau, le dioxyde de carbone et le dioxyde de soufre). Ces deux possibilités suggèrent aussi deux possibilités d'apparition de mécanismes biologiques : l'apport des premières molécules biologiques par des comètes et des météorites, ou l'apparition de mécanismes biologiques sans apport extérieur. La fréquence des mécanismes biologiques dans l'univers dépend fortement du scénario retenu. Les manifestations biologiques, voire la vie d'organismes complexes, pourraient être plus probables, d'un point de vue statistique, dans

(15) Voir par exemple Martin Rees, *Just Six Numbers*, 2001, Basic Books.

l'hypothèse d'apport de molécules biologiques par des comètes et des météorites. Quelle qu'en soit l'origine, la fréquence des mécanismes biologiques dans l'univers, puis l'existence d'organismes complexes, de la vie intelligente, et enfin d'une vie technologiquement développée, restent autant de questions auxquelles nous n'avons pas de réponses. Les techniques d'observation des prochaines années permettraient de détecter des «biosignatures» dans les planètes extrasolaires proches. Par exemple, l'existence des molécules de dioxygène, d'eau et d'ozone dans l'atmosphère de ces exoplanètes serait un bon traceur d'une activité biologique. Ces observations devraient se faire en direction d'une sélection de planètes extrasolaires choisies de telle sorte que leurs propriétés soient «favorables» à la présence des mécanismes biologiques (la fameuse «zone habitable» mentionnée plus haut). Il est important de noter néanmoins que le choix des biosignatures et des exoplanètes cibles où les rechercher, ne peut être découplé de notre compréhension du phénomène d'apparition de la vie sur Terre, et donc des processus biologiques que nous connaissons. Si la vie ailleurs était vraiment différente de celle sur Terre (même dans ses conditions les plus extrêmes), serions-nous capables de la «découvrir» à de telles distances ?

La place de l'homme dans l'univers

Enfin, il est un dernier domaine dans lequel la pensée musulmane peut utilement dialoguer avec la cosmologie contemporaine : celui de la place de l'homme dans l'univers. Dans la perspective musulmane, Dieu place l'être humain sur Terre comme son «représentant» (*khalîfah*). L'être humain doit vivre dans le Jardin en usant des fruits, sans abuser. La fragilité de la Terre telle qu'elle apparaît de l'espace nous renvoie à notre responsabilité de «gardiens». Or, au moment même de l'histoire humaine où nous parviennent les premières images prises par les satellites qui illustrent à quel point la Terre est isolée dans l'espace, et où nous commençons à comprendre qu'il existe sans doute des milliards de planètes semblables à la Terre dans la Voie Lactée, nous prenons aussi conscience, par les travaux des scientifiques, de l'impact majeur de notre activité sur l'équilibre de notre planète : réchauffement climatique, montée du niveau de mers et océans, érosion des sols, perte de la biodiversité, épuisement des ressources, etc. Cette activité est désormais insoutenable sur le long terme. Il nous appartient donc de changer radicalement notre comportement, et d'apprendre à vivre ensemble sur une planète dont nous percevons désormais les limites.

Chapitre 5

L'histoire de la vie

Rana Dajani

Le concept de changement des espèces au cours du temps a été présent depuis au moins vingt-cinq siècles dans la pensée humaine. Les anciens Grecs, et les auteurs romains et chinois ont fait allusion à l'idée d'une grande chaîne des êtres. Empédocle (490-430 av. J.C.) a argumenté que la naissance et la mort des animaux étaient des mélanges et des séparations d'éléments qui pouvaient produire d'innombrables «tribus de choses mortelles».⁽¹⁾ Anaximandre de Milet (610-546 av. J.C.) a proposé que les animaux vivaient d'abord dans l'eau, et que le premier ancêtre de l'homme habitant sur la terre ferme devait être né dans l'eau et n'avoir passé qu'une partie de sa vie sur la terre.⁽²⁾ Platon (428-348 av. J.C.), en revanche, était un essentialiste et un opposant à l'évolution.⁽³⁾ Aristote (383-322 av. J.C.), fut l'un des élèves de Platon, et, comme historien naturel, il fit de nombreuses observations et interprétations qui résultèrent dans une classification des organismes en relation avec une «échelle hiérarchique» de la vie qui plaçait les organismes selon leur complexité.⁽⁴⁾

Les penseurs chinois taoïstes, au cours du IV^{ème} siècle av. J.C., refusèrent toute fixité des espèces biologiques, et spéculèrent que les espèces ont développé différents attributs en réponse à différents environnements.⁽⁵⁾ Parmi les Romains, Lucrèce (98 ?-55 ? av. J.C.)⁽⁶⁾ décrivit, dans ses poèmes, le développement du cosmos, de la Terre et des choses vivantes à travers un mécanisme naturel, et en contraste avec Cicéron (106-43 av. J.C.) qui avait une vision stoïcienne de la nature, *celle de l'éternel retour*.⁽⁷⁾

(1) Kirk, Raven, & Schofield (1983). *The Presocratic Philosophers* (2 ed.). Cambridge University Press, p. 291 - 292.

(2) Kirk, Raven, & Schofield (1983), op. cit., p. 140 - 142.

(3) http://en.wikipedia.org/wiki/Ernst_Mayr, Ernst (1982). *The Growth of Biological Thought: Diversity, Evolution, and Inheritance*. The Belknap Press of Harvard University Press.

(4) Singer, Charles (1931), *A Short History of Biology*. Clarendon Press.

(5) Needham, Joseph; Ronan, Colin Alistair (1995). *The Shorter Science and Civilisation in China: An Abridgement of Joseph Needham's Original Text, Vol. 1*. Cambridge University Press.

(6) Sedley, David (August 4, 2004) Lucretius Stanford Encyclopedia of Philosophy. Récupéré le 24-07-2008.

(7) Cicéron, *De Natura Deorum*, 2.22. Loeb Classical Library. Harvard University Press, 1956, p. 179.

Les savants musulmans de la grande période de l'Islam ont aussi avancé des idées semblables. Al-Jâhiz (776-867) a affirmé, dans son livre *Kitâb al-Hayawân*, l'idée que les oiseaux montraient des signes d'adaptation et d'évolution⁽⁸⁾. Ibn Miskawayh (932-1030), dans son livre *Al-Fawz al-asghar*, fit aussi allusion au concept des origines humaines prenant part à l'évolution. Les frères de la pureté (*Ikhwân As-Safâ*) ont fourni une vue détaillée et complexe de l'évolution dans leurs *Epîtres*.⁽⁹⁾ Ibn Khaldûn (1332-1406), au XIV^{ème} siècle, eut aussi des idées qui étaient proches du paradigme de l'évolution.⁽¹⁰⁾ Par exemple, il écrit :

«Nous avons expliqué que l'ensemble de l'existence dans (tous) ses mondes simples et composés est arrangée dans un ordre naturel ascendant et descendant, de telle sorte que tout constitue un continuum ininterrompu. Les essences à la fin de chaque stade particulier des mondes sont par nature préparées à être transformées dans les essences qui leurs sont adjacentes, soit au-dessus, soit au-dessous d'elles. C'est le cas avec les éléments matériels simples ; c'est le cas avec le palmier et la vigne, (qui constituent) le dernier stade des plantes, dans leur relation avec les escargots et les coquillages, (qui constituent) le stade (inférieur) des animaux. C'est aussi le cas avec les singes, des créatures qui combinent en elles l'intelligence et la perception, dans leur relation avec l'homme, l'être qui a la capacité de penser et de réfléchir. La préparation (pour la transformation) qui existe de part et d'autre, et chaque stade des mondes, est ce à quoi nous faisons allusion (quand nous parlons) à propos de leur connexion.»

Le célèbre poète Jalâl al-Dîn Rumi (1207-1273), au XIII^{ème} siècle, a discuté le concept d'évolution dans l'un de ses poèmes⁽¹¹⁾ :

«L'Homme apparut d'abord au niveau de la matière inanimée,
Puis il passa au niveau des plantes
Et vécut des années et des années comme une plante parmi les plantes
Sans se rappeler une chose de sa précédente vie inanimée ;
Puis il passa de la plante à l'animal.
Il ne se rappela rien de sa vie de plante
Excepté sa nostalgie pour les plantes,

(8) Ommaya, *Rise and decline of the science in the Islamic world*.

(9) Azzam, *The principle of biological evolution in the works of the classical Muslim philosophers*, p. 172.

(10) *Muqaddimah*, Chapter 6, Part 5 Muslimphilosophy.com. Récupéré le 26-03-2010.

(11) Cité par Nidhal Guessoum, *Islam's Quantum Question*, I. B. Tauris, 2011, p. 308.
Traduction française : Réconcilier l'islam et la science moderne : *l'esprit d'Averroès*.
Presses de la Renaissance, 2009, Paris.

Surtout quand vient le printemps et les belles fleurs s'épanouissent,
Comme la nostalgie des enfants pour leur mère ;
Ils ne connaissent pas la raison de leur nostalgie pour leur sein.
Puis le Créateur a tiré l'homme - comme tu le sais - de son état animal
Pour son état humain.
Ainsi l'Homme est passé d'un état naturel à un autre état naturel
Jusqu'à ce qui devînt sage, savant et fort comme il l'est maintenant.
Mais il ne se rappelle rien de ses états antérieurs,
Et il changera de nouveau à partir de son état actuel.»

Au XVIII^{ème} siècle, la science de la description, ou taxinomie, biologique émergea, avec le naturaliste Carl von Linné (1707-1778), et fut affectée par l'essentialisme, qui affirme que chaque espèce avait des traits essentiels qui ne pouvaient pas être altérés, un concept dont l'origine était platonicienne et aristotélicienne, et qui était compatible avec la théologie naturelle chrétienne. Avec l'arrivée des Lumières, les scientifiques commencèrent à s'intéresser à la variabilité des espèces. La position *fixiste*, qui affirme que les espèces ne changent pas, était défendue par l'anatomiste Georges Cuvier (1769-1832), qui argumenta que les momies d'Egypte avaient des milliers d'années, et ne montraient aucun signe de changement par rapport aux êtres humains et aux animaux de l'époque moderne. La vision statique de la nature fut réfutée par la science de la paléontologie, à travers le concept d'extinction. Jean-Baptiste de Lamarck (1744-1829) proposa la théorie de la *transmutation* des espèces, qui décrit l'altération d'une espèce en une autre, selon une position *transformiste*. Un autre scientifique de cette ère pré-darwinienne fut Robert Chambers (1802-1871) qui publia le livre *Vestiges of the Natural History of Creation*.⁽¹²⁾ De nombreux scientifiques discutèrent ces idées d'évolution, parmi lesquels le géologue Charles Lyell (1797-1875), le paléontologiste Richard Owen (1804-1892), et

En 1859, Charles Darwin (1809-1882) publia son livre *L'Origine des espèces (On the Origin of Species)*. Le livre proposait la théorie de la sélection naturelle pour expliquer les faits observationnels de la géologie, de la bio-géographie, de la morphologie, de l'embryologie, et de l'anatomie. Alfred Russell Wallace (1823-1913) arriva indépendamment à la même théorie.

(12) Bowler, Peter J (2003), *Evolution: The History of an Idea* (3rd ed.), University of California Press.

Qu'est-ce que l'évolution ?

La théorie de l'évolution selon Darwin

Il y a un motif qui existe dans la nature, et un processus qui explique ce motif : la descendance avec modification par sélection naturelle. Les postulats de Darwin sont les suivants :

1. Les individus à l'intérieur d'une population sont variables ;
2. Les variations parmi les individus sont au moins en partie transmises par les parents à leur progéniture ;
3. A chaque génération, certains individus réussissent mieux que les autres à survivre et à se reproduire ;
4. La survie et la reproduction des individus ne sont pas aléatoires ; au contraire, elles sont liées aux variations parmi les individus. Les individus avec les variations les plus favorables sont ceux qui sont les meilleurs pour survivre et se reproduire, et ils sont donc naturellement sélectionnés.

Des inférences sont tirées des observations précédentes : D'une part, les individus auxquels les traits transmis donnent une probabilité plus élevée de survie et de reproduction dans un environnement donné tendent à laisser plus de progéniture que les autres individus. D'autre part, des capacités inégales des individus à survivre et à se reproduire comme résultat de la diversité vont conduire à une accumulation des traits favorables dans la population au cours des générations. Ainsi les individus qui survivent ne sont pas choisis aléatoirement. Ils sont naturellement sélectionnés. Pour résumer, la théorie de l'évolution énonce que les espèces changent au cours du temps, que les espèces sont dérivées d'ancêtres communs, et que la Terre et la vie sont vieilles, puisque ces processus ont nécessairement pris beaucoup de temps pour se produire.

La descendance avec modification peut être difficile à comprendre complètement, parce qu'il s'agit d'un processus statistique : un changement de la distribution des traits dans les populations. Il y a plusieurs idées fausses à propos de l'évolution. Par exemple : la sélection naturelle ne conduit pas à la perfection ; la sélection naturelle n'est pas aléatoire, mais elle n'est pas non plus progressive ; il n'y a pas d'organisme «supérieur» ou «inférieur» du point de vue de l'adaptation : chaque organisme est le mieux adapté pour son environnement ; la sélection naturelle adapte des populations aux conditions qui ont prévalu dans le passé, et non aux conditions qui pourraient advenir dans le futur.

Les êtres humains utilisent le concept de sélection naturelle et de descendance avec modification quand ils pratiquent la sélection artificielle en élevant du bétail ou en

cultivant des fruits. Mais la sélection naturelle est un changement graduel plutôt qu'un changement accéléré (comme dans la sélection artificielle) : la progéniture d'un ancêtre commun, dépendant graduellement de l'environnement, y accumule de nouveaux traits qui ont pour résultat la production de nouvelles espèces.

Les preuves de l'évolution

Les preuves de l'évolution et de la sélection naturelle sont multiples :

Les fossiles : les fossiles sont les traces d'organismes qui ont vécu dans le passé.

Les fossiles fournissent les preuves que des espèces se sont éteintes.

1. La loi de succession. Les fossiles des espèces éteintes sont présents dans les mêmes zones que des espèces semblables encore existantes. Les espèces éteintes et existantes de la même zone sont semblables les unes avec les autres, et elles sont différentes de celles d'autres aires géographiques. Les faunes de mammifères des deux Mondes (l'Ancien et le Nouveau) sont manifestement différentes, et pourtant la faune existante de chaque Monde est, de façon frappante, semblable aux formes fossiles récentes de ce Monde. Le motif général de correspondance entre les formes fossiles et vivantes du même endroit est connu comme la loi de succession. Cette loi est assise sur des analyses d'une grande variété de lieux et de groupes taxonomiques. La théorie de l'évolution de Darwin donne à la loi une explication directe. Les espèces d'aujourd'hui descendent, avec des modifications, d'ancêtres qui vivaient dans la même région ; on s'attend donc à ce qu'elles montrent une plus forte ressemblance avec leurs ancêtres récents qu'avec leur parenté plus distante dans d'autres parties du monde.
2. Les formes de transition. Dès lors que l'évolution affirme que des espèces descendent par modification d'espèces ancestrales, nous nous attendons à découvrir des fossiles d'espèces de transition montrant un mélange de traits anciens et nouveaux. Un exemple est *archaeopteryx*, qui est une espèce fossile de transition : il a des plumes et donc a pu voler comme les oiseaux, mais son squelette était celui d'un reptile.

L'embryologie : les embryons des différents vertébrés sont très semblables durant leur développement. L'explication la plus naturelle de cette similitude est qu'ils descendent tous d'un ancêtre commun.

L'adaptation : les organismes s'adaptent à l'environnement dans lequel ils vivent. Par exemple, le proboscis de certains insectes a la longueur exacte qui correspond à la profondeur des fleurs d'orchidées qu'ils utilisent pour leur nectar.

Les structures vestigiales : une structure vestigiale est une version rudimentaire et inutile d'une partie du corps qui a une fonction importante dans une autre espèce. Par exemple, le boa caoutchouc (*charina bottae*) a conservé des membres postérieurs, qui sont des os rudimentaires des hanches et des jambes. L'interprétation évolutionnaire est que les boas descendent d'ancêtres qui avaient des membres postérieurs complètement formés et fonctionnels. Les humains ont aussi des structures vestigiales. L'os du coccyx au bout de notre colonne vertébrale est un restant d'un ancêtre qui avait une queue. Les muscles attachés à nos follicules pileux se contractent pour faire se dresser nos poils quand nous avons froid ou nous sommes effrayés. C'est un reste de nos ancêtres plus velus. Quand nos poils se dressent, ils nous protègent contre le froid et nous font paraître plus gros et plus effrayants pour des ennemis. Certaines structures vestigiales apparaissent seulement pendant le développement. Les poules ont trois doigts à leurs ailes et quatre doigts à leur pattes. Dans leur stade embryonnaire, les poules ont cinq doigts à leurs ailes et à leurs pattes. Les doigts en plus disparaissent chez l'adulte. L'explication évolutionnaire est que les oiseaux descendent d'ancêtres qui avaient cinq doigts à leurs membres. Il y a aussi des structures vestigiales au niveau moléculaire. Les humains ont un gène pour l'enzyme CMAH (acide CMP-N-acétylneuraminique hydroxylase). Toutefois, ce gène n'est pas fonctionnel à cause de l'effacement de 92 paires de bases. La plupart des mammifères ont une enzyme CMAH fonctionnelle. L'explication la plus naturelle est que les humains descendent d'ancêtres qui avaient une CMAH fonctionnelle.

Les structures homologues : les structures homologues sont celles où la structure sous-jacente est la même, alors que l'apparence extérieure et la fonction sont différentes. Par exemple, les membres antérieurs chez l'homme, le cheval, le dauphin et la chauve-souris. Il y a aussi des homologies moléculaires. A commence par l'ADN, bien sûr, qui est le support du code génétique. Tous les organismes utilisent le même code génétique formé d'un «alphabet» de bases. Un exemple très important d'homologie moléculaire est celui des *pseudogènes*. La plupart des gènes sont fait d'*q*. Les exons sont des morceaux d'ADN qui codent pour des acides aminés, alors que les introns sont des morceaux non-codants, qui disparaissent après que l'ADN est transcrit en ARN. Dans certains cas, l'ARN sans introns est retranscrit en ADN, et réinséré dans le génome à un nouvel endroit. Ce morceau d'ADN est appelé pseudogène, parce qu'il n'a pas les introns. Le pseudogène n'est pas traduit, et n'a donc pas de fonction, mais il tend à accumuler des mutations parce qu'il n'est pas utilisé et donc pas sélectionné. Plus il y a de mutations, plus le pseudogène ainsi «processé» par l'accumulation des mutations est vieux. L'âge du pseudogène peut être estimé par comparaison avec le gène parent. Les pseudogènes plus vieux doivent être partagés par un

nombre plus grand d'espèces. Plus tôt vivait l'ancêtre d'où le pseudogène est originaire, plus nombreux sont les descendants qui doivent en avoir hérité. Felix Friedberg et Allen Rhoads (2000)⁽¹³⁾ ont estimé les âges de six pseudogènes processés dans le génome humain. Les âges trouvés s'échelonnaient entre 11 millions d'années et 36 millions d'années. Les chercheurs ont ensuite regardé les mêmes six pseudogènes processés dans les génomes du chimpanzé, du gorille, de l'orang-outan, du singe rhésus, du sapajou à tête noire (*sapajus apella*) et du hamster. Les résultats sont cohérents avec les prédictions de la théorie de l'évolution. Les humains partagent les plus jeunes des six pseudogènes seulement avec les grands singes africains (chimpanzé et gorille). Ils partagent ensuite les quatre pseudogènes d'âge intermédiaire avec une diversité plus grande de primates (bien que le pseudogène vieux de 16 millions d'années paraisse avoir été perdu chez le gorille). Finalement, les humains partagent le plus vieux des pseudogènes avec les grands singes africains, les grands singes d'Asie (orang-outan), les singes de l'Ancien Monde (rhésus), et les singes du Nouveau Monde (sapajou). Ces pseudogènes processés sont des homologies moléculaires, dont la distribution parmi les primates indique un ancêtre commun.

La sélection naturelle se produit aujourd'hui : Par exemple, les virus et les bactéries acquièrent des résistances aux antibiotiques. On part d'une population de bactéries qui est composée d'une variété d'individus qui ne sont pas strictement identiques. Les bactéries sont exposées à un environnement (l'antibiotique) ; certains individus meurent et d'autres survivent à cause des différences dans leur patrimoine génétique. Ceux qui survivent se reproduisent et finissent par constituer la majorité des nouvelles générations, qui sont maintenant résistantes à cet antibiotique.

Faits et mécanismes

Quand on présente les débats au sujet des théories de l'évolution, il faut faire attention à distinguer entre les *faits* et les *mécanismes*. Les faits montrent l'unité fondamentale du vivant, et le lien de parenté qui existe entre tous les êtres vivants, passés et présents, depuis le premier être vivant à l'origine de tous les êtres vivants connus sur Terre actuellement, et qui est usuellement désigné par l'acronyme LUCA (pour *Last Universal Common Ancestor*, sans doute une cellule unique qui a vécu il y a peut-être 3.5 ou 4 milliards d'années). Les mécanismes sont les processus qui ont été invoqués pour expliquer ces faits.

(13) Felix Friedberg et Allen Rhoads (2000).

Divers mécanismes

Les faits sont les preuves que nous avons présentées au lecteur dans la section précédente. Les débats ne portent pas sur les faits ; ceux-ci ne peuvent pas être changés. Les débats portent sur les divers mécanismes qui ont été avancés pour expliquer les faits.

De nombreuses théories ont été proposées au cours du temps pour ces mécanismes. Citons-en quelques unes :

Le lamarckisme. Le concept lamarckien affirme la théorie de l'hérédité des caractères acquis. Les espèces changent parce qu'elles tendent à s'adapter à leur environnement en acquérant les traits qui sont nécessaires pour cela, et en les transmettant à leur progéniture. Les variations de chaque individu ne sont pas aléatoires, puisqu'elles vont toujours dans le sens de l'adaptation.

Le darwinisme. Le concept darwinien est celui d'un processus graduel de petites variations aléatoires sur lesquelles agit la sélection naturelle. Le darwinisme est donc un gradualisme. Toutefois, cette théorie ne peut pas expliquer certains aspects critiques du processus évolutif. Plus spécifiquement, Darwin a été incapable d'expliquer la source des variations des traits à l'intérieur d'une espèce, ni d'identifier un mécanisme qui pouvait transmettre les traits de façon fiable d'une génération à la suivante.

La théorie des équilibres ponctués est une variante du darwinisme due aux paléontologues Stephen Jay Gould (1941-2002) et Niles Eldredge (1943-), qui propose que les changements évolutifs peuvent se produire pendant des périodes relativement rapides, lorsque la pression sélective est grande, et sont suivis de longues périodes de stabilité. Cette théorie est critiquée par certains darwiniens (ou «ultra-darwiniens», qui insistent sur le gradualisme). Gould et Eldredge ont insisté sur le fait que cette théorie était conforme au darwinisme.

L'évolution convergente. Il s'agit d'une autre variante du darwinisme, qui met l'accent sur le fait que certains traits représentent un tel avantage adaptatif qu'une fois trouvés par les variations aléatoires, ils sont conservés dans l'évolution. Tel est le cas, par exemple, de l'évolution vers l'œil caméra, qui apparut indépendamment chez les arachnides, les mollusques, et les mammifères. Le principal avocat de cette position est actuellement Simon Conway-Morris (1951-).

Le saltationnisme (ou évolution par sauts). C'est l'hypothèse selon laquelle de nouvelles espèces apparaissent comme le résultat de grandes mutations. Cette idée se retrouve par exemple dans la théorie des «monstres prometteurs» du généticien et embryologiste Richard Goldschmidt (1878-1958). Le saltationnisme n'est pas compatible avec les idées de Darwin.

L'orthogenèse (ou évolution progressive). C'est l'hypothèse que la vie possède une tendance «naturelle» à changer vers plus de perfection.

A ces différentes écoles de pensée s'ajoutent trois niveaux d'interprétation des rapports de l'évolution avec la pensée religieuse, essentiellement dans le cadre du christianisme.

La lecture séparationniste qui refuse toute discussion de nature philosophique et théologique sur le «sens» ou «l'absence de sens» de l'évolution. Beaucoup de biologistes en Occident sont séparationnistes, même s'ils sont croyants.

La lecture athée. La théorie de l'évolution darwinienne, qui met l'accent sur le caractère aléatoire des variations de traits, et donc sur le rôle du *hasard* dans l'évolution, a été considérée comme l'accomplissement du projet matérialiste qui remontait aux Grecs. Certains auteurs comme Richard Dawkins (1941-), ont mené une action résolue pour imposer une lecture particulière du darwinisme, comme une preuve de l'inutilité de Dieu pour expliquer le monde, et donc comme le meilleur soutien d'un athéisme militant qui prône la disparition des religions. C'est une telle lecture qui, en raison de ses outrances, a renforcé l'hostilité à la théorie darwinienne de l'évolution, voire à l'idée même d'évolution, dans les milieux religieux chrétiens, et maintenant musulmans.

La lecture déiste de l'évolution. Elle consiste à dire que Dieu a créé l'univers (avec un début dans le temps, ou de toute éternité), a disposé un ensemble de lois physiques et biologiques, puis a laissé le monde évoluer selon ces lois, sans intervenir directement dans les phénomènes naturels. Il semblerait que cette position était celle de Darwin.

La lecture théiste de l'évolution. Elle tient que Dieu a créé l'univers (avec un début dans le temps, ou de toute éternité), et a disposé un ensemble de lois naturelles (physiques et biologiques), mais qu'Il continue à intervenir *directement* à l'intérieur des lois naturelles, à côté des lois naturelles, ou en assurant la validité des lois naturelles. Par exemple, le botaniste Asa Gray (1810-1888) proposa l'idée que Dieu intervenait dans le processus de l'évolution, pour le guider d'une façon telle que le monde vivant pouvait encore être considéré comme directement «conçu» par Lui.

Le néo-darwinisme, ou synthèse moderne

La théorie néo-darwinienne de l'évolution reconnaît les mutations et les variations dans une population. La sélection naturelle est alors le processus qui y altère la fréquence des gènes. L'étude de la génétique des populations est apparue, et a montré que la génétique mendélienne, dont les lois phénoménologiques furent

énoncées par Gregor Mendel (1822-1884), était en accord avec la sélection naturelle et l'évolution graduelle. Les idées actuelles sur l'évolution sont désormais désignées par le terme de Théorie synthétique, telle qu'elle est décrite, par exemple, par Douglas Futuyma de la façon suivante⁽¹⁴⁾ : «Les principes les plus importants de la synthèse évolutionnaire, donc, furent que les populations contiennent une variation génétique qui apparaît par des mutations et recombinaisons aléatoires (c'est-à-dire, qui ne sont pas dirigées de façon adaptative) ; que les populations évoluent par le changement de la fréquence des gènes produit par la dérive génétique aléatoire, les flots de gène, et surtout la sélection naturelle ; que la plupart des variantes génétiques adaptatives ont des effets phénotypiques⁽¹⁵⁾ individuellement petits, de telle sorte que les changements phénotypiques sont graduels (bien que certains allèles⁽¹⁶⁾ avec des effets discrets puissent être avantageux, comme dans certains polymorphismes de couleur) ; que la diversification se produit par spéciation, qui entraîne normalement l'évolution graduelle de l'isolement reproductif parmi les populations ; et que ces processus, s'ils se poursuivent pendant un temps suffisamment long, donnent naissance à des changements d'une telle ampleur qu'ils garantissent l'appellation par les niveaux taxonomiques les plus élevés (genres, familles, et ainsi de suite).»

La synthèse moderne a mis à jour les idées de Darwin. Elle a comblé le fossé entre différents champs de la biologie ; la génétique, la paléontologie, l'anatomie, etc. Elle affirme que :

1. L'évolution peut être expliquée par la génétique et ce que nous voyons des animaux et des plantes vivant à l'état sauvage.
2. La variété des gènes portés par les populations naturelles est un facteur clé dans l'évolution.
3. La sélection naturelle est le principal mécanisme du changement. Même un très petit avantage peut être important, car il peut être passé de génération en génération. Seuls ceux qui survivent et se reproduisent transmettent leurs gènes à la prochaine génération.
4. L'évolution est graduelle. De petits changements génétiques s'accumulent. Les espèces changent peu d'une génération à l'autre. De grands changements peuvent se produire, de temps en temps, mais ils sont très rares.

(14) Futuyma, D.J., *Evolutionary Biology*, Sinauer Associates, 1986, p. 12.

(15) Le phénotype est l'état d'un trait, ou caractère, observable chez un organisme vivant, par opposition au génotype, qui caractérise le génome, ou ensemble du matériel génétique de cet organisme.

(16) Une des différentes formes que peut prendre un même gène.

5. La dérive génétique est ordinairement moins importante que la sélection naturelle. Elle peut être importante dans de petites populations.
6. Au fur et à mesure que les circonstances changent, le taux d'évolution peut accélérer ou ralentir, mais les causes restent les mêmes.
7. L'isolement géographique conduit souvent à l'émergence de nouvelles espèces, bien que ce point soit encore débattu.

Presque tous les aspects de la synthèse moderne ont été contestés en leur temps, avec des degrés variables de succès. Il est incontestable, pourtant, que la synthèse a été une grande étape de la biologie de l'évolution. Des avancées dans différents domaines ont contribué à la théorie moderne de l'évolution : génétique écologique, paléontologie, vision «génocentrique» de l'évolution - par exemple la *pléiotropie antagoniste* de George C. Williams (1957-), qui postule que le rôle des gènes est principalement d'accroître les chances de reproduction de l'individu, même si leurs effets finissent par être néfastes pour celui-ci - macroévolution (évolution des clades phylogénétiques⁽¹⁷⁾ au niveau des espèces, et au-dessus : famille, ordre, classe, embranchement, etc.), et microévolution (changements dans la fréquence des gènes à l'intérieur de populations, opérant sur une longue période).

Enfin, l'épigénétique étudie comment les facteurs environnementaux affectent la façon dont les gènes s'expriment pendant le développement. De tels facteurs environnementaux pourraient affecter l'expression des gènes de générations consécutives, même si la progéniture n'est pas exposée aux mêmes facteurs, et s'il n'y pas eu de changement génétique. Cela montre que, dans certains cas, des changements non génétiques d'un organisme peuvent être transmis, et il a été suggéré qu'une telle transmission peut aider l'adaptation aux conditions locales et affecter l'évolution.

L'impact des «surinterprétations» de la théorie de l'évolution

Au cours de ces dernières années, il y a eu une véritable explosion de l'intérêt pour la théorie de l'évolution dans une large variété de domaines, de l'informatique à la philosophie, en passant par l'économie, la sociologie, et la psychologie.

Dans le domaine de la sociologie, par exemple, l'évolution a été incorporée ce qui est appelé l'évolution socio-culturelle qui est définie comme le processus par

(17) Un clade phylogénétique est un groupe qui comprend un ancêtre et l'ensemble de ses descendants.

lequel la réorganisation structurelle des sociétés et des cultures est affectée à travers les temps, produisant par la suite une structure qui est différente de la forme ancestrale. Certaines des théories de l'évolution socio-culturelle ont été tirées de leur contexte et utilisées pour nuire à des êtres humains ; on peut citer à ce propos le darwinisme social, et le racisme scientifique qui ont été utilisés pour justifier le colonialisme, l'esclavage et l'eugénisme.

En outre, la théorie de l'héritage duel (encore appelée coévolution gène-culture, ou théorie bio-culturelle), selon laquelle le comportement humain est le produit de l'évolution génétique et de l'évolution culturelle, elles-mêmes en interaction, a eu l'avantage de fournir une solution à la controverse de «l'inné et de l'acquis» (ce que les anglo-saxons appellent *nature versus nurture*). Aujourd'hui, les spécialistes s'interrogent pour savoir si les notions d'évolution ou de société ont une signification qui leur soit propre, ou si elles révèlent plus la personne qui fait la description que la chose qui est décrite. Les cultures qui observent et celles qui sont observées peuvent manquer de similarités culturelles suffisantes pour être capables de se communiquer aisément leurs priorités respectives. Par exemple, l'observation de concepts très différents en mathématiques et en physique chez les peuples indigènes a conduit à des théories telles que la science cognitive des mathématiques par George Lakoff (1941-), qui, dans une perspective constructiviste, met en question l'objectivité des systèmes de mesure.

Dans le domaine politique, la théorie de l'évolution est basée sur la définition d'un système politique comme le sous-système d'un groupe socialement organisé, et de la politique comme l'ensemble des processus sociaux qui acquièrent le contrôle sur le système social. L'introduction du concept d'évolution est utilisée pour expliquer le comportement politique des animaux sociaux, et des humains depuis les temps préhistoriques jusqu'à aujourd'hui.

L'économie évolutionnaire a été défendue par Richard Nelson et Sidney Winter dans leur livre *An Evolutionary Theory of Economic Change*.⁽¹⁸⁾ Ils affirment que, si le changement se produit constamment dans l'économie, il doit alors y avoir un processus évolutif qui œuvre, et permet d'expliquer les tendances du changement. Ce processus évolutif est darwinien par nature, dans le sens que l'on peut identifier des mécanismes qui produisent de la variation, de la sélection et de l'autoréplication.

En conclusion, le concept d'évolution peut être incorporé dans tous les systèmes qui ont un élément de changement. C'est un mécanisme qui peut lui-même «évoluer» dans sa compréhension, et dans l'interprétation qui est faite des

(18) Richard Nelson et Sidney Winter, *An Evolutionary Theory of Economic Change* (1982).

phénomènes. Les gens essaient de prédire et d'expliquer. Tout va bien, tant que cela ne cause de tort à personne, et que l'interprétation n'est pas tirée de son contexte ou utilisée pour nuire à un être humain, quel qu'il soit. Il faut aussi garder à l'esprit qu'il s'agit là d'interprétations humaines de théories scientifiques, et qu'elles peuvent être sujettes à l'erreur et au changement.

L'islam et l'évolution

Le rôle des êtres humains sur terre est de vivre en harmonie avec toute la création, à la fois avec les autres êtres humains et avec tous les êtres vivants sur Terre. «Lorsque ton Seigneur dit aux anges ; Je vais créer un représentant sur la Terre.»⁽¹⁹⁾ A travers le Coran, Dieu nous a enseigné comment vivre en harmonie avec toute Sa création, en appliquant les lois qui sont dans Son Livre. Le Coran est un ensemble de lignes directrices qui nous disent comme nous devons vivre. Le Coran ne prétend pas être un livre scientifique, ni poser des énoncés sur l'âge de la Terre ou les détails de la création. Il fournit des preuves de l'existence de Dieu. Mais ces preuves doivent être comprises dans le contexte du temps de la Révélation.

Dans son livre *Islam's Quantum Question*, Nidhal Guessoum avance l'idée qu'il n'y pas d'opposition entre le Coran et la science. Il écrit : «Alors que le Coran ne peut pas être transformé en une sorte d'encyclopédie, et encore moins de toute la science, on doit garder à l'esprit le fait que, si le Coran doit être pris sérieusement et avec respect, on doit aussi conserver le principe rushdien [c'est-à-dire, venant Averroès] de l'impossibilité de tout conflit (entre la parole de Dieu et l'œuvre de Dieu), et sa prescription herméneutique. Dans la pratique, ce principe peut être transformé en une approche de non objection ou non opposition, par laquelle on peut convaincre le public musulman d'une idée donnée (disons, la théorie de l'évolution biologique), non en prouvant qu'elle peut être trouvée dans le Coran, mais plutôt en montrant qu'au moins une lecture et interprétation intelligente de divers passages du Livre Saint est pleinement cohérente avec cette théorie.»⁽²⁰⁾

L'islam comme façon de vivre (minhâj)

Le Coran nous donne des lignes directrices pour penser et utiliser notre cerveau afin de découvrir le monde autour de nous d'une façon logique. Il n'y a pas de limite à notre questionnement, tant que nous ne questionnons pas l'existence de Dieu, ce qui n'a rien à voir avec l'évolution. L'une de ces lignes directrices est l'observation et la réflexion, et la recherche de savoir et d'explications par

(19) Coran 2 :30.

(20) Nidhal Guessoum, *Islam's quantum question*, p. 174-175.

l'application de la méthode scientifique. «En vérité, dans la création des cieux et de la Terre, et dans l'alternance de la nuit et du jour, il y a de signes pour ceux qui comprennent.»⁽²¹⁾

Des scientifiques venant de toutes les religions et de tous les horizons cherchent ensemble la vérité. Certains peuvent avoir raison et d'autres se tromper. «Quand un juge émet un jugement, fait un effort pour trouver une solution (*ijtahada*) et tombe juste, il a deux récompenses. S'il émet un jugement et fait un effort pour trouver une solution, mais se trompe, il a une seule récompense.»⁽²²⁾ A travers le temps, les scientifiques ont observé des créatures vivantes de différents genres, et ils ont alors cherché à expliquer le processus par lequel elles avaient été faites. Darwin était un scientifique qui, en 1859, après une recherche extensive, a proposé une théorie pour expliquer à la fois l'unité et la diversité de la vie. Il y a un motif qui existe dans la nature, et le processus qui explique ce motif est la descendance avec modification par sélection naturelle.

Positions musulmanes contemporaines

D'après un sondage effectué sur les étudiant musulmans dans différents pays, plus de 50 % d'entre eux croient que l'évolution est fausse, ou probablement fausse.⁽²³⁾ Le résultat de ce sondage montre qu'une partie importante des étudiants musulmans trouve des difficultés pour se placer dans le cadre de la biologie contemporaine.

Les opinions des penseurs musulmans modernes et contemporains se classent dans trois catégories⁽²⁴⁾

1. Les «conservateurs» : ils considèrent l'évolution comme totalement contradictoire avec les enseignements de l'islam, et incompatible avec lui. Leurs positions s'échelonnent depuis le pur littéralisme créationniste, jusqu'à une vision plus traditionnelle et symbolique, en passant par le mouvement contemporain de l'*Intelligent Design*. Citons dans cette catégorie, et avec des différences, Seyyed Hossein Nasr (1933-), Muzaffar Iqbal (1954-), ou Harun Yahya (1956-).
2. Les «modernistes», qui insistent sur le fait que l'évolution est entièrement vraie, soit en disant que les textes de l'islam favorisent l'idée d'évolution, soit en argumentant pour la neutralité des enseignements de l'islam à cet égard. Citons

(20) Nidhal Guessoum, *Islam's quantum question*, p. 174-175.

(21) Coran 3 :190.

(22) Bukhârî (*b00*), 9.133: 7352 (*a2*).

(23) Hamid, Salman, *Bracing for Islamic Creationism*, Science 322 (2008) p. 395-419.

(24) Majid, Abdul, *The Muslim Responses to Evolution*, Metanexus Views, 2002.

ici Ghulam Ahmad Pervez (1903-1985), Muhammad Shahrour (1938-), ou Abdul Wadood.

3. Les «modérés» qui considèrent que certains aspects de la théorie de l'évolution, mais pas tous, peuvent être réconciliés avec l'islam. Par exemple, Hussein Al-Jisr (1845-1909), ou Muhammad Iqbal (1877-1938).

Au cours de la civilisation islamique, un certain nombre de savants ont proposé des variantes de la théorie de l'évolution. A cette époque, personne ne s'est opposé à ces savants. Comment se fait-il que tant de personnes s'opposent à l'évolution maintenant ? Il y a probablement plusieurs explications.

L'ignorance. Au cours des derniers trois siècles, l'éducation a faibli dans le monde arabo-musulman, principalement comme résultat de la colonisation par l'Occident, de l'impérialisme culturel, de la corruption de l'Empire ottoman à la fin du XIX^{ème} siècle, et de l'absence de priorité qui fut donnée à l'éducation après la décolonisation.

Le manque d'universitaires. Un autre effet de la colonisation et du manque de liberté politique qui l'accompagna fut la perte d'autonomie de la population en général. Le manque de liberté de pensée et d'opinion eut pour résultat moins de liberté pour penser, et mener à bien, des projets scientifiques. D'un autre point de vue, l'abandon de l'islam tel qu'il était originellement pratiqué réduisit la pratique de l'éducation dans son rôle pour éclairer l'individu, ce qui est essentiel dans l'islam. Inévitablement, la science souffrit du fait de cette désaffection.

Le langage. Darwin n'a été traduit en Arabe que récemment. L'usage de différentes définitions a troublé les gens. Par exemple, le mot «créationnisme» est compris en islam dans un contexte différent de celui de l'Occident, où une différence peut être faite avec le mot «création». Le mot création signifie simplement qu'il y a un Créateur responsable de l'univers et de tout ce qui s'y trouve. Beaucoup de musulmans croient, en toute bonne foi, que le créationnisme est synonyme de création. Or le créationnisme n'est pas cela. Il est la version littéraliste de la doctrine de la création. La doctrine de la création dit effectivement qu'il y a un Créateur dont tout dépend, mais elle ne réfute pas l'évolution ni la présence de la sélection naturelle. Le seul choc serait avec les athées qui croient qu'il n'y a pas d'Être divin qui soit responsable de tout, et dont tout dépend. Mais cette question *n'est pas* le point qui est discuté ici. L'ensemble de l'argumentation consiste à savoir si, du point de vue humain (car Dieu n'est pas soumis au temps), les créatures ont été créées instantanément, pendant une très courte durée de temps, ou par un long processus contrôlé par des lois, et sur les longues échelles de temps trouvées par la science contemporaine pour l'évolution cosmique, géologique et biologique.

Nous ne cherchons pas la science du monde dans le Coran. S'il se trouve que certains versets sont reliés à des faits naturels, c'est très bien. Mais le Coran est absolu, alors que la science est changeante. S'il y a contradiction, nous devons nous assurer de la science, puis revisiter l'interprétation des versets, puisque l'interprétation des versets est relative dans la mesure où elle faite par des êtres humains qui sont sujets à la possibilité de l'erreur.

Dans la loi islamique, pour une interprétation indépendante et originale des problèmes qui ne sont pas précisément couverts par le Coran, le hadith (les traditions concernant la vie du Prophète et ses dires), ou l'*ijma'* (le consensus des savants), chaque juriste adéquatement qualifié a le droit d'exercer une telle pensée originale, principalement le *qiyas* (raisonnement par analogie) et le *ra'y* (jugement personnel).

En vérité, dans l'islam, l'évolution n'est pas un problème. Le problème apparut quand des savants musulmans, par ignorance de la science, adoptèrent les positions de certaines Eglises chrétiennes contre l'évolution, positions qui étaient une réponse (inadéquate) à une compréhension particulière de l'évolution, c'est-à-dire à la lecture athéiste qui était commune en Europe et aux Etats Unis. Pour certaines personnes en Occident, si vous adhérez à la théorie de l'évolution, vous êtes nécessairement un athée et vous ne pouvez pas être un croyant. Ce n'est pas le cas en islam. La contradiction ne surgit qu'avec certaines Eglises chrétiennes qui approchent la Bible littéralement pour y trouver l'âge précis de la Terre et une théorie de la création en sept jours comprise au sens le plus obvie.

L'opposition à l'évolution mentionne le temps écoulé depuis la Création temporelle comme un problème dans la Bible. Mais il n'y a pas de détermination spécifique de l'âge de la Terre dans le Coran. Le temps est bien mentionné. Cependant, il est implicite que le temps est différent du point de vue divin. «Il régule l'affaire depuis le Ciel vers la Terre ; puis Il la fait monter vers Lui en un jour dont la mesure est de mille ans selon votre compte.»⁽²⁵⁾ Dans le Coran, il n'y a pas de référence spécifique à l'âge de la Terre, ni à la façon dont la création a été faite dans le détail. Aussi, malheureusement, avons-nous adopté l'explication de certains chrétiens littéralistes, et avons-nous refusé l'évolution.

La religion ne contredit pas l'évolution

Création instantanée et création à travers le temps

Croire que Dieu a créé l'univers et la vie ne contredit pas l'évolution. De façon semblable, croire en Dieu ne contredit pas la loi physique selon laquelle, si vous

(25) Coran 32 :5.

lâchez une pomme, elle tombera. Il n'y a pas de contradiction quand on affirme que Dieu a créé l'univers et qu'il a mis en place un ensemble de lois, par lesquelles Il lui a permis de se développer jusqu'à son stade actuel. "Et c'est Lui qui a créé la nuit et le jour, et le Soleil et la Lune. Ils naviguent, chacun sur son orbite.»⁽²⁶⁾, et «Il a créé l'homme à partir d'un grumeau.»⁽²⁷⁾

Le concept selon lequel toutes les choses vivantes ont pour origine une forme de vie primitive, les autres formes de vie s'étant développées à travers l'évolution par sélection naturelle, indique la présence de Dieu davantage que s'Il créait les choses d'un coup. On peut voir les preuves de l'évolution aujourd'hui et on ne peut pas repousser les faits. Si nous regardons la création de l'univers depuis les galaxies jusqu'à la Terre, cela a pris des milliards d'années ; personne ne peut prétendre que cela contredit le Coran. Cependant, quand la science montre que la vie a mis des centaines de millions d'années pour évoluer, beaucoup de gens objectent et disent que le Coran utilise le mot *khalaqa* et que ce mot signifie «instantanément». Mais Dieu n'est pas soumis au temps et le concept d'instantanéité n'a pas de sens dans la perspective de Dieu. En revanche, du point de vue de l'être humain qui est, quant à lui, soumis au temps, si nous pouvons croire que la création de l'univers a pris du temps, pourquoi ne pouvons-nous pas croire que la création de la vie a, elle aussi, pris du temps ?

De même qu'il y a des lois physiques, il y a des lois pour l'évolution. Le physiologiste Albert Szent-Györgyi (1893-1986) ne pouvait pas accepter qu'il y ait plein de temps pour tout essayer. Il disait : «échanger des briques au hasard ne construira jamais de château ou de Temple grec.»⁽²⁸⁾ Mais s'il y a certaines lois, cela finira par le faire. Ces lois ont été instaurées par Dieu qui a mis des règles pour la vie, exactement comme Il a mis des règles pour la matière. Puis la vie a évolué selon ces lois. Ainsi l'évolution peut être vraie et Dieu, vraiment Créateur. Il n'y a pas de contradiction.

En fait, la question qui se pose est celle du hasard et de la contingence, que mettent en avant ceux, comme les philosophes matérialistes ou athées, qui refusent les lectures déistes ou théistes de l'évolution. Le hasard apparaît dans les petites variations des traits qui sont dues à la génétique. Ces variations sont imprévisibles, mais on pourrait penser qu'elles sont au moins prévisibles de façon statistique. Par exemple, un joueur de dés sait que s'il lance les dés suffisamment de fois, il va finir par avoir un «6» et gagner. La contingence est plutôt le fait que l'évolution ait subi de nombreux accidents qui l'ont profondément altérée. Par

(26) Coran 21 :33.

(27) Coran 96 :2.

(28) Cité par Corey M. A. *Back to Darwin: A Scientific Case for Deistic Evolution*, 1994.

exemple, la chute de la météorite de Chicxulub, il y a 65 millions d'années, a provoqué l'extinction massive de la crise crétacé-tertiaire (60 % à 80 % des espèces). Pour reprendre notre exemple, la contingence serait le fait que le jeu de dés soit interrompu par l'irruption de la police. Pour ceux qui mettent l'accent sur hasard et contingence, l'homme, résultat d'une longue histoire évolutionnaire, aurait très bien pu ne pas apparaître. Qu'en est-il alors de la centralité qui est accordée à l'être humain dans les textes sacrés, si nous sommes juste le produit d'une série d'«accidents» ? A cela, les théistes (dont les musulmans) répondent que Dieu est à l'œuvre dans toutes les chaînes de causes et d'effets, et que l'être humain est effectivement apparu à l'issue de cette longue histoire évolutionnaire, ce qui montre la sagesse et la grandeur du Créateur.

L'évolution humaine

La plus grande question est l'évolution humaine. Si l'on comprend l'évolution correctement, on peut accepter que les humains doivent avoir évolué à partir de formes de vie primitives. Juste comme les plantes, les souris, les bactéries ou les chimpanzés : tous ont évolué à partir d'une forme ancestrale commune. Le fait d'avoir un ancêtre commun avec les chimpanzés ne contredit pas le fait que Dieu ait créé la vie, qui a évolué vers ce que nous observons aujourd'hui. Des versets semblent aller dans le sens de cette évolution : «Celui qui a bien fait tout ce qu'Il a créé et il a commencé (*bada'a*) la création de l'homme à partir de l'argile (*tîn*)»⁽²⁹⁾, et «Oui, Nous avons créé l'homme de la meilleure façon (*fî ahsani taqwîm*), puis Nous l'avons renvoyé au plus bas.»⁽³⁰⁾ Dans le premier verset, Dieu affirme qu'Il a créé tous les organismes pour être les plus adaptés, et que même l'homme fut créé d'argile, à l'instar de toutes les créatures. Dieu dit qu'il a commencé la création (*bada'a*), ce qui sous-entend que cette création a ensuite continué, donc qu'elle ne fut pas instantanée. Dans le second verset, Dieu affirme qu'Il a créé l'homme de la meilleure façon (*ahsan*), et non le meilleur des hommes (*afdal*). Ce verset semble renforcer l'idée que chaque organisme a évolué en suivant les lois de l'évolution pour être le plus adapté à son environnement.

Il y a beaucoup de versets qui contiennent ce mot *khalaqa* (créer) appliqué à diverses choses : les cieux, la Terre, le Soleil etc. Dans l'esprit de la plupart des gens, il ne semble y avoir aucune contradiction avec la théorie du *Big Bang* et la formation du Soleil et de la Terre au cours de l'évolution cosmique. Ici le Coran dit que Dieu a créé le «début», a fixé les règles pour que l'univers évolue jusqu'au stade actuel, et que l'univers est encore en train d'évoluer. Quand Dieu utilise le

(29) Coran 32 :7.

(30) Coran 95 :4.

mot *khalafa*, il ne fait pas allusion à un processus instantané, mais à un «commencement» puis à une durée dans le temps. Puisque Dieu lui-même n'est pas limité par le temps, il n'utilise pas ce mot dans le contexte de l'instantanéité.

Pourquoi ne pouvons-nous pas, dans le même contexte, prendre les versets selon lesquels Dieu a créé l'Homme, et comprendre que cette création a pris des centaines de millions d'années ou davantage encore, parce que Dieu a créé un «commencement», puis un jeu de lois biologiques et évolutionnaires qui ont produit tous les organismes que nous connaissons, et ces lois sont encore en vigueur aujourd'hui. Ainsi n'y a-t-il pas eu de création instantanée de l'homme dès lors que Dieu n'est pas restreint par le temps. Pourquoi la plupart des savants acceptent-ils l'évolution cosmique, mais pas l'évolution biologique ?

Nous sommes limités par notre biologie, et par notre pensée. Nous ne pouvons pas, par exemple, appréhender la présence d'une éventuelle quatrième dimension spatiale à cause de notre limitation biologique. Carl Sagan, dans son livre *Cosmos*⁽³¹⁾, donne un exemple parlant de cette absence de compréhension qui pourrait être la nôtre du fait de nos limites biologiques : celui de fourmis se mouvant à deux dimensions spatiales et incapables de percevoir les phénomènes produits par l'existence de la troisième dimension spatiale.

Au fur et à mesure de l'avancée de la science, notre compréhension du monde s'accroît, et notre interprétation des textes doit changer en conséquence. Cependant, nous devons toujours nous rappeler que nous sommes limités par notre biologie, juste comme des fourmis le sont à leur niveau. Nous devons donc accepter que tous les phénomènes que nous observons doivent avoir une explication, même les miracles. Simplement, nous ne l'avons pas encore découverte, ou notre biologie limitera à jamais notre capacité à la comprendre.

Au stade actuel de cette recherche sans fin, les faits suggèrent une notion étonnante : comme une Pierre de Rosette ou des rouleaux de la Mer Morte biologiques, notre propre ADN -une somme d'information comparable à l'*Encyclopædia Britannica* dans chaque cellule de notre corps- contient l'enregistrement du passé que nous avons juste maintenant appris à lire. Cet enregistrement, qui reflète des millions d'années d'histoire génétique, inclut les restes des anciens accidents génétiques qui se sont produits avant que nos ancêtres primates ne parcourent les plaines d'Afrique, restes que nous partageons maintenant avec les autres descendants de ces mêmes ancêtres : les chimpanzés et gorilles modernes.

(31) Carl Sagan, *Cosmos*, Chap. 10, Ballantine Books, 1985.

Il faut remarquer ici que Darwin n'a jamais discuté ou questionné l'origine de la vie. Il a seulement discuté comment différentes espèces ont évolué depuis cette origine. Darwin a écrit, dans le dernier paragraphe de son livre *Origin of the species* : «Il y a de la grandeur dans cette vision de la vie, avec cette puissance initiale soufflée par le Créateur, dans quelques formes ou dans une seule, [...] et qu'à partir d'un début si simple, des formes infiniment belles et magnifiques ont évolué et évoluent encore.»⁽³²⁾ Cela nous évoque aussi l'incompréhension qui est née dans le monde musulman. Les musulmans ont été conduits, par imitation de certaines Eglises chrétiennes qui adhéraient littéralement aux récits et chronologies bibliques, à croire que Darwin a refusé la présence de Dieu parce qu'il a attribué le développement des espèces à la sélection naturelle. C'est exactement le contraire.

L'histoire d'Adam ne fait pas nécessairement référence à la création de l'argile, qui lui préexistait et qui représente sa part biologique, mais au moment où Dieu a insufflé dans cette argile Son Souffle (*rûh*) et où Il donna à Adam la responsabilité pour l'humanité et pour la Terre toute entière. D'autres interprétations sont possibles, ce qui montre que nous pouvons échapper à une adhésion littérale aux mots qui aurait pour conséquence de nous emprisonner dans de nombreuses contradictions avec les faits avérés. Comment avons-nous évolué ? Comment notre conscience a-t-elle évolué ? Comment la pensée apparaît-elle dans notre cerveau ? Il y a là des questions intrigantes et intéressantes que nous pouvons explorer (au moins jusqu'à un certain point) si nous ouvrons notre pensée aux questionnements, exactement comme Dieu nous le demande dans le Coran.

La vision scientifique de l'histoire de la vie offre un extraordinaire panorama d'unité dans la diversité, et de diversité dans l'unité. A partir des lois de la biologie moléculaire, et de principes simples comme les mécanismes de l'évolution, la vie a pu apparaître sur Terre, et se diversifier en un buissonnement foisonnant, depuis un ancêtre commun qui existait il y a des milliards d'années. Derrière l'extraordinaire complexité et diversité du vivant se cache une unité sous-jacente qui montre la sagesse et la puissance du Créateur, bien mieux que la lecture littéraliste.

(32) Charles Darwin, *On the Origin of the species*, 2^{ème} à 6^{ème} éditions.

Conclusion

En conclusion, l'islam est un guide spirituel pour la vie. Il nous enseigne comment vivre en harmonie avec nous-mêmes, avec nos frères humains, et avec le monde. L'islam nous demande d'utiliser notre pensée pour explorer le monde autour de nous. L'islam appelle à l'usage de la logique et de la méthodologie scientifique dans notre approche de la science. Le Coran contient des versets qui décrivent les phénomènes du monde. Ces versets sont présentés comme des preuves de l'élégance et de la simplicité de la Création. Le Coran n'est pas un livre sur les faits scientifiques. S'il arrive qu'il y ait des contradictions entre un verset du Coran et un résultat scientifique, le chemin qu'il nous est demandé de prendre est de vérifier le résultat scientifique pour être sûrs des faits (parce que la science est relative, non absolue, et que l'erreur est possible), d'un côté, et de vérifier l'interprétation du verset, de l'autre. Ce sont les êtres humains qui interprètent les versets, et les êtres humains, même s'ils sont pieux, sont limités au moins par la connaissance scientifique de leur temps. En conséquence, il ne devrait pas y avoir de conflit entre l'islam et la science, mais seulement de l'harmonie.

Lexique

Acte (actuality) : chez Aristote, s'oppose à la puissance. L'acte est le caractère de ce qui est et donne forme au monde.

Agosticisme (agnosticism) : position qui considère que certaines vérités, notamment la question de l'existence de Dieu, sont inconnaissables.

Apologétique (apologetics) : discipline qui défend une position religieuse en utilisant toutes les informations disponibles.

Athéisme (atheism) : position qui affirme la non existence de Dieu.

Atomisme (atomism) : doctrine qui professe que la matière est composée d'entités élémentaires discontinues, insécables et irréductibles, plongées dans le vide.

Causalisme (causalism) : doctrine qui s'intéresse d'abord au rapport de cause à effet dans l'explication des phénomènes.

Concordisme (concordism) : doctrine qui postule que les textes révélés et l'investigation scientifique parlent de la même chose, et peuvent donc soit s'accorder, soit entrer en contradiction.

Constructivisme (constructivism) : doctrine qui insiste que la façon dont nous donnons sens au monde et l'ordonnons en créant des filtres ou des constructions mentales pour le connaître.

Contextualité (contextuality) : caractéristique de la Mécanique Quantique selon laquelle le résultat des mesures peut dépendre de l'ordre dans lequel on les effectue.

Contradiction [principe de] (principle of contradiction) : principe général dans lequel viennent se résoudre et sont condamnées toutes les contradictions particulières.

Cordes [théorie des] (String theory) : théorie de Grande Unification qui considère les particules comme les manifestations de cordes vibrant dans un espace à 10 dimensions.

Cosmogonie (cosmogony) : étymologiquement, «engendrement» du monde. Théorie ou mythe parlant de l'origine des choses. Ce mot a tendance à ne plus être utilisé en science.

Cosmologie (cosmology) : Théorie ou mythe décrivant l'univers comme un tout ordonné (un cosmos). La cosmologie physique moderne explique les structures de l'univers par son évolution.

Création (creation) : dépendance du monde vis-à-vis de Dieu. La création peut être éternelle, temporelle et/ou renouvelée

Créationnisme (creationism) : position qui refuse la théorie de l'évolution et stipule que les espèces n'ont pas d'ascendance commune. Le créationnisme peut aussi porter sur l'origine de l'univers lorsqu'on adopte une lecture littéraliste des textes sacrés (création en six jours, il y a 6000 ans, pour certains chrétiens). On distingue usuellement les créationnistes «de la jeune terre», qui n'acceptent ni évolution biologique, ni évolution cosmique et géologique, et les créationnistes «de la vieille terre» qui acceptent l'évolution cosmique et géologique, mais pas l'évolution biologique.

Darwinisme (darwinism) : théorie énoncée par Darwin dans laquelle l'évolution des espèces se fait graduellement, par petites variations des traits et sélection naturelle.

Déduction (deduction) : acte qui consiste à tirer des conséquences particulières d'un principe plus général.

Déisme (deism) : doctrine qui professe l'existence de Dieu et son influence sur la création de l'univers, sans s'appuyer sur les textes révélés ni les enseignements d'une religion.

Déterminisme (determinism) : Doctrine selon laquelle l'état futur d'un système peut être prédit de façon certaine à partir de son état présent.

Dualisme (dualism) : doctrine qui professe qu'il y a fondamentalement deux réalités irréductibles, par exemple la matière et l'esprit.

Dynamique (dynamics) : étude du mouvement, dans sa relation aux forces.

Élément chimique (chemical element) : constituant de la matière, caractérisé par un type identique d'atome (fixé par le nombre de protons dans le noyau, et à l'état neutre, le nombre d'électrons autour du noyau).

Empirisme (empirism) : doctrine qui fait de l'expérience sensible l'origine de toute connaissance.

Épigénétique (epigenetics) : domaine scientifique qui étudie l'influence de l'environnement sur l'expression des gènes.

Essence : nature réelle d'une chose, qui fait que la chose est ce qu'elle est.

Essentialisme (essentialism) : doctrine qui affirme la primauté de l'essence. Dans le contexte de la biologie, doctrine qui affirme que les essences des êtres vivants sont irréductibles les unes aux autres.

Étant (being) : un étant est une réalité singulière qui est.

Étance (the act of being) : l'étance est l'acte d'être des étants.

Éternel retour (eternal return) : doctrine d'origine grecque selon laquelle l'univers est éternel et les choses finissent par se reproduire à l'identique.

Évolution [cosmique, géologique, biologique] (cosmic, geological, biological evolution) : passage d'un système d'un état à un autre.

Évolutionnisme (evolutionism) : doctrine qui professe l'importance de l'évolution, voire la centralité du concept d'évolution, pour comprendre le monde.

Fidéisme (fideism) : position défendant que la foi n'a pas besoin de la raison, ou doit se protéger de la raison, pour arriver à la vérité.

Fixisme (fixism) : doctrine qui postule que les espèces ne peuvent se transformer les unes dans les autres.

Forme (form) : dans la physique d'Aristote, le principe qui fait qu'un étant est ce qu'il est.

Génétique (genetics) : domaine de la biologie qui étudie l'hérédité et le code génétique.

Gradualisme (gradualism) : doctrine qui postule que les variations dans le vivant se font de façon lente et graduelle.

Gravitation quantique à boucles (Loop quantum gravity) : théorie de Grande Unification qui vise à unifier Mécanique Quantique et Relativité générale.

Horizon cosmologique (cosmological horizon) : surface sphérique centrée sur tout observateur, qui limite sa capacité d'observation en raison de la vitesse finie de propagation de la lumière et de l'âge fini de la phase d'expansion.

Humanisme (humanism) ; doctrine qui met au premier plan l'homme, comme la mesure de toute chose.

Hypothèse (hypothesis) : proposition d'explication d'un phénomène, qui doit être ensuite testée par d'autres observations ou expériences.

Idéalisme (idealism) : ici, doctrine professée par George Berkeley selon laquelle «être, c'est être perçu ou percevoir».

Idées (ideas) : dans la philosophie de Platon, principes immuables et universels dont le monde sensible est le reflet.

Idéologie (ideology) : Ensemble d'idées formant une vision globale du monde et des actions à y mener.

Incertitude (uncertainty) : conséquence de la contextualité, qui fait que certaines grandeurs observables ne peuvent être connues simultanément avec précision. Encore appelée indétermination.

Incomplétude (incompleteness) : Dans le contexte de ce livre, limitation inhérente à tout système d'axiomes suffisamment puissant, dans lequel il existe nécessairement des énoncés formellement valides dont ni la vérité ni la fausseté ne peuvent être démontrées.

Indécidabilité (undecidability) : caractère d'une question qui ne peut, par nature, recevoir de réponse

Indéterminisme (undeterminacy) : caractéristique de la Mécanique Quantique liée à sa théorie de la mesure : la fonction d'état décrivant un système ne permet de calculer que la probabilité d'obtenir un résultat parmi un jeu de valeurs possibles.

Indiscernabilité (undiscernability): En Mécanique Quantique, il existe deux sortes des particules identiques donc indiscernables : les bosons, qui peuvent exister dans le même état, et les fermions qui ne peuvent par coexister dans le même état (principe d'exclusion de Pauli)

Induction (induction) : acte qui consiste à tirer des principes généraux de l'observation de faits particuliers.

Instrumentalisme (instrumentalism) : voir opérationnalisme

Interprétation (interpretation) : Les théories cherchent à expliquer les faits, mais elles sont elles-mêmes susceptibles de différentes lectures ou interprétations, selon les options philosophiques choisies.

Intersubjectivité (intersubjectivity) : entre la subjectivité qui dépend du sujet, et l'objectivité, qui n'en dépend pas, désigne l'accord entre les différents observateurs. Dans la mesure où la science ne peut plus être considérée comme la description subjective de la réalité, elle demeure, au moins, intersubjective.

Imprédictibilité (unpredictability) : Dans le contexte de ce livre, limitation inhérente à certains systèmes macroscopiques dont l'état futur, après un certain temps, ne peut être prédit à partir de la connaissance de l'état présent. La mesure des systèmes microscopiques n'est prédictible que de façon probabiliste.

Lamarckisme (lamarckism) : doctrine qui postule l'hérédité des caractères acquis.

Linéarité (linearity) : caractéristique de la Mécanique Quantique qui énonce que la somme d'états possibles est un état possible.

Littéralisme (literalism) : position selon laquelle les textes sacrés ont un seul sens, le sens littéral, évident ou obvie.

Macroscopique (macroscopic) : l'échelle macroscopique est l'échelle de phénomènes qui ont une taille mesurable et observable.

Matérialisme (materialism) : doctrine qui énonce que le seul type d'être est la matière, soumise au hasard et aux lois immanentes.

Matière (matter) : dans la physique d'Aristote, substrat du changement, potentialité qui attend la forme pour être en acte ; dans les doctrines atomistes, nature des atomes. Dans la physique actuelle, l'entité matière-énergie est conservée localement, et prend la forme de «particules» qui peuvent se transformer les unes dans les autres.

Mécanique (mechanics) : étude du mouvement

Mécanique statistique (statistical mechanics) : description des propriétés globales d'un système comprenant un grand nombre de sous-systèmes (par exemple un gaz composé d'atomes), par la mise en œuvre de lois statistiques.

Mécanisme (mechanism) : doctrine qui conçoit les phénomènes comme des «machines» suivant des liens de cause à effet.

Mécanique classique (classical mechanics) : branche de la physique, élaborée avant les révolution conceptuelles du XX^{ème} siècle, qui s'applique aux phénomènes macroscopiques, et suppose que les systèmes possèdent des propriétés avant la mesure

Mécanique Quantique (quantum mechanics) : branche de la physique élaborée au XX^{ème} siècle, qui décrit le comportement des systèmes microscopiques, et en particulier des molécules, atomes, et «particules élémentaires»

Métaphysique (metaphysics) : domaine de la philosophie et des doctrines religieuses, qui traite des principes premiers et de leurs conséquences.

Méthode scientifique (scientific method) : la méthode scientifique repose sur l'induction, et la déduction, dans un aller et retour entre théorie et expérience. Une hypothèse est formulée par induction à partir de faits observés ou d'expériences. D'autres conséquences observables ou expérimentales déduites de cette hypothèse sont ensuite testées par de nouvelles observations ou expériences. Si ces hypothèses ne sont pas confirmées par les nouveaux fait, elles

sont modifiées et testées de nouveau, et ainsi de suite.

Microscopique (microscopic) : l'échelle microscopique est l'échelle de phénomènes qui ont une petite taille.

Modernité (modernity) : projet philosophique d'imposer la raison comme norme globale de la société.

Multivers (multiverse) : idée générale selon laquelle il existe plusieurs sortes d'univers déconnectés les uns des autres, et possédant éventuellement des propriétés très différentes les uns des autres. Diverses théories physiques, plus ou moins spéculatives, suggèrent l'existence du multivers.

Naturalisme (naturalism) : thèse selon laquelle il n'existe rien d'autre que la nature.

Non-localité (non-locality) : propriété indépendante de l'espace que doivent avoir les «variables cachées» inconnues de la Mécanique Quantique, qui permettraient d'affecter des propriétés aux systèmes microscopiques avant la mesure.

Non-séparabilité (non-separability) : propriété observée des systèmes microscopiques, qui énonce qu'un système fait un tout indépendamment de son extension spatiale et qu'une mesure sur une partie du système est en fait une mesure sur l'ensemble du système.

Ontologie (ontology) : branche de la métaphysique qui traite de l'être «en tant qu'être».

Opérationnalisme : école qui postule que la science est un ensemble de recettes expérimentales, sans prétentions métaphysiques.

Paradigme (paradigm) : Représentation générale du monde, remise en cause lors des révolutions scientifiques.

Positivisme (positivism) : doctrine philosophique qui postule que l'analyse rationnelle des faits vérifiés par l'expérience peut seule expliquer le monde, et rejette la métaphysique.

Postmodernité (postmodernity) : concept sociologique qui étudie la dissolution de la modernité dans les sociétés contemporaines, à travers le recul de la raison comme norme globale.

Principe cosmologique (cosmological principle) : principe qui énonce qu'aucun point, ni aucune époque, de l'univers ne possède un statut particulier. En conséquence, l'univers doit apparaître homogène et isotrope, et le temps, uniforme.

Puissance (potentiality) : chez Aristote, l'indéterminé et le possible.

Raison critique (critical reason) : raison qui se place dans son histoire, critique en permanence ses fondements, et limite son champ d'action.

Raison dogmatique (dogmatic reason) : raison qui prétend déduire l'ensemble des connaissances d'un jeu limité de principes intuitivement vrais.

Rationalisme (rationalism) : doctrine qui considère la raison comme la seule source possible de connaissance réelle.

Réalisme (realism) : doctrine philosophique qui énonce qu'il existe «quelque chose» en dehors de notre pensée, qui résiste à nos efforts de connaissance (dans le sens que toutes les théories ne décrivent pas ce «quelque chose» avec un égal succès).

Réalité (reality) : caractère de ce qui existe effectivement.

Réduction (wave function collapse) : désigne le passage, lors de la mesure, un état à un autre (un état propre qui correspond à la valeur mesurée)

Réductionnisme (reductionism) : dans sa version méthodologique, doctrine qui consiste à postuler qu'un système en ses parties pour l'expliquer totalement ou partiellement. Dans sa version ontologique, doctrine qui postule qu'un système n'est que la somme de ses parties en interaction.

Référentiel (reference frame) : système de coordonnées de temps et d'espace permettant de repérer et de décrire les phénomènes. Une classe particulière de référentiels est composée des référentiels dits inertiels, dans lesquels les lois de la physique ont une forme simple (par exemple, un corps qui n'est soumis à aucune force n'y change pas d'état de mouvement ou de repos).

Relativité restreinte et générale [théorie de la] (special and general relativity) : théorie, due principalement à Albert Einstein, qui permet de décrire l'ensemble des phénomènes macroscopiques classiques (c'est-à-dire, non quantiques), postule l'invariance de la vitesse de lumière, établit la relativité du temps et de l'espace par rapport au référentiel de mesure, établit l'équivalence de la masse et de l'énergie, et donne une explication de la gravitation comme une courbure de l'espace-temps.

Réversibilité (reversibility) : propriété d'un système qui change, se déplace ou évolue de pouvoir parcourir en sens inverse la trajectoire ou l'évolution effectuée pour revenir à son état initial.

Révolution scientifique (scientific revolution) : Changement rapide et brutal de vision du monde à la suite de découvertes fondamentales. En astronomie et

physique, on parle par exemple de la révolution copernicienne, galiléenne, newtonienne, puis des révolutions relativiste et quantique.

Saltationnisme (saltationism) : doctrine qui énonce que les transformations dans le vivant se font par «sauts», ou grandes variations.

Scientisme (scientism) : doctrine qui postule que la science est la seule voie de connaissance.

Sélection (selection) : processus qui élimine les individus les moins aptes (dans la nature ou dans un élevage).

Sens [question du] (issue of meaning) : question posée dans le dialogue entre science et philosophie par l'interprétation, ou la lecture, des théories scientifiques

Sens commun (common sense) : l'ensemble des préjugés que nous formons lors de notre vie quotidienne, sur l'espace, le temps et la matière, et qui sont souvent contredits par la Mécanique Quantique et plus généralement la physique contemporaine.

Séparationnisme (separationism) : position qui consiste à tenir tout dialogue entre science, et philosophie ou théologie, comme dénué de pertinence.

Singularité (singularity) : point où les grandeurs deviennent infinies, et donc non physiques.

Sous-détermination (underdetermination) : possibilité d'expliquer les mêmes faits par différentes théories.

Sublunaire (sublunar) : dans la physique d'Aristote, se rapporte au monde «au-dessous la sphère de la Lune», corruptible et ne pouvant faire l'objet de description mathématique.

Supersymétrie (supersymmetry) : théorie de Grande Unification qui vise à unifier fermions et bosons.

Supra-lunaire (supralunar) : dans la physique d'Aristote, se rapporte au monde «au-dessus de la sphère de la Lune», incorruptible, et faisant l'objet d'une description mathématique par des mouvements circulaires uniformes.

Taxinomie (taxonomy) : science qui s'occupe de la classification des espèces vivantes.

Technoscience (technoscience) : l'ensemble de la science et de la technique conçues comme entretenant des liens organiques forts, la science se développant pour la technique, dont elle utilise en retour les développements pour avancer plus loin.

Théisme (theism) : doctrine qui professe l'existence d'un Dieu qui influence la création et continue d'intervenir dans son fonctionnement. Le théisme religieux professe qu'on peut connaître à travers la révélation et les textes sacrés.

Théologie naturelle (natural theology) : branche de la théologie qui consiste à connaître Dieu à partir du monde.

Théorie (theory) : ensemble d'hypothèses ou de connaissances spéculatives donnant une représentation d'un domaine de la réalité.

Théorie synthétique de l'évolution (modern evolutionary synthesis) : nom de la théorie de l'évolution contemporaine, qui prolonge le darwinisme en incorporant les apports de la génétique, de la biologie moléculaire, de la paléontologie, de l'embryologie, de l'anatomie comparée, etc.

Tiers exclu (excluded third) : principe qui énonce que n'importe quelle proposition formellement valide est vraie, ou bien c'est sa proposition contraire qui est vraie.

Transcendance (transcendence) : caractère de ce qui est absolument différent et séparé du monde.

Transcendental (transcendental) : dans la philosophie de Kant, caractère de ce qui précède l'expérience.

Transformisme (transformism) : doctrine qui professe que les espèces peuvent se transformer les unes dans les autres.

Unification (unification) : démarche de la physique contemporaine qui vise à intégrer les faits observés et les théories actuelles dans une théorie plus vaste.

Univers (universe) : ensemble de toute la réalité physique. L'univers est conçu comme un cosmos ou un monde (mots qui, étymologiquement en grec et en latin, comprennent l'idée d'ordre et de beauté). Dans le cadre de la théorie du multivers, partie du multivers régie par des lois homogènes, et ayant comme origine le même Big Bang. L'univers observable (observable universe) est la sphère centrée sur chaque observateur, et limitée par son horizon cosmologique.

