

Jacques Haïssinski et Hélène Langevin-Joliot
Jean-Pierre Kahane, Michel Morange, Évariste Sanchez-Palencia

Science et culture

Repères pour une culture scientifique commune

  ditions Apogée

Dans la collection Espace des sciences

dirigée par Michel Cabaret

Les Araignées (Alain Canard et Frédéric Ysnel)

Le Ciel au fil des saisons (Odile Guérin)

Du Big Bang à nos jours (Bruno Mauguin)

L'Évolution des espèces - Les preuves (Maxime Hervé et Denis Poinot)

L'Évolution des espèces - Les mécanismes (Maxime Hervé et Denis Poinot)

Les Gorilles (Annie Gautier-Hion)

Les Lois de la nature (Alain Nouailhat)

La Lune, vérités et légendes (Bernard Melguen)

Les Mathématiques pour comprendre le monde (Alain Nouailhat)

La Mesure du temps (Bernard Melguen)

Les Météorites (Bernard Melguen)

Le Phénomène des marées (Odile Guérin)

Les Perturbateurs endocriniens (Olivier Kah)

Les Planètes extrasolaires (Bruno Mauguin et Odile Guérin)

Rennes en sciences (Jos Pennec)

La Reproduction animale et humaine (dir. Olivier Kah)

Le Système solaire (Bruno Mauguin et Bénédicte Saulnier-Le Dréan)

La Vie dans l'univers (Bruno Mauguin et Priscilla Abraham)

Vie et mort des étoiles (Bruno Mauguin et Bénédicte Saulnier-Le Dréan)

Découvrez également la collection « Espace des sciences junior »

avec les séries « Sais-tu pourquoi... ? », « Fais l'expérience ! » et « Espèce d'animal ! »

Image de couverture © ESA and the Planck Collaboration

© Éditions Apogée, 2020

ISBN 978-2-84398-675-8

La science est trop souvent considérée comme une source de savoirs spécialisés réservés à des experts, alors que son intégration dans la culture des citoyens est un enjeu majeur pour la démocratie.

Ce livre *Science et culture*, issu des réflexions du groupe « Culture scientifique » de l'Union rationaliste, s'adresse à tous. Il a pour ambition de permettre au plus grand nombre de s'appropriier les sciences, pour que celles-ci occupent toute leur place dans la culture contemporaine. C'est aussi la préoccupation des centres de culture scientifique, technique et industrielle (CCSTI) et en particulier celle de l'Espace des sciences Rennes-Bretagne. Des rencontres de travail avec Hélène Langevin-Joliot ont débouché sur une première édition de ce livre en 2015 dans la collection « Espace des sciences » des Éditions Apogée. Cette seconde édition, enrichie, numérique et interactive vient à point nommé.

On assiste en effet aujourd'hui à la propagation croissante d'infos, confrontant de manière toujours plus frontale le discours scientifique, au point de gommer celui-ci dans l'esprit de ceux qui le reçoivent. Les informations fausses ou tronquées doivent être repérées et combattues pour endiguer la montée de l'obscurantisme. Porter les valeurs de la science, comprendre ses méthodes et quelques notions fondamentales, disposer de repères sont autant de missions qui permettent de mobiliser l'esprit critique de chacun pour cet objectif. Développer la place de la science dans la culture contemporaine devient plus que jamais un enjeu majeur à l'heure où l'engagement de nos sociétés dans la transition écologique ne peut plus être différé. La qualité des débats sur les choix à effectuer pour apporter des solutions réalistes à des problèmes complexes en dépend.

Les jeunes générations sont les premières concernées à long terme : elles doivent être dotées des outils nécessaires à l'exercice de leurs futures responsabilités. Les enseignants, les médiateurs scientifiques, les parents et les jeunes eux-mêmes trouveront dans ce livre le moyen d'approcher de manière accessible aussi bien des notions fondamentales que des connaissances plus pointues que l'interactivité permet aisément de mettre en rapport. Tous ceux que la curiosité motive, quels que soient l'âge, les intérêts et la profession, apprécieront des récits stimulants sur l'univers, la vie ou la construction de la science.

Michel Cabaret
directeur de l'Espace des sciences

Les auteurs

Jacques Haïssinski, professeur émérite des universités. Physicien des particules, il a travaillé principalement au Centre d'Orsay de l'université Paris-Sud et a exercé des responsabilités de direction de recherche au CNRS et au CEA.

Hélène Langevin-Joliot, physicienne, directrice de recherche émérite au CNRS et présidente sortante de l'Union rationaliste. Ses conférences et interventions promeuvent la science dans la culture de tous et une vision humaniste de la science dans la tradition des Curie. Elle a publié *Marie Curie et ses filles. Lettres*, Pygmalion, 2011.

Jean-Pierre Kahane †, mathématicien, professeur émérite à la faculté des sciences de l'université Paris-Sud, membre de l'Académie des sciences. Ancien président de l'Union rationaliste, on lui doit de nombreuses interventions sur la place de la science dans la société et l'enseignement des mathématiques.

Michel Morange, professeur de biologie à l'ENS et l'université Paris-Sud, directeur du centre Cavailles d'histoire et de philosophie des sciences. Il a publié notamment *La Vie, l'évolution et l'histoire*, Odile Jacob, 2011.

Évariste Sanchez-Palencia, directeur de recherche émérite au CNRS (mécanique théorique et mathématiques appliquées), membre de l'Académie des sciences. Il est l'auteur de *Promenade dialectique dans les sciences*, Hermann, 2012.

Sous l'égide du groupe « Culture scientifique » de l'**Union rationaliste**.

Composition du groupe de réflexion

Katia Allégraud, Marcel Bohy[†], Thierry Corn, Dominique Dubaux, Gabriel Gohau, Jérôme Goidin, Jacques Haïssinski, Alain Haraux, Jean-Pierre Kahane, Hubert Krivine, Hélène Langevin-Joliot, Anne-Sophie Lollivier, Samar Mokaïesh, Michel Morange, Françoise Perrot, Évariste Sanchez-Palencia, Mireille Tadjeddine, Jean-Claude Vial. Le groupe s'est élargi : la présente édition numérique a bénéficié des contributions de Michel Verdaguer, ainsi que de Nelly Bensimon et Isabelle Ramade.

Remerciements

Nous adressons nos remerciements tout d'abord à Claude Benzaken, Jean-Marie Biau, Régine Douady, Jean Duprat, Muriel Esch, Étienne Ghys, Pierre Jullien, Rodolph Mouix et Jean-Michel Muller pour leurs suggestions faites au cours de l'élaboration de ce livre. Nous sommes très reconnaissants à Nicolas Férey, Jean-François Le Gall et Jean-Pierre Raoult qui ont contribué à la rédaction des rubriques portant sur les probabilités, la statistique et l'informatique. Nous remercions aussi Gilles Dowek pour avoir accepté l'insertion, dans la troisième partie du livre, d'un texte sur l'informatique dont il est l'auteur. Nous remercions enfin Natalie Pigeard pour son aide précieuse à la recherche d'images et des droits associés.

Avant-propos

Cet ouvrage collectif a été élaboré par un groupe de réflexion mis en place par l'Union rationaliste en vue de contribuer au développement de la culture scientifique.

La culture scientifique est trop souvent considérée comme une somme de savoirs spécialisés qui ne sauraient s'intégrer dans la culture, généraliste par nature. Celle-ci se développe à partir d'une formation initiale dans laquelle les matières scientifiques enseignées à tous les jeunes au collège ne sont pas toujours assimilées. Nous proposons un contenu concret et synthétique de la notion de culture générale scientifique en référence à ce niveau (celui du collège), enrichi d'ouvertures vers des sujets importants mais un peu plus complexes.

L'introduction « Pour une culture générale scientifique » expose constat et objectifs et présente les trois parties qui suivent. La première partie porte sur les principes et les méthodes de la science. Elle est complétée par un récit de l'histoire de l'univers et de la vie. La seconde rassemble des connaissances de base pouvant servir d'ancrage à l'enrichissement ultérieur de la culture scientifique de chacun. Le choix de textes présentés dans la troisième partie illustre par des exemples la façon dont la science se construit et éclaire la place de la science dans la culture.

Les parties 1 et 2 du livre ont été principalement rédigées par Jacques Haisinski, avec le concours de Jean-Pierre Kahane pour les mathématiques et de Michel Morange pour les sciences de la vie et de la Terre. Pour cette nouvelle édition, la rédaction du chapitre « Matière inerte et matière vivante » qui ouvre la deuxième partie a été reprise et enrichie par Michel Verdaguer. Le choix de textes illustrant la construction de la science a été effectué sous la responsabilité d'Evariste Sanchez-Palencia.

Cette édition numérique et interactive de *Science et culture. Repères pour une culture scientifique commune*, s'adresse à tous ceux, en particulier les jeunes, qui souhaitent approcher les sciences dans leur diversité, mais aussi leur unité. Elle a été conçue comme un outil pour les enseignants et les passeurs de culture pour faciliter une mise en rapport plus aisée des sujets traités. On y trouvera un glossaire à deux niveaux auquel le lecteur pourra faire appel pour apprécier la signification des termes signalés par un fond bleu et un index pour rechercher des notions abordées dans le livre.

Hélène Langevin-Joliot

Sommaire

Introduction	8
Partie 1 - Des principes et des méthodes	13
<i>Chapitre 1 - Causalité et déterminisme</i>	14
<i>Chapitre 2 - Méthodes scientifiques</i>	19
<i>Chapitre 3 - Une histoire de l'Univers et de la vie</i>	26
Partie 2 - Des savoirs pour une culture générale	35
<i>Chapitre 1 - Matière inerte et matière vivante</i>	36
<i>Chapitre 2 - Le monde physique</i>	44
<i>Chapitre 3 - Spécificités du monde vivant</i>	60
<i>Chapitre 4 - Systèmes et leur dynamique</i>	69
<i>Chapitre 5 - La Terre dans le système solaire</i>	80
<i>Chapitre 6 - Concepts et outils mathématiques</i>	88
<i>Chapitre 7 - Traitement des données, algorithmique et informatique</i>	105
Partie 3 - Choix de textes	115
<i>[1] La valeur éducative de l'histoire des sciences, Paul Langevin</i>	116
<i>[2] Une querelle de vigneron, Ernest Kahane et Jean Silvanien</i>	122
<i>[3] Remarques sur la causalité dans les sciences, Michel Morange et Évariste Sanchez-Palencia</i>	127
<i>[4] La causalité et les enfants, Alain Haraux</i>	131
<i>[5] Autour d'un feu de bois, Évariste Sanchez-Palencia</i>	134
<i>[6] Qu'est ce que l'informatique ?, Gilles Dowek</i>	138
<i>[7] La nature de la connaissance scientifique par un exemple : la chute des corps, Évariste Sanchez-Palencia</i>	142
<i>[8] Wegener illustre-t-il la notion de précurseur ?, Gabriel Gohau</i>	147
<i>[9] Autour de la découverte de la pénicilline, Évariste Sanchez-Palencia</i>	153
Index	...
Glossaire	...

Introduction

Pour une culture générale scientifique

Quelle part la science devrait-elle avoir, au XXI^e siècle, dans la culture générale? Aujourd'hui plus encore qu'hier, notre pays a des besoins croissants de chercheurs, d'ingénieurs ou de techniciens. Il a aussi impérativement besoin d'enseignants ayant intégré la science dans leur culture générale et de citoyens dotés d'un bagage de culture générale scientifique.

1. Un constat

La science reconstitue progressivement l'histoire de notre Univers, identifie des systèmes planétaires dans la Voie lactée, cherche à déterminer les conditions de l'apparition de la vie et les mécanismes de l'évolution, décrypte la structure de composés chimiques complexes, effectue la synthèse de matériaux nouveaux, élabore et résout des conjectures mathématiques, interprète l'activité cérébrale de façon de plus en plus précise. Elle ne cesse d'ouvrir de nouveaux domaines de recherche prometteurs de découvertes.

L'humanité dispose aujourd'hui d'instruments scientifiques sophistiqués et de moyens techniques extrêmement puissants. Nous pouvons guérir des maladies qui étaient incurables jusqu'à un passé récent. Nos moyens de communication sont sans commune mesure avec ce qu'ils étaient il y a quelques décennies. Nous pourrions nous rendre un jour sur la planète Mars. Mais notre activité puise largement dans des ressources non renouvelables. Elle affecte le devenir du climat et, de ce fait, affecte les conditions de vie dans de nombreuses régions de notre planète.

Si le progrès scientifique et technique n'entraîne pas automatiquement le progrès de la société, il est clair que les changements à effectuer dans notre mode de développement nécessiteront plus de science au cours de ce siècle pour répondre

aux besoins de neuf milliards d'hommes et de femmes, économiser les ressources naturelles, sauvegarder la biodiversité, maîtriser le réchauffement climatique et relever d'autres défis qui se posent à nous, souvent à l'échelle mondiale.

En contraste avec cette situation, la science a encore une place très réduite dans la culture des citoyens d'aujourd'hui, y compris celle des « élites » intellectuelles et politiques. C'est une situation dangereuse pour la démocratie et aussi pour le progrès du bien-être collectif. Nos sociétés ont impérativement besoin de citoyens formés aux méthodes de la science, quels que soient leurs professions et leurs intérêts culturels.

2. Savoirs spécialisés et culture générale scientifique

Le constat ci-dessus, partagé par de nombreuses personnalités, sociétés ou institutions scientifiques, a débouché au fil des années sur d'importantes initiatives que les fêtes de la science symbolisent pour le grand public. Force est de constater pourtant que la culture scientifique reste vue, à tort, par le plus grand nombre comme une somme de savoirs spécialisés, chacun en développement accéléré, qui ne sauraient s'intégrer dans la culture générale. Les premiers échanges de vues que nous avons eus dans le groupe de travail nous ont conduits à penser qu'il y avait là une difficulté réelle qu'il fallait tenter de lever. Les programmes du collège présentent à grands traits la culture scientifique dans le préambule du « socle commun ». Dans ces programmes, le panorama des connaissances se trouve éclaté entre ce qui sera enseigné dans les classes successives et entre les disciplines. Il nous a semblé qu'une approche synthétique, dégageant un certain nombre de concepts et rassemblant des connaissances de base sans rompre leur unité, est mieux adaptée à la construction d'une culture générale scientifique. Quelques remarques complémentaires ont servi à cadrer le travail entrepris en ce sens.

Une culture générale scientifique devrait permettre au citoyen d'être mieux armé pour participer de manière constructive aux débats démocratiques à mener sur les nombreuses questions sociétales impliquant la science ou les techniques.

Une culture générale scientifique ne suffit évidemment pas pour se préparer aux métiers scientifiques ou techniques devenus de plus en plus variés mais elle permet de situer les connaissances spécialisées dans un large ensemble de

repères communs, propre à faciliter les échanges entre domaines scientifiques ou techniques.

Le contenu de l'enseignement initial et plus encore les méthodes utilisées durant cette formation pour susciter motivation et curiosité des élèves jouent un rôle essentiel dans l'acquisition – à cette étape et ultérieurement – des éléments d'une culture générale scientifique. La nécessité de faire largement appel au questionnement en même temps qu'à l'apprentissage du raisonnement, au croisement des disciplines aussi, est reconnue, et pratiquée, autant que faire se peut. On ne peut que se réjouir de la place importante donnée dans les programmes actuels du collège à la « démarche d'investigation » et des efforts des enseignants en ce sens, malgré les difficultés (horaires, moyens). Ces méthodes qui relaient celles développées dans le primaire avec « La main à la pâte » contribuent à faire comprendre comment les connaissances scientifiques se forment. De même, un retour sur l'histoire des découvertes et des progrès scientifiques permet parfois de mieux en apprécier le sens et la portée.

Mais cela ne suffit pas : un certain nombre de connaissances doivent être assimilées ou du moins abordées pour permettre le développement ultérieur de la culture de chacun autour de repères concrets. Si l'effort demandé aux élèves, au collège et en seconde, ne doit pas avoir pour but l'acquisition d'un empilement de connaissances, il est important de les doter d'un bagage initial de culture générale scientifique, alors que l'enseignement des sciences n'est l'objet aujourd'hui d'aucun complément dans certaines filières de formation.

La culture générale scientifique déborde ce qui est enseigné au collège dans le cadre des horaires et de l'organisation actuels de l'enseignement en mathématiques, sciences physiques et chimiques, sciences de la vie et de la Terre et technologie. Certaines notions peuvent être abordées à travers l'expérimentation ou par des exemples ou dans des récits. Certains concepts ou connaissances sont certainement difficiles à exposer en toute rigueur au niveau du collège, mais il est important de les introduire pour assurer la cohérence d'ensemble d'un bagage scientifique de base. Il nous semble possible et nécessaire d'en donner à tous une image simplifiée mais correcte, suffisante à ce stade. Modèles, analogies expérimentales et anecdotes devraient y contribuer. Nous sommes conscients de l'hétérogénéité des acquis des élèves à l'entrée du collège : un effort particulier sur l'enseignement primaire pour redresser cette situation s'impose, plutôt que de renoncer devant des difficultés réelles.

Une culture générale initiée à l'école, au collège ou au lycée a besoin d'être enrichie, aussi bien au cours d'études supérieures non-scientifiques (et même scientifiques...) que d'études professionnelles – et plus tard encore.

L'information sur les sujets touchant la science, les technologies et leurs applications est trop souvent délivrée de manière ascientifique, voire antiscientifique dans certains médias d'aujourd'hui. C'est un problème que l'on ne peut guère espérer résoudre qu'à long terme. Comment aider le public à sélectionner des sources d'information qui soient fiables ? Sans doute faut-il intégrer cet apprentissage dans les initiatives de culture scientifique s'adressant au grand public.

Le concept même de culture exclut de donner à son contenu un contour rigide.

3. Une vue synthétique de la culture générale scientifique

Cette esquisse de culture générale scientifique est organisée en trois parties. Les deux premières sont divisées en chapitres, la troisième est un choix de textes.

La première partie regroupe trois chapitres. Les deux premiers sont consacrés aux principes et aux méthodes scientifiques. La compréhension de ces sujets transdisciplinaires est essentielle dans l'enseignement, mais aussi pour la diffusion de la culture scientifique et le débat public. Le troisième chapitre cherche à donner une vision globale de l'histoire de l'Univers et de la vie. La forme d'un récit a été adoptée pour aborder cette histoire qui permet de structurer l'acquisition d'une culture générale scientifique.

La deuxième partie comprend cinq chapitres portant sur le monde vivant et sur le monde inerte tel que nous les observons à diverses échelles. Elle se conclut par deux chapitres consacrés aux mathématiques, au traitement des données et à l'informatique. Si les mathématiques sont d'abord une science, le « langage mathématique » joue un rôle majeur dans l'ensemble des disciplines, tandis que le traitement des données et l'informatique interviennent de plus en plus fréquemment dans les sciences et les techniques ou dans la vie courante.

L'ordre des chapitres dans cette deuxième partie – matière inerte et matière vivante, le monde physique, les spécificités du vivant, les systèmes, la Terre dans le système solaire – ou celui adopté pour les rubriques au sein des chapitres, ne nous paraît pas essentiel. Le chapitre consacré aux concepts et outils mathématiques

Introduction

couronne cet ensemble, tout en introduisant celui portant sur le traitement des données et sur l'informatique.

Chacune des rubriques comporte successivement :

- le contenu principal explicité de façon succincte ;
- présentés avec une police réduite, des commentaires, certains éléments moins importants ou excédant nettement le niveau du collège, ainsi que des exemples empruntés à un éventail de disciplines. Ceux-ci sont en petit nombre et n'ont pas d'autre but que d'indiquer quelques domaines, parfois très délimités, dans lesquels tel ou tel concept est utilisé.

Dans la deuxième partie de cet ouvrage, des liens indiqués à la fin de chaque rubrique suggèrent des rapprochements avec d'autres. Notre objectif est de montrer que les notions que nous avons retenues sont utiles dans de multiples champs de la connaissance, hors de celui où elles ont été définies. Chaque rubrique peut cependant être considérée séparément. Certaines se réfèrent à des notions débordant le niveau du collège, pour lesquelles il nous a semblé important de fournir quelques repères (le monde subatomique par exemple). D'autres encore ont suscité de notre part des commentaires sur des questions importantes dans le débat public. Nous nous sommes efforcés d'éclaircir le sens de certains termes trop spécialisés par une définition ou un exemple afin de rendre le texte compréhensible par tous.

La troisième partie comprend un choix de textes qui approfondissent quelques-uns des concepts abordés dans les deux premières parties ou illustrent la marche des sciences à travers quelques exemples.

L'acquisition d'une « culture commune » par tous les étudiants se destinant au professorat est à l'ordre du jour. Ce livre de culture générale scientifique pourrait, sous des formes appropriées, être utilisé dans les instituts nationaux supérieurs de professorat et de l'éducation (INSPE) pour la nécessaire mise à niveau des connaissances des étudiants qui n'ont suivi aucun enseignement de science depuis la classe de seconde. Les futurs professeurs de sciences pourraient bénéficier aussi de cette présentation synthétique de connaissances scientifiques « repères » par-delà leur propre discipline. Les éléments rassemblés dans ce livre ne prétendent nullement constituer une esquisse de futurs programmes de science au collège, même si nous pensons qu'ils peuvent être utiles à la réflexion sur de futurs changements.

Le développement des centres de culture scientifique, technique et industrielle est plus que jamais nécessaire. Les animateurs spécialisés de ces centres pourraient trouver dans cette approche de la culture générale scientifique de nouvelles ressources.

Partie 1

Des principes et des méthodes

Chapitre 1 Causalité et déterminisme

1. Causalité



Fig. 1 - Relation de cause à effet

Il n'y a pas d'effet sans une ou plusieurs causes (parfois un grand nombre). Il n'y aurait pas de science possible s'il en était autrement. Un effet est toujours précédé par sa ou ses causes.

Dans le langage courant, le mot « cause » peut avoir deux significations très différentes. Il peut évoquer une cause dite finale (« j'appelle un taxi pour revenir chez moi » : revenir chez moi est la cause de mon appel) ou une cause dite efficiente, précédant un effet qui en sera le conséquent selon le principe causal postulé par la science. C'est ce second sens qui fait l'objet de cette rubrique.

Tout ce qui précède un effet n'est pas cause. La tâche du scientifique est de déterminer, parmi les faits ou les phénomènes qui précèdent un effet étudié, celui ou ceux qu'il faut retenir pour expliquer cet effet. Le scientifique ne s'arrête pas à la mise en évidence d'une première cause, il considère l'éventualité que d'autres causes interviennent et, si c'est le cas, il hiérarchise leurs rôles dans la mesure où c'est possible.

Corrélation n'est pas cause ! En ville, le nombre de personnes qui portent des lunettes de soleil un jour donné varie, *grosso modo*, proportionnellement au nombre de personnes qui portent un chapeau ce jour-là. Ces deux caractères de la population présentent donc une corrélation sans que le port du chapeau soit dû au port de lunettes, ni inversement.



Fig. 2 - Corrélation n'est pas cause

Dans le cas de phénomènes complexes, tels que ceux rencontrés en médecine et santé publique, une relation de cause à effet ne peut pas toujours être établie par

une étude expérimentale. Les recherches menées sur les causes d'une épidémie, par exemple, impliquent de recueillir de très nombreuses données; la validité des conclusions dépend pour beaucoup d'une maîtrise de l'analyse statistique qui s'ensuit. Le principe de causalité a un caractère universel. On en trouve des illustrations dans nombre de phénomènes rencontrés dans la vie courante.

Les textes [3] et [4] de la troisième partie complètent cette rubrique.

2. Invariance des lois de la nature dans l'espace et dans le temps

Les mêmes causes produisent les mêmes effets, en tout lieu et en tout temps. Il n'y aurait pas de science possible s'il en était autrement. Cette invariance a un caractère universel mais, évidemment, elle ne prévaut que dans la mesure où l'effet ou le phénomène considéré n'est en aucune façon affecté par son environnement. Elle implique qu'une expérience n'a de valeur scientifique que si elle peut être reproduite ailleurs et à n'importe quelle date.

L'invariance dont il est question n'implique pas une évolution unique, prédictible, de systèmes extrêmement complexes comme le sont, par exemple, certains écosystèmes.

3. Déterminisme et prédictibilité

Les lois « classiques » de la physique permettent de décrire le monde à l'échelle macroscopique – notamment le monde accessible à nos sens – et les phénomènes qui s'y produisent. Un système physique relevant de ces lois est dit déterministe parce qu'il est possible de prédire son évolution si on connaît son état initial et toutes les interactions internes ou externes qui l'affectent.

Parmi ces systèmes déterministes, certains sont tels qu'une très petite modification des conditions initiales ou de l'environnement (si celui-ci intervient dans l'évolution considérée) peut conduire à un comportement qui, à la longue, diffère radicalement de celui qui prend place sans cette modification. De tels systèmes sont dits chaotiques. Comme on ne peut jamais connaître ou fixer les conditions initiales avec une précision infinie, ces systèmes peuvent donner l'impression d'évoluer de façon erratique et de violer le déterminisme. Il n'en est rien, mais de tels systèmes nous obligent à distinguer le déterminisme et la prédictibilité : alors qu'ils sont déterministes, il s'avère impossible de prédire leur état à long terme – et parfois à relativement court terme – même avec des ordinateurs extrêmement puissants (en météorologie par exemple).



Fig. 3 - Henri Poincaré en 1911

Pour simplifier cette caractérisation du déterminisme, seuls des systèmes évoluant selon des lois classiques – par opposition à quantiques (cf. 1. 4) – sont considérés ici.

Il ne suffit pas que l'évolution d'un système soit très sensible à son état initial pour qu'il soit déclaré chaotique. Une bille placée au point le plus haut d'une boule parfaite tombe le long d'un méridien ou d'un autre, selon l'erreur, même infime, de son positionnement initial. Ce système n'est toutefois pas de type chaotique.

Dans un passé qui se compte en milliards d'années, la dynamique du système solaire a

conduit aux mouvements périodiques (ou presque) des planètes sur leurs orbites quasi elliptiques actuelles. C'est en étudiant la stabilité de ces mouvements qu'Henri Poincaré a été amené à conclure que le système solaire était en fait chaotique et qu'il a jeté les bases de la théorie du chaos.

La constante de temps avec laquelle la dynamique du système solaire est susceptible d'évoluer profondément est de l'ordre de la centaine de millions d'années.

Le comportement du système constitué par l'atmosphère terrestre en interaction avec les océans – l'objet de la météorologie – s'analyse dans le cadre de la dynamique des fluides. Certains modèles simplifiés de ce système suggèrent qu'il peut avoir un comportement chaotique. C'est ce qu'exprime la question de E. N. Lorentz : « Un battement d'ailes de papillon au Brésil peut-il déclencher une tornade au Texas ? » Cette interrogation laisse entendre que l'évolution de l'atmosphère et donc le temps qu'il fera dans les prochains jours résultent d'une multitude de causes dont certaines peuvent sembler négligeables... mais ne le sont peut-être pas.

Le texte [5] de la troisième partie complète cette rubrique.

4. Le monde quantique

Alors que les lois classiques traitent souvent les milieux matériels comme s'ils étaient continus, les avancées de la science au tournant des XIX^e et XX^e siècles ont conduit à remettre en cause leur validité dans de nouvelles circonstances : ni les phénomènes atomiques, ni l'émission du rayonnement thermique (par exemple la lumière visible émise par un corps porté à très haute température) ne pouvaient être décrits par les lois classiques. Une profonde révision de la mécanique et de la théorie des interactions entre des particules chargées électriquement et un champ électrique ou magnétique s'est alors imposée. C'est ainsi que la « mécanique quantique » a pris naissance ; elle a permis de rendre compte des propriétés de la matière à l'échelle microscopique.

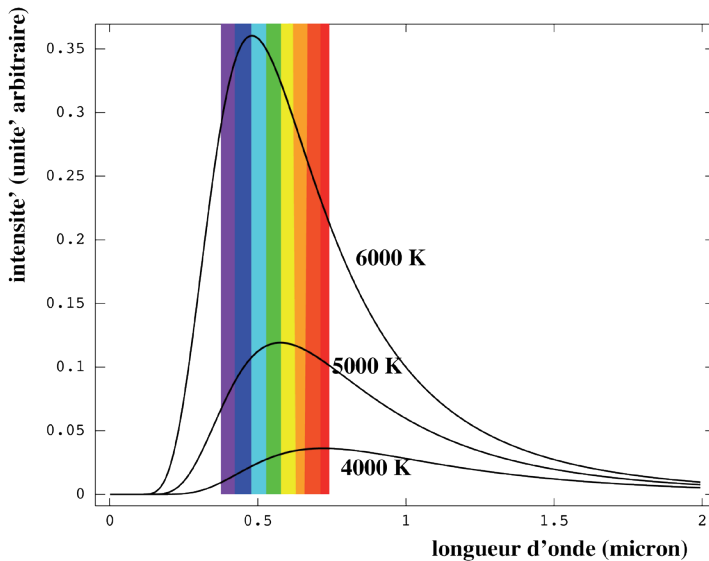


FIG. 4 - Intensité lumineuse à l'intérieur d'une cavité fermée pour trois valeurs de la température

Ces développements ont conduit à revoir et à préciser en physique atomique et subatomique un ensemble de notions fondamentales telles que grandeur observable, mesure, état d'un système, prédictibilité ou déterminisme. Ils ont aussi montré que certaines grandeurs physiques prennent des valeurs « discrètes » (c'est-à-dire une série de valeurs bien particulières et non pas des valeurs pouvant varier continûment) à cette échelle. C'est le cas, par exemple, de l'énergie d'un atome.

Par ailleurs, la mécanique quantique décrit les propriétés des systèmes microscopiques et leurs constituants (électrons, atomes, molécules) par des « fonctions d'onde ». Il s'ensuit que, comme on peut le faire en physique classique dans le domaine des ondes (sonores ou lumineuses), on peut construire de nouveaux états d'un système physique, d'un atome par exemple, en superposant ou mélangeant deux états particuliers – une procédure qui n'aurait aucun sens en mécanique classique.

Le qualificatif « quantique » (du latin *quantum* : quelle quantité, combien) fait référence au caractère souvent discontinu des grandeurs mesurées à l'échelle microscopique. L'exemple le plus simple de cette quantification est fourni par l'énergie d'un oscillateur harmonique, un système constitué d'une masse quasi ponctuelle attirée par un centre proportionnellement à la distance de la masse à ce centre (comme le fait un ressort). Alors qu'en mécanique classique l'énergie totale attachée aux oscillations d'un tel système peut prendre n'importe quelle valeur numérique (positive), en mécanique quantique, cette énergie ne peut prendre que les valeurs $1/2$, $3/2$, $5/2$, $7/2$ etc. fois $h\nu$,

Partie 1 – Des principes et des méthodes

où h est la constante de Planck et v la fréquence d'oscillation de la masse calculée selon la mécanique classique.

Procéder à une mesure entraîne presque toujours des perturbations non négligeables du système sur lequel porte la mesure et, de ce fait, introduit certaines incertitudes sur l'état du système après que cette mesure ait été effectuée. Par exemple, une façon de mesurer la position d'une particule (électron, photon...) consiste à la faire passer par un (petit) trou percé dans un écran. L'expérience montre que plus ce trou est petit, c'est-à-dire plus précise est l'information recherchée concernant la position de la particule au niveau de l'écran, plus l'onde qui décrit l'état de la particule est divergente à la sortie du trou, ce qui entraîne une incertitude de plus en plus grande sur la direction de la quantité de mouvement (produit de la masse par la vitesse) de la particule après cette mesure de position.

Un système physique étant préparé dans un état initial donné, la mécanique quantique ne permet pas, en général, de prédire de façon unique le résultat de certaines mesures faites ultérieurement sur ce système : pour une telle mesure, elle ne donne qu'une loi de probabilité portant sur son résultat. Par exemple, étant donné un noyau radioactif, la mécanique quantique ne peut rien dire sur la date à laquelle ce noyau particulier se désintégrera, mais elle permet de calculer la vie moyenne d'un échantillon contenant un grand nombre de noyaux analogues, et ce, sans limite fondamentale sur la précision de ce calcul. En d'autres termes, la mécanique quantique détermine la loi de probabilité (en l'occurrence, une exponentielle décroissante) du temps au bout duquel le noyau particulier auquel on a affaire se désintégrera.

Alors que la mécanique quantique a été développée pour décrire la structure et les propriétés de la matière à l'échelle microscopique, c'est aussi à elle qu'il faut faire appel pour rendre compte de certains phénomènes à l'échelle macroscopique, par exemple le fait que certains matériaux, tel le plomb, deviennent supraconducteurs à très basse température : ils ne présentent alors strictement plus aucune résistance à la circulation d'un courant électrique. Les grands aimants de l'accélérateur LHC du CERN fonctionnent dans ces conditions de supraconductivité.

Chapitre 2 Méthodes scientifiques

1. Observation, hypothèse, expérience

Une observation est souvent le point de départ d'une réflexion scientifique. Ce peut être aussi un jalon ou l'aboutissement d'un programme expérimental.

Une hypothèse est le point de départ d'une investigation scientifique (théorique ou expérimentale).

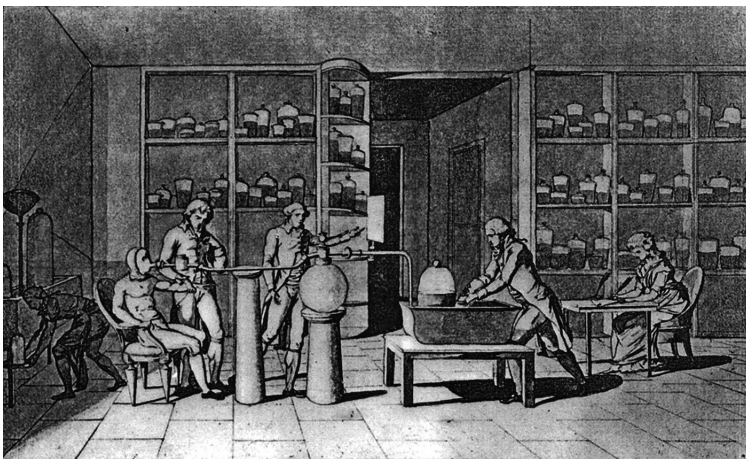
Une expérience est faite en général dans un but bien défini. Souvent, il s'agit de valider ou de rejeter une hypothèse. Elle porte alors sur un système aussi bien délimité que possible, et s'exécute selon un protocole précis, préalablement établi. Ce protocole définit, en particulier, les conditions initiales du système sur lequel porte l'expérience et inclut des contrôles du bon déroulement de celle-ci.

Le chercheur peut faire une expérience exploratoire, susceptible de révéler une piste nouvelle.

Le plus souvent, il est nécessaire de s'appuyer sur un ensemble d'observations ou d'expériences pour parvenir à une conclusion admise par tous.

Le chemin de l'hypothèse au protocole expérimental, puis de l'expérience à son analyse et au résultat final fait appel à des raisonnements logiques et à des analyses critiques, et souvent à des calculs mathématiques.

La méthodologie scientifique que développa Lavoisier pour effectuer ses expériences et analyser leurs résultats est à la base de la chimie moderne.



*Fig. 5 - Antoine Lavoisier (1743-1794)
effectuant une expérience sur la respiration humaine*

Partie 2

Des savoirs pour une culture générale

L'ensemble des rubriques qui suivent vise à donner une vue synthétique des différents champs scientifiques; des suggestions de rapprochement entre rubriques figurent à la fin de chacune d'elles (ces liens sont repérés par le numéro du chapitre suivi de celui de la rubrique). Les mathématiques irriguent l'ensemble des champs de la connaissance, même si seuls quelques rapprochements sont explicitement mentionnés. La culture scientifique n'est pas un encyclopédisme : elle vise en priorité une aptitude au questionnement, une démarche rigoureuse excluant tout dogmatisme, une prise en compte des faits, une ouverture à la critique. L'objectif ici est de faciliter le choix par chacun des notions les mieux à même de servir de repères, de points d'ancrage pour la construction de sa propre culture; il est de donner un cadre cohérent susceptible d'encourager la recherche d'informations sur des savoirs plus détaillés, notamment sur la toile.

Enseignants ou médiateurs scientifiques peuvent y trouver des éléments pour construire un cours, organiser une exposition ou des conférences.

Chapitre 1

Matière inerte et matière vivante

1. Constituants fondamentaux de la matière

Les atomes, généralement associés en molécules, sont les constituants fondamentaux de la matière inerte et de la matière vivante.

Plus de 99,9% de la matière d'un atome est concentrée dans un noyau central, chargé d'électricité positive, autour duquel circulent des électrons, chacun portant une charge électrique négative. Au total, l'atome n'est pas chargé électriquement.

Les noyaux sont constitués de protons qui portent chacun une charge électrique positive élémentaire ($e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$) et de neutrons, très semblables aux protons mais sans charge électrique. Le noyau le plus simple est le noyau d'hydrogène, composé d'un seul proton, sans neutron.

Le numéro atomique, Z , de l'atome est égal au nombre de protons dans le noyau. Les électrons se répartissent sur des « couches » électroniques, les plus proches du noyau étant ceux qui sont le plus liés électriquement au noyau. Les électrons plus éloignés (périphériques) peuvent plus facilement être arrachés de l'atome (pour donner un ion) ou se combiner avec ceux d'autres atomes pour former des molécules ou des solides. La distribution des électrons autour du noyau détermine les propriétés chimiques de l'atome.

La dimension des atomes et des molécules constituées de peu d'atomes est très petite, de l'ordre de l'angström ($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$). La dimension des noyaux est une centaine de milliers de fois plus réduite, de l'ordre de 10^{-15} m . Si les dimensions d'un atome étaient multipliées de sorte qu'il occupe toute la place de la Concorde, son noyau aurait la taille d'un pépin de pomme. À ce jour, aucune

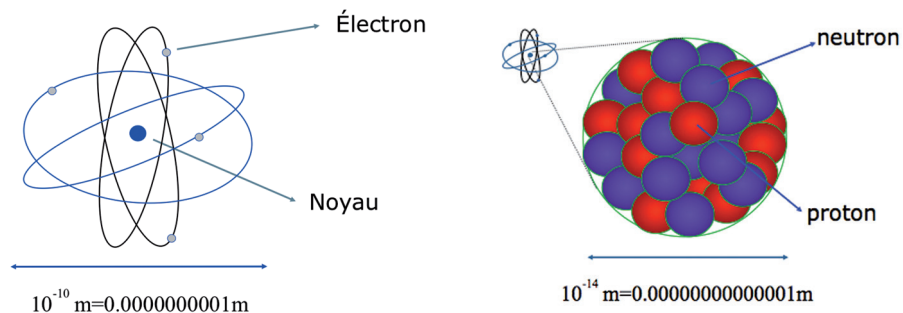


Fig. 15 - L'atome et son noyau