

H. KRIVINE et A. GROSMAN

DE  
L'ATOME  
IMAGINÉ  
À L'ATOME DÉCOUVERT  
CONTRE LE  
RELATIVISME

Préface  
d'Étienne Klein



de boeck



## Dans la même collection

ATKINS P. W., C'est quoi la chimie ?

ATKINS P. W., Les 4 grands principes qui régissent l'Univers

ATKINS P.W., Au cœur des réactions chimiques. La vie privée des atomes

BENSON D.C., Le ballet des planètes.

De l'élégance mathématique des orbites planétaires

DEPOVERE P., La classification périodique des éléments.

La merveille fondamentale de l'Univers

DEPOVERE P., La fabuleuse histoire des bâtisseurs de la chimie moderne

FREDERICK J.E., Sciences de l'atmosphère. Une introduction

JOUBERT J., De l'électron à la réaction. Entre forme et déformation

MALLEY M. C., La radioactivité. Une mystérieuse science

MILLOT C., VANDERMARLIÈRE J., Dessine-moi l'univers

NESSE R., WILLIAMS G., Pourquoi tombons-nous malade ?

SANDERS R., À la recherche de la matière noire.

Histoire d'une découverte fondamentale

STANNARD R., Vers la fin des découvertes.

Approchons-nous des limites de la science ?

WYNN C.M., WIGGINS A.W., Intuitions géniales.

Le top 5 des meilleures idées scientifiques

H. KRIVINE et A. GROSMAN

DE L'ATOME  
IMAGINÉ  
À L'ATOME DÉCOUVERT  
CONTRE LE  
RELATIVISME

Préface d'Étienne Klein

Pour toute information sur notre fonds et les nouveautés dans votre domaine de spécialisation, consultez notre site web : [www.deboeck.com](http://www.deboeck.com)

© De Boeck Supérieur s.a., 2015  
Fond Jean Pâques, 4 – 1348 Louvain-la-Neuve

1<sup>re</sup> édition

Tous droits réservés pour tous pays.

Il est interdit, sauf accord préalable et écrit de l'éditeur, de reproduire (notamment par photocopie) partiellement ou totalement le présent ouvrage, de le stocker dans une banque de données ou de le communiquer au public, sous quelque forme et de quelque manière que ce soit.

Imprimé aux Pays-Bas

Dépôt légal :

Bibliothèque nationale, Paris : janvier 2015

Bibliothèque royale de Belgique, Bruxelles : 2015/0074/097

ISBN 978-2-8041-9072-9

# Table des matières

<b>Préface</b>	<b>7</b>
<b>Introduction</b>	<b>13</b>
<b>1. Un peu de culture physique (ce qu'on sait aujourd'hui)</b>	<b>19</b>
Le noyau, l'atome et la molécule . . . . .	20
Loi d'Avogadro-Ampère . . . . .	24
<b>2. L'atome imaginé</b>	<b>27</b>
La pré-science des atomistes grecs . . . . .	27
Latence médiévale puis... Renaissance . . . . .	30
L'atomisme au Moyen Âge européen . . . . .	30
L'atomisme dans les mondes arabo-musulman et indien . . . . .	31
L'atomisme contre la pensée d'Aristote . . . . .	33
<b>3. Naissance de l'atomisme scientifique</b>	<b>35</b>
Les physiciens . . . . .	36
Les objections philosophiques . . . . .	39
Les objections physiques . . . . .	39
Premières évaluations du nombre d'Avogadro . . . . .	44
Le calcul de Loschmidt . . . . .	44
Les chimistes . . . . .	47
Dalton . . . . .	48
Les premières objections . . . . .	52
La réponse d'Avogadro . . . . .	52
Les objections (suite) . . . . .	56

Équivalentistes contre atomistes ? . . . . .	59
Le tournant : Cannizzaro et le congrès de Karlsruhe . . . . .	60
<b>4. L'atomisme moderne</b>	<b>61</b>
Einstein et Perrin . . . . .	61
Le mystère du mouvement brownien . . . . .	62
Mouvement brownien et nombre d'Avogadro . . . . .	69
Quelques conséquences secondaires de l'atomisme . . . . .	73
La dilution homéopathique . . . . .	73
L'anti-atomisme de la tradition catholique . . . . .	77
Un nouvel étalon de masse ? . . . . .	79
L'âge de la Terre . . . . .	81
Vitesse de la lumière et nombre d'Avogadro. . . . .	82
Tribulations des modèles atomiques . . . . .	83
La boîte de Pandore de la structure de la matière . . . . .	86
Matière et énergie noires ? . . . . .	89
<b>5. Le discours scientifique n'est pas un discours comme les autres</b>	<b>91</b>
La science explique-t-elle ? . . . . .	94
Quel point de départ d'une découverte ? . . . . .	96
L'imbrication des connaissances . . . . .	100
La science, une « construction sociale » ? . . . . .	104
Du trivialement vrai au trivialement faux . . . . .	109
Pour un scepticisme bien placé . . . . .	112
En guise de conclusion . . . . .	116
<b>Annexes</b>	<b>119</b>
Lettre de Charpak et Hennion à Benveniste . . . . .	119
Qu'est-ce que l'entropie ? . . . . .	120
Marche au hasard . . . . .	123
Équation barométrique . . . . .	125
Formule d'Einstein . . . . .	126
Le modèle d'Ehrenfest . . . . .	127
<b>Glossaire</b>	<b>131</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>133</b>
<b>Index</b>	<b>141</b>

# Préface

par Étienne Klein <sup>1</sup>

*Tous les corps matériels, qu'ils soient inertes ou vivants, solides, liquides ou gazeux, sont constitués de petits grains de matière, les atomes. Les cailloux sont faits d'atomes, de même que l'eau, le lait, le fromage, l'air, le papier, le bois, l'acier ou les planètes. Cela, les physiciens le savent de façon certaine depuis un peu plus d'un siècle, notamment grâce à une expérience menée par un savant français portant barbichette, Jean Perrin, sur un phénomène en apparence insignifiant, le mouvement « brownien ». Ce terme désigne la valse incessante des particules qui s'agitent dans un fluide. Ainsi, si on verse des grains de pollen dans une goutte d'eau, on observe au microscope que ces grains décrivent des trajectoires folles, apparemment guidées par le seul hasard. Mais en 1905, Einstein (qui cette année-là ne s'intéressait pas qu'à sa théorie de la relativité) avait déjà fait l'hypothèse que les mouvements désordonnés de ces grains ne sont pas de purs caprices. Ils sont secrètement déterminés par l'agitation des molécules d'eau qui ne cessent de heurter les grains de pollen, les obligeant sans cesse à changer de direction. L'expérience de Jean Perrin confirma les prédictions d'Einstein. La réalité des molécules, et donc des atomes, encore contestée au tout début du xx<sup>e</sup> siècle, fut ainsi établie. L'atome devenait un objet que l'expérience pouvait enfin saisir.*

*Dans un premier temps, la vision des atomes resta à peu près conforme au discours des atomistes de l'Antiquité : entités élémentaires indivisibles, pleines, immuables et éternelles. Mais on s'aperçut très vite que cette conception était beaucoup trop naïve. La véritable structure de l'atome n'est, en effet, pas simple du tout. L'atome, c'est un univers en soi, très différent de l'idée que les uns ou les autres avaient pu s'en faire.*

---

1. Étienne Klein est physicien, directeur de recherche au CEA.

*D'abord, l'atome échappe à son étymologie puisqu'il n'est pas insécable. C'est un édifice composite, constitué d'un noyau très dense (200 000 milliards de fois plus dense que l'eau liquide) autour duquel s'agitent des électrons. Et qu'y a-t-il entre le noyau et les électrons ? Du vide, rien que du vide (qui n'est d'ailleurs pas rien. . .). Mais s'il y a du vide au sein même de l'atome, c'est que l'atome n'est pas plein, contrairement à l'image que s'en faisaient nos grands anciens.*

*Ensuite, les atomes ne sont pas indestructibles. On peut les tailler en pièces, au propre comme au figuré. Par exemple, on peut leur arracher un ou plusieurs électrons. Au terme de cet épluchage périphérique, les atomes deviennent des « ions », porteurs d'une charge électrique. Mais on peut aussi bombarder leurs noyaux avec des particules de haute énergie de diverses natures (proton, neutron, électron...) et ainsi modifier le nombre de protons et de neutrons qu'ils contiennent. Enfin, les atomes ne sont pas éternels, d'une part parce qu'ils n'ont pas toujours été présents dans l'univers, d'autre part parce que certains d'entre eux (les atomes radioactifs) sont condamnés, par leur structure même, à changer de nature.*

*Les physiciens contemporains savent beaucoup de choses sur l'atome. Pour autant, ils ne clament pas qu'ils possèdent la « vérité sur l'atome », car certains phénomènes, notamment au sein du noyau de l'atome, sont encore l'objet de recherches approfondies. Mais ils savent que l'atome existe. Le fait que l'atome qu'ils ont appris à connaître n'ait été préalablement pensé par personne montre que, d'une certaine manière, cet objet-là s'est imposé à eux : ils ne l'ont pas inventé, mais découvert.*

*Dans ce bel ouvrage, Hubert Krivine et Annie Grosman nous rappellent quels ont été les arguments, les faits, les calculs, les expériences et les raisonnements qui ont permis aux physiciens de savoir ce qu'ils savent sur l'atome. En ces temps d'agnotologie galopante, leur contribution n'est pas seulement utile : elle est aussi précieuse, et même salvatrice.*

*Dans Humain, trop humain, Nietzsche pronostiquait qu'un jour « le goût du vrai allait disparaître au fur et à mesure qu'il garantirait moins de plaisir ». Il me semble que les temps présents lui donnent raison : « on y est », si je puis dire. Certes, nous continuons d'affirmer que nous aimons la vérité, que nous la désirons et l'acceptons telle qu'elle est, mais peut-être ne s'agit-il plus que d'une ritournelle. Car, à rebours de nos déclarations ferventes, il arrive que nous nous montrions plus enclins à déclarer vraies les idées que nous aimons qu'à aimer les idées vraies. Ce climat intellectuel découle d'abord de*

*la montée en puissance des idées ultrarelativistes : la science se voit accusée d'avoir gagné ses pouvoirs exclusivement grâce à des arguments d'autorité, et non parce qu'elle aurait un lien privilégié avec le « vrai », de sorte que ses prétentions peuvent être remises en cause, voire ridiculisées. Ainsi, sous couvert d'antidote symbolique à l'arrogance des scientifiques, un certain relativisme radical en vient-il à renforcer un soupçon qui se généralise par ailleurs, celui de l'imposture : « Finalement en science comme ailleurs, tout est relatif. » Chacun serait en somme libre d'adhérer ou pas adhérer à ce que la science a établi. En légitimant une forme de paresse intellectuelle, ce soupçon procure une sorte de soulagement : dès lors que la science produit des discours qui n'ont pas plus de véracité que les autres, pourquoi faudrait-il s'échiner à vouloir les comprendre, à se les approprier ? Il fait beau. N'a-t-on pas mieux à faire qu'à se consacrer à la physique, la biologie ou les statistiques ?*

*Mais il y a autre chose, qui renvoie directement à la philosophie des Lumières, plus exactement à sa lente extinction. L'une des idées qu'elle défendait était que la souveraineté du peuple se heurte à une limite, celle de la vérité, sur laquelle elle n'a pas prise. David Hume écrit par exemple, en 1742 : « Même si le genre humain tout entier concluait de manière définitive que le Soleil se meut et que la Terre demeure en repos, en dépit de ces raisonnements le Soleil ne bougerait pas d'un pouce de sa place et ces conclusions resteraient fausses et erronées à jamais<sup>2</sup> ». La vérité ne saurait relever d'un vote. Mais – et c'est là que les choses deviennent intéressantes en démocratie –, c'est aussi cette indépendance de la vérité qui protège l'autonomie de l'individu puisque celui-ci peut toujours, face au pouvoir, se réclamer du vrai.*

*Or, ce bel ordonnancement décrit par les Lumières se fracture peu à peu. Se répand en effet l'idée que « la science, c'est le doute ». Cette phrase a d'ailleurs constitué – curieux synchronisme – le leitmotiv de la rhétorique des climato-sceptiques. La science serait le doute ? Ah bon ? En ce début de XXI<sup>e</sup> siècle, il faudrait encore douter de l'existence de l'atome ou de la non-platitudo de la Terre ?*

*Une anecdote m'a permis de prendre conscience de cette évolution. Récemment, j'ai eu l'occasion de donner un cours de relativité (et non de relativisme...) à de futurs ingénieurs. Alors que je venais d'effectuer un calcul montrant que la durée d'un phénomène dépend de la vitesse de l'observateur, un étudiant prit la parole : « Monsieur, personnellement, je ne suis pas d'accord*

---

2. David Hume, *Le Sceptique*, in *Essais moraux, politiques & littéraires*, Alive, 1999, p. 215.

*avec Einstein ! » J'imaginai qu'il allait défendre une théorie alternative, ou bien réinventer l'éther luminifère, en tout cas qu'il allait argumenter. Mais il se contenta de dire : « Je ne crois pas à cette relativité des durées que vous venez de démontrer, parce que je ne la... sens pas ! » Là, j'avoue, j'ai éprouvé une sorte de choc : ce jeune homme qui n'avait certainement pas lu Einstein avait suffisamment confiance dans son « ressenti » personnel pour s'autoriser à contester un résultat qu'un siècle d'expériences innombrables avait cautionné. Je découvris à cette occasion que, lorsqu'elle se transforme en alliée objective du narcissisme, la subjectivité semble avoir du mal à s'incliner devant ce qui a été objectivé si ce qui a été objectivé la dérange ou lui déplaît.*

*On ne saurait donner à cette anecdote une portée générale, mais elle me semble tout de même indicatrice d'un changement de climat culturel (qui explique au passage la facilité déconcertante avec laquelle a pu se développer en France la vraie-fausse controverse sur le changement climatique). Aujourd'hui, notre société semble en effet parcourue par deux courants de pensée qui semblent contradictoires. D'une part, on y trouve un attachement intense à la véracité, un souci de ne pas se laisser tromper, une détermination à crever les apparences pour atteindre les motivations réelles qui se cachent derrière – bref une attitude de défiance généralisée. Mais à côté de ce désir de véracité, de ce refus d'être dupe, il existe une défiance tout aussi grande à l'égard de la vérité elle-même : la vérité existe-t-elle ? se demande-t-on. Si oui, peut-elle être autre que relative, subjective, culturelle ? Ce qui est troublant, c'est que ces deux attitudes, l'attachement à la véracité et la suspicion à l'égard de la vérité, qui devraient s'exclure mutuellement, se révèlent en pratique parfaitement compatibles. Elles sont même mécaniquement liées, puisque le désir de véracité suffit à enclencher au sein de la société un processus critique qui vient ensuite fragiliser l'assurance qu'il y aurait des vérités sûres.*

*Le fait que l'exigence de véracité et le déni de vérité aillent de pair ne veut toutefois pas dire que ces deux attitudes fassent bon ménage. Car, si vous ne croyez pas à l'existence de la vérité, quelle cause votre désir de véracité servira-t-il ? Ou – pour le dire autrement – en recherchant la véracité, à quelle vérité êtes-vous censé être fidèle ? Il ne s'agit pas là d'une difficulté seulement abstraite ni simplement d'un paradoxe : cette situation entraîne des conséquences concrètes dans la cité réelle et vient nous avertir qu'il y a un risque que certaines de nos activités intellectuelles en viennent à se désagréger.*

*Pourtant, n'y a-t-il pas quelque chose de bancal dans l'argumentation des relativistes les plus radicaux ? Car, contrairement à ce qui se passe*

*avec l'histoire – où la contestation de l'histoire officielle doit elle-même s'appuyer sur l'histoire, c'est-à-dire sur de nouvelles données historiques –, les dénonciations des sciences exactes ne se basent jamais sur des arguments relevant des sciences exactes. Elles s'appuient toujours sur l'idée étonnante qu'une certaine sociologie des sciences serait mieux placée pour dire la vérité des sciences que les sciences ne le sont pour dire la vérité de la nature... En somme, il faudrait se convaincre que la vérité n'existe pas, sauf lorsqu'elle sort de la bouche des sociologues des sciences qui disent qu'elle n'existe pas...*

*Certes, nul n'ignore que, par exemple, des intérêts militaires ont contribué à l'essor de la physique nucléaire. Cela relève d'ailleurs de la plus parfaite évidence : la périphérie de la science et son contexte social influencent son développement. Mais de là à en déduire que de tels intérêts détermineraient, à eux seuls, le contenu même des connaissances scientifiques, il y a un pas qui me semble intellectuellement infranchissable. Car si tel était le cas, on devrait pouvoir montrer que nos connaissances en physique nucléaire exprimeraient, d'une manière ou d'une autre, un intérêt militaire ou géopolitique. Or, si l'humanité décidait un jour de se débarrasser de toutes ses armes nucléaires, il est peu probable que cette décision changerait ipso facto les mécanismes de la fission de l'uranium ou du plutonium...*

*Si l'atome et la physique quantique, pour ne prendre que ces deux exemples, n'étaient que de simples constructions sociales, il faudrait aussi expliquer par quelle succession de « miracles » – oui, c'est le mot – on a pu parvenir à concevoir des lasers. Si les lasers existent et fonctionnent, n'est-ce pas l'indice qu'il y a un peu de « vrai » dans les théories physiques à partir desquelles on a pu les concevoir, de « vrai » avec autant de guillemets que l'on voudra et un *v* aussi minuscule qu'on le souhaitera ? En définitive, le fait que les lasers fonctionnent n'est-il pas la preuve rétrospective que Planck, Einstein et les autres avaient bel et bien compris deux ou trois choses non seulement à propos d'eux-mêmes ou de leur culture, mais – osons le dire – à propos des interactions entre la lumière et la matière ?*

*La sociologie des sciences a certainement raison d'insister sur l'importance du contexte dans la façon dont la science se construit. Mais faut-il tirer de ce constat, au bout du compte, des conclusions aussi relativistes que certaines des siennes ? Il est permis d'en douter. Car il serait difficile d'expliquer d'où vient que les théories physiques, telles la physique quantique ou la théorie de la relativité, « marchent » si bien, si elles ne disent absolument rien de vrai. Comment pourraient-elles permettre de faire des prédictions aussi*

*merveilleusement précises si elles n'étaient pas d'assez bonnes représentations de ce qui est (ce serait trop dire cependant que d'en déduire qu'elles ne peuvent dès lors qu'être vraies). En la matière, le miracle – l'heureuse coïncidence – est très peu plausible. Mieux vaut donc expliquer le succès prédictif des théories physiques (nous parlons ici de celles qui n'ont jamais été démenties par l'expérience) en supposant qu'elles nous parlent de la nature, et qu'elles arrivent à se référer, plus ou moins bien, à cette réalité-là. Et que, sans arguments complémentaires, nos affects, nos préjugés, nos intuitions ne sont guère en mesure de les contester sur ce qui constitue leur terrain de jeu.*

# Introduction

*Deviner ainsi l'existence ou les propriétés d'objets qui sont encore au-delà de notre connaissance, expliquer du visible compliqué par de l'invisible simple, voilà la forme d'intelligence intuitive à laquelle, grâce à des hommes tels que Dalton ou Boltzmann, nous devons l'atomistique...*

Introduction du livre de Jean Perrin, *Les Atomes* (1913).

*La dame dans l'assistance était têtue. « Avez-vous jamais vu un atome ? » insistait-elle... Ma réponse à cette épineuse question commence toujours par une tentative de généraliser le mot "voir"... Finalement, en désespoir de cause, je demande : « Avez-vous jamais vu le pape ? Oui, bien sûr, est la réponse habituelle. Je l'ai vu à la télévision ». Vraiment ? Ce que la dame a vu était un jet d'électrons frappant le phosphore étalé sur la face interne d'un écran en verre. Ma preuve concernant l'atome ou le quark est tout aussi bonne<sup>1</sup>.*

Les choses qu'on ne voit pas existent-elles ou ne sont-elles que pures constructions de l'esprit<sup>2</sup> ? Et celles qu'on « voit » ? Si on les « voit », c'est que l'œil reçoit de la lumière émise ou réflétee par l'objet et transmet par le nerf optique des signaux au cerveau qui doit alors les interpréter. Les mêmes objets peuvent donc être perçus différemment suivant les personnes<sup>3</sup> (et les animaux). Le ciel analysé en ultra-violet ou infrarouge est-il « vu » ou pas ?

---

1. Anecdote attribuée à Léon Lederman, prix Nobel de physique en 1988 pour ses travaux sur le neutrino.

2. Observons ainsi que les mots « visible » et « évident » (de *ex videre*) sont couramment identifiés à « vrai ».

3. Les daltoniens, par exemple, voient mal les couleurs. C'est Dalton (1766-1844), le père de l'atomisme moderne, atteint de cette maladie qui lui a donné son nom en France.

Les pères Noël, les fées, les djinns et les atomes font tous partie de la catégorie des choses non vues, or ils n'ont pas le même statut. Certaines constructions de l'esprit correspondent à des mythes, d'autres pas.

À la fin de la Renaissance, un débat féroce opposait Galilée (1564-1642) à ses détracteurs : qu'est-ce qui prouvait que les satellites de Jupiter ou les montagnes de la Lune étaient réels puisqu'on ne pouvait les voir qu'à travers la lunette<sup>4</sup> ? Aujourd'hui l'opinion s'est habituée à considérer comme réelles des « choses » pourtant invisibles à l'œil nu. Par exemple, on sait que le courant électrique circule dans un fil parce qu'une ampoule s'allume ou que l'aiguille d'un ampèremètre dévie, que les ondes électromagnétiques existent parce qu'un poste de radio fonctionne ou qu'un four à micro-ondes chauffe. À chaque fois un effet visible, ou en tout cas sensible, se manifeste qui « prouve » la réalité de ces invisibles. Mais cette « démonstration » ne vaut que parce qu'elle repose sur des théories indiscutées, elles-mêmes reposant sur des millions de faits expérimentaux dont elles ont bien rendu compte jusque-là.

On fait maintenant confiance aux instruments et aux théories existantes pour transformer de l'invisible en signaux sensibles et interprétables. Il y a bien longtemps qu'il n'y a plus, en physique, de données expérimentales brutes, directement visibles ; toutes renvoient à un ensemble très chargé d'autres expériences et théories. Un exemple extrême est l'existence du boson de Higgs : ce qu'ont finalement « vu » les physiciens du CERN, à la suite du traitement de milliards de données, est une (toute petite) bosse sur une courbe d'écran d'ordinateur. On est très loin d'une photo !

Le degré de certitude des théories et des appareillages qui ont permis de « voir » ce boson n'est certes pas celui des théories et des appareillages permettant aujourd'hui de « voir » les atomes d'un métal et encore moins celui qui permet de « voir » le pape à la télévision. C'est toute la différence entre la science en train de se faire et la science faite. Ce n'est pas une différence de nature.

Cette distance entre les choses invisibles (microbes, atomes, quarks, etc.) et leurs manifestations « visibles » – comme le manque de compréhension générale des liens logiques qui relient les unes aux autres – participe de la croyance moderne que ce sont les savants qui, en quelque sorte, « fabriqueraient » ce qu'ils croient découvrir. L'un des buts de ce livre est

---

4. Ce n'était pas une objection si irrationnelle : la lunette était une invention récente et son fonctionnement encore mal compris théoriquement.

donc de combattre ce relativisme répandu en expliquant, dans un cas concret, les expériences et les raisonnements qui ont conduit à nos connaissances actuelles des atomes.

Généralement, on attribue à Démocrite (env. 460–360 av. J.-C.), contemporain de Socrate, puis à Lucrèce (1<sup>er</sup> siècle av. J.-C.) la paternité de l'atomisme, c'est-à-dire l'idée que la matière est composée de briques insécables séparées par du vide. Combattue par Aristote (384-322 av. J.-C.) qui imposa sa marque à la physique jusqu'à la Renaissance, cette conception, largement spéculative, fut à peu près sans lendemain. Reste à ces philosophes le mérite de s'être posé la question : peut-on couper indéfiniment de la matière en morceaux tous identiques ou le processus a-t-il une fin ? Autrement dit, la matière est-elle continue ou discrète ?

Pour la majorité des gens, le nombre d'Avogadro,  $N_A$ , sur lequel nous centrerons notre histoire de l'atomisme, n'évoque rien, si ce n'est, pour certains, un vague et ennuyeux souvenir de lycée, quelque chose en rapport avec la physique ou la chimie et qui est donc naturellement incompréhensible. Ce nombre colossal qui vaut sensiblement  $6 \times 10^{23}$ , soit 6 fois 100 000 milliards de milliards, défie toute imagination ; il permet d'évaluer le nombre d'atomes qui composent quelques grammes de matière. Il mesure l'abîme qui sépare le monde microscopique du monde macroscopique (celui de tous les jours, pour nous autres, êtres humains). La genèse de sa découverte, comme celle de l'atome, a mobilisé toute sorte de facettes de l'activité humaine : la chimie et la physique bien sûr, mais aussi les mathématiques et même la philosophie. Le passage de « l'hypothèse atomique <sup>5</sup> » à la théorie atomique est pour nous exemplaire de la construction d'une démarche scientifique. Voici comment s'exprimait un de ses principaux artisans, Jean Perrin (1913) (1870-1942), dans son ouvrage *Les Atomes*, un des plus beaux livres scientifiques de langue française.

*Un temps viendra peut-être où les atomes, enfin directement perçus, seront aussi faciles à observer que le sont aujourd'hui les microbes. L'esprit des atomistes actuels se retrouvera alors chez ceux qui auront hérité le pouvoir de deviner, derrière la réalité expérimentale devenue plus vaste, quelque autre structure cachée de l'Univers.*

---

5. Appellation encore en vigueur en France dans certains cours de physique jusqu'à la seconde moitié du xx<sup>e</sup> siècle.

Quarante-quatre ans plus tard, cette prophétie a été réalisée par Erwin Müller grâce au microscope à émission ionique de champs.

À partir du moment où l'existence des atomes a été postulée, la question s'est posée de leur forme, de leur taille, de leur structure et de leur nombre. Or, leur taille n'est pas seulement petite et leur nombre grand, mais cette taille est si petite que pour en analyser la structure elle requiert une nouvelle physique : la physique quantique, et leur nombre si grand qu'il implique une nouvelle approche de nature probabiliste : la mécanique statistique.

Ni philosophes, ni sociologues des sciences, nous nous sommes néanmoins attaqués à cet épineux problème de la valeur des idées scientifiques. Osons une image. Il y a dissymétrie éditoriale entre soignants et soignés : pour des raisons évidentes, ce sont surtout les premiers qui écrivent sur les seconds (notons qu'à la limite, entre vétérinaires et cochons, la dissymétrie est totale). Les bons médecins savent cependant que, même dépourvu de connaissances médicales, le patient peut apporter un jugement pertinent. Le chercheur n'est certes pas le malade du sociologue (même s'il a quelquefois le sentiment d'être son cobaye) mais il a droit à la parole. Le fait de vouloir, en quelque sorte, éviter une sociologie des sciences de type « vétérinaire » ne signifie évidemment pas qu'il faille, à l'inverse, prendre les écrits des savants sur leur propre travail comme parole d'Évangile.

Nous voulons utiliser les travaux menés durant plus de vingt-cinq siècles sur « l'hypothèse atomique » comme méta-laboratoire pour examiner la genèse d'une théorie scientifique. Ce livre n'est pas un traité général de philosophie ou d'histoire des sciences, il ne s'intéresse qu'au développement des idées sur une question précise, laissant délibérément de côté les contextes historique et socio-politique<sup>6</sup>. Il est plutôt un manuel de « travaux pratiques » pour des cours de philosophie des sciences que nous n'avons pas écrits. Ceux, entre autres, de Bertrand Russell, Jacques Bouveresse, Steven Weinberg, Richard Dawkins, David Deutsch ou Alan Sokal.

Nous voulons établir par quels arguments « l'hypothèse atomique » est devenue une vérité scientifique, même si le mot « vérité » choque à juste titre chaque fois qu'il est confondu avec une vérité révélée et comment cette hypothèse atomique a acquis une vraisemblance si grande qu'en vocabulaire courant, on appelle cela une certitude. Pour ce faire, nous examinons les

---

6. C'est aussi ce qui a été fait dans un précédent livre (Krivine, 2011), à propos de nos conceptions sur l'âge et le mouvement de la Terre.

deux bouts de la chaîne : la lente gestation de la théorie atomique au cours du XIX<sup>e</sup> siècle, puis les évaluations récentes du nombre d'Avogadro.

Nous montrerons en conclusion comment cette genèse de la théorie atomique a intimement mêlé les points de vue expérimentaux et théoriques, et comment elle questionne les tenants d'une science « socialement construite », qui réduisent finalement la recherche scientifique à un immense jeu de rôles destiné à affirmer des positions de pouvoir au bénéfice d'instituts ou d'individus. Pour cette école, la notion de vérité scientifique est vue comme une naïveté et le recours à l'expérimentation comme un simple argument rhétorique additionnel dans la compétition. Très minoritaires chez les scientifiques – quand ils les connaissent –, ces idées « relativistes », bien dans l'air du temps, ont été largement diffusées par Bruno Latour dans son livre *La science en action* dont nous ferons la critique car elles peuvent jouer un rôle nocif dans le choix des politiques de la recherche.

Nous ajoutons en annexes quelques développements un peu techniques. Un glossaire rappelle la signification de quelques termes utilisés. Une bibliographie et un index des noms propres et de certains mots savants terminent l'ouvrage.

Les passages en petits caractères peuvent être sautés en première lecture, ceux en gras résument le contenu de chapitres ou de paragraphes.

Les références sont indiquées ainsi : (Auteur, date) ou bien Auteur (date) où la date est celle de la parution.

## Remerciements

Nous remercions nos amis et collègues :

Béregère Abou, Samuel Alizon, Roger Balian, Sébastien Balibar, Jacques Bouveresse, Michel Boyer, Édouard Brézin, Xavier Campi, Maurice Chastrette, Boris Chenaud, Manuel Combes, Alain Comtet, Jean-Pierre Dedonder, Philippe Deterre, Claudine Falk, Danielle Fauque, Pierre Fiala, Alexandre Ghazi, Françoise Gicquel, Olivier Giraud, Delphine Hardin,

Catherine Jami, Thierry Jolicœur, Samy Joshua, Lucille Julien, Marcel-Francis Kahn, Jean-Pierre Kahane, Étienne Klein, Jean Krivine, Tony Lévy, Robert Luft, Benjamin Maillet, Charles Malamoud, Dominique Mouhanna, Sylvie Nony, Reynald Pain, Nicolas Pavloff, Bernard Raoult, Jean Louis Rivail, Nicolas Sator, Alan Sokal, Jacques Treiner, Sophie Trincaz-Duvoid, Denis Ullmo et Marcel Vénéroni pour leur encouragement et pour avoir critiqué tout ou partie de ce travail.

Ils ont apporté et – heureusement – supprimé plusieurs idées de cet ouvrage. Parce que nous tenons à conserver l'amitié des collègues qui nous ont aidés, il faut préciser qu'ils ne partagent pas nécessairement toutes nos opinions.

Thérèse-Marie Mahé aura eu le mérite et la patience de transformer le texte initial en ce que voulaient ses auteurs : un livre fait pour être compris. Qu'elle en soit remerciée.

Merci à André Bellaïche pour ses nombreuses et judicieuses critiques ainsi que son aide professionnelle pour le travail d'édition.

Merci également à Irène, Jean-Michel et Catherine pour les relectures du manuscrit et à Vincent pour son aide informatique.

Une horloge arrêtée indique à coup sûr l'heure exacte, mais on ne sait pas quand. De même, le doute systématique permet certes de se prémunir des erreurs ou des escroqueries, mais, au passage, il ignore également le vrai. Quelles que soient les satisfactions intellectuelles qu'il procure, il est donc aussi opérant que notre horloge arrêtée. C'est – entre autres – ce qu'Étienne Klein souligne dans la riche préface dont nous lui savons gré.

L'un de nous (HK) a apprécié l'accueil et l'ambiance intellectuelle offerts par le Laboratoire de Physique Théorique et Modèles Statistiques (LPTMS) de l'Université de Paris XI et le Laboratoire de Physique Nucléaire et de Haute Énergie (LPNHE) de l'Université Pierre et Marie Curie.

# 1

## Un peu de culture physique (ce qu'on sait aujourd'hui)

*Si, dans un cataclysme, toute notre connaissance scientifique devait être détruite et qu'une seule phrase passe aux générations futures, quelle affirmation contiendrait le maximum d'informations dans le minimum de mots ? Je pense que c'est l'hypothèse atomique (ou le fait atomique, ou tout autre nom que vous voudrez lui donner) que toutes les choses sont faites d'atomes – petites particules qui se déplacent en mouvement perpétuel, s'attirant mutuellement à petite distance les unes les autres et se repoussant lorsque l'on veut les faire se pénétrer. Dans cette seule phrase, vous verrez qu'il y a une énorme quantité d'information sur le monde, si on lui applique un peu d'imagination et de réflexion.*

Richard Feynman, *The Feynman Lectures on Physics*, Lecture 1, p. 2.

**Nous allons brièvement rappeler ici la constitution microscopique de la matière, telle qu'elle est connue aujourd'hui.**

Pour des raisons de clarté, nous avons choisi de débiter par la conception moderne de la matière, c'est-à-dire de commencer l'histoire de l'atomisme par la fin. En avons-nous le droit ? Nous croyons que les atomes existent et donc qu'ils existaient préalablement à leur mise en évidence<sup>1</sup> ; de même pensons-nous que l'Amérique existait avant Christophe Colomb. On peut donc décrire les voyages de ce découvreur à l'aide de cartes modernes, assez représentatives de ce qui est. Ce n'est pas la seule approche. Si l'on veut entrer dans la pensée du navigateur et éviter les anachronismes, on peut n'utiliser que la carte de Ptolémée (env. 100–170 apr. J.-C.). De même, pourrait-on décrire les difficultés de la genèse de l'atomisme en se limitant

---

1. Bruno Latour, par exemple, a besoin de deux pleines pages de *la Recherche*, n° 307 pour savoir si « affirmer, sans autre forme de procès, que le Pharaon [Ramsès II] est mort de la tuberculose revient à commettre le péché cardinal de l'historien, celui d'anachronisme », puisque le bacille de Koch, responsable de la maladie, n'avait pas encore été inventé ! Nous reviendrons plus en détail sur cette conception dans la conclusion.

aux seules connaissances des protagonistes de l'époque. Mais un tel livre, destiné à un public spécialisé, perdrait en simplicité et gagnerait en longueur.

## Le noyau, l'atome et la molécule

Tous les objets matériels sont constitués d'un ou de plusieurs des 118 éléments regroupés dans le tableau – écrit ici sous sa forme actuelle – proposé en 1869 (table 1) par le chimiste russe Dmitri Ivanovitch Mendeleïev (1834-1907). Notons que son tableau initial ne contenait que la moitié des éléments. Les autres seront découverts ensuite et rangés dans les cases prophétiquement laissées vides<sup>2</sup>. Tous les éléments (l'hydrogène, le carbone, le plomb, etc.) existent sous la forme d'atomes ; les atomes sont *chimiquement* indécomposables (*atome* veut dire *insécable* – impossible à couper – en grec) mais on sait maintenant qu'ils sont sécables (osera-t-on écrire coupables ?) avec l'énergie nucléaire : le vieux rêve des alchimistes de métamorphoser le plomb en l'or réclame une énergie des millions de fois supérieure à ce que la chimie peut offrir ; c'est celle communiquée par les accélérateurs de particules.

Les corps simples sont composés d'atomes identiques. Chaque atome comporte un noyau central formé de nucléons :  $Z$  protons chargés positivement plus un nombre égal ou supérieur de neutrons<sup>3</sup> non chargés. Protons et neutrons ont sensiblement la même masse.

Autour de ce noyau « gravitent »  $Z$  électrons chargés négativement, qui assurent ainsi la neutralité électrique du système. Une image populaire assimile le noyau entouré de son cortège électronique à l'image de notre système planétaire, la force électrique attractive entre les protons et les électrons jouant le rôle de la force de gravitation dans le Système solaire. Cette image, adoptée un temps par les physiciens, est trompeuse : les électrons obéissent à la mécanique quantique ; ils n'ont pas de trajectoire, au contraire des planètes, seulement une probabilité de présence plus ou moins grande suivant leur distance au noyau.

Comme la masse d'un nucléon est presque 2 000 fois supérieure à celle d'un électron, le noyau concentre pratiquement toute la masse de l'atome. Enfin, la taille de l'atome vaut plus de 100 000 fois celle de son noyau : elle est de l'ordre du 10 000<sup>e</sup> de micron (un micron vaut un millième de millimètre).

---

2. Pour le statut actuel de ces cases vides, voir Scerri (2013).

3. À l'exception du noyau d'hydrogène composé du seul proton.

La matière est donc très majoritairement composée de vide. Comment l'a-t-on su ? En 1909, le physicien britannique Rutherford (1871-1930) montre que seulement 0,01 % d'un faisceau de particules  $^4\alpha$  est dévié lors de la traversée d'une feuille d'or très mince. Et quand elles sont déviées, elles le sont d'un très grand angle. La seule explication plausible (Geiger et Marsden, 1909) est qu'en règle générale les particules  $\alpha$  ne rencontrent rien sur leur passage ; seule une minorité heurte des îlots de charges positives, les noyaux, qui les repoussent.

Les propriétés chimiques sont déterminées par le cortège électronique de l'atome. Au nombre d'électrons (et de protons)  $Z$ , correspond donc le nom de l'élément chimique. Deux éléments qui ne diffèrent que par leur nombre de neutrons sont appelés isotopes<sup>5</sup> (qui signifie « même place » en grec) : ils occupent la même case dans le tableau de Mendeleïev (qui classe les éléments chimiques selon leur nombre de protons,  $Z$ ) et ont les mêmes propriétés chimiques. Il existe plus d'une centaine d'isotopes naturels. Le carbone-12, par exemple, contient 6 protons et 6 neutrons, c'est le plus répandu, mais il existe un isotope (instable), le carbone-14, qui contient 8 neutrons. On connaît 26 isotopes à l'uranium.

Par l'effet des interactions de leur cortège électronique, des atomes identiques ou différents, mis en présence, s'assemblent en molécules<sup>6</sup> ; ce sont les briques élémentaires des composés chimiques (simples, ou composés si les atomes sont différents). La molécule d'hydrogène gazeux, par exemple, est diatomique (composée de deux atomes), et elle s'écrit  $H_2$  ; celle d'oxygène (diatomique aussi) s'écrit  $O_2$  ; celle de l'eau composée de deux atomes d'hydrogène et d'un atome d'oxygène, s'écrit  $H_2O$ . Un corps chimique composé se distingue ainsi d'un *mélange* de molécules différentes (par exemple de l'eau sucrée) où les proportions des constituants peuvent varier arbitrairement.

Habituellement on distingue trois états de la matière : gazeux, liquide et solide. À l'état gazeux comme à l'état liquide, les molécules du fluide sont délocalisées et se choquent sans cesse ; c'est ce qu'on appelle l'agitation thermique. Voilà pourquoi, mis en contact, deux fluides (gaz ou liquides) se

---

4. Ce sont des atomes d'hélium ayant perdu leurs deux électrons, donc des noyaux composés de deux protons et deux neutrons – ce qui veut dire qu'ils ont une charge électrique positive.

5. Découverts en 1913 par l'anglais Soddy, prix Nobel de chimie.

6. Ce n'est pas le seul agencement possible : ils peuvent également se regrouper en réseau, comme dans les cristaux ou les métaux.

# Tableau périodique

Groupe	1	2						8	9
	IA	IIA							VIII B
Période									
I	hydrogène 1 H 1,00794								
2	lithium 3 Li 6,941	béryllium 4 Be 9,012182							
3	sodium 11 Na 22,98976928	magnésium 12 Mg 24,3050							
4	potassium 19 K 39,0983	calcium 20 Ca 40,078	scandium 21 Sc 44,955912	titane 22 Ti 47,867	vanadium 23 V 50,9415	chrome 24 Cr 51,9961	manganèse 25 Mn 54,938045	fer 26 Fe 55,845	cobalt 27 Co 58,933195
5	rubidium 37 Rb 85,4678	strontium 38 Sr 87,62	yttrium 39 Y 88,90585	zirconium 40 Zr 91,224	niobium 41 Nb 92,90638	molybdène 42 Mo 95,94	technétium 43 Tc 97,9072	ruthérium 44 Ru 101,07	rhodium 45 Rh 102,90550
6	césium 55 Cs 132,9054519	baryum 56 Ba 137,327	lanthanides 57-71	hafnium 72 Hf 178,49	tantale 73 Ta 180,94788	tungstène 74 W 183,84	réactif 75 Re 186,207	osmium 76 Os 190,23	iridium 77 Ir 194,217
7	francium 87 Fr [223,0197]	radium 88 Ra [226,0254]	actinides 89-103	rutherfordium 104 Rf [263,1125]	dubnium 105 Db [262,1144]	seaborgium 106 Sg [266,1219]	bohrium 107 Bh [264,1247]	hassium 108 Hs [269,1341]	meitnerium 109 Mt [268,1388]
			lanthane 57 La 138,90547	cerium 58 Ce 140,116	praseodyme 59 Pr 140,90765	néodyme 60 Nd 144,242	prométhium 61 Pm [144,9127]	samarium 62 Sm 150,36	
			actinium 89 Ac [227,0277]	thorium 90 Th 232,03806	protactinium 91 Pa 231,03588	uranium 92 U 238,02891	neptunium 93 Np [237,0482]	plutonium 94 Pu [244,0642]	

— nom de l'élément  
 — numéro atomique  
 — symbole chimique  
 — masse atomique relative ou [celle de l'isotope le plus stable]

primordial (encadré plein)  
 désintégration d'autres éléments (encadré pointillé)  
 synthétique (encadré traitillés)

TABLE I. Tableau de Mendeleïev sous sa forme actuelle. Les éléments sont

# des éléments

18  
VIII A

			13 IIIA	14 IVA	15 VA	16 VIA	17 VIIA	18 VIII A
			bore 5 B 10,811	carbone 6 C 12,0107	azote 7 N 14,00644	oxygène 8 O 15,9994	fluor 9 F 18,9984032	hélium 2 He 4,002602
10	11 IB	12 IIB	aluminium 13 Al 26,9815386	silicium 14 Si 28,0855	phosphore 15 P 30,973762	soufre 16 S 32,066	chlore 17 Cl 35,4527	argon 18 Ar 39,948
nickel 28 Ni 58,6934	cuivre 29 Cu 63,546	zinc 30 Zn 65,39	gallium 31 Ga 69,723	germanium 32 Ge 72,61	arsenic 33 As 74,92160	sélénium 34 Se 78,96	brome 35 Br 79,904	krypton 36 Kr 83,80
palladium 46 Pd 106,42	argent 47 Ag 107,8682	cadmium 48 Cd 112,411	indium 49 In 114,818	étain 50 Sn 118,710	antimoine 51 Sb 121,760	tellure 52 Te 127,60	iode 53 I 126,90447	xénon 54 Xe 131,29
platine 78 Pt 195,084	or 79 Au 196,966569	mercure 80 Hg 200,59	thallium 81 Tl 204,3833	plomb 82 Pb 207,2	bismuth 83 Bi 208,98040	polonium 84 Po [208,9824]	astate 85 At [209,9871]	radon 86 Rn [222,0176]
darmstadtium 110 Ds [272,1463]	roentgenium 111 Rg [272,1535]	copernicium 112 Cn [277]	ununtrium 113 Uut [284]	ununquadium 114 Uuq [289]	ununpentium 115 Uup [288]	ununhexium 116 Uuh [292]	unuseptium 117 Uus [292]	ununoctium 118 Uuo [294]
europium 63 Eu 151,964	gadolinium 64 Gd 157,25	terbium 65 Tb 158,92535	dysprosium 66 Dy 162,500	holmium 67 Ho 164,93032	erbium 68 Er 167,259	thulium 69 Tm 168,93421	ytterbium 70 Yb 173,04	lutécium 71 Lu 174,967
américium 95 Am [243,0614]	curium 96 Cm [247,0703]	berkélium 97 Bk [247,0703]	californium 98 Cf [251,0796]	einsteinium 99 Es [252,0830]	fermium 100 Fm [257,0951]	mendélévium 101 Md [258,0984]	nobélium 102 No [259,1011]	lawrencium 103 Lr [262,110]

classés par numéro atomique croissant.

mélangent<sup>7</sup>. En revanche, dans les solides, les molécules ou les atomes sont localisés : ils oscillent en permanence autour d'une position d'équilibre. Ce qui distingue le gaz du liquide est la densité : dans les gaz, *le libre parcours moyen* (distance moyenne parcourue par une molécule entre deux chocs) est considérable par rapport à la taille de la molécule. Dans les liquides, il est du même ordre de grandeur. Dans tous les cas, plus la température est élevée, plus grande est la vitesse moyenne des molécules.

## Loi d'Avogadro-Ampère

La loi dite d'Avogadro-Ampère, du nom de ses deux découvreurs<sup>8</sup>, joue, comme nous le verrons, un rôle essentiel dans la justification de l'« hypothèse atomique » et dans l'estimation du nombre d'Avogadro. Elle s'énonce ainsi : *des volumes égaux de gaz différents, à mêmes pression et température, contiennent le même nombre de molécules.*

Cette loi peut sembler étonnante puisque des gaz différents sont constitués de molécules de tailles différentes. Mais quelle que soit cette taille, elle reste petite par rapport aux distances intermoléculaires, si bien qu'on peut considérer les molécules comme des points matériels et sans interaction. C'est l'approximation dite des gaz parfaits, d'autant mieux vérifiée que les gaz sont à faible densité, c'est-à-dire que les molécules sont suffisamment distantes les unes des autres en moyenne.

Si on supposait les molécules d'un gaz *strictement* ponctuelles et sans interaction, leur probabilité de rencontre serait nulle et elles seraient sans influence les unes sur les autres. Or, on constate qu'un gaz dans une enceinte fermée et isolée atteint une température et une densité uniformes. Comment, sans interaction, un tel gaz pourrait-il se thermaliser, c'est-à-dire comment les molécules les plus rapides (ou les plus lentes) pourraient-elles céder (ou recevoir) de l'énergie ? De ce point de vue, on ne peut pas négliger l'existence d'une petite interaction entre les molécules qui est responsable de l'établissement de l'équilibre, mais dont l'influence est négligeable sur l'énergie du système.

---

7. Il y a néanmoins des liquides non miscibles, comme l'huile et l'eau où des forces intermoléculaires s'opposent au mélange.

8. Le premier (1776-1858) est italien, le second (1775-1836), français.

Dans les conditions dites normales (température de  $0^{\circ}\text{C}$  et pression atmosphérique), la plupart des gaz courants, tels l'hydrogène, l'azote, l'oxygène, le gaz carbonique, etc., peuvent être considérés comme parfaits avec une très bonne approximation. Ainsi un nombre donné de molécules de ces gaz occupe toujours le même volume. Historiquement le nombre d'Avogadro a été défini comme le nombre de molécules d'un gaz parfait occupant un volume de 22,4 litres. Ce volume a été choisi parce qu'il contient des quantités simples d'éléments : pour l'hydrogène, c'est sensiblement 2 grammes, 28 grammes pour l'azote, 32 grammes pour l'oxygène, etc. C'est ce qu'on appelle une mole.

En réalité, pour quatre raisons d'importance très inégale, la masse atomique (voir le glossaire) n'est pas, comme le nombre de masse qui compte les nucléons ou le numéro atomique qui compte les protons, un nombre entier. Elle le serait si les masses des protons et des neutrons étaient identiques (prises par convention égales à l'unité) et si la masse de l'atome était simplement la somme des masses des nucléons, mais :

1. Les éléments naturels sont souvent constitués d'isotopes de masses atomiques différentes même si chacune est presque entière. Par exemple, la masse atomique du chlore naturel composé essentiellement de trois quarts de chlore-35 et d'un quart de chlore-37 est de 35,453 grammes.
2. La masse d'un noyau est un peu différente de la somme de ses divers nucléons, cette différence de masse  $\Delta m$  correspond, par la célèbre formule d'Einstein  $E = \Delta m c^2$ , à une énergie de liaison qui assure la cohésion du noyau. Par exemple, la masse atomique de l'isotope 16 de l'oxygène n'est pas 16, mais vaut 15,9949 grammes.
3. La masse des neutrons n'est pas exactement celle des protons (elle est 0,14% plus lourde).
4. La masse des électrons est très petite par rapport à la masse des nucléons qui composent le noyau, mais elle n'est pas nulle. Sa contribution est de l'ordre de 0,025%. Enfin la contribution de l'énergie de liaison chimique des électrons au noyau est négligeable.

Aujourd'hui, pour des raisons de précision expérimentale, on préfère définir le nombre d'Avogadro  $N_A$  comme le nombre d'atomes contenus dans 12 grammes de carbone (définition de la 17<sup>e</sup> Conférence générale des poids et mesures de 1983), c'est-à-dire dans une mole. Nous verrons plus loin que

la précision de sa mesure (Andreas *et al.*, 2011)

$$N_A = (6,022\ 140\ 78 \pm 18 \times 10^{-8}) \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

est telle qu'il est aujourd'hui question d'inverser la définition : c'est maintenant la masse de  $N_A$  atomes de carbone-12 qui définirait l'étalon de 12 grammes, en remplacement du kilogramme étalon déposé au pavillon de Breteuil !

**Se représenter le nombre d'Avogadro ?** L'immensité de ce nombre sensiblement égal à  $6 \times 10^{23}$  le rend difficile à imaginer :

- Il y a *grosso modo* autant d'atomes dans un gramme d'eau que de gouttes d'eau dans la Méditerranée ou de grains de sable dans le Sahara.
- Compter le nombre de molécules de 2 grammes d'hydrogène à raison de un million de molécules par seconde, prendrait 19 milliards d'années, soit plus que l'âge de l'univers.
- Ce nombre est connu avec une incertitude de 20 millions de milliards de molécules. Ce qui semble considérable, mais correspond à une incertitude de 20 centimètres sur la distance Paris-New York.

Le point important est l'ordre de grandeur ; bien sûr 10 fois, 100 fois ou un dixième de fois  $N_A$  n'est pas égal à  $N_A$ , mais l'ordre de grandeur relatif change peu<sup>9</sup>. Aussi toute quantité « raisonnable » de matière (du gramme au kilogramme) contient l'ordre de grandeur du nombre d'Avogadro de molécules ou d'atomes.

Sans la notation en puissance de 10, le nombre d'Avogadro s'écrirait :

$$N_A = 602\ 214\ 078\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000 \pm 18\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ \text{mol}^{-1}$$

Est-ce plus évocateur ?

---

9. On peut le mesurer par son logarithme, c'est-à-dire la puissance qu'il faut affecter à 10 pour écrire le nombre d'Avogadro ; elle reste de l'ordre de 23.

# 2

## L'atome imaginé

### La pré-science des atomistes grecs

**Depuis la civilisation grecque jusqu'au début du XVIII<sup>e</sup> siècle, l'atomisme a connu un sort fluctuant, tout en restant spéculatif : aucune mesure ne lui était attachée et il ne permettait aucune prévision.**

L'usage est d'attribuer à deux philosophes grecs du v<sup>e</sup> siècle, Leucippe (env. 460–360 av. J.-C.) et Démocrite, son disciple, la naissance de l'atomisme. À vrai dire, l'écrasante majorité des écrits de cette époque a disparu ou n'est connue qu'indirectement par des auteurs postérieurs et souvent hostiles. La reconnaissance de paternité, de dates ou de lieux exige donc beaucoup de prudence. On a même pu contester que les atomes de Démocrite étaient matériels (Klein, 2013).

Pour Épicure (III<sup>e</sup> siècle av. J.-C.), héritier et continuateur des atomistes grecs, la nature est composée d'atomes et de vide. Il y a bien longtemps, tous les atomes tombaient d'un mouvement uniforme et parallèlement les uns aux autres<sup>1</sup>. À un certain moment, l'un d'eux a légèrement dévié et heurté les autres. C'est le *clinamen* que le philosophe latin Lucrèce décrit dans le livre II du *De natura rerum* :

*Les atomes descendent bien en droite ligne dans le vide, entraînés par leur pesanteur ; mais il leur arrive, on ne saurait dire où ni quand, de s'écarter un peu de la verticale, si peu qu'à peine peut-on parler de déclinaison. Sans cet écart, tous, comme des gouttes de pluie, ne cesseraient de tomber à travers le vide immense ; il n'y aurait point lieu à rencontres, à chocs, et jamais la nature n'eût pu rien créer.*

Ensuite, par l'effet des « atomes crochus », un phénomène de boule de neige

1. On ne trouve pas cette description chez Démocrite (Salem, 1996, Marx, 1841).

va créer les divers corps dont les propriétés (lisses ou rugueuses, par exemple) dépendent de la nature des atomes (ronds ou pointus).

Il s'agit, comme souvent chez les savants grecs ou latins, d'une conception spéculative ne reposant sur aucune donnée empirique. Elle se fonde sur l'idée – que la physique moderne ne désavouerait pas – que bien des effets visibles seraient causés par des objets invisibles : les effets du vent, des odeurs, de la vision, de l'humidité. « Je te citerai des corps dont tu seras forcé de reconnaître l'existence, quoiqu'ils échappent à la vue », affirme Lucrèce : en effet, les éléments (l'eau, l'air, le feu et la terre) peuvent se transformer les uns en les autres et, comme il ne peut y avoir de création *ex nihilo*, il faut bien qu'existent des particules invisibles qui assurent cette continuité. Dans ce même texte encore, Lucrèce se fait même plus précis (Mouchet, 2010) :

*Tu dois observer avec d'autant plus de soin l'agitation désordonnée de ces corps dans les rayons de soleil qu'elle nous révèle les mouvements imperceptibles et aveugles de la matière. De fait, tu en verras beaucoup se mouvoir brusquement sous l'effet de collisions invisibles, virevolter, changer de direction tantôt par ici tantôt par là, en tous sens. Naturellement tout ce remuement provient de celui des éléments primordiaux. Bien entendu, ceux-ci commencent les premiers à bouger par eux-mêmes ; puis ils viennent frapper de coups indistincts les assemblages suffisamment petits pour être influencés par leur force, les impulsions se transmettent à leur tour aux corps un peu plus grands. Ainsi, à partir des atomes, le mouvement remonte peu à peu pour émerger jusqu'à nos sens ; il affecte les poussières que nous pouvons discerner dans la lumière du Soleil sans qu'apparaissent clairement les chocs qui le provoquent.*

En tirant un peu le texte à nous (c'est nous qui avons souligné), on pourrait y voir une ébauche du mouvement brownien : les atomes ne sont pas les poussières, mais la cause de leurs mouvements.

En inférer néanmoins, comme on le lit souvent, une prescience de la théorie moderne de l'atomisme nous paraît pour le moins abusif : l'atome de Lucrèce n'a pas grand chose à voir avec l'atome « réellement existant ». Paradoxalement, on pourrait affirmer qu'Aristote, le plus grand savant de l'Antiquité dont l'influence sera dominante – voire écrasante – durant le Moyen Âge chrétien (et même jusqu'au XIX<sup>e</sup> siècle, au Vatican en tout cas!), adopta une attitude plus scientifique dans la critique qu'il fit de

l'atomisme, même si celle-ci était erronée. En effet, pour « le Philosophe », la vitesse d'un corps est proportionnelle à la force qui la cause et inversement proportionnelle à la densité du milieu traversé, rapide dans l'air, lente dans l'eau, plus lente encore dans l'huile<sup>2</sup>. Donc, dans le vide où la densité est nulle, la vitesse serait infinie, ce qui est impossible. Donc, le vide n'existe pas. Donc, l'atomisme qui présuppose le vide est une doctrine erronée.

Il n'en reste pas moins que ces philosophes grecs ont eu le mérite de s'interroger : peut-on diviser à l'infini de la matière en parties semblables ou le processus a-t-il une fin ? Mais l'originalité des premiers atomistes, leur modernisme tient davantage à leur matérialisme :

*Ce qui rend les hommes esclaves de la peur, c'est que, témoins de mille faits accomplis dans le ciel et sur la terre, mais incapables d'en apercevoir les causes, ils les imputent à une puissance divine. Aussi, dès que nous aurons vu que rien ne se fait de rien, déjà nous distinguerons mieux le but de nos poursuites, et la source d'où jaillissent tous les êtres, et la manière dont ils se forment, sans que les dieux y aident.*

*Lucrece, De natura rerum, I, v. 146-214.*

Le rapprochement avec Laplace (1749-1827), près de vingt siècles plus tard, s'impose :

*[...] mais ces causes imaginaires ont été successivement recu-  
lées avec les bornes de nos connaissances, et disparaissent entiè-  
rement devant la saine philosophie, qui ne voit en elles que l'ex-  
pression de l'ignorance où nous sommes des véritables causes [...]  
Tous les phénomènes extraordinaires étaient regardés comme au-  
tant de signes de la colère céleste. On invoquait le ciel pour dé-  
tourner leur funeste influence. On ne le priait point de suspendre  
le cours des planètes et du Soleil : l'observation eût bientôt fait  
sentir l'inutilité de ces prières.*

*Laplace, Essai philosophique  
sur les Probabilités, 1814.*

Traditionnellement, les précurseurs de l'atomisme européen les plus cités

---

2. Bien qu'encore partagée par un large public, c'est une physique fautive qui confond vitesse et accélération. Elle s'appuie sur une généralisation – abusive – de ce qui se passe par exemple pour la chute de corps dans l'eau ou dans l'air, milieux qui offrent une résistance à l'avancement ; dans ces cas vitesse et force de résistance deviennent proportionnelles.

sont Démocrite, Leucippe, Épicure ou Lucrèce. Mais on aurait tort<sup>3</sup> de négliger les conceptions du plus fameux contemporain de Démocrite (et de Socrate) : Platon (env. 428–348 av. J.-C.), un des premiers philosophes à s'être intéressé à la théorie de la connaissance. Le *Timée* (env. 360 av. J.-C.) est un texte difficile à saisir pour un lecteur actuel non familier avec la culture et la vision du monde grecques. Platon croit à l'existence d'un Démiurge, Dieu organisateur d'un Univers composé des quatre éléments : la Terre, l'Eau, l'Air et le Feu. Selon ce philosophe, les choses sensibles ne peuvent se comprendre que par l'existence des Formes (ou réalité intelligible), qui elles sont immuables, immatérielles, voire mathématiques (les triangles par exemple). Les quatre types de particules idéelles dont parle le *Timée* – cubiques pour la Terre, icosaédriques pour l'Eau, octaédriques pour l'Air et tétraédriques pour le Feu – ne sont donc certainement pas les atomes bien matériels de Lucrèce. Elles seules permettent de rendre compte de l'arrangement stable et harmonieux de ce monde, contrairement à l'agitation aléatoire des atomes de Démocrite. Nikseresht (2007) donne une interprétation très détaillée de cet atomisme bien *sui generis* de Platon. Pour lui comme pour Kahane (2013) cette « géométrisation » de l'atome renvoie à une intuition de la conception atomique moderne bien meilleure – si on ose dire – que celle des atomistes de la tradition antique.

## Latence médiévale puis... Renaissance

**Au Moyen Âge chrétien on n'observe qu'une toute petite survivance de l'atomisme. Il est plus fortement présent dans le monde indien et arabomusulman, mais sous une forme qui n'est plus matérialiste ; cet atomisme n'a eu qu'un rôle nul ou marginal dans la construction de l'atomisme moderne. Le renouveau effectif d'une conception atomiste date de la Renaissance.**

### *L'atomisme au Moyen Âge européen*

À cause des nombreux arguments indiqués plus loin dans la section consacrée à l'anti-atomisme de la tradition catholique, l'atomisme connu au Moyen Âge en Europe une traversée du désert. Si quelques théologiens s'y risquèrent, ce fut en préalable d'une attaque en règle de la philosophie d'Aristote. Guillaume de Conches (env. 1080-1154) – voir Duhem (1913)

---

3. Nous sommes redevables à Jean-Pierre Kahane d'avoir insisté sur ce point.

–, Guillaume d’Occam (env. 1285-1349) et Nicolas d’Autrecourt (env. 1298-1369) sont peut-être les plus connus, bien que beaucoup de leurs écrits aient été perdus (ou brûlés). Nicolas d’Autrecourt dut abjurer en 1347 au terme d’un procès fameux qui dura près de six ans. Contre Aristote, il développa non seulement une théorie atomiste, mais aussi une critique de sa dialectique substance-accident (voir p. 78).

### *L’atomisme dans les mondes arabo-musulman et indien*

La tradition atomiste est plus vivace (Pines, 1997) dans le monde arabo-musulman. L’Europe chrétienne en eut connaissance essentiellement grâce à ses adversaires, en particulier au savant juif Maïmonide (1138-1204). L’atomisme, avec de multiples variantes, est contenu dans le Kalam<sup>4</sup>. Cet atomisme qui n’aura pas ou peu d’influence sur la construction de l’atomisme moderne, constitua un important objet de controverse sur la conception du monde. Par exemple, il présentait l’avantage d’éliminer la division infinie de la matière – et aussi des distances – qui répugnait tant aux Anciens. Du point de vue de la « physique », cet atomisme est assez inspiré de celui des Grecs. Il s’en distingue philosophiquement sur deux points essentiels :

– Dieu n’est pas passif ; bien au contraire, par une espèce d’atomisme dans le temps, Dieu, à chaque instant, décide du devenir de chaque atome, ce qui – s’il en était encore besoin – démontre sa puissance<sup>5</sup>. C’est par cette suite d’« accidents » que le monde existe comme il est.

– Pour les Grecs, les atomes des âmes disparaissent avec le corps, pas pour les savants musulmans.

Il n’y a pas d’atomisme juif, à la seule exception de celui des Karaïtes<sup>6</sup> – et encore pas tous !

---

4. Doctrine théologico-philosophique qui, tout en puisant dans le rationalisme grec, s’est opposée aux *falasifa* (philosophes) comme Averroès (1126-1198) ou Avicenne (980-1037), auxquels elle reproche l’idée que Dieu est accessible par la seule raison. Déclinée sous différentes versions (y compris juive) – dont toutes ne sont pas atomistes –, elle peut être considérée comme dominante à partir du XIII<sup>e</sup> siècle. Voir p. 43-47 de Nony (2010).

5. Selon Al-Biruni (973-1048) cité par Pines (1997)

*Il [al-Razi (865-925), un des principaux atomistes du Kalam, N.d.A.] distingue entre le temps (zamân) et la durée (mudda), de telle sorte que les nombres s’appliquent à l’un [le temps], mais pas à l’autre [la durée].*

On croirait lire du Bergson (1938) !

6. Branche juive très minoritaire aujourd’hui, qui connut son apogée vers le x<sup>e</sup>

De façon très simplifiée, on peut reconnaître trois courants dans l'atomisme indien.

Appartenant à une branche du brahminisme (ou hindouisme ancien), Kanada, qui vécut un siècle *avant* Démocrite, est réputé avoir développé une théorie atomique. Elle a été exposée dans le *Vaisheshika-sūtra* huit siècles plus tard. Voici ce qu'en dit Jean Varenne dans l'*Encyclopædia Universalis 2013* : « elle pose en principe l'existence de neuf substances correspondant aux cinq éléments classiques auxquels s'ajoutent le temps, l'espace, l'esprit, l'âme. Les quatre premiers éléments (terre, eau, air, feu), et eux seuls, sont constitués d'atomes éternels qui se combinent selon une énergie, éternelle elle aussi, et purement mécanique, appelée l'« Invisible » (*adr̥ṣṭa*). C'est de ces combinaisons, en nombre indéfini, que naissent les objets des sens, dont l'interaction rend compte de toutes les activités observables (contraction, expansion, déplacement...). ».

Pour le bouddhisme, la branche Hinayana défendait une conception assez voisine, mais voyait dans les atomes plutôt des sources de force (Majumdar, 2002). Les différences de Hinayana avec les atomistes grecs sont principalement :

- l'existence de plusieurs sortes d'atomes (terre, lumière, air, éther, feu), analogues aux cinq éléments d'Aristote, correspondant aux cinq sens ;
- le fait que les atomes des âmes ne disparaissent pas avec le corps ;
- l'existence de combinaisons d'atomes (dyades, triades...), un peu analogues aux molécules.

Enfin le jaïnisme<sup>7</sup>, plus proche des conceptions de Démocrite distingue des atomes collants et des atomes secs ; leur combinaison relative détermine les propriétés de la substance.

On ne sait pas dans quelle mesure les sources grecques étaient connues des savants indiens. Pines (1997) signale les intéressantes similitudes entre les conceptions du Kalam et celles de Kanada, mais reste là aussi prudent sur leurs échanges éventuels.

Il n'y a pas, à notre connaissance, d'atomisme chinois proprement dit – à part celui qui appartient au bouddhisme indien.

---

siècle. Elle ne reconnaît que l'autorité de la Bible hébraïque, ne croit pas à l'autorité divine des commentaires du Talmud et questionne les interprétations rabbiniques.

7. Très vieille religion indienne, pratiquant, peut-être plus que les autres, ascétisme et non-violence. Comme le bouddhisme, elle ne reconnaît pas le système des castes.

## *L'atomisme contre la pensée d'Aristote*

Le *De natura rerum* de Lucrèce, opportunément retrouvé au début du xv<sup>e</sup> siècle, connaît une large diffusion dans les milieux novateurs. Il est de nouveau utilisé pour se libérer du carcan aristotélicien qui s'était imposé durant plus de quinze siècles. Il permet d'en finir avec la composition de l'Univers en cinq éléments (la terre, l'eau, le feu, l'air et la quintessence), la division entre les mondes sub et supralunaires, les mouvements des corps expliqués par leur nature : les *graves* vers le bas, le feu vers le haut, etc.

Parmi les nombreux partisans de l'atomisme, on peut citer Gassendi (1592-1655), Galilée, Newton (1643-1727) et Diderot (1713-1784)<sup>8</sup>. Comme bien souligné dans Salem (1999), il n'existe pas un atomisme, mais plusieurs, jusqu'à un atomisme des idées chez Hume (1711-1776) ou un atomisme abstrait, celui des monades, chez Leibniz (1646-1716). Le cas de Descartes (1596-1650) est à part : il n'acceptait ni l'indivisibilité des atomes (puisqu'ils possédaient une étendue), ni l'existence du vide (remplacé par la « matière subtile »). Pascal (1623-1662) croyait évidemment au vide : ses célèbres expériences barométriques au Puy-de-Dôme lui ont fait conclure que « la nature n'a aucune horreur pour le vide ». Mais il est resté très prudent sur l'atomisme.

Il y eut d'autres savants atomistes moins connus ; l'ouvrage très documenté de Kahn (2007) expose les 14 thèses affichées par Antoine de Villon (1589-1647) et Étienne de Clave au titre explicite *Contre Aristote, Paracelse et les « cabalistes »*. La dernière thèse est assez claire :

*Par toutes ces choses, il est tres-manifeste que ces deux dits des Anciens, Toutes choses sont en toutes choses, & Toutes choses sont composées d'atomes ou indivisibles, ont esté ignoramment ou plustot malicieusement bafouiez par Aristote. Et parce que l'un & l'autre est conforme à la raison, à la vraye philosophie, & à l'anatomie des corps nous les deffendons obstinément, soustenons fermement.*

---

8. Au xvii<sup>e</sup> siècle, les cercles savants discutaient beaucoup des atomes ou « petits corps », en témoigne Molière :

Je m'accommode assez pour moi des petits corps ;  
Mais le vide à souffrir me semble difficile,  
Et je goûte bien mieux la matière subtile.

*Les Femmes savantes*, III, 2

Elle sera censurée par la Faculté<sup>9</sup> :

*Cette proposition est fausse, téméraire, et erronée en matière de foi.*

Cet atomisme est très lié à ce qu'on appellera une philosophie mécaniste, qui impose la recherche de lois universelles associant causes et effets. L'explication du monde par les chocs et les combinaisons d'atomes cadrerait bien avec cette vision. Ce n'est pas du matérialisme à proprement parler : Dieu est toujours présent chez tous ces savants, mais, disons, *a minima*. Pascal ne s'y trompe pas qui écrit dans les *Pensées* :

*Je ne puis pardonner à Descartes ; il aurait bien voulu dans sa philosophie, se pouvoir passer de Dieu ; mais il n'a pu s'empêcher de lui faire donner une chiquenaude, pour mettre le monde en mouvement ; après cela, il n'a plus que faire de Dieu.*

Cette vision de l'atomisme, comme de l'anti-atomisme, reste encore spéculative. À preuve, un très grand savant comme Leibniz (1672) écrivait de façon bien subjective :

*Il y a trois principes optiques : le feu, dont les atomes sont pyramidaux, l'eau, donnant l'air par dilatation, dont les atomes sont sphériques, la terre, dont ils sont cubiques.*

On croirait lire le *Timée* de Platon. C'est donc encore largement de l'atomisme littéraire, comme celui de Diderot (1782) qui parlait d'atomes « sensibles ». Il faut noter, dans l'édition de 1754 de l'*Encyclopédie ou Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers*, un très long article de d'Alembert (1717-1783) pesant soigneusement les arguments en faveur de l'atomisme et les arguments opposés. Sans prendre parti.

---

9. On notera une tonalité de la condamnation plus douce que celle de la thèse de Copernic (1473-1543) sur l'héliocentrisme qui, elle,

*est stupide et absurde, et fautive en philosophie, et formellement hérétique, car elle contredit explicitement, et en de nombreux paragraphes, les sentences de l'Écriture sainte, lue selon le sens propre des mots et l'interprétation commune des saints Pères et des théologiens.*

# 3

## Naissance de l'atomisme scientifique

**L'atomisme moderne, fondé sur la théorie, la mesure et l'observation, a deux sources qui, étonnamment, ne s'unifieront que tardivement. La première est la physique du début du XVIII<sup>e</sup> siècle, avec la théorie cinétique des gaz de Bernoulli (1700-1782); la seconde, au début du siècle suivant, est la chimie naissante, grâce à Lavoisier (1743-1794), avec les travaux de Dalton et d'Avogadro. Dans les deux disciplines, les polémiques entre atomistes et opposants firent rage. La victoire des atomistes au début du XX<sup>e</sup> siècle sera assurée essentiellement par les travaux théoriques d'Einstein (1879-1955) sur le mouvement brownien et les expériences de Jean Perrin.**

Curieusement, ces deux mondes où s'affrontèrent partisans et adversaires de l'atomisme n'ont que peu communiqué entre eux. Boltzmann (1844-1906), qui avait désespérément besoin de l'existence des atomes, n'a – à notre connaissance – que peu invoqué les chimistes pour sa défense. Dans un article de douze pages consacré à l'étude de l'atomisme, Maxwell (1873) (1831-1879) ne mentionne ni la loi de Dalton ni celle d'Avogadro. Inversement, le chimiste Wurtz (1817-1864), défenseur de l'atomisme, dans ses polémiques avec Dumas (1800-1884), n'utilisera pratiquement pas les travaux des physiciens atomistes (Pigeard-Micault, 2012). À tel point que Cannizzaro (1826-1910) dut encore se battre au congrès de Karlsruhe en 1860 pour convaincre qu'il n'y avait aucun sens à distinguer l'« atome du physicien » de l'« atome du chimiste » (Nye, 1986).

- En physique, aux partisans de l'atomisme comme Bernoulli, Maxwell ou Boltzmann s'opposèrent jusqu'au début du XX<sup>e</sup> siècle les « énergétistes ».
- En chimie, à John Dalton, ou Joseph-Louis Proust (1754-1826) s'opposèrent les « équivalentistes ».

On comprendra mieux l'évolution des polémiques en suivant la logique des idées plutôt que la chronologie. Une remarque néanmoins à propos de

cette dernière (Hawthorne, Jr., 1970) : les déterminations du nombre d'Avogadro,  $N_A$ , faites au XIX<sup>e</sup> siècle sont dues aux physiciens ; elles reposent sur une chaîne de déductions reliant entre elles des propriétés macroscopiques, les seules alors directement observables : la théorie cinétique des gaz suppose l'existence des molécules et en déduit des propriétés expérimentalement observées. Les déterminations du XX<sup>e</sup> siècle sont plus directes et, partant, plus convaincantes : à l'inverse, elles relient des propriétés microscopiques aux propriétés macroscopiques. Millikan (1858-1953), par exemple, a su mesurer la charge d'un électron et, comme on connaissait celle de  $N_A$  électrons, restait à faire une simple division. Mais ce qui assura finalement le triomphe de l'« hypothèse atomique » est l'étude théorique et expérimentale du mouvement brownien (Einstein, 1905, Perrin, 1913, Ren, 2005)<sup>1</sup>.

La division entre physique et chimie n'est évidemment pas absolue : ce sont les travaux des chimistes Proust, Dalton ou Gay-Lussac (1778-1850) qui conduiront Avogadro à formuler sa fameuse loi, base des développements des physiciens dans la seconde moitié du XIX<sup>e</sup> siècle.

## Les physiciens

**Le savant suisse Daniel Bernoulli est le pionnier de l'atomisme scientifique. C'est plus d'un siècle plus tard que Maxwell et Boltzmann reprennent le flambeau en utilisant un formalisme mathématique.**

On doit à Bernoulli (1738) d'avoir développé dans son *Hydrodynamica* l'idée que les propriétés d'un gaz, comme la pression ou la température pouvaient s'expliquer à partir du mouvement de ses constituants microscopiques. Pour lui, la pression du gaz résulte de leurs chocs incessants sur les parois et sa température est liée à l'agitation de ces « corpuscules » appelés aussi « particules ». Ces présupposés l'ont conduit à donner pour la première fois une *démonstration* de la loi de Mariotte<sup>2</sup> (1629-1684) énoncée un demi-siècle plus tôt ; pour un gaz enfermé dans une enceinte de volume  $V$ , à la pression  $p$ , le produit  $pV$  reste constant à température constante.

**Démonstration de Bernoulli.** En substance, elle peut se résumer de la façon suivante :

Supposons qu'on réduise de moitié le volume d'un cylindre vertical rempli d'air, en faisant coulisser un piston. Si la vitesse verticale des particules reste constante (*pas*

---

1. On consultera avec profit :

<http://www2.cndp.fr/themadoc/einstein/einstein.htm>

2. Loi de Boyle (1627-1691) dans le monde anglo-saxon.

de changement de température), comme la distance verticale parcourue est divisée par 2, l'intervalle de temps entre deux chocs est divisé par 2 et donc le nombre de chocs, par unité de temps et de surface, multiplié d'autant. Il en découle une pression double sur les deux faces du cylindre. Concernant maintenant la pression sur la surface latérale, comme c'est le même nombre de particules parcourant horizontalement la même distance qui est responsable des chocs, ces derniers seront, sur une surface 2 fois plus petite, 2 fois plus nombreux ; ce qui multipliera la pression latérale également par 2. On comprend donc que la pression aura doublé sur toute la surface du cylindre (faces et paroi). Remplaçons le cylindre par un cube<sup>3</sup>, la même démonstration vaut encore. Et comme tout volume peut se décomposer en somme de petits cubes, on a démontré que si  $V$  était divisé par 2, la pression  $p$  doublait. Maintenant le 2 est arbitraire, ce pourrait être un facteur arbitraire  $k$  : si  $V$  est divisé par  $k$ , la pression  $p$  est multipliée d'autant. Il reste donc que  $pV$  est constant à température constante.

La faiblesse de cette explication est que la notion de vitesse des particules n'est pas précisée. Aujourd'hui on invoquerait plutôt la vitesse quadratique moyenne, c'est-à-dire la moyenne du carré de la vitesse<sup>4</sup>. Sa force est que lorsque Bernoulli introduit ensuite un volume impénétrable autour de chaque particule, il ouvre la porte aux développements théoriques ultérieurs qui rendront compte de la liquéfaction ou de la solidification possibles des fluides, quand les particules se touchent presque, mais ne peuvent s'interpénétrer.

L'idée que la température ou la pression d'un fluide puisse être expliquée par la connaissance du mouvement de corpuscules invisibles était donc apparue dès 1738, mais c'est seulement à partir de la fin des années 1850 que le concept d'atomisme, à l'origine de la physique statistique, se trouve largement débattu – sinon accepté – chez les physiciens. Clausius (1822-1888) introduit la notion de libre parcours moyen ou distance moyenne parcourue par les molécules entre deux chocs successifs (de l'ordre de quelques dixièmes de microns pour un gaz dans les conditions normales). Krönig (1822-1878) propose, dès 1856, d'interpréter la température absolue d'un gaz comme une mesure de l'énergie cinétique moyenne de ses constituants. Maxwell est le premier à mathématiser le problème en utilisant la théorie des probabilités.

---

3. Évidemment il s'agit d'une expérience de pensée : les pistons carrés sont difficiles à usiner !

4. Comme on le verra plus loin, il faut prendre le carré car la vitesse est nulle *en moyenne* : intuitivement les particules allant dans tous les sens, il ne peut y avoir de direction privilégiée ; ainsi, algébriquement les vitesses sont *en moyenne* nulles sur les trois directions de l'espace.

En 1859, il montre que la distribution statistique des vitesses des constituants d'un gaz obéit à une loi gaussienne, la fameuse « courbe en cloche ».

### **Les objections à l'atomisme furent de deux ordres :**

#### **1. D'ordre méthodologique ou philosophique.**

**Parmi les grands physiciens il faut signaler l'hostilité (au début en tout cas) de Poincaré (1854-1912) et le refus acharné de Mach (1838-1916), d'Ostwald (1853-1932) ou de Duhem (1861-1916)<sup>5</sup>. Pour ces savants, on ne pouvait pas fonder une théorie sur l'existence non prouvée d'êtres hypothétiques, pour la seule raison qu'ils seraient utiles aux démonstrations.**

#### **2. D'ordre physique.**

- Pour les tenants de la théorie atomique, les vitesses moyennes des molécules de gaz seraient de l'ordre du kilomètre par seconde. Or, l'odeur d'une bouteille de parfum (ou d'un camembert) met plusieurs secondes pour atteindre l'extrémité d'une pièce, révélant une vitesse de diffusion bien inférieure, de l'ordre du décimètre par seconde.**
- Que dit le *paradoxe de Loschmidt* (1821-1895) ? Si le mouvement des molécules obéit aux lois du mouvement de Newton qui sont réversibles (c'est-à-dire qu'il n'y a pas de direction privilégiée au temps), comment expliquer le comportement généralement irréversible de la matière (le vieillissement, la dispersion du colorant dans l'eau, l'égalisation des températures, etc.) ?**
- Que dit aussi le *paradoxe de la récurrence* énoncé par Poincaré ? Tout système mécanique isolé, défini comme n'échangeant ni énergie ni matière avec le monde extérieur, devrait, au bout d'un certain temps, repasser arbitrairement près de sa situation initiale, ce qui impliquerait par exemple que le colorant puisse spontanément se séparer à nouveau de l'eau en gouttelettes colorées<sup>6</sup>.**

Détaillons ces objections et leurs réponses modernes.

---

5. Ostwald changea de position à la fin de sa vie, Duhem ne changea jamais ; quant à Mach, les témoignages divergent.

6. Le point essentiel est que l'énergie du système soit conservée. C'est un peu comme au bridge, où on suppose toutes les cartes équiprobables (le jeu est bien battu). Si vous jouez suffisamment longtemps, vous êtes certain de retrouver votre main initiale : en effet le nombre de cartes étant fixe, le nombre de cartes possibles est fini.

## *Les objections philosophiques*

Schématiquement, la deuxième partie du XIX<sup>e</sup> siècle voit donc s'affronter deux écoles de pensée : les « énergétistes » et les « mécanistes ». Les premiers refusent toute introduction d'hypothèses *ad hoc*. Les propriétés de l'énergie, aisément mesurables, leur semblent le bon point de départ. « Partir du bon sens pour arriver au bon sens », tel est le *credo* de Duhem, un des plus farouches énergétistes. En l'absence de preuve de l'existence des atomes, mieux vaut conserver la continuité observée dans les propriétés de la matière. « Montrez-moi un atome », répétait Mach. Le physicien doit se limiter à établir des rapports entre différentes grandeurs expérimentales. Aussi les énergétistes sont souvent appelés « relativistes<sup>7</sup> ». De même, ils se méfient – à juste titre, dira-t-on aujourd'hui – de l'éther censé être le support de la propagation des ondes électromagnétiques. On peut clairement relier cette école de pensée au « positivisme », même si son promoteur, Auguste Comte (1798-1857), n'était pas opposé à l'atomisme.

Les mécanistes ont plus d'ambition : ils cherchent une explication des phénomènes physiques qui se ramènerait à des lois simples, généralement de type newtonien, d'où leur nom. On doit pouvoir rendre compte des propriétés de la matière à la seule aide de forces et de collisions d'atomes.

## *Les objections physiques*

La première objection, qui porte sur le temps de propagation des odeurs, est riche d'enseignements. On n'avait pas compris la différence entre la vitesse instantanée (très élevée) et la vitesse moyenne de déplacement des molécules, beaucoup plus lente, à cause de leur déplacement en zigzags. En annexe, page 123, nous décrivons le modèle idéalisé de la marche aléatoire qui comporte les caractéristiques essentielles du mouvement réel d'une molécule de gaz. Nous montrons pourquoi une molécule, même animée d'une grande vitesse instantanée, dans la mesure où elle choque ses voisines, change en permanence de direction et parcourt finalement en moyenne une distance au point de départ qui ne croît pas proportionnellement au temps, comme dans le cas du mouvement habituel ; cette distance croît seulement comme la racine carrée du temps, donc beaucoup plus lentement.

Le paradoxe de Loschmidt et celui de la récurrence de Poincaré ont été

---

7. Rien à voir avec les relativistes de la pensée postmoderne pour lesquels la science n'est qu'une construction sociale qui, comme telle, évolue selon le rapport de force, question que nous traiterons en conclusion.

les arguments les plus convaincants contre la théorie atomique. On parle de paradoxes parce que, découlant de l'hypothèse atomique, ils apparaissent contradictoires avec le deuxième principe de la thermodynamique et, pire, avec ce que l'expérience quotidienne suggère : un système isolé évolue toujours de façon irréversible en uniformisant sa température, sa densité, sa magnétisation, etc. En termes savants (voir p. 120), on dit que son entropie ne peut que croître. Ce deuxième principe n'a jamais été mis en défaut expérimentalement. A-t-on jamais vu spontanément de la chaleur passer d'un corps froid à un corps chaud, de l'encre dissoute dans de l'eau se réagglutiner en gouttes colorées, etc. ?

Ostwald<sup>8</sup> résume très joliment cette objection :

*La proposition selon laquelle tous les phénomènes naturels peuvent être finalement réduits à des phénomènes mécaniques n'est même pas à envisager à titre d'hypothèse de travail efficace : c'est simplement une erreur [...] Toutes les équations de la mécanique possèdent cette propriété qu'elles admettent l'inversion du signe du temps. Autrement dit, des processus théoriquement parfaitement mécaniques peuvent se dérouler aussi bien à l'endroit qu'à l'envers dans le temps. Ainsi, un monde purement mécanique ne pourrait, contrairement au nôtre, contenir un avant et un après : l'arbre pourrait redevenir bourgeon puis graine, le papillon se retransformer en chenille, et le vieil homme en enfant. La doctrine mécaniste ne donne aucune explication sur le fait que cela ne se produit jamais, et ne peut d'ailleurs en donner à cause de cette propriété fondamentale des équations mécaniques ; cela fixe le verdict à l'égard du matérialisme scientifique.*

L'explication est que les lois de la thermodynamique microscopique ne sont pas de même nature que les lois du mouvement de Newton : elles sont de type *probabiliste* (voir l'annexe, p. 127) et ne s'appliquent donc qu'à des systèmes composés d'énormément de constituants. Prenons un exemple très simple : la répartition des molécules d'un gaz dans les deux côtés d'un récipient séparé par une paroi mobile (voir fig. 1).

Supposons qu'au départ toutes les molécules soient dans la moitié gauche. On enlève la paroi. Très rapidement, à cause des chocs entre elles et sur les parois, les molécules qui passent incessamment d'une moitié à l'autre vont finir par se répartir uniformément dans toute l'enceinte. En imaginant

---

8. <http://www2.cndp.fr/themadoc/einstein/mouvementbrownien.htm>

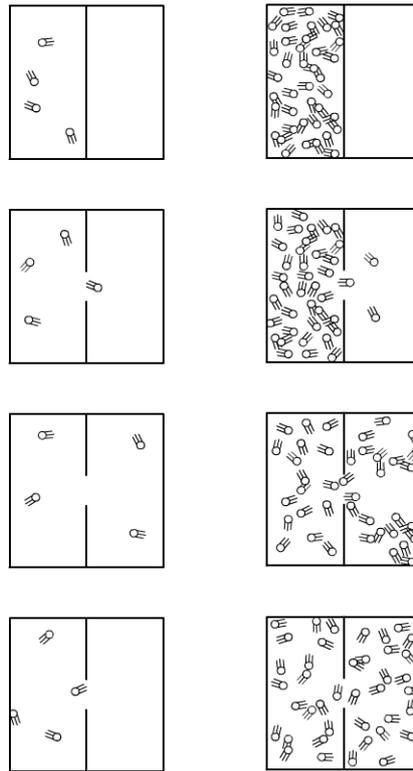


FIGURE 1. Répartition schématique des molécules avec le temps (croissant du haut vers le bas). Quatre molécules à gauche, une quarantaine à droite.

que soit filmée l'évolution de cette répartition, on voit clairement comment la partie de gauche se vide au profit de celle de droite pour arriver à l'état appelé stationnaire, quand les deux parties contiennent sensiblement le même nombre de molécules. Ce même film projeté à l'envers donnerait un résultat aussi comique qu'in vraisemblable. Aucun doute : les chocs et les rebonds, phénomènes obéissant aux équations réversibles de Newton, ont créé un phénomène irréversible, de même qu'est irréversible la diffusion des molécules d'encre dans l'eau.

L'entropie d'un système (comme son énergie) est une grandeur attachée à l'état du système. C'est elle qui permet de quantifier l'irréversibilité de ses transformations ; elle va, par exemple, croître quand on permet aux particules d'occuper tout l'espace disponible. Elle reste constante lors d'une transformation réversible.

Même s'il est encore un sujet de travaux, le mécanisme qui crée de l'irréversible à partir de lois toutes réversibles est, grâce aux travaux initiaux de Boltzmann, bien compris ; le lecteur pourra se référer aux écrits

pédagogiques de Balian (2010, 1994) ou de Bricmont (1995), qu'il est hors de question de résumer en quelques lignes.

Précisons seulement comment cette irréversibilité est liée au nombre gigantesque de constituants de la matière. Reprenons le récipient séparé initialement par une cloison mobile. On a décrit comment, très vite, le système s'équilibrait dans une situation où parties de gauche et de droite contenaient sensiblement le même nombre de molécules. Le film décrivant ce processus, projeté à l'envers, serait invraisemblable : il montrerait les molécules se rassemblant spontanément dans une seule moitié de l'enceinte, laissant l'autre vide ! L'irréversibilité semble bien là. Mais si au départ, il n'y a que 2 molécules à gauche du récipient et qu'on tourne le même film, personne ne saura dire s'il est ensuite projeté à l'endroit ou à l'envers. En effet, si, à l'état final, les deux molécules étaient disposées aléatoirement, la probabilité d'avoir les deux du même côté est  $1/2$  (et une de chaque côté, encore  $1/2$ ). Donc, la situation où toutes les molécules – elles ne sont que deux, il est vrai – sont du même côté est aussi probable que l'équipartition ! Augmentons un peu le nombre de molécules ; on conçoit qu'avec seulement 4 ou 5 molécules, il n'est également pas impossible de les voir assez fréquemment toutes du même côté. Le paradoxe de Loschmidt n'est plus ici paradoxal et on voit, sous une forme grossière, se manifester la récurrence de Poincaré.

Mais la situation change avec des millions de molécules. Le calcul est simple, la probabilité qu'une molécule prise au hasard soit à gauche est  $1/2$  ; si on suppose que les molécules se déplacent de façon indépendante (c'est l'hypothèse des gaz parfaits), la probabilité de trouver deux molécules à gauche est le produit de trouver l'une et l'autre à gauche, soit  $1/2 \times 1/2$ . Et la probabilité d'en trouver  $N$  est  $1/2^N$ . C'est-à-dire pratiquement 0 pour  $N$  valant seulement 100, pour ne pas parler de  $N$  valant le nombre d'Avogadro ! Avec une probabilité aussi faible, on comprend que même si le système teste un million de configurations différentes par seconde, il faudrait attendre en moyenne des durées colossales, supérieures à l'âge de l'Univers, pour espérer le voir repasser par son état initial. C'est une image du temps de récurrence de Poincaré. Il croît exponentiellement avec le nombre de particules. Pour les grands systèmes (macroscopiques) on ne l'atteint jamais : jamais on ne verra l'encre diluée se regrouper dans le verre, même si la probabilité d'un tel événement n'est pas nulle mathématiquement. Voir le modèle des chiens et des puces à l'annexe, en page 127.

Il y a plus : la théorie atomique rendra compte de cette irréversibilité



FIGURE 2. *Portrait de Ludwig Boltzmann (Wikipédia).*

ou croissance de l'entropie en lui donnant, grâce à Boltzmann, une interprétation microscopique. L'idée est que les chocs incessants des molécules entre elles, brouillent les conditions initiales jusqu'à obtenir une situation où – tenant compte des contraintes du système – vitesses et positions peuvent prendre aléatoirement toutes les valeurs possibles. C'est, au niveau microscopique, le désordre maximum<sup>9</sup>. Voir l'annexe, page 120.

---

9. Il y a un contresens possible : dans la vie courante on qualifierait plutôt de « désordonné » un système où les densités et les températures varieraient beaucoup d'un endroit à l'autre et de mieux ordonné, ce système enfin à l'équilibre. Il est curieux de voir que le désordre macroscopique est associé à l'ordre microscopique et *vice versa*.

La thermodynamique reliait l'entropie à l'irréversibilité, la théorie atomique permet de la relier au désordre microscopique. Autrement dit, on peut tracer une équivalence entre l'augmentation de l'entropie et l'évolution vers les états microscopiques les plus désordonnés qui sont aussi les plus probables. C'est la naissance d'une nouvelle science : la mécanique statistique qui relie de façon probabiliste les lois réversibles des mouvements microscopiques à l'irréversibilité macroscopique.

Notons que cette croissance de l'entropie ne s'applique qu'à des systèmes fermés ; l'apparition de la vie, créatrice d'ordre, n'est pas en contradiction avec ce principe : elle n'a pu se développer que dans des systèmes ouverts aux échanges d'énergie et de matière avec le milieu.

### *Premières évaluations du nombre d'Avogadro*

Avogadro n'a pas connu la valeur du nombre qu'on lui a attribué : sa première estimation est – indirectement – due au physicien autrichien Loschmidt (auteur du paradoxe sur l'irréversibilité)<sup>10</sup>.

Le point de départ de son calcul est la surprenante « loi d'Avogadro » (voir p. 24) qui affirme que le nombre de molécules d'un gaz (parfait) contenu dans un volume  $V$  ne dépend pas de sa nature (gaz carbonique, air, oxygène, hydrogène...). Il ne dépend que de la pression et de la température. Il en découle que le nombre  $N$  de molécules contenues dans  $1 \text{ cm}^3$  à  $0^\circ\text{C}$ , sous la pression atmosphérique, est une constante universelle. C'est le *nombre de Loschmidt*. Le nombre d'Avogadro  $N_A$  lui est proportionnel : il faut remplacer le volume de  $1 \text{ cm}^3$  par celui de 22,4 litres (on a vu ce qui justifiait ce choix), donc le multiplier par 22 400.

### *Le calcul de Loschmidt*

Le modèle de Loschmidt (1865) était celui de tous les physiciens « atomistes » de l'époque, tels Maxwell (1867) ou Clausius. Il fallait imaginer le gaz comme ensemble de molécules ponctuelles mais entourées d'une espèce de halo répulsif de diamètre  $d$  maintenant les autres molécules à cette distance minimum. Ce diamètre définit le « volume » des molécules, soit  $4\pi(d/2)^3/3$ . Entre deux chocs, les molécules ont un mouvement rectiligne dont la direction est modifiée à chaque collision. Soit  $l$  le libre parcours moyen. L'idée de Loschmidt a été de considérer que le volume disponible

---

10. Notons que ce physicien n'aura pas non plus connu « sa » constante évaluée un an après sa mort !

pour ce type de mouvement des molécules gazeuses était précisément celui de l'enceinte. Par contre, les liquides ou les solides sont très peu compressibles ; on peut donc considérer que les molécules ou les atomes s'y empilent en contact serré. En d'autres termes,  $N$  molécules y occupent un volume très peu supérieur (la différence tient au vide des interstices) à  $N$  fois le volume d'une molécule. Loschmidt a montré qu'on pouvait relier  $d$  et  $l$  via le coefficient de condensation qui est le quotient du volume du gaz au volume de la même quantité de liquide. Comme  $l$  était estimé grâce aux travaux de Maxwell sur la friction dans un gaz, on pouvait en tirer  $d$ , puis  $N$ , nombre de molécules contenues dans  $1 \text{ cm}^3$ . Des calculs originaux de Loschmidt <sup>11</sup>, on peut déduire  $N = 1,82 \times 10^{18}$  molécules par  $\text{cm}^3$ . L'ordre de grandeur était atteint (actuellement on sait que  $N \simeq 2,7 \times 10^{19}$ ).

**La dérivation de Loschmidt.** Si on suppose les molécules compactées, laissant le moins possible d'espace libre,  $N$  molécules occupent un volume  $V_l = N\pi d^3/6$ ;  $V_l$  est en fait un peu supérieur pour tenir compte des interstices de l'empilement. Ce serait, grossièrement, le volume occupé par les molécules du gaz quand il est liquéfié. Comment évaluer maintenant le volume correspondant à l'état gazeux, quand les molécules ont un libre parcours moyen  $l \gg d$  ?

Si  $v$  est la vitesse moyenne des molécules et  $\tau$ , le temps moyen séparant deux collisions, le libre parcours moyen  $l$  vaut  $v\tau$ . Le volume total de vide disponible entre deux chocs devrait valoir  $N\tau v\pi d^2$  puisque le diamètre  $d$  est aussi la distance entre les deux centres répulsifs des molécules qui se choquent ; c'est la somme des volumes des  $N$  cylindres de diamètre  $d$ . Cependant ce qu'il faut considérer n'est pas  $v$ , vitesse absolue moyenne, mais la vitesse *relative* moyenne de la molécule, en supposant qu'elle choque les autres molécules qui ont en moyenne le même module de vitesse, mais des orientations arbitraires. Cette vitesse relative dépend des angles des trajectoires ; après avoir effectué une moyenne sur les angles de toutes les autres molécules, Clausius obtient un facteur  $4/3$ . Le vide réellement disponible est donc

$$V_g = \frac{4}{3}N\tau v\pi d^2 = \frac{4}{3}Nl\pi d^2.$$

Faisant le quotient  $V_l/V_g$  on en tire la relation :

$$d = 8\frac{V_l}{V_g}l.$$

On a donc relié  $d$  et  $l$  à une quantité connue expérimentalement, le coefficient de condensation. Comme on ne savait pas à l'époque liquéfier l'air, Loschmidt a dû

<sup>11</sup>. Maxwell (1873) déduisait de l'évaluation de Loschmidt qu'« un million de millions de millions de millions d'entre elles [les molécules d'hydrogène] devraient peser entre quatre et cinq grammes. », ce qui n'est pas si erroné puisque 2 grammes d'hydrogène contiennent  $6 \times 10^{23}$  molécules.

utiliser un détour pour obtenir ce coefficient qu'il évalue à 0,000866. Sur cette base, et en utilisant une estimation de Maxwell pour le libre parcours moyen  $l$ , il obtint  $d = 8 \times 0,000866 \times 0,000140 = 0,000000969$  mm. De la connaissance de  $d$  et  $l$ , il aurait pu déduire le nombre de Loschmidt  $N$  en prenant  $V_g = 1\text{cm}^3$ .

Avogadro n'a donc jamais calculé « son » nombre et Loschmidt non plus. Par contre, usant d'une méthode voisine, George Johnstone Stoney (1826-1911) obtint en 1868 une valeur explicite de  $10^{21}$  par  $\text{cm}^3$  pour (ce qui sera appelé) le nombre de Loschmidt. Il est amusant de voir que ce résultat figure comme en passant dans la dernière phrase de son article (Stoney, 1868).

*Il est donc probable qu'il n'y a pas moins que quelques  $10^{18}$  molécules dans chaque millimètre cube de gaz à température et pression ordinaires.*

Comme signalé par Tanford (2004), on attribue erronément au savant américain Benjamin Franklin (1706-1790) la première estimation de la taille des molécules. C'est qu'il avait tous les éléments pour le faire. Dans les années 1770, étudiant l'effet apaisant – bien connu par les marins depuis des siècles – de l'huile versée sur de l'eau agitée, il fut frappé par l'étalement sur une surface de  $2000\text{ m}^2$  de l'huile d'olive contenue dans une seule cuillère à soupe ( $2\text{ cm}^3$ ). Il n'en calcula pas l'épaisseur  $d = 2/(2000 \times 10^4) = 10^{-7}\text{ cm}$ , qui lui aurait donné un ordre de grandeur de la taille d'une molécule d'huile. Ce que Lord Rayleigh (1842-1919) fit, un siècle plus tard. Son hypothèse était que l'huile se répand jusqu'à ce que la tache ne soit plus composée que d'une seule couche de molécules. Il est remarquable qu'armé seulement d'une bassine et d'une pipette<sup>12</sup>, on puisse atteindre des dimensions si petites.

Nous avons détaillé le calcul de Loschmidt pour son importance historique, puis celui de Lord Rayleigh pour sa très grande simplicité, mais bien d'autres méthodes *indépendantes* (Perrin, 1913) ont été utilisées dans cette seconde moitié du XIX<sup>e</sup> siècle. Citons, entre autres :

1. La diffusion de la lumière par les molécules d'air (responsable du bleu du ciel), dont ce même Rayleigh montra que l'intensité était proportionnelle au nombre de molécules d'air par  $\text{cm}^3$ .
2. L'équation de Van Der Waals (1837-1923), dont la loi de Mariotte est un cas limite pour les hautes températures. Cette équation qui relie pression, volume et température fait intervenir explicitement

---

12. Expérience souvent faite en TP de lycée.

le diamètre des molécules : du volume total on retranche le volume d'exclusion déterminé par la taille des molécules pour faire apparaître le volume effectivement disponible.

3. La loi de cryoscopie de Raoult (1830-1901), selon laquelle l'abaissement de la température de congélation d'une solution est proportionnelle à la fraction molaire du soluté (rapport du nombre de molécules de soluté au nombre total de molécules)<sup>13</sup>.

Néanmoins ce sont les mesures plus directes, microscopiques, de Perrin au début du xx<sup>e</sup> siècle, appuyées sur les développements théoriques d'Einstein qui assurent la victoire définitive de l'atomisme chez les physiciens.

D'autres arguments convaincront les chimistes, moins soudainement, mais plus tôt.

## Les chimistes

**Ce sont les chimistes qui occupent la scène désertée pendant plus d'un siècle par les physiciens après les travaux de Bernoulli. Ils ne s'intéressent pas tant au nombre d'Avogadro qu'aux masses relatives des différents corps purs. Ils durent par contre, à la différence des physiciens, se poser le problème de la nature de ces corpuscules. Ils buteront longtemps sur la distinction entre molécules et atomes.**

On doit peut-être à Stahl (1659-1734), puis certainement à Lavoisier d'avoir définitivement sorti la chimie de l'alchimie, c'est-à-dire d'y avoir introduit une rationalité déjà bien en œuvre dans les sciences physiques. L'usage systématique de la balance (un des instruments les plus précis de l'époque) ruina la théorie en vogue (et développée par Stahl) du *phlogistique*, considéré comme substance matérielle à l'origine des combustions. En brûlant, les substances perdaient leur phlogistique. Ainsi l'azote qui est ce qui reste de l'air après combustion, est de l'air phlogistiqué : il a récupéré le phlogistique des corps brûlés. Mais comment expliquer que du métal calciné, donc ayant perdu son phlogistique, soit plus lourd que le métal initial ? Le phlogistique aurait-il un poids négatif ? Lavoisier montra que le métal, en fait, avait incorporé l'air déphlogistiqué (l'oxygène de l'air).

La genèse de la théorie atomique moderne doit à Lavoisier essentiellement deux choses :

---

13. Voilà pourquoi le sel répandu sur la chaussée peut retarder la formation de glace.

– Le principe de conservation de la masse dans toute réaction chimique :

*[...] car rien ne se crée, ni dans les opérations de l'art, ni dans celles de la nature, & l'on peut poser en principes que, dans toute opération, il y a une égale quantité de matière avant & après l'opération, que la qualité et la quantité des principes est la même & qu'il n'y a que des changements, des modifications.*

Traité élémentaire de chimie, 1789.

– La notion de ce qu'on appellerait aujourd'hui corps simple :

*Tout ce qu'on peut dire sur le nombre et sur la nature des éléments se borne, suivant moi, à des discussions purement métaphysiques : ce sont des problèmes indéterminés qu'on se propose de résoudre, qui sont susceptibles d'une infinité de solutions, mais dont il est très-probable qu'aucune en particulier n'est d'accord avec la nature. Je me contenterai donc de dire que, si par le nom d'éléments nous entendons désigner les molécules simples et indivisibles qui composent les corps, il est probable que nous ne les connaissons pas : que, si, au contraire, nous attachons au nom d'éléments ou de principes des corps l'idée du dernier terme auquel parvient l'analyse, toutes les substances que nous n'avons encore pu décomposer par aucun moyen sont pour nous des éléments.*

Ibid.

Opposé aux « discussions purement métaphysiques », Lavoisier se méfiait de l'atomisme défendu par les chimistes du XVIII<sup>e</sup> siècle. Il faut dire qu'ils se montraient peu convaincants ; dans leur opinion, fondée sur une base purement spéculative, tous les atomes étaient de même nature, ne différant que par leur forme et leur disposition.

### **Dalton**

Parmi les fondateurs de l'atomisme « chimique », John Dalton émerge sans conteste. Son point de départ était la *loi des proportions définies* énoncée par Proust en 1801. Cette loi stipule que les masses des corps simples entrant dans une réaction chimique sont toujours dans des rapports *fixes* et *simples* (entiers). On fabriquera par exemple de l'eau en combinant 8 grammes d'oxygène avec 1 gramme d'hydrogène, du gaz carbonique avec 3 grammes de carbone et 8 grammes d'oxygène, du méthane avec 3 grammes de carbone

et 1 gramme d'hydrogène <sup>14</sup>, etc. Contre Berthollet (1748-1822), il établissait la distinction entre mélange où les proportions peuvent varier continûment, comme de l'eau sucrée, et corps composés.

Dalton proposa à cette loi une explication simple : les corps composés sont faits de réunions d'un nombre entier (et petit) d'atomes *de masse et de nature différentes* pour chaque corps simple. Il se distinguait ainsi de beaucoup d'atomistes précédents, comme Newton, qui voyaient les mêmes atomes mais disposés différemment selon les corps, ce qui, en passant, justifiait sa recherche de la transmutation du plomb en or. Pour des raisons de parcimonie (économie et simplicité des hypothèses), Dalton supposa les proportions les plus simples possibles. Comme cette hypothèse – erronée – entachera le développement de l'atomisme, il vaut la peine de citer le texte :

*1. Si seulement une combinaison de deux corps peut être obtenue, on doit – sauf bonne raison contraire – la supposer binaire.*

*2. Si deux combinaisons sont observées, on doit présumer l'une binaire et l'autre ternaire.*

*3. Si trois combinaisons sont observées, on doit présumer l'une binaire et les deux autres ternaires.*

*[...] De l'application de ces règles aux données chimiques bien établies, nous tirons les conclusions suivantes ;*

*1. Que l'eau est un composé binaire d'hydrogène et d'oxygène et que les poids relatifs des deux atomes élémentaires sont dans le rapport de 1 à 7 (1 à 8 aujourd'hui, N.d.A).*

*2. Que l'ammoniac est un composé binaire d'hydrogène et d'azote et que les poids relatifs des deux atomes sont sensiblement dans le rapport de 1 à 5 (1 à 7 aujourd'hui, N.d.A).*

*3. Que le gaz nitreux <sup>15</sup> est un composé binaire d'azote et d'oxygène dont les poids relatifs sont respectivement 5 et 7 (7 et 8 aujourd'hui <sup>16</sup>, N.d.A).*

*(Dalton, 1808) in A New System  
of Chemical Philosophy.*

---

14. Nous donnons ici les valeurs modernes, ce sont presque exactement des valeurs entières, parce qu'essentiellement déterminées par un seul isotope. Ce ne serait pas le cas avec du chlore (voir p. 25).

15. NO<sub>2</sub> en notation moderne.

16. Il est curieux de remarquer qu'avec une erreur de 12%, Dalton, propose néanmoins un nombre entier.

# ELEMENTS

	Hydrogen	1		Strontian	46
	Azote	5		Barytes	68
	Carbon	5		Iron	50
	Oxygen	7		Zinc	56
	Phosphorus	9		Copper	56
	Sulphur	13		Lead	90
	Magnesia	20		Silver	190
	Lime	24		Gold	190
	Soda	28		Platina	190
	Potash	42		Mercury	167

FIGURE 3. *Les masses atomiques selon Dalton. Tiré du New System of Chemical Philosophy (1808). [Aujourd'hui on écrirait 7 pour l'azote, 6 pour le carbone et 8 pour l'oxygène.]*

Par exemple encore, pour lui, l'éthylène ( $C_2H_4$  en notation moderne) était CH et donc le méthane ( $CH_4$ ) était  $CH_2$  puisque, comparé au carbone, l'analyse chimique révélait qu'il contenait en masse deux fois plus d'hydrogène que l'éthylène. Le fait que cette hypothèse était fautive dans bien des cas, a été un des arguments majeurs contre l'atomisme. Il y en aura d'autres.



FIGURE 4. *Dalton. Gravure de Charles Turner d'après James Lonsdale (Wikipédia).*

### *Les premières objections*

Les critiques méthodologiques apparaissent, sensiblement les mêmes qu'en physique. Par exemple, déçu par l'atomisme, le grand chimiste Dumas (1878), professait en 1836 :

*Si j'étais le maître, j'effacerais le mot atome de la science, persuadé qu'il va plus loin que l'expérience; et jamais en chimie, nous ne devons aller plus loin que l'expérience.*

Relevons néanmoins, dans ces mêmes *Leçons sur la philosophie chimique*, une prophétie à laquelle il ne croyait pas vraiment :

*Ainsi donc, pas d'incertitude possible : la Chimie seule n'a pas la vertu de nous éclairer sur l'existence des atomes; mais si d'autres considérations peuvent l'établir, le rapprochement fait par M. Dalton acquerra peut-être une grande probabilité et deviendra capable de servir de point de départ aux plus sublimes découvertes que l'homme eût osé se promettre dans l'étude de la nature.*

La majorité des chimistes reconnus était donc hostile à l'atomisme, comme Berthollet et encore, quarante ans plus tard, le très réputé Berthelot<sup>17</sup> (1827-1907) qui – comme Dumas – usera et abusera de ses positions académiques contre ses opposants. Du point de vue plus technique :

1. Berthollet considérait que la loi des proportions définies n'était valable que dans des cas particuliers.
2. Aucune preuve ne pouvait être avancée sur le nombre d'atomes engagés puisqu'on n'en connaissait que les masses relatives. Par exemple en prenant 1 pour la masse d'un atome d'hydrogène, l'eau pouvait bien contenir un atome d'hydrogène et un atome d'oxygène de masse 8 ou bien 2 atomes d'hydrogène combinés à 1 atome d'oxygène de masse 16. Donc avec des masses *ad hoc* les deux formules HO et H<sub>2</sub>O convenaient : elles respectaient les proportions pondérales.

### *La réponse d'Avogadro*

De même que Dalton s'était appuyé sur les résultats de Proust, Avogadro résolut ce dernier dilemme en s'appuyant sur ceux de Gay-Lussac :

---

17. Il démontra notamment que la chimie organique n'avait nullement besoin d'une mystérieuse force vitale pour être étudiée.

*L'attraction des molécules dans les solides et les liquides est donc la cause qui modifie leurs propriétés particulières, et il paroît que ce n'est que lorsqu'elle est entièrement détruite, comme dans les gaz, que les corps se trouvant placés dans des circonstances semblables, présentent des lois simples et régulières. Je vais du moins faire connoître des propriétés nouvelles dans les gaz, dont les effets sont réguliers, en prouvant que ces substances se combinent entre elles dans des rapports très-simples, et que la contraction de volume qu'elles éprouvent par la combinaison suit aussi une loi régulière.*

Sur la combinaison de substances gazeuses, les unes avec les autres par M. Gay-Lussac, le 31 décembre 1808

C'est l'analogie de la loi de Proust, mais portant sur les volumes gazeux et pas sur les masses. La loi de Gay-Lussac stipule que les volumes de gaz qui réagissent sont toujours dans un rapport simple entre eux, et aussi avec le produit de réaction. Il faut par exemple combiner exactement 2 volumes d'hydrogène avec 1 volume d'oxygène pour obtenir 2 volumes d'eau.

La clé de voûte de la théorie atomique sera trouvée par Avogadro (1811) – et Ampère, un peu plus tard – : c'est que des volumes égaux de gaz contiennent un nombre égal de molécules, quel que soit le gaz (voir loi d'Avogadro-Ampère, chapitre 1, p. 24).

ESSAI D'UNE MANIÈRE DE DÉTERMINER LES MASSES RELATIVES  
DES MOLÉCULES ÉLÉMENTAIRES DES CORPS, ET LES PROPORTIONS  
SELON LESQUELLES ELLES ENTRENT DANS CES COMBINAISONS

PAR A. AVOGADRO

*M. Gay-Lussac a fait voir dans un Mémoire intéressant (Mémoires de la Société d'Arcueil, tome II) que les combinaisons des gaz entre eux se font toujours selon des rapports très-simples en volume, et que lorsque le résultat de la combinaison est gazeux, son volume est aussi en rapport très-simple avec celui de ses composans ; mais les rapports des quantités de substances dans les combinaisons ne paroissent pouvoir dépendre que du nombre relatif des molécules qui se combinent, et de celui des molécules composées qui en résultent. Il faut donc admettre qu'il y a aussi des rapports très-simples entre les volumes des substances gazeuses, et le nombre des molécules simples ou composées qui les forme. L'hypothèse qui se présente la première à cet égard, et qui*

*paroit même la seule admissible, est de supposer que le nombre des molécules intégrant dans les gaz quelconques, est toujours le même à volume égal, ou est toujours proportionnel aux volumes.*

*[...] En partant de cette hypothèse, on voit qu'on a le moyen de déterminer très-aisément les masses relatives des molécules des corps qu'on peut avoir à l'état gazeux, et le nombre relatif de ces molécules dans les combinaisons ; car les rapports des masses des molécules sont alors les mêmes que ceux des densités des différents gaz, à pression et température égales, et le nombre relatif des molécules dans une combinaison, est donné immédiatement par le rapport des volumes des gaz qui la forment. Par exemple, les nombres 1,10359 et 0,07321 exprimant les densités des deux gaz oxygène et hydrogène, lorsqu'on prend celle de l'air atmosphérique pour unité, et le rapport entre les deux nombres représentant par conséquent celui qui a lieu entre les masses de deux volumes égaux de ces deux gaz, ce même rapport exprimera dans l'hypothèse proposée, le rapport des masses de leurs molécules. Ainsi la masse de la molécule de l'oxygène sera environ 15 fois celle de la molécule d'hydrogène, ou plus exactement, elle sera à celle-ci comme 15,074 à 1.*

Journal de Physique, 14 juillet 1811.

Des mesures de volumes, on déduit que l'eau contient deux fois plus de molécules d'hydrogène que d'oxygène et qu'il y a autant de molécules d'hydrogène que d'eau. La bonne formule n'est donc pas HO, avec une masse de l'oxygène 8 fois celle de l'hydrogène, mais H<sub>2</sub>O avec une masse de l'oxygène 16 fois plus forte. L'ambiguïté de la détermination de Dalton est levée.

Mais il y a une contradiction : comme rien ne se perd, il devrait y avoir autant de molécules d'eau (de formule H<sub>2</sub>O) que de molécules d'oxygène initial. Or, si les hypothèses d'Avogadro étaient justifiées, le volume d'eau final étant deux fois plus grand que celui d'oxygène, il devrait y avoir deux fois plus de molécules d'eau que de molécules d'oxygène. Avogadro en convient :

*Une réflexion paroît d'abord s'opposer à l'admission de notre hypothèse à l'égard des corps composés. Il semble qu'une molécule composée de deux ou plusieurs molécules élémentaires, devrait avoir sa masse égale à la somme des masses de ces molécules, et qu'en particulier, si dans une combinaison une molécule d'un*

*corps s'adjoint deux ou plusieurs molécules d'un autre corps, le nombre des molécules composées devrait rester le même que celui des molécules du premier corps. D'après cela, dans notre hypothèse, lorsqu'un gaz se combine avec deux ou plusieurs fois son volume d'un autre gaz, le composé qui en résulte, s'il est gazeux, ne pourroit avoir qu'un volume égal au premier de ces gaz. Or cela n'a pas lieu en général dans le fait. Par exemple, le volume de l'eau supposée gazeuse est, comme M. Gay-Lussac l'a fait voir, double de celui du gaz oxygène qui y entre, ou, ce qui revient au même, égal à celui de l'hydrogène, au lieu d'être égal à celui de l'oxygène ;*

Et c'est là qu'Avogadro va faire preuve de génie en ajoutant :

*mais il se présente assez naturellement un moyen d'expliquer les faits de ce genre conformément à notre hypothèse : c'est de supposer que les molécules constituantes d'un gaz simple quelconque, c'est-à-dire celles qui s'y tiennent à une distance telle à ne pouvoir exercer leur action mutuelle, ne sont pas formées d'une seule molécule élémentaire, mais résultent d'un certain nombre de ces molécules réunies en une seule par attraction, et que lorsque des molécules d'une autre substance doivent se joindre à celles-là pour former des molécules composées, la molécule intégrante qui devrait en résulter se partage en deux ou plusieurs parties ou molécules intégrantes composées de la moitié, du quart, etc., du nombre de molécules élémentaires dont étoit formée la molécule constituante de la première substance, combinée avec la moitié, le quart, etc., du nombre des molécules constituantes de l'autre substance, qui devrait se combiner avec la molécule totale, ou, ce qui revient au même, avec un nombre égal à celui-ci de demi-molécules, de quarts de molécule, etc., de cette seconde substance ; en sorte que le nombre des molécules intégrantes du composé devienne double, quadruple, etc., de ce qu'il devrait être sans ce partage, et tel qu'il le faut pour satisfaire au volume du gaz qui en résulte<sup>a</sup>.*

<sup>a</sup> Ainsi la molécule intégrante de l'eau, par exemple, sera composée d'une demi-molécule d'oxygène avec une molécule, ou, ce qui est la même chose, deux demi-molécules d'hydrogène.

La réponse est donc que la molécule d'oxygène est en fait composée de deux « molécules élémentaires ». Aujourd'hui on dirait atomes<sup>18</sup>.

L'essentiel de la conception atomique de la chimie était fondé. Mais elle fut loin d'être majoritairement acceptée, même si Avogadro lui-même fit des concessions :

*En lisant ce Mémoire, on aura pu remarquer, en général, qu'il y a beaucoup de points d'accord entre nos résultats particuliers et ceux de Dalton, quoique nous soyons partis d'un principe général, et que Dalton ne se soit réglé que sur des considérations particulières. Cet accord dépose en faveur de notre hypothèse, qui n'est au fond que le système de Dalton, muni d'un nouveau moyen de précision par la liaison que nous y avons trouvée avec le fait général établi par M. Gay-Lussac. Ce système suppose que les combinaisons se font en général en proportions fixes, et c'est ce que l'expérience fait voir par rapport aux combinaisons les plus stables et les plus intéressantes pour les chimistes [...]. On entrevoit que le rapprochement des molécules dans les corps solides et liquides, ne laissant plus entre les molécules intégrantes que des distances de même ordre que celles des molécules élémentaires, peut donner lieu à des rapports plus compliqués, et même à des combinaisons en toute proportion ; mais ces combinaisons seront pour ainsi dire d'un autre genre que celles dont nous nous sommes occupés, et cette distinction peut servir à concilier les idées de M. Berthollet sur les combinaisons, avec la théorie des proportions fixes.*

Ibid.

### *Les objections (suite)*

La situation reste longtemps confuse. Les lois pondérales de Dalton sont généralement acceptées et exploitées. Mais, malgré l'explication – jugée aujourd'hui lumineuse – d'Avogadro, la distinction entre atomes et molécules n'a pas été majoritairement admise pendant encore près d'un demi-siècle. Le développement est resté sinueux : Dalton contre Avogadro (Dumon et Luft, 2008), Dumas atomiste puis anti-atomiste, etc. Pourquoi ?

Il y avait d'abord une objection théorique importante : rien ne pouvait expliquer le regroupement stable de deux atomes identiques pour former une

---

18. En fait jusqu'à la moitié du XIX<sup>e</sup> siècle les termes molécule et atome étaient souvent interchangeable, ce qui laisse imaginer la confusion qui régnait à ce propos (Weiner, 1942).

molécule <sup>19</sup>. Ils devraient électriquement se repousser : puisque l'électricité décomposait par l'électrolyse les substances chimiques, on pouvait lui attribuer réciproquement la responsabilité de la cohésion d'atomes différents, mais certainement pas identiques. De plus l'atomicité (la valence) d'un même corps variait suivant les combinaisons chimiques ou la température.

Paradoxalement, les améliorations de précision et les multiplications des mesures accentuaient le doute sur l'hypothèse d'Avogadro. On doit à Berzelius <sup>20</sup> (1779-1848) un travail remarquable de détermination systématique des masses atomiques par plusieurs méthodes. Quelles étaient ces méthodes dans cette première moitié du XIX<sup>e</sup> siècle ?

Il y avait bien sûr la méthode de Dalton avec son postulat – discutable – de simplicité. Remarquant que les masses connues des éléments exprimés en masse de l'atome d'hydrogène étaient des nombres voisins d'entiers, Prout (1815) <sup>21</sup> alla plus loin : il en déduisit que l'atome d'hydrogène était la brique élémentaire de matière et que toute masse devait en être un multiple. La table 2 compare les valeurs actuelles des masses atomiques à celles proposées par Prout (1785-1859) sur la base des données expérimentales à sa disposition en 1815. Éventuellement à un facteur 2 près dû à la confusion entre molécule et atome <sup>22</sup>, il y avait manifestement quelque chose digne d'attirer l'attention.

Nous avons vu page 25 pourquoi, essentiellement à cause des isotopes, la loi de Prout pouvait être violée.

Pour ceux qui admettaient la loi d'Avogadro, la mesure de densité des gaz offrait une voie simple et précise. Puisque des volumes égaux de gaz contiennent le même nombre de molécules, leur poids doit être proportionnel à la masse de leurs constituants élémentaires. La densité du gaz est donc proportionnelle à la masse des molécules. Mais le raffinement des mesures va montrer que les lois de Gay-Lussac qui étaient à la base de l'hypothèse d'Avogadro tombaient lourdement en défaut dès que le gaz s'approchait de la liquéfaction. De plus, Dumas, par exemple, croyait que les gaz étaient tous diatomiques.

---

19. Pour la même raison, mais dans un domaine totalement différent, la théorie de Wegener (1880-1930) sur la dérive des continents, malgré son évidence, a mis près d'un demi-siècle pour s'imposer : on ne comprenait pas quel mécanisme entraînait un tel mouvement des plaques.

20. C'est un peu le Tycho Brahé de la chimie...

21. À ne pas confondre avec Joseph-Louis Proust !

22. N'oublions pas que l'eau a pour lui la formule HO.

	actuel	Prout	exp.
Hydrogène	1	2	2,11
Carbone	12	12	12,06
Azote	14	28	28,06
Oxygène	16	16	16
Soufre	32	32	32
Sodium	23	48	46,56
Fer	55,8	56	55,2
Chlore	35,5	72	70,56

TABLE 2. La première colonne indique les masses atomiques actuelles, la seconde, celles conjecturées par Prout sur la base des données expérimentales de son temps indiquées en dernière colonne. Pour unifier avec les données actuelles, on a pris 16 comme masse atomique de l'oxygène.

Or la vapeur de mercure est monoatomique, celle de phosphore et celle de l'arsenic, tétratomiques, etc.

La loi de Dulong (1785-1838) et Petit (1791-1820) stipulait que pour les solides, les chaleurs spécifiques<sup>23</sup> atomiques étaient constantes ; elles ne dépendaient pas de leur nature. Dans une quantité donnée de matière, le nombre d'atomes étant inversement proportionnel à leur masse, la mesure de la chaleur spécifique renseigne sur la masse atomique. Mais là encore, il y avait problème. Par exemple, on lit dans un grand classique, le cours de physique de l'École polytechnique (Jamin, 1868) :

*[...]la loi n'est satisfaite que si l'on prend pour quelques corps un multiple ou un sous-multiple des équivalents adoptés par les chimistes. Il faut doubler celui du carbone, prendre la moitié de ceux du brome, de l'iode, de l'arsenic et du phosphore. Cela ne présente aucune difficulté au point de vue chimique. Mais il faut aussi diviser par 2 les poids atomiques du potassium, du sodium et de l'argent, ce qui est plus difficile à admettre.*

L'avantage était que la loi s'appliquait aux corps non volatils. Hélas encore, cette loi tombait gravement en défaut aux très basses températures : au lieu de rester constante, la chaleur spécifique tendait vers zéro. Einstein – encore lui – en 1905, puis la mécanique quantique vont en rendre compte.

Enfin Faraday (1791-1867) développa l'utilisation de l'électrolyse (1834). La masse de produit dégagé aux électrodes, proportionnelle à la quantité

23. Quantité d'énergie qu'il faut fournir pour élever de 1°C la température de  $N_A$  atomes.

de courant et à la masse atomique de l'élément considéré, fournissait une troisième méthode indépendante de détermination de la masse atomique. Cette méthode révéla des masses atomiques, rapportées à l'hydrogène, non entières, ruinant ainsi l'hypothèse de Prout <sup>24</sup>.

Quoique plus précis, les résultats sur les masses atomiques restaient incohérents souvent d'un facteur entier typiquement 2 ou 3. C'était le prix de la confusion entre atomes et molécules.

### *Équivalentistes contre atomistes ?*

Les équivalentistes ne refusent pas nécessairement la notion d'atomes comme quantités minimales de matière pouvant se combiner, mais ils refusent d'utiliser cette notion abstraite et hypothétique comme mode d'explication des réactions chimiques <sup>25</sup>. Il était préférable d'en rester à ce qui est expérimentalement observable, à savoir les poids équivalents. Comme 2 grammes d'hydrogène se combinent à 16 grammes d'oxygène pour former 18 grammes d'eau ou se combinent à 71 grammes de chlore pour former 73 grammes d'acide chlorhydrique, en prenant – arbitrairement <sup>26</sup> – 1 pour l'hydrogène, le poids équivalent de l'oxygène était de 8, celui du chlore de 35,5, etc. On définit ainsi les masses atomiques comme poids équivalents et ce, apparemment, sans hypothèse. La philosophie de ces chimistes est bien résumée par Stas (1894) :

*[...] si par l'analyse et la synthèse des corps composés, exécutées à l'aide de la pesée, et sans recourir à des considérations d'ordre physique, on ne peut arriver à la connaissance des rapports des poids atomiques, alors on doit renoncer pour le moment à la notion du poids atomique. La renonciation à l'hypothèse atomique n'apportera, du reste, aucun trouble dans la science, car en somme, qu'il existe des atomes, ou qu'il n'en existe pas, les combinaisons s'effectuent dans tous les cas d'après les nombres proportionnels établis par l'expérience. Il n'y aura en moins qu'une*

24. Il faudra attendre la compréhension de ce que sont les isotopes. Par exemple si la masse atomique du chlore naturel est 35,5, c'est que ce chlore est un mélange de deux isotopes contenant chacun 17 protons, mais 20 et 18 neutrons dans les proportions 3/4 et 1/4.

25. De façon un peu analogue, l'Église n'a pas refusé l'utilisation de l'héliocentrisme de Copernic et Galilée comme moyen pratique de calcul, mais refusait d'accepter le mouvement de la Terre comme *réellement* existant.

26. Berzelius a pris 100 pour l'oxygène.

*conception de l'esprit et un ordre de choses réglé d'après cette conception.*

*En m'exprimant ainsi, je n'ignore pas que les formules, qui représentent la composition des corps, sont dans beaucoup de cas plus simples et plus facilement intelligibles que celles qui dérivent de la notation des rapports proportionnels ou équivalents chimiques. Mais la simplicité des formules, et la facilité qu'a l'esprit de les comprendre, ne peuvent pas être prises en considération lorsqu'il s'agit de décider de l'exactitude ou de l'inexactitude d'une loi de la nature. Dans l'ordre naturel, un principe est immuable, ou bien il n'est pas un principe.*

### ***Le tournant : Cannizzaro et le congrès de Karlsruhe***

La seconde moitié du XIX<sup>e</sup> siècle connut un tel développement de l'industrie chimique que la confusion régnante devenait insupportable. Il y avait 19 façons d'écrire la formule de l'acide acétique (en notations modernes, CH<sub>3</sub>CO<sub>2</sub>H). Le congrès de Karlsruhe, premier grand rassemblement international scientifique, tenu en 1860, marque le début d'un tournant. Non parce qu'il aurait mis fin aux discussions, mais pour l'influence ultérieure qu'exerça le chimiste italien Cannizzaro, auteur d'un texte publié en 1858, *Sunto di un corso di filosofia chimica*, largement diffusé aux congressistes. Cannizzaro y réhabilite les conclusions d'Avogadro sur la distinction entre atome (les « molécules élémentaires ») et molécule, en s'appuyant sur tous les travaux récents des chimistes<sup>27</sup>. Les notations chimiques modernes sont maintenant unifiées.

---

27. Lécaille (2009) signale un grand oublié : Antoine Marc Gaudin qui avait dès 1831 fait, sans succès, un travail analogue.

# 4

## L'atomisme moderne

**Il faut maintenant revenir à la physique ; c'est elle qui va définitivement asseoir l'« hypothèse atomique », au moment où cette hypothèse avait gagné à elle une bonne partie des chimistes.**

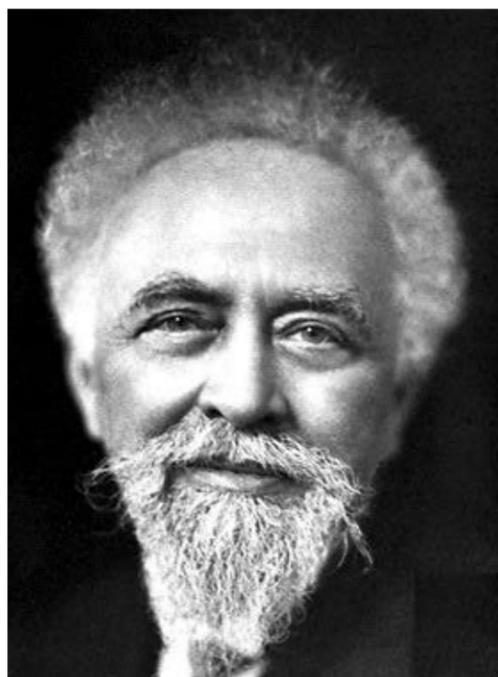


FIGURE 5. *Einstein en 1925 et Perrin en 1930.*

### Einstein et Perrin

Les études théoriques d'Einstein sur le mouvement brownien, spectaculairement confirmées par les expériences de Perrin, ont été les fameuses « autres considérations » réclamées par Dumas (voir p. 52) nécessaires à la validation de l'hypothèse atomique. De plus, elles ont fourni deux méthodes originales de calcul du nombre d'Avogadro, indépendantes des précédentes.

## *Le mystère du mouvement brownien*

De petites particules en suspension dans l'eau sont agitées d'un mouvement désordonné et incessant, mouvement d'autant plus rapide que les particules sont petites et la température élevée. Même s'il avait déjà été observé sous les premiers microscopes (Pearle *et al.*, 2010), on doit au botaniste Robert Brown (1773-1858) l'étude systématique de ce mouvement qui porte à juste titre son nom. Commenant avec des grains de pollen de *Clarkia pulchella* dispersés dans de l'eau, puis examinant une série d'autres particules microscopiques, Brown aboutit à la conclusion que ce mouvement n'était pas dû à une forme de vie, puisque même des substances purement minérales (des fragments de sphinx égyptiens, par exemple) y étaient soumises. Il ne dépendait pas de la nature des particules, mais de leur taille.

Ce mouvement était intrigant. Pourtant, relativement peu de physiciens s'y intéressèrent dans la seconde moitié du XIX<sup>e</sup> siècle (Ren, 2005). On a compris très vite qu'il n'était pas non plus causé par de petites inhomogénéités de température ou de vitesse d'écoulement de l'eau, auquel cas les vitesses de deux particules très voisines ne sauraient être très différentes ; ce mouvement n'est donc pas analogue à celui de la poussière, agitée par l'air, telle qu'on la voit dans un rayon de soleil.

Comment mesurer la vitesse d'une particule animée d'un mouvement brownien ? Ne suffit-il pas de mesurer la distance parcourue en prenant une photo à des intervalles réguliers comme le montre la figure 6 ? Deux problèmes apparaissent :

1. Les distances parcourues depuis l'origine ne sont pas proportionnelles au temps, mais croissent comme sa racine.
2. La vitesse, qui est le quotient de l'espace parcouru  $\Delta s$  à l'intervalle de temps  $\Delta t$  mis à le parcourir, varie aléatoirement d'un instant à l'autre, quel que soit  $\Delta s$ .

Le premier problème rappelle la marche au hasard (voir l'annexe, p. 123). Le deuxième montre que la vitesse instantanée, qui devrait être la limite de la vitesse moyenne quand l'intervalle de temps  $\Delta t$  tend vers zéro, ne peut pas être définie dans ce cas<sup>1</sup>. Illustrons ce qui se passe avec la figure schématique 7 ; les vitesses moyennes entre deux points sont

---

1. Il semble qu'on ait maintenant réussi – ce qu'Einstein jugeait hors d'atteinte – à mettre en évidence le mouvement brownien en temps réel, voir par exemple Pusey (2011) et les travaux de Mark Raizen (Cordonnier, 2010).

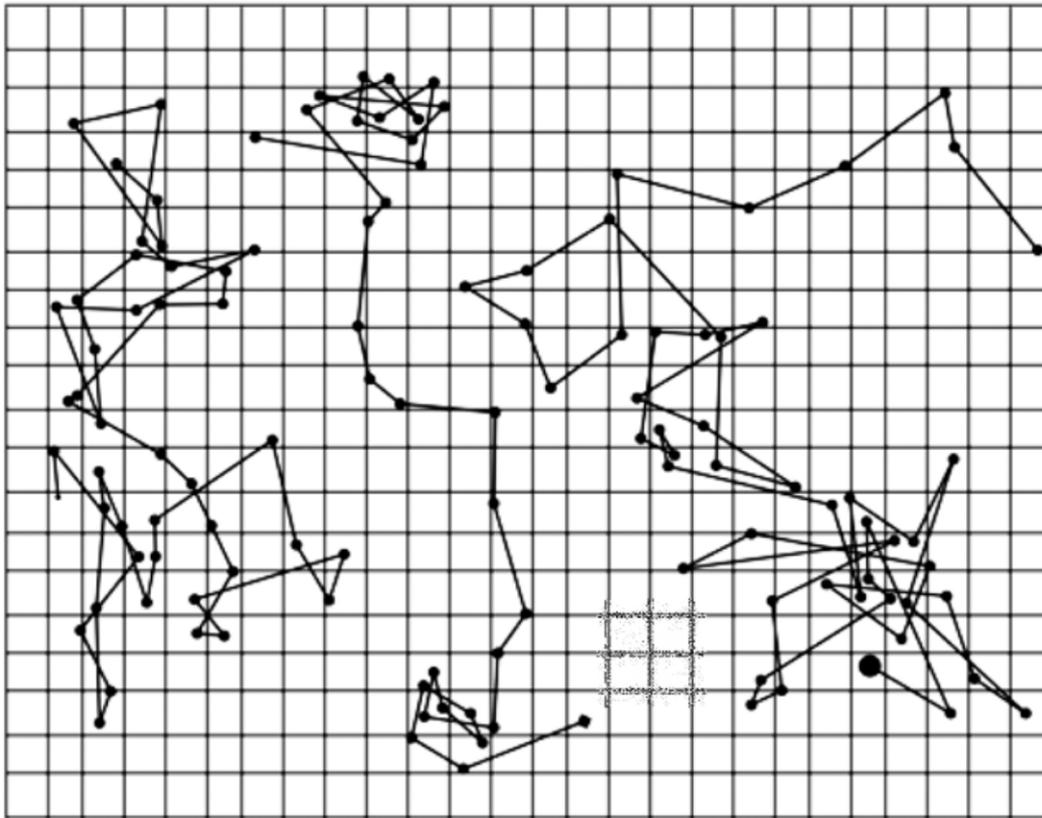


FIGURE 6. *Trois tracés (Perrin, 1913) du mouvement de particules colloïdales de rayon  $0,53 \mu\text{m}$ , vues sous le microscope. Les positions successives sont notées toutes les 30 secondes et reliées par des segments de droite (ce ne sont pas les trajectoires qui, elles, sont infiniment plus erratiques). La maille est de  $3,2 \mu\text{m}$ .*

portées par les différents segments. La décomposition de  $AB$  en  $A_1A_2A_3B$  puis en  $A_1A_2A_3 \dots A_{15}B$  n'est qu'une image d'une décomposition qui peut se poursuivre quand les prises de vue sont plus rapprochées : à son tour,  $A_1$  pourrait se décomposer comme  $AB$ , etc. Chaque décomposition a le même aspect général. C'est ce qu'on appelle l'autosimilarité du mouvement brownien, c'est-à-dire qu'un changement d'échelle n'en modifie pas l'allure globale<sup>2</sup>.

2. Cette autosimilarité a une limite dans un mouvement réel : avec des temps suffisamment brefs (de l'ordre de  $10^{-8}$  seconde), on aboutit à la succession des collisions individuelles avec les molécules et la trajectoire réelle est exactement faite de bouts de droites juxtaposés (de l'ordre de  $10^{-10}$  mètre pour les liquides et plusieurs centaines de fois plus pour les gaz).

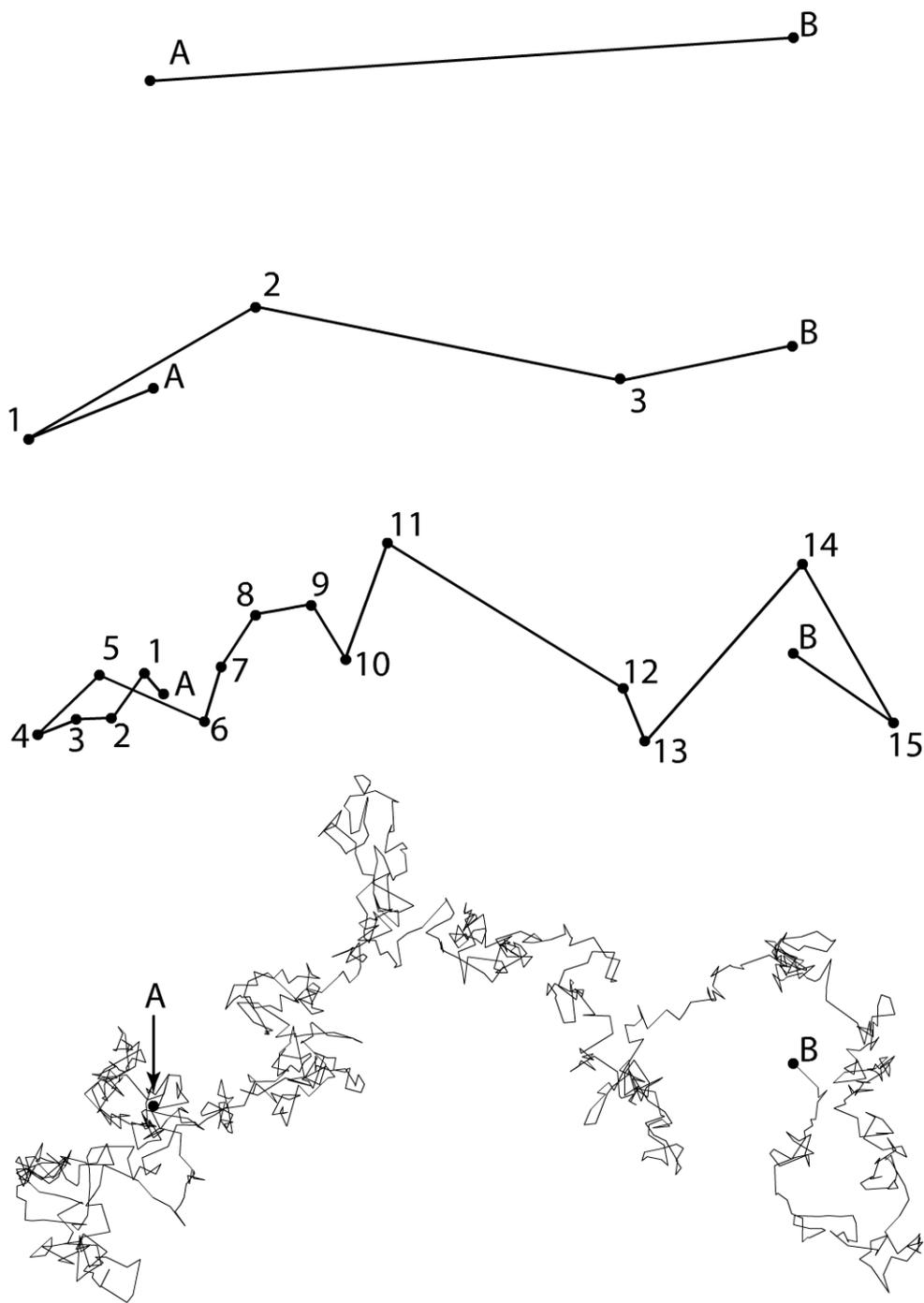


FIGURE 7. *Représentation schématique des positions d'une particule brownienne allant de A à B, en trait épais. Les lignes, qui ne sont pas les trajectoires, sont tracées seulement pour guider l'œil. Elles relient les points intermédiaires à des échelles de temps de plus en plus fines : le temps est divisé en 4, puis 16, puis 1024 parties égales.*

**Résultats expérimentaux actuels.** Nous remercions B. Abou et R. Colin<sup>3</sup> de nous avoir fourni, avant publication, les résultats qui suivent. Ils portent sur le mouvement brownien de 49 particules de latex de  $1 \mu\text{m}$  de diamètre en suspension dans un mélange de glycérol et d'eau. On constate :

a) *la complexité des trajectoires.*

La figure 8 donne les positions d'une particule brownienne toutes les 0,02 secondes. Pour des raisons pédagogiques, ces positions ont été reliées par des segments de droite. Même si les intervalles de temps sont 150 fois plus petits que ceux de Perrin, il ne s'agit pas du tout de la trajectoire réelle, infiniment plus complexe.

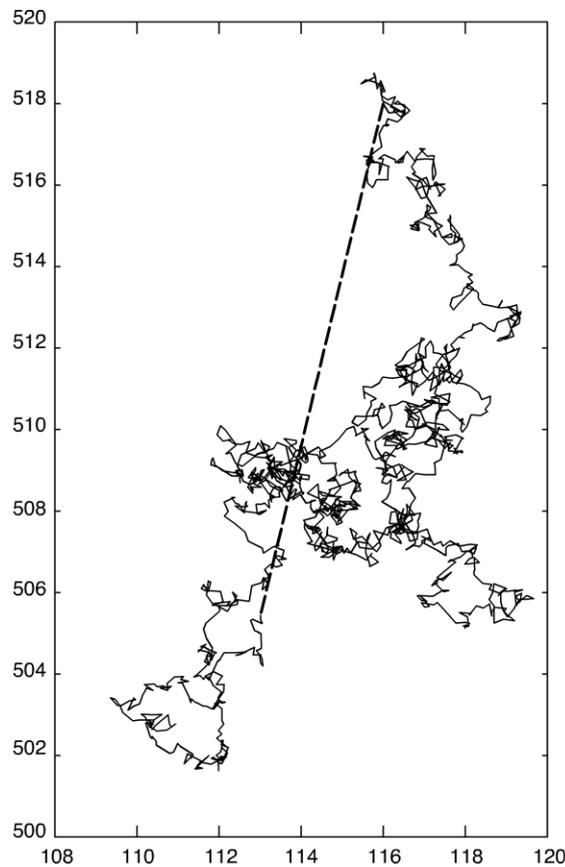


FIGURE 8. *Données expérimentales à comparer avec les figures 6 et 7. Les positions  $(x, y)$  (en pixel) d'une particule sont relevées toutes les 0,02 secondes. La droite en trait épais relie le point de départ au point final de la mesure.*

3. Laboratoire Matière et Systèmes Complexes (MSC), université Paris Diderot.

La figure 9 est une simulation numérique de marche au hasard. Elle représente les 100 000 collisions d'une molécule de gaz effectuées en  $10^{-4}$  secondes. Cette représentation théorique est étonnamment semblable à la représentation expérimentale de la figure 8 ;

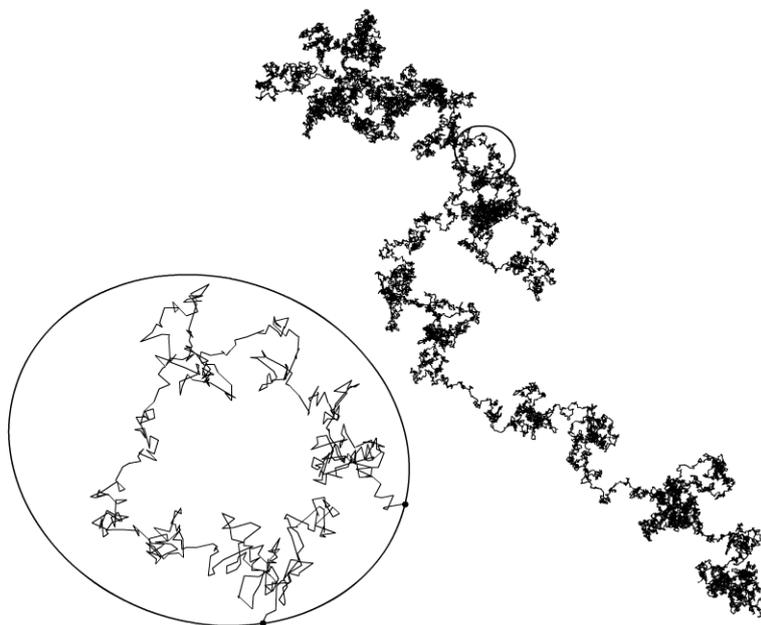


FIGURE 9. *Marche au hasard simulée sur ordinateur. Le dessin de gauche est un agrandissement de la partie entourée du dessin de droite. On comparera avec les données expérimentales de la figure 8.*

*b) un éloignement du point de départ proportionnel à la racine du temps.*

Dans un mouvement balistique (le mouvement habituel), la distance à l'origine varie proportionnellement au temps ; dans le mouvement d'une particule brownienne elle varie proportionnellement à *la racine du temps*, il est donc beaucoup plus lent. Si, par exemple, la particule brownienne s'éloigne de 1 cm en une seconde, elle parcourra seulement 60 cm en une heure. Le plus simple donc, pour mettre en évidence cette dépendance, est de tracer non pas cette distance, mais le carré de cette distance et de vérifier sa proportionnalité au temps. On devrait donc trouver une droite. La figure 10 représente les carrés des distances parcourues par trois des particules browniennes de l'échantillon. Les courbes sont toutes différentes et assez éloignées de droites. Pourquoi ? Parce qu'il s'agit d'une loi statistique qui ne s'applique qu'aux moyennes. C'est ce qu'illustre sur cette même figure la droite (en trait épais), qui représente la moyenne des carrés des distances

effectuée sur les 49 particules. La différence entre les trois courbes (en trait fin) et cette dernière marque l'importance des fluctuations individuelles.

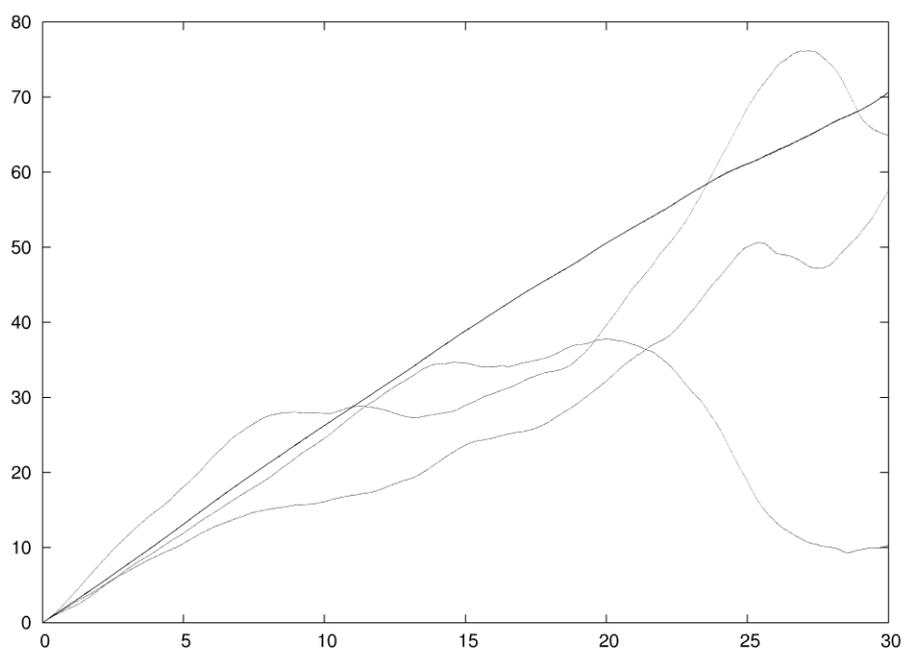


FIGURE 10. Mêmes données expérimentales qu'à la figure 8. En abscisses, le temps (en secondes). En ordonnées, on a représenté en traits fins le carré des distances à l'origine,  $r^2$  (en  $\text{pixel}^2$ ), pour trois particules et en trait épais la moyenne de cette quantité portant sur 49 particules. On voit que cette dernière varie sensiblement comme  $t$  et non comme  $t^2$ .

**Digressions mathématiques.** Le mouvement réel d'une particule brownienne est une succession de petits segments de droite d'orientations arbitraires. Sa description mathématique l'idéalise en prenant le cas limite où chacune des distances parcourues entre deux chocs tend vers zéro. Elle va poser problème : la courbe qui représente théoriquement la trajectoire de la particule brownienne est nécessairement continue – la particule ne saute jamais –, et pourtant, elle n'admet pas de dérivée. Autrement dit, le rapport  $\Delta s / \Delta t$  où  $s$  représente la distance parcourue, n'a pas de limite quand  $\Delta t$  tend vers 0. L'existence de fonctions partout continues, mais nulle part dérivables, était devinée ou connue depuis un demi-siècle (Bernhard Riemann en 1861, puis Karl Weierstrass en 1872), mais apparaissait comme un jeu pouvant amuser les seuls mathématiciens. Et encore, pas tous ! On peut lire chez Poincaré (1918), in *Science et méthode* :

*La logique parfois engendre des monstres. On vit surgir toute une foule de fonctions bizarres qui semblaient s'efforcer de ressembler aussi peu que possible aux honnêtes fonctions qui servent à quelque chose. Plus de continuité, ou bien de la continuité, mais pas de dérivées [...] Autrefois, quand on inventait une fonction nouvelle, c'était en vue de quelque but pratique ; aujourd'hui, on les invente tout exprès pour mettre en défaut les raisonnements de nos pères, et on n'en tirera jamais que cela.*

Ce sera peut-être là le plus grand manque de perspicacité chez cet illustre mathématicien pourtant très intéressé à la physique. Aujourd'hui, l'étude du mouvement brownien est une branche importante des mathématiques (Kahane, 2006).

Il est intéressant de comparer à ce qu'écrit Perrin dans la préface de son livre *Les Atomes* :

*Les mathématiciens, pourtant, ont bien compris le défaut de rigueur de ces considérations dites géométriques, et combien, par exemple, il est puéril de vouloir démontrer, en traçant une courbe, que toute fonction continue admet une dérivée. Si les fonctions à dérivée sont les plus simples, les plus faciles à traiter, elles sont pourtant l'exception ; ou, si l'on préfère un langage géométrique, les courbes qui n'ont pas de tangente sont la règle, et les courbes bien régulières, telles que le cercle, sont des cas fort intéressants, mais très particuliers. Au premier abord, de telles restrictions semblent n'être qu'un exercice intellectuel, ingénieux sans doute, mais en définitive artificiel et stérile, où se trouve poussé jusqu'à la manie le désir d'une rigueur parfaite. Et, le plus souvent, ceux auxquels on parle de courbes sans tangentes ou de fonctions sans dérivées commencent par penser qu'évidemment la nature ne présente pas de telles complications et n'en suggère pas l'idée.*

*C'est pourtant le contraire qui est vrai, et la logique des mathématiciens les a maintenus plus près du réel que ne faisaient les représentations pratiques employées par les physiciens.*

La théorie des fractales y est même en germe dans l'introduction. Comme expérience de pensée, Perrin prend l'exemple de la longueur des côtes de la Bretagne. Suivant la taille de l'instrument de mesure, celui-ci pourra plus ou moins en épouser les irrégularités. Ainsi un double décimètre qui peut pénétrer dans toutes les anfractuosités du littoral donnerait une longueur de côtes bien supérieure à celle d'une chaîne d'arpenteur de 100 mètres, qui

lisserait les détails. Cet exemple a été ensuite vulgarisé dans le célèbre article de 1967 *How Long Is the Coast of Britain?* écrit par Mandelbrot (1924-2010) pour populariser les fractales.

### *Mouvement brownien et nombre d'Avogadro*

Anticipée notamment par Christian Wiener<sup>4</sup> (1826-1896), l'explication et surtout la théorie du mouvement brownien – remarquablement décrit par Gouy (1854-1926) – furent données par Einstein en 1905 et indépendamment par Marian Smoluchowski (1872-1917). Cette théorie permit d'établir un pont entre les mouvements microscopiques inobservables des molécules du milieu et des grandeurs macroscopiques mesurables (des densités ou des déplacements de petites billes immergées). On appréciera la prudence d'Einstein :

*Dans cet article, on se propose de montrer que, selon la théorie cinétique moléculaire de la chaleur, des corps en suspension dans un fluide d'une taille visible au microscope, doivent du fait de l'agitation thermique des molécules, effectuer des mouvements d'une ampleur telle qu'ils puissent être aisément mis en évidence au microscope. Il se peut que le mouvement dont il est question ici soit identique à ce que l'on appelle « le mouvement moléculaire brownien ». Les informations dont je dispose à ce sujet sont cependant si peu précises qu'il ne m'a pas été possible de me faire une opinion.*

*Si le mouvement dont il est question ici, ainsi que les lois qu'on peut anticiper à son sujet sont effectivement observés, la thermodynamique classique doit être considérée comme n'étant déjà plus strictement valable à l'échelle des distances que résout le microscope, et l'on peut alors déterminer de façon exacte les vraies dimensions atomiques. Si, à l'inverse, cette prédiction s'avérait inexacte, il y aurait là un argument de poids à opposer à la conception moléculaire cinétique de la chaleur.*

Annalen der Physik 17, 1905.

On comprend la prudence du physicien : le « mouvement moléculaire brownien » résulterait d'un transfert direct de l'énergie thermique du bain (l'agitation de ses molécules constituantes) en énergie mécanique (le

---

4. Ne pas confondre avec Norbert Wiener (1894-1964) qui initiera la description mathématique moderne du mouvement brownien (Duplantier, 2005, Kahane, 2006).

déplacement des corps en suspension). Ce serait en contradiction avec le second principe de la thermodynamique si fortement établi, qui interdit ce transfert direct ; il stipule qu'on ne peut obtenir de travail avec seulement une source chaude ; il faut aussi une source froide. Perrin à ce propos donne l'exemple impossible d'un bateau qui tirerait son énergie (le travail) de la transformation de l'eau de mer (la source chaude) en glace. Il fait également la remarque que pour qu'une brique de 1 kg suspendue par un fil puisse par un mouvement brownien s'élever de un étage, il faudrait attendre en moyenne une durée de  $10^{1010}$  années. On retrouve ici, dans un cadre différent, des exemples analogues à la récurrence de Poincaré qu'on ne voit jamais se manifester, même si elle est « théoriquement » possible. La conclusion, révolutionnaire pour l'époque, est que les lois de la thermodynamique ne sont que des lois moyennes, statistiques, et elles cessent d'être applicables aux petites dimensions spatiales et temporelles.

Comme souvent, Einstein n'est pas parti de l'expérience, mais a fait la démarche théorique suivante : si l'hypothèse atomique est vraie, comment calculer, puis mettre en évidence les fluctuations microscopiques et indécélables des molécules du milieu ? Son idée sera de considérer l'effet possible de ces fluctuations invisibles sur des particules de taille intermédiaire entre les dimensions moléculaires et, disons, le centimètre : ce qu'on appelle aujourd'hui les dimensions mésoscopiques.

Nous donnons en annexe, page 126, le schéma de la démarche d'Einstein. Le point clé est le suivant : *sous réserve de la validité de l'hypothèse atomique*, on peut établir l'analogie entre le comportement des molécules invisibles d'un gaz et celui de particules en suspension dans un liquide, visibles au microscope.

Que se passe-t-il quand, dans un fluide (gaz ou liquide), ses molécules en agitation permanente frappent aléatoirement une particule immergée ? Si la particule est suffisamment grosse, les très nombreux chocs qui se produisent dans toutes les directions s'équilibrent et la résultante du mouvement imprimé est pratiquement nulle. Pour une particule microscopique, les chocs sont beaucoup moins nombreux et ne peuvent donc se compenser totalement sur un temps donné (observable) et, en permanence, il y a une résultante non nulle, fluctuante, responsable d'un mouvement visible<sup>5</sup>. Ce mouvement,

---

5. Ce phénomène est analogue à celui d'un tirage au sort à pile ou face. Si le nombre de coups est faible, il y aura généralement déséquilibre entre le nombre des pile et celui des face. Ajoutons un résultat qui choque le bon sens : même si, en

sans cesse renaissant, est systématiquement freiné par la viscosité du bain qui agit en quelque sorte à la fois comme moteur (le choc des molécules) et comme frein (les frottements). On s'attend donc à un déplacement d'autant plus prononcé que la taille de la particule immergée est petite, la viscosité du bain, faible et la température (liée à l'agitation moléculaire), grande. Notons que ce que nous avons appelé particules microscopiques sont des millions de fois plus grosses que les molécules du bain qu'il s'agit de mettre en évidence.

La formule d'Einstein (5) (voir l'annexe, p. 126) relie directement le nombre d'Avogadro au coefficient de diffusion de particules browniennes et au coefficient de viscosité du fluide. Une expérience fondamentale de Perrin mesurant les coefficients de diffusion illustre ce mécanisme. L'application de cette formule répétée avec des milieux de viscosité très différente (eau, glycérine) ainsi qu'avec des grosseurs de grain variant dans un rapport 1 à 50 redonna des valeurs de  $N_A$  comprises entre  $6,5$  et  $7,2 \times 10^{23}$ .

Une deuxième et tout aussi célèbre expérience vérifie encore le comportement prévu par Einstein de petites particules browniennes qui sédimentent à cause de leur pesanteur. Dans une colonne de fluide, les particules en suspension sont soumises à leur poids  $mg$  ( $g$  est l'accélération terrestre)<sup>6</sup> qui tend à les faire tomber et à l'agitation moléculaire qui tend à les disperser. Il en résulte une densité (ou un nombre de particules  $n(z)$  par unité de volume) qui diminue exponentiellement avec l'altitude  $z$  (voir l'équation (1) de l'annexe, p. 125). La puissance de l'exponentielle est :  $-mgz/k_B T$ . Ce qui signifie que la densité décroît d'autant plus vite que le poids  $mg$  est grand et la température  $T$  basse.

Où est le nombre d'Avogadro ? Il est contenu dans la constante de Boltzmann  $k_B$ . En effet on peut démontrer que  $k_B N_A = R$  où  $R$  est la constante des gaz parfaits, gaz qui obéissent à la loi de Mariotte qui stipule que pour une mole (occupant donc un volume  $V = 22,4$  litres), on a  $pV = RT$ . Cette constante est connue expérimentalement.

Avec des molécules de l'air, il faut quelques dizaines de mètres pour déceler un effet de diminution de densité. Le grand mérite de Perrin est d'avoir vérifié, à la suite d'expériences soignées et délicates<sup>7</sup>, que l'équation barométrique restait valable avec des particules microscopiques en

---

moyenne, il y a autant de pile que de face, le parieur traverse de longs moments en situation de gagnant – et bien sûr, de perdant à d'autres moments !

6. Éventuellement corrigé de la poussée d'Archimède.

7. Il fallait – entre autres difficultés – obtenir des grains très bien calibrés.

suspension dans un liquide. Microscopiques, mais quand même 100 millions de fois plus grosses que la molécule d'oxygène ! L'avantage est double : d'abord, pour voir la densité changer de façon significative, il suffit de mesurer des altitudes inférieures au millimètre, ce qu'on peut faire très bien au microscope ; ensuite on connaît avec précision la masse  $m$  des particules (ce qui n'était pas le cas de la molécule d'oxygène ou d'azote). Laissons parler Perrin :

*[...] s'il faut s'élever seulement de 1/20 de millimètre, c'est-à-dire 100 millions de fois moins que dans l'oxygène, pour que la richesse en grains devienne deux fois plus faible, on devra penser que le poids efficace de chaque grain est 100 millions de fois plus grand que celui de la molécule d'oxygène. C'est ce poids du granule encore mesurable qui va faire l'intermédiaire, le relais indispensable, entre les masses qui sont à notre échelle et les masses moléculaires.*

PHÉNOMÈNES OBSERVÉS	$\frac{N}{10^{22}}$
Viscosité des gaz (équation de Van der Waals).	62
Répartition de grains	68,3
Mouvement brownien	
Déplacements .....	68,3
Rotation .....	65
Diffusion .....	69
Répartition irrégulière des molécules.....	
Opalescence critique	75
Bleu du ciel .....	60 (?)
Spectre du corps noir .....	64
Charge de sphérules (dans un gaz).....	68
Charges projetées .....	62,5
Radioactivité .....	
Hélium engendré .....	64
Radium disparu .....	71
Énergie rayonnée .....	60

TABLE 3. Résultats compilés par Perrin (1913). Ici  $N$  est le nombre d'Avogadro

Nous avons insisté sur le travail de Perrin à cause de son élégance et de son importance historique. Mais bien d'autres méthodes indépendantes ont été utilisées. Dans son livre, Perrin (1913) décrit 13 expériences mettant en jeu des phénomènes physiques totalement différents depuis le bleu du ciel

en passant par la radioactivité et la viscosité des gaz. Toutes donnent à 10% près le même résultat. Près d'un siècle plus tard la liste s'est passablement allongée. Citons en particulier l'expérience très simple de Kappler (1931). Il a suspendu un miroir très léger au bout d'un long fil (fil de torsion). Le mouvement brownien des molécules d'air qui frappent sur le miroir lui font subir des fluctuations angulaires autour de sa position d'équilibre. La mesure de ces fluctuations donne accès au nombre d'Avogadro.

Surtout la précision s'est énormément améliorée. Becker (2001) constate une réduction de l'incertitude sur  $N_A$  d'un facteur 10 tous les quinze ans entre 1850 et 2000 !

## Quelques conséquences secondaires de l'atomisme

**L'existence du nombre d'Avogadro donne des limites quantitatives à la division possible de la matière. Il invalide par exemple les prétentions théoriques de l'homéopathie fondée sur l'efficacité des faibles dilutions censées soigner le mal par le mal. Aujourd'hui l'atomisme rend rationnellement intenable le mystère de la transsubstantiation. On trouvera ensuite deux exemples moins connus de l'utilisation du nombre d'Avogadro : la création d'un nouvel étalon de masse et l'estimation de l'âge de la Terre.**

### *La dilution homéopathique*

On l'a vu : une quantité raisonnable de matière (disons quelques grammes) contient quelque  $10^{22}$  molécules de matière. On la dissout dans un litre d'eau. On mélange ce litre avec 99 litres d'eau pure. En vocabulaire homéopathique, une telle solution est dite diluée à 1 CH ; si on en prélève un litre, il ne contient plus que 1/100 des  $10^{22}$  molécules initiales, c'est-à-dire  $10^{20}$  ; dilué à nouveau à 2 CH, il n'en contient que  $10^{18}$ . Et à 12 CH, qui est une dilution homéopathique courante, il en contiendrait  $10^{22}/100^{12} = 1/100$ . Mais 1/100 de molécule n'a aucun sens. Le seul sens est statistique, il signifie que la probabilité de trouver une molécule de soluté dans le litre de solution ainsi diluée est de 1/100 ; ou, si on préfère, qu'en moyenne sur 100 flacons, un seul contient une molécule active<sup>8</sup>. Avec un CH de 15, sur 100 millions de flacons, en moyenne, un seul aurait une molécule. Et comment distinguer *cette*

---

8. Ce calcul n'est valable que si les solutions sont parfaitement homogènes, sans effet de collage sur les bords ; ceci est obtenu par le processus de « succussion » pratiqué dans toutes les bonnes préparations homéopathiques.

molécule active – si d’ailleurs elle est présente – des milliards d’autres qui traînent dans une solution même ultra purifiée ? Samuel Hahnemann (1755-1843), médecin allemand et fondateur de la discipline, ignorait évidemment cette discontinuité de la matière. Citons-le (Hahnemann, 1834) :

*Peu importe alors que l’atténuation aille jusqu’au point de paraître impossible aux médecins vulgaires dont l’esprit ne se nourrit que d’idées matérielles et grossières<sup>a</sup>.*

*<sup>a</sup> Qu’ils apprennent des mathématiciens qu’en quelque nombre de parties qu’on divise une substance, chaque portion contient cependant encore un peu de cette substance, que, par conséquent, la plus petite parcelle qu’on puisse imaginer ne cesse point d’être quelque chose, et ne devient pas rien ! Qu’ils apprennent des physiciens qu’il y a des puissances immenses qui n’ont pas de poids, comme le calorique, la lumière, etc., et qui, par cela même, sont infiniment plus légères encore que le contenu médicinal des plus petites doses de l’homéopathie !*

Qu’il croie encore au « calorique », comme la plupart des savants de son temps, n’est pas choquant ; par contre on voit mal comment l’invocation des mathématiques qui peuvent abstraitement diviser un nombre à l’infini peut apprendre quelque chose sur la divisibilité physique de la matière.

Racontons brièvement l’histoire de l’homéopathie, pratique qui peut éventuellement soulager le malade, mais certainement pas grâce aux produits que le médicament est censé contenir.

**L’histoire de l’homéopathie condense tous les ingrédients qui pimentent les rapports entre science et société. D’un côté, il y a l’attitude réputée bornée des scientifiques qui maintiennent que le « médicament » homéopathique est un *placebo* sous prétexte que – nombre d’Avogadro oblige – les dilutions homéopathiques ne contiennent finalement plus aucune molécule active. De l’autre, il y a, surtout en France<sup>9</sup>, un public massif qui pratique cette médecine « douce » avec la bénédiction de nombreux médecins.**

À l’époque où Hahnemann imaginait l’homéopathie, contrairement à la chirurgie, la médecine était généralement impuissante (Molière l’avait amplement brocardée un siècle auparavant). Il n’est pas exagéré de dire que ses bases « théoriques » étaient encore *grosso modo* celles de la médecine

---

9. C’est le seul pays où *toutes* les pharmacies arborent les pancartes « Allopathie » et « Homéopathie ».

du Moyen Âge <sup>10</sup>. La justification de cette nouvelle thérapeutique se trouve dans l'affirmation de ce praticien que les maladies peuvent être traitées par l'ingestion – à très faible dose – de substances provoquant les mêmes symptômes. À l'époque actuelle, beaucoup l'assimilent au vaccin ou à du sérum. Le *hic* est, comme nous l'avons montré, qu'il ne reste plus de molécule active dans le médicament. Cette objection appelée « barrière d'Avogadro », évidemment inconnue de Hahnemann, constitue aujourd'hui une objection fondamentale.

C'est ainsi qu'opportunistement est survenue l'affaire dite de la « mémoire de l'eau ». En juin 1988, le n° 333 de la revue *Nature* publiait un article dans lequel le Dr Jacques Benveniste (1935-2004) soutenait qu'une solution diluée au point de ne plus contenir de molécule de soluté conservait néanmoins une activité biologique (la dégranulation des basophiles). Tout se passait donc comme si l'eau se souvenait d'avoir jadis contenu un soluté maintenant disparu, évoquant pour ainsi dire une « mémoire de l'eau ». Un scientifique, et un scientifique de renom, ouvrait donc une brèche dans cette barrière d'Avogadro. Inutile de dire que le laboratoire Boiron, principal fabricant mondial de produits homéopathiques, s'y engouffra <sup>11</sup>.

Quoique choqués, des scientifiques s'intéressèrent à un tel résultat. Un parallèle avec une autre découverte sensationnelle dans un autre domaine s'impose. Bien qu'accueillie avec scepticisme, vu la révolution théorique qu'elle aurait impliquée, la « fusion froide » a aussi fait l'objet d'études intensives dans les plus grands laboratoires <sup>12</sup>. L'attitude des scientifiques sur ces deux découvertes fait écho au célèbre pari de Pascal : une proposition même avec une probabilité très faible d'être vraie, mais avec un possible gain colossal (intellectuel et – ne l'oublions pas – matériel) vaut la peine d'être testée. Aucune barrière psychologique et aucun conservatisme scientifique ne peuvent résister à cet attrait. Ce n'est pas parce qu'on ne sait pas expliquer un

---

10. Il est instructif de savoir que la pratique de la saignée extrêmement populaire depuis au moins vingt siècles reposait fondamentalement sur une « théorie » des humeurs viciées à éliminer (Hippocrate). Sauf dans des cas très rares comme l'œdème aigu du poumon et l'hémochromatose (maladie génétique rare), elle ne reposait sur *aucun* effet bénéfique. Ainsi l'idée qu'une longue pratique est garante d'une certaine efficacité est quelquefois fautive.

11. Pour ensuite, élégamment, couper ses crédits quand l'affaire fit long feu.

12. Deux scientifiques, Fleischmann et Pons, ont cru voir, en mars 1989, un dégagement anormal de chaleur au cours d'une électrolyse, interprétée par eux comme prouvant une fusion nucléaire à température ordinaire. Il y avait là une potentialité d'énergie propre pratiquement inépuisable.

phénomène qu'il faut en nier l'existence : on a trouvé les propriétés curatives de l'aspirine bien avant qu'on en ait compris le mécanisme. Après tout, les solides ont bien une mémoire : c'est elle qui permet des enregistrements sur les disques. Certes, à la différence des solides, la prodigieuse agitation des molécules des liquides rend cette mémoire à peu près invraisemblable. Mais qui sait ? Bien des laboratoires – y compris notre célèbre prix Nobel, Charpak (1924-2010) (voir le document p. 119) – vont donc tenter de reproduire les résultats de Benveniste.

En vain ! Aujourd'hui on peut affirmer que cette « mémoire » était un artefact : aucune théorie ne peut en rendre compte et aucune donnée empirique reproductible ne l'atteste. Quant à l'efficacité de l'homéopathie, elle est celle du *placebo* (Shang *et al.*, 2005, Schwartz, 1986, Coletti, 1999), ce qui n'est pas négligeable et offre un avantage supplémentaire : les surdosages ne présentent aucun risque <sup>13</sup> !

Notons que, bien malgré eux, les laboratoires Boiron ont effectué en 2007 une expérience en double aveugle et sur grande échelle. Ci-joint un communiqué de la très officielle Agence nationale de sécurité du médicament et des produits de santé que nous ne commenterons pas :

*L'Afssaps a été informée par les laboratoires Boiron d'une inversion d'étiquetage entre deux médicaments homéopathiques. Les flacons étiquetés « teinture mère de Gingko biloba » contiennent de la teinture mère d'Equisetum arvense et vice versa. Au plan de la toxicité, l'inversion d'étiquetage ne semble pas entraîner de risque particulier pour les patients. Par mesure de précaution, les laboratoires Boiron, en accord avec l'Afssaps, procèdent au retrait des lots concernés. [...] À ce jour, aucun cas de pharmacovigilance n'a toutefois été rapporté à l'Afssaps avec ces deux produits.*

L'homéopathie reste largement une spécialité française. Ce constat doit faire réfléchir : aujourd'hui, les acquis médicaux prouvés sont universels, à l'image de tous les résultats scientifiques. La raison de ce succès « national » tient probablement à l'épidémie de choléra des années 1830-1832 en France, alors que les premières statistiques médicales étaient produites. Il a été

---

13. Notons que les médicaments homéopathiques sont les seuls à être remboursés – partiellement – par la Sécurité sociale, *sans devoir apporter la preuve de leur efficacité*. L'argument habituel des homéopathes est que chaque malade étant singulier, les tests standard en double aveugle seraient dépourvus de sens. Mais si chaque malade est si singulier, comment peut-on enseigner la posologie homéopathique ? Le fait d'enseigner suppose des classifications possibles derrière l'infinité des cas particuliers.

établi que plus de la moitié des patients traités par la médecine officielle mouraient, mais seulement 10% des malades traités par homéopathie. Certes, suivant les sources, les chiffres varient, mais selon toute vraisemblance, l'homéopathie sortait gagnante. L'explication nous semble simple : la saignée qu'on pratiquait sur ces malheureux déjà déshydratés ne pouvait qu'accélérer leur trépas ; mieux valait l'abstention pure et simple (l'homéopathie) que le traitement par la médecine « officielle ».

Comment ne pas voir là un symbole de l'attractivité de la médecine « douce », celle qui prétend soigner le malade et non la maladie et qui prend le temps nécessaire, à l'opposé de la violence et des excès de la médecine dite « dure » ? L'étude détaillée du succès de l'homéopathie est profitable à la médecine : il y a beaucoup à apprendre de sa pratique, mais certainement rien de sa « théorie »<sup>14</sup>.

### *L'anti-atomisme de la tradition catholique*

L'Église catholique s'est longtemps opposée à l'atomisme. Les raisons sont multiples. D'une part, traditionnellement, les atomistes grecs étaient matérialistes<sup>15</sup>, ce qui déjà sent le soufre ; ensuite, comme on l'a vu, Aristote avait combattu la conception atomiste et il est à peine exagéré de dire que – via saint Thomas d'Aquin – la pensée de ce païen était sacro-sainte. Enfin, le rôle joué par le hasard dans les théories atomistes semblait contredire la toute-puissance divine.

Mais il y avait plus grave : la constitution atomique de la matière rend extraordinairement difficile le mystère de la transsubstantiation lors de l'Eucharistie, c'est-à-dire la transformation du vin et de l'hostie respectivement en sang et chair du Christ. Pour l'Église catholique depuis le concile de Trente (xvi<sup>e</sup> siècle) – ce n'est pas le cas des autres Églises chrétiennes<sup>16</sup> –, il ne s'agit pas d'un symbole, mais d'une réalité.

*En effet, sous les espèces [sub species] dont nous parlons, il n'y a plus ce qui s'y trouvait auparavant, mais quelque chose de tout différent ; et cela non seulement en dépendance du jugement*

---

14. Sur les médecines « douces », on lira avec profit le travail très documenté de Ernst et Singh (2008).

15. Sans oublier la réputation d'immoralité ordinairement associée à l'épicurisme.

16. Les Églises réformées y voient plutôt un symbole. Les Églises orthodoxes adopteraient une position intermédiaire, mais rares sont les travaux portant sur la science et l'orthodoxie (Efthymios, 2011).

*que porte la foi de l'Église, mais par le fait de la réalité objective elle-même ; car une fois la nature ou substance du pain et du vin changée en corps et sang du Christ, il ne subsiste du pain et du vin rien que les seules espèces, sous lesquelles le Christ tout entier est présent en sa réalité physique, et même corporelle, bien que selon un mode de présence différent de celui selon lequel les corps occupent tel ou tel endroit.*

Mysterium Fidei : la doctrine et le culte  
de la Sainte Eucharistie, par Paul VI, 1965.

Ce texte est difficile à comprendre, même pour un croyant, puisque ce même saint Père ajoute :

*De ce mystère nous ne pouvons donc nous approcher qu'avec un humble respect, sans nous tenir au raisonnement humain, qui doit se taire, mais en nous attachant fermement à la Révélation divine.*

Ibid.

Avant l'avènement de l'atomisme, ce mystère n'était, si l'on ose dire, pas si irrationnel. Il renvoyait en fait à la philosophie d'Aristote. Celui-ci distinguait dans toute réalité *l'accident*<sup>17</sup> et *la substance*. En simplifiant on dira que l'accident est la façon dont apparaît la substance. Par exemple l'eau peut nous apparaître comme solide (la glace) ou liquide. Un homme peut être bon, roux, chrétien, hérétique. Ce sont des accidents. Les substances sont connues à nos sens par leurs accidents. Inversement des accidents semblables peuvent représenter des substances différentes. On pourrait par exemple penser qu'un œuf dès qu'il est fécondé conserve son apparence, mais change de nature. Ainsi, s'il est vrai que le vin de messe continuera à avoir le goût et la couleur du vin<sup>18</sup>, y compris après sa consécration par le prêtre, il n'en n'aura pas moins changé réellement de substance (Kubbinga, 2002).

Le fait que la matière soit composée d'atomes *indestructibles* abolit la séparation entre accident et substance. Voilà pourquoi, comme nous y invite le pape, face à la *réalité* de la transformation du vin en sang, le « raisonnement humain » est condamné à « se taire ».

Signalons l'hypothèse très originale de Redondi (1985) selon laquelle l'accusation de soutenir le modèle de Copernic aurait servi à *protéger* Galilée.

---

17. L'Église parle ci-dessus d'espèce au sens d'accident, ce qui peut semer un peu de confusion puisque ces deux mots n'ont pas exactement la même signification chez Aristote.

18. Il est généralement blanc parce que moins salissant.

En effet, celui-ci était plus ou moins secrètement partisan de l'atomisme : voir la contribution de Festa dans Salem (1999). Or, selon Redondi, une telle doctrine envoyait au bûcher sans rémission. Cette thèse, qui repose sur beaucoup de suppositions et peu de documents, est largement mise en doute (Festa, 2007, Beretta, 2009).

La conception atomiste n'étant pas explicitement contradictoire avec les Saintes Écritures (Matton, 2002) comme l'était l'héliocentrisme de Copernic<sup>19</sup>, la réaction de l'Église sera moins véhémence. Le procès pour atomisme intenté à Andrea Pissini (Beretta, 2009), puis sa rétractation obligée en 1676 ne constituent qu'une pâle et douce copie du procès de Galilée.

### *Un nouvel étalon de masse ?*

L'exigence actuelle des physiciens en matière de précision des étalons de mesure est impressionnante. Un exemple caricatural illustrera l'implication d'un « mauvais » étalon. Supposons qu'on prenne votre masse comme étalon de 70 kilos. Que constaterons-nous ? Tous les jours après 14 heures, presque toutes les masses mesurées avec cet étalon auront diminué de quelques pour cent. Les physiciens vont alors chercher une loi expliquant ce phénomène périodique et universel, jusqu'au jour où on aura compris qu'après le déjeuner, vous avez « pris du poids » et si, avant midi, 1/70 de cet étalon équilibrait sur une balance 1 litre d'eau, l'étalon étant devenu plus lourd, il faudrait en prendre un peu moins, par exemple 1/71 après repas pour retrouver le même équilibre sur la balance. Changer d'étalon, en prenant par exemple, pour un kilogramme, la masse de platine iridié déposée au pavillon de Breteuil à Sèvres, ferait disparaître cette « loi ». Mais, si à son tour on montrait que cet étalon perdait du poids, il faudrait à nouveau en changer.

À cause de leur variabilité inévitable, presque tous les étalons « naturels » ont disparu, en particulier le mètre étalon et la seconde. Reste le kilogramme

---

#### 19. La Bible est explicite :

10 : 12 Alors Josué parla à l'Éternel, le jour où l'Éternel livra les Amoréens aux enfants d'Israël, et il dit en présence d'Israël :

Soleil, arrête-toi sur Gabaon,

Et toi, lune, sur la vallée d'Ajalon !

10 : 13 Et le soleil s'arrêta, et la lune suspendit sa course,

Jusqu'à ce que la nation eût tiré vengeance de ses ennemis.

Cela n'est-il pas écrit dans le livre du Juste ?

Le soleil s'arrêta au milieu du ciel [...]

Si le Soleil a dû s'arrêter, c'est que c'était lui qui était en mouvement.

en platine iridié. Or, à cause des poussières (malgré les protections) et des nettoyages, on considère qu'il pourrait varier de 50 millièmes de gramme chaque siècle. On ne peut qu'évaluer cette variation en comparant le poids de l'étalon à celui de quelques unes de ses copies dont le poids a également varié. En tout cas, les 50 millièmes de gramme sont apparemment trop : il faut trouver un étalon plus stable.

Maxwell (1870) avait remarquablement anticipé cette nécessité il y a plus d'un siècle et demi :

*Si, alors, nous voulons obtenir des étalons de longueur, de temps et de masse qui doivent rester absolument permanents, on doit les chercher non pas dans les dimensions, ou le mouvement ou la masse de notre planète, mais dans la longueur d'onde, la période de vibration et la masse absolue de ces molécules parfaitement semblables, impérissables et inaltérables.*

Si précise est maintenant la connaissance du nombre d'Avogadro,  $N_A$ , qu'on envisage de remplacer l'étalon de 1 kilogramme en platine iridié, dernier étalon « naturel », par un étalon définissant 12 grammes constitué par la masse de  $6,022\ 140\ 78 \times 10^{23}$  atomes de carbone-12.

Les mesures les plus précises de  $N_A$  sont actuellement déterminées par l'étude des cristaux. Connaissant la masse atomique  $M$  de l'élément chimique (masse des protons + masse des neutrons moins l'énergie de liaison), le nombre d'atomes  $n$  contenus dans une maille de cristal d'arête  $a$  (voir fig. 11) et sa densité  $\rho$ , on en déduit  $N_A$ , nombre d'atomes contenus dans  $M$  grammes. Soit :

$$N_A = \frac{nM}{\rho a^3}.$$

C'est plutôt le silicium qui a aujourd'hui la faveur des expérimentateurs, à cause de la facilité – relative – à fabriquer des cristaux de très grande pureté (Deslattes *et al.* (1976) et réf. citées). Andreas *et al.* (2011) donnent :

$$N_A = (6,022\ 140\ 78 \pm 18 \times 10^{-8}) \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}.$$

Toute la difficulté réside dans l'obtention de cristaux « parfaits », la détermination précise de la masse atomique de l'échantillon, de sa densité et de la maille du réseau.

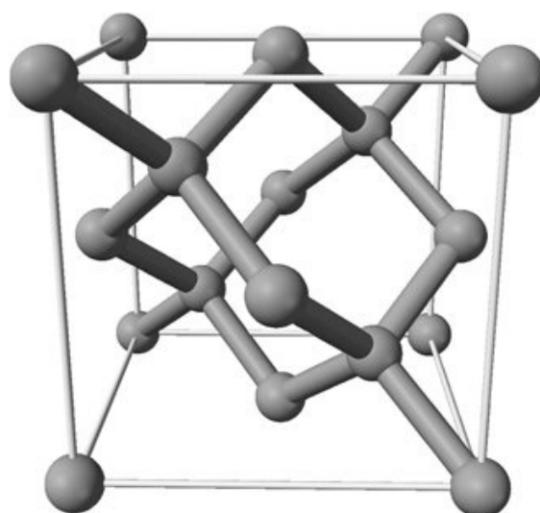


FIGURE 11. *Maille du cristal de silicium.*

En France, on travaille plutôt à définir une nouvelle unité de masse à l'aide de la « balance du Watt » selon un procédé qui relève de l'électromagnétisme. Le lecteur intéressé pourra lire un document très pédagogique sur le sujet (Genevès *et al.*, 2007) et le dernier article de Bettin *et al.* (2013).

### *L'âge de la Terre*

Il existe un autre sous-produit intéressant de la valeur du nombre d'Avogadro : l'évaluation de l'âge de la Terre à 4,55 milliards d'années.

Cette estimation est fondée sur la connaissance précise de la période radioactive de certains éléments à vie longue comme l'uranium-235 ou le rubidium-87. La période radioactive (ou demi-vie) est le temps nécessaire pour que la quantité de noyaux radioactifs soit divisée par deux. C'est aussi bien le temps nécessaire pour qu'un noyau ait une chance sur deux de se désintégrer. Très grossièrement, le principe de datation est le suivant : supposons qu'un élément U ait une période de 5 milliards d'années et se désintègre en un autre élément Pb, stable. Supposons encore qu'à la naissance de la Terre, il n'y avait pas de Pb et que tout le Pb actuel provienne de la désintégration de U. Si on trouve aujourd'hui qu'il y a autant de noyaux de Pb que d'U, on peut dater la Terre à 5 milliards d'années. Le calcul réel est évidemment plus complexe – et plus convaincant – que ce cas d'école (Treiner, 2011).

On peut se demander, dans le cas des périodes longues, si le nombre

de désintégrations par seconde d'un échantillon est suffisant pour être observable. Prenons la période la plus longue, celle du rubidium-87. Elle est de 50 milliards d'années, il faut donc attendre en moyenne 50 milliards d'années, soit  $1,58 \times 10^{18}$  secondes pour qu'un noyau ait une chance sur deux de se désintégrer. Comment peut-on le savoir sans attendre ce temps gigantesque ? C'est que la mesure ne porte pas sur *un* atome, mais sur un échantillon de quelques milligrammes de rubidium qui contient quelques  $10^{21}$  noyaux ; il est alors facile de montrer qu'en moyenne, 1 milligramme de rubidium donne 3 désintégrations par seconde, ce qui est aisément mesurable. En résumé, l'immensité du nombre d'Avogadro contrebalance la très grande rareté de la désintégration radioactive.

### *Vitesse de la lumière et nombre d'Avogadro.*

Il est amusant de comparer l'histoire de la découverte de la vitesse de la lumière avec celle du nombre d'Avogadro. On s'est d'abord demandé si ces deux quantités avaient un sens : la vitesse de la lumière pouvait être infinie et la matière continue. Il s'est agi ensuite d'appréhender une grandeur ou une quantité de magnitude inusuelle, presque impossible à imaginer. Toutes les deux avaient été conjecturées avant d'être évaluées quelque soixante années plus tard. Galilée est un des premiers à postuler une vitesse finie de la lumière, mais l'a trouvée plus grande que ce que ses instruments permettaient de mesurer ; c'est Rømer en 1676 qui la mesura, à 30 pour cent près, pour la première fois. De même, l'existence d'un nombre immense, mais fini, d'atomes dans un volume donné de gaz fut postulée par Avogadro, puis très grossièrement estimée à la suite des travaux de Loschmidt en 1865. Dans les deux cas, les progrès des mesures ont été rapides, à tel point que la vitesse de la lumière, mesurée grâce au laser à  $299\,792\,458 \pm 0,2$  mètres par seconde, va servir d'étalon de longueur : c'est la distance parcourue par la lumière dans le vide en une seconde. On fixe la longueur du mètre comme la distance parcourue par la lumière en  $1/299\,792\,458^e$  de seconde.

En quelque sorte, la loi fixe aujourd'hui la vitesse de la lumière. Demain peut-être, une loi, en changeant la définition du gramme, fixera aussi le nombre d'Avogadro, comme le nombre d'atomes contenus dans 12 grammes de carbone-12.

## Tribulations des modèles atomiques

**Si l'atome existe, à quoi ressemble-t-il ? Ses représentations ont fortement évolué au cours du XX<sup>e</sup> siècle pour des raisons expérimentales et théoriques. Une physique nouvelle, révolutionnaire et très contre-intuitive, la mécanique quantique, devient le cadre indispensable pour comprendre la structure de l'atome.**

Le « premier » atomisme clairement établi est celui de l'électricité. Le fait que le courant électrique soit composé de charges électriques élémentaires a été conjecturé en 1874 par Stoney (1894)<sup>20</sup>. Il avait été frappé par le fait que les quantités d'éléments libérés par l'électrolyse étaient toujours dans des rapports simples. Comme ces quantités étaient proportionnelles à la quantité de courant qui avait circulé, l'idée lui est venue que la charge d'un ion monovalent (en terme moderne) en serait la brique élémentaire. Il proposa le terme d'« électron » et en calcula la charge :  $10^{-20}$  coulomb<sup>21</sup>. En 1897, J.J. Thomson (1856-1940) prouvait expérimentalement leur existence, comme composant les rayons cathodiques.

Au tout début du xx<sup>e</sup> siècle, le modèle atomique dominant est celui de Thomson. Dans ce modèle, les atomes sont formés d'électrons chargés négativement qui oscillent à l'intérieur d'une espèce de soupe chargée positivement<sup>22</sup>. Il y avait là, grâce à la théorie électromagnétique de Maxwell, une première explication de l'émission et de l'absorption de la lumière par la matière. Un des élèves de Thomson, Rutherford, voulant préciser la distribution des charges positives dans l'atome, a eu l'idée de bombarder des feuilles métalliques minces (et l'or, particulièrement malléable, est bien adapté) par la diffusion de particules  $\alpha$ . Comme on l'a expliqué page 21, ces expériences ont établi que la matière est « pleine de vide » et invalidé le modèle de Thomson. En a découlé le modèle planétaire de Rutherford de 1911. Notons l'intuition de Perrin (1901)<sup>23</sup> :

---

20. Le même qui avait déjà évalué le nombre d'Avogadro (voir p. 46).

21. La valeur moderne est  $1,6 \times 10^{-19}$  coulomb.

22. On peut montrer que la force électrique qui s'exerce sur des charges négatives immergées dans une sphère uniformément chargée positivement est analogue à celle d'un ressort, c'est-à-dire une force de rappel proportionnelle à l'élongation.

23. On peut également mentionner Hantaro Nagaoka (1865-1950), physicien japonais, qui en 1904 avait proposé un modèle « saturnien » d'atome : un noyau chargé positivement entouré d'un anneau de charge opposée.

*Chaque atome serait constitué, d'une part, par une ou plusieurs masses très fortement chargées d'électricité positive, sorte de soleils positifs dont la charge serait très supérieure à celle d'un corpuscule, et d'autre part, par une multitude de corpuscules, sorte de petites planètes négatives, l'ensemble de ces masses gravitant sous l'action des forces électriques, et la charge négative totale équivalant exactement à la charge positive totale, en sorte que l'atome soit électriquement neutre.*

Le modèle de Rutherford souffrait cependant d'un défaut rédhibitoire : selon les lois de Maxwell, les électrons chargés négativement doivent, par leur mouvement autour du noyau, perdre de l'énergie cinétique par rayonnement, comme un courant électrique qui rayonne dans une antenne, et donc finir par tomber sur le noyau. Or les atomes sont stables. Que faire, puisqu'il semblait déraisonnable d'abandonner les lois de Maxwell si bien et si universellement vérifiées par ailleurs ? On doit à Niels Bohr (1885-1962) une amorce de solution : seules certaines orbites stables sont autorisées et le rayonnement n'a lieu qu'au cours d'un saut d'orbite.

**Découvertes des limites de la physique classique.** La violation des règles classiques impliquée par la mécanique quantique a une histoire. Le premier coup de canif a donc été celui de la discontinuité de la charge électrique postulée par Stoney. On peut, maintenant, considérer que Boltzmann qui avait dû discrétiser l'espace de phase dans sa mécanique statistique avait fait, comme M. Jourdain, de la mécanique quantique avant la lettre<sup>24</sup>. Pour pouvoir qualitativement rendre compte des données expérimentales, du moins pour l'atome d'hydrogène, Bohr avait en 1913 proposé un modèle enfreignant les règles admises de l'électromagnétisme. De la même façon, treize ans auparavant, Planck (1858-1947) avait empiriquement rendu compte des propriétés de rayonnement d'un corps chauffé en supposant que les échanges entre matière et rayonnement se faisaient non pas continûment, comme le supposait la théorie classique, mais par quantum d'énergie. Cinq ans plus tard, la théorie de l'effet photoélectrique d'Einstein avec le photon, comme quanta de lumière, donna un cadre théorique à la loi de Planck. Avec les travaux ultérieurs – entre autres – des de Broglie (1892-1987), Heisenberg (1901-1976), Schrödinger (1887-1961), Dirac (1902-1984), Pauli (1900-1958), Fermi (1901-1954), se dessine un cadre plus général d'explication, celui de la mécanique quantique.

24. Rappelons qu'il avait découpé l'espace de phase (l'espace impulsion-position des particules), *a priori* continu, en cubes finis.

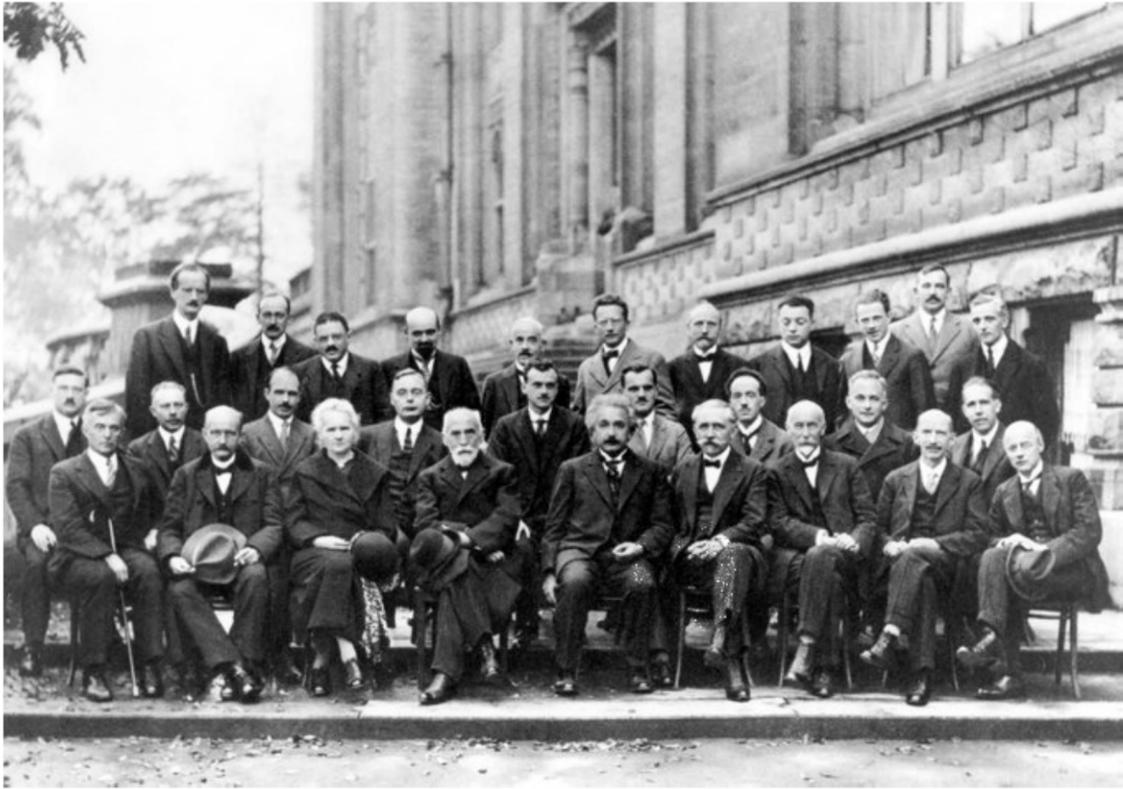


FIGURE 12. *Congrès Solvay de 1927 qui réunit un grand nombre des auteurs de la nouvelle physique. Chercher la femme : on reconnaît Marie Curie (1867-1934) à la droite d'Einstein et de Lorentz .*

Les mesures de Perrin ont clos la « controverse atomiste » ouverte depuis vingt-cinq siècles. En 1908, Ostwald, un des derniers farouches anti-atomistes, déclare :

*Je suis désormais convaincu que nous sommes récemment entrés en possession de preuves expérimentales du caractère discret ou granulaire de la nature, que l'hypothèse atomique avait cherchées en vain depuis des siècles et même des millénaires.*

*Aperçus de chimie générale (1908).*

On peut considérer que ces propos rapportés par Weinberg (1992) terminent la dispute. Seul subsistera jusqu'à sa mort, Duhem, butte-témoin d'une lutte perdue.

## La boîte de Pandore de la structure de la matière

**Les physiciens de la première moitié du XX<sup>e</sup> siècle ont réhabilité les notions d'atome et de vide, mais on va vite découvrir que cet atome et ce vide ne sont pas ce qu'ils prétendaient être.**

**Des atomes sécables.** On sait maintenant qu'on peut couper les atomes (bel oxymore !). Non par la chimie, qui ne met pas suffisamment d'énergie en œuvre, mais par des collisions de noyaux disposant d'énergies plus d'un million de fois supérieures à celles des réactions chimiques. On sait aussi que les constituants du noyau, les nucléons (neutrons et protons), sont eux-mêmes composés de quarks – et rien ne dit qu'on s'en tiendra là (Lincoln, 2013). Pour l'instant seules quelques particules comme les quarks et les leptons (les électrons par exemple) sont considérées comme élémentaires, c'est-à-dire non décomposables. Entre 1950 et 1980, on a mis en évidence des dizaines de particules composées de quarks, appelés hadrons (les protons et les neutrons ou les mésons par exemple sont des hadrons).

Un peu comme la chimie a dû classer la quantité d'éléments apparus à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle dans le tableau de Mendeleïev (Scerri, 2011, Luft, 1997), les physiciens cherchent des lois de conservation (ou des propriétés de symétrie<sup>25</sup>) pour les ordonner.

Mendeleïev a eu l'idée de classer les éléments chimiques par masse atomique croissante (voir table 1), mettant en évidence des propriétés physico-chimiques voisines ou analogues. Au-delà de la description de choses connues, le tableau de Mendeleïev, par ses cases vides, a prévu des éléments inconnus à l'époque et qui seront découverts ensuite comme le gallium ou le germanium. Il faudra attendre la mécanique quantique pour comprendre ce succès : par numéro atomique croissant, les électrons remplissent et saturent les couches successives qui leur sont assignées : deux sur la première, huit sur la seconde, etc. Or les propriétés chimiques dépendent de la dernière couche électronique. Derrière le classement, il y avait donc une théorie sous-jacente ; ce qu'avait bien vu Mendeleïev qui écrivait « Selon toute probabilité la cause [de la loi de périodicité] en réside dans le mécanisme interne des atomes et des molécules » (cité par Luft (1997)).

---

25. L'équivalence entre ces deux notions, propriété fondamentale de la physique moderne, a été établie par la mathématicienne Emmy Noether (1882–1935) (voir à ce propos les développements de Mouchet (2013)).

La physique classique assignait seulement une charge et une masse aux particules ; maintenant il faut considérer d'autres caractéristiques comme le spin, les saveurs (étrangeté, charme, beauté, vérité), la couleur, etc.<sup>26</sup> pour mettre (trouver ?) de l'ordre. Le modèle théorique sous-jacent, le modèle standard de la physique des particules, a connu des vérifications expérimentales spectaculaires. Beaucoup de ces particules ont été prédites avant d'être découvertes. La dernière en date a résisté jusqu'en 2012 : c'est le boson de Higgs trouvé au CERN par les expériences du Grand Collisionneur de Hadron, *Large Hadron Collider* (LHC). Sa découverte donne – entre autres – une clé pour comprendre d'où vient la masse des particules.

Le LHC est probablement le plus gros (et coûteux) instrument de physique jamais construit. C'est un collisionneur de protons placé dans un tunnel de 27 kilomètres de circonférence. Il prétend recréer les conditions régnant  $10^{-12}$  seconde après le Big Bang. Le plus grand de ses quatre détecteurs de particules a une masse de 7000 tonnes, 22 mètres de diamètre et 40 mètres de long ! L'énergie disponible lors de la collision est de 7 Tev ( $1 \text{ Tev} = 10^{12} \text{ eV}$ ) – et sera porté à 14 Tev –, soit un million de fois les 5 Mev de l'énergie des particules  $\alpha$  de Rutherford qui ont permis de découvrir la structure des atomes ! Pour donner une image de la démesure de l'expérience il faut savoir que la production d'un boson de Higgs a lieu en moyenne une fois toutes les 65 milliards de collisions, et que le LHC analyse 20 millions de collisions par seconde (Tarrade, 2012) ! La figure 13 compare les appareillages qui ont permis de « voir » les électrons à celui qui permet de « voir » la structure des nucléons.

Signalons enfin la « théorie des cordes » ou plutôt les théories afférentes. Il s'agit pour l'instant de spéculations mathématiques complexes sans vérification empirique. Un des objectifs de ces développements est de formuler une théorie quantique de la gravitation. La conséquence importante serait de faire apparaître ces cordes comme briques « réellement » élémentaires de la matière<sup>27</sup>.

**Un vide bien rempli.** On a vu des atomes sécables, on va voir un vide qui ne mérite pas mieux son nom. Même en physique classique, le vide défini par l'absence de particules (par exemple un petit volume de l'espace intersidéral) est

---

26. On appréciera l'imagination des physiciens dans le choix du vocabulaire !

27. Ces théories nécessitent – au-delà de l'espace-temps usuel quadri-dimensionnel de la physique – l'introduction de dimensions supplémentaires, non perceptibles à notre échelle.

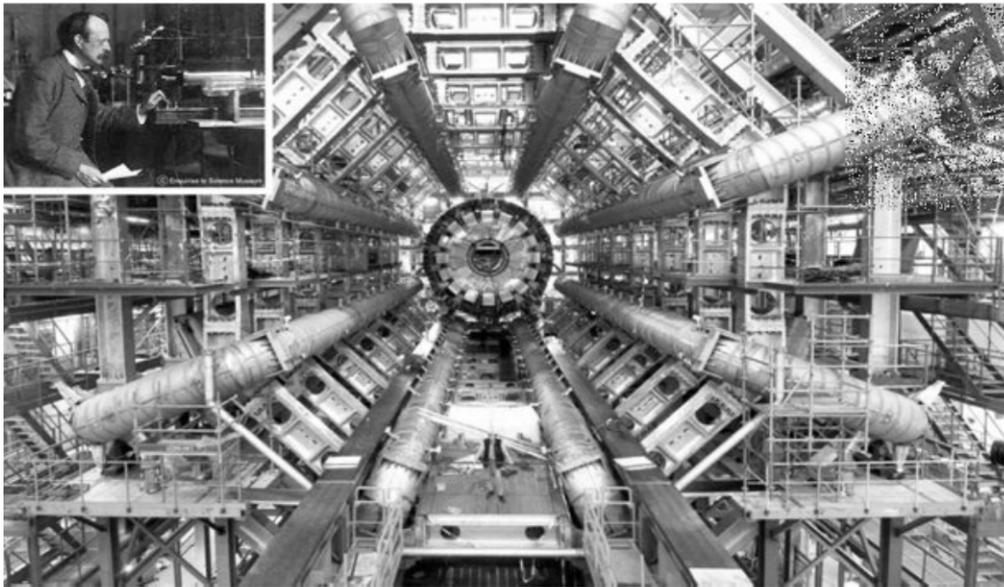


FIGURE 13. *Vue d'Atlas, le plus grand détecteur du LHC, qui recherche le boson de Higgs. En insert, J.J. Thomson et le tube à décharge qui lui a permis de découvrir l'électron (musée du Laboratoire Cavendish). Pour estimer les ordres de grandeur, on devine au centre, le physicien dont on peut supposer qu'il a une taille analogue à celle de J.J. Thomson.*

peuplé d'ondes électromagnétiques<sup>28</sup>. La physique quantique va bouleverser le paysage. Les « particules » sont caractérisées par des fonctions d'onde qui peuvent occuper tout l'espace ; en outre, le vide est plein de particules et d'antiparticules qui se créent et s'annihilent en permanence. Une création *ex nihilo* d'une particule de masse  $m$  requiert, selon la relation bien connue d'Einstein, une énergie  $E = mc^2$ , où  $c$  est la vitesse de la lumière. La physique quantique autorise cette violation de la loi de conservation de l'énergie que suppose une telle création, pourvu que le temps de violation  $\Delta t$  soit suffisamment bref. Plus précisément, il faut que le temps  $\Delta t$ , qui est le temps de vie de cette particule virtuelle, soit suffisamment petit pour que l'énergie nécessaire à sa création,  $E$ , soit supérieure à  $\hbar/\Delta t$  où  $\hbar$  est la constante de Planck normalisée<sup>29</sup>.

Il y a des preuves expérimentales presque directes de ce peuplement du

28. On croyait, de plus, que l'éther, substance hypothétique nécessaire à la propagation de la lumière, remplissait le vide. La théorie de la relativité obligera à renoncer à cette idée.

29. C'est une conséquence des relations d'incertitude de Heisenberg.

vide. L'effet Casimir (1909-2000) en est une manifestation macroscopique : on a pu mesurer que, conformément à la théorie, deux miroirs non chargés, très proches, s'attirent. Cette force provient des fluctuations quantiques de l'énergie du vide que la présence des miroirs perturbe. Voilà pour la complexité quantique du vide.

### *Matière et énergie noires ?*

Impossible de clore cette histoire de nos conceptions sur la matière sans mentionner un « détail » : il est tout à fait possible que tout ce que nous avons raconté ne concerne que 20% de la masse de l'univers, le reste, 80%, nous serait totalement inconnu. D'où vient alors l'hypothèse de cette *matière noire* ? Elle serait nécessaire pour expliquer la masse manquante des galaxies ; manquante, car il faudrait davantage de masse pour rendre compte de leur mouvement ainsi que ceux de leurs étoiles (Blitz, 2011), à partir des lois connues de la gravitation.

Et ce n'est pas tout : l'expansion de l'univers qui a commencé avec le Big Bang s'accélère au lieu de ralentir<sup>30</sup>. Ceci ne serait possible que s'il existait une forme de pression négative créée par une énergie colossale baptisée *énergie sombre* ou *noire*. Cette énergie mystérieuse représenterait plus de 70% de l'énergie totale de l'univers.

Peut-on se passer de l'hypothèse de la matière et de l'énergie noires ? Oui, si on veut en payer le prix : considérer que la théorie de la relativité cesse d'être valable aux échelles cosmologiques. C'est un prix que la majorité des physiciens n'est pas prête aujourd'hui à consentir<sup>31</sup>. Des expériences à Genève au LHC et dans l'espace en traquent actuellement les signaux nécessairement indirects.

Pensons au précédent de Le Verrier (1811-1877) qui, en supposant valide la théorie de Newton, avait prévu l'existence d'une planète inconnue, Neptune, perturbatrice de la trajectoire d'Uranus. Par contre, avec la même supposition, il avait échoué à rendre compte, par une planète inconnue, des

---

30. À cause des lois de la gravitation. Si, par exemple, vous lancez de Terre un objet, il pourra soit s'éloigner indéfiniment si sa vitesse initiale est suffisamment élevée, soit retomber, mais dans aucun cas avoir une vitesse d'éloignement croissante.

31. Signalons, entre autres, la position très minoritaire de Magnan (2011) ; il considère que les données observationnelles ne sont pas encore suffisamment précises et que les modèles théoriques utilisant la relativité générale sont trop grossiers, pour conclure à l'existence de matière ou d'énergie hypothétiques.

anomalies du périhélie de Mercure (position de l'astre quand il est le plus proche du Soleil). Il fallait une théorie plus vaste : la relativité générale.

Une fois encore, l'accroissement gigantesque de nos connaissances induit un accroissement gigantesque de nos ignorances.

## Sources

Le livre de Perrin (1913) est fondamental, mais, en plus des références déjà signalées, nous avons également beaucoup appris des auteurs suivants : Mathieu (1984, 1985), Bensaude-Vincent et Kounelis (1991), Chabas-Buès (1999), Kubbinga (2002), Vidal (1985), Diu (1997), Becker et Gläser (2006), Bouveresse (2006), Barberousse (2007), Minois (1998), Wurtz (1886). Mention particulière doit être faite à la thèse de Hanriot (1880), à l'histoire de la réfutation des paradoxes de Poincaré et Loschmidt par Brush (1986) et Klein (2009) et au travail encyclopédique de Pullman (1995). Enfin, le livre de Radvanyi (2007) contient sur l'histoire de l'atomisme une mine de citations particulièrement bien choisies.

# 5

## Le discours scientifique n'est pas un discours comme les autres

*Les textes scientifiques [...] n'appartiennent pas à un autre monde et ne sont pas écrits par des auteurs différents de ceux qui écrivent les articles de journaux ou les romans.*

Bruno Latour.

**La genèse de la conception atomique illustre deux questions liées entre elles : la science explique-t-elle ou se contente-t-elle de représenter ? Repose-t-elle sur la théorie ou sur l'expérience ? Elle montre aussi comment l'imbrication d'une connaissance avec toutes les autres en constitue un test de validité. Elle illustre enfin la vacuité d'une conception totalement relativiste de la science : ce n'est pas parce que la science serait une « construction sociale » que son évolution s'expliquerait par des rapports de forces entre réseaux d'où serait exclu le rapport à l'expérience.**

Pour éviter de tirer une leçon trop générale de la victoire de l'atomisme, il est utile d'évoquer une autre polémique scientifique majeure surgie au XIX<sup>e</sup> siècle ; elle a porté sur l'âge de la Terre et opposé Charles Darwin (1809-1882) à William Thomson (Lord Kelvin). Le premier ne pouvait accepter les estimations de Kelvin fondées sur l'équation de la chaleur et l'hypothèse d'une Terre rigide et sans source de chaleur (Treiner, 2011, Krivine, 2011). Pour le naturaliste, qui s'était gardé de donner une durée précise, 20 millions d'années était néanmoins bien insuffisant pour être compatible avec sa théorie de l'évolution. La découverte de la radioactivité a tranché : l'âge de la Terre est de 4,55 milliards d'années. C'est Darwin qui avait raison contre l'illustre physicien.

L'« hypothèse atomique » n'a pas triomphé de la même façon ; en effet, elle n'a pas disqualifié ses concurrentes, elle les a absorbées, grâce à la mécanique statistique développée par Boltzmann. Quels que soient les

mérites de Kuhn (1922-1996) comme historien des sciences, sa théorie du « changement de paradigme » ne nous semble pas éclairante dans le cas de l'atomisme<sup>1</sup>. Pour Kuhn, une science « normale » se développe tranquillement à l'intérieur d'un paradigme (ensemble des connaissances et croyances de l'époque), puis de temps en temps éclatent des révolutions par lesquelles un paradigme chasse l'autre. L'exemple emblématique serait le passage du géocentrisme de Ptolémée à l'héliocentrisme de Copernic. Dans cette optique, concernant la structure de la matière, on constate bien la coexistence de deux paradigmes, énergétiste contre atomiste, puis la victoire du second. Mais cette victoire assure finalement une base théorique au premier : les « incohérences » de la conception atomique relevées par Poincaré et Loschmidt ont été parfaitement expliquées et intégrées dans la nouvelle théorie. Comme souvent dans l'histoire de la physique, le progrès scientifique a consisté à *borner* le domaine d'application d'une théorie (la théorie classique) pour la faire apparaître comme un cas limite d'une théorie plus vaste. En tout cas, la thèse de l'« incommensurabilité des paradigmes », c'est-à-dire l'impossibilité d'en juger un à la lumière de l'autre, quelquefois invoquée est clairement démentie.

Pour Feynman, la reconnaissance du « fait atomique » est le plus important acquis scientifique de l'humanité. Ses implications pratiques, innombrables, ont façonné le monde moderne. Mais il y a plus : il a rendu nécessaire le développement d'une théorie nouvelle, la mécanique quantique dont la redoutable efficacité contraste avec l'étrangeté de ses présupposés. Ce n'était pas seulement pour rire que Feynman (1990), un des ses principaux théoriciens, écrivait :

*Il est de mon devoir de vous convaincre de ne pas vous en détourner parce que vous ne comprenez pas. Voyez-vous, mes étudiants en physique non plus... C'est parce que je ne comprends pas davantage. Personne n'y arrive.*

À part quelques spécialistes dont le métier a pu – difficilement – rééduquer l'intuition, les propositions de la mécanique quantique choquent infiniment le sens commun façonné par l'expérience quotidienne, qui n'est pas celle des laboratoires de physique quantique (Mouchet, 2010) : qui comprend vraiment que ce fameux chat de Schrödinger soit mort et vivant simultanément,

---

1. Une opinion voisine est exprimée par Scerri (2011) dans son travail sur l'histoire du tableau de Mendeleïev.

que la trajectoire d'un électron n'ait aucun sens, que les particules soient aussi des ondes, etc. ?

Les questions portant sur la nature du temps, de l'espace, du vide ou de la matière ont longtemps fait partie de la métaphysique. Ainsi des penseurs du XIX<sup>e</sup> siècle comme Kant (1724-1804) ou Hegel (1770-1821) pouvaient « philosophiquement » se montrer anti-atomistes. De même que la théorie de la relativité a rendu en quelque sorte expérimentales des propriétés du temps et de l'espace, la théorie atomique moderne permet d'apporter sur le vide et la matière des réponses là où la seule réflexion philosophique ne pouvait conclure. Ce n'est pas la mort de la philosophie ; la mécanique quantique va aussi obliger des physiciens tels Bohr, Einstein, Heisenberg ou Weinberg et bien d'autres à (re)penser la causalité ou le déterminisme. Bien que de portée beaucoup moins vaste, la théorie du chaos déterministe<sup>2</sup> – en séparant le déterminisme de la prédictibilité en pratique – a joué un rôle analogue. En perdant de la hauteur (philosophique), comme souvent, on gagne en profondeur<sup>3</sup>. C'est ainsi que François Jacob (1981) observe :

*À première vue la science paraît moins ambitieuse que le mythe par les questions qu'elle pose et les réponses qu'elle cherche. De fait, le début de la science moderne date du moment où, aux questions générales se sont substituées des questions limitées [...] Ce changement a eu un résultat surprenant. Alors que les questions générales ne recevaient que des réponses limitées, les questions limitées se trouvèrent conduire à des réponses de plus en plus générales.*

Inventés d'abord par les atomistes grecs sur des bases philosophiques, puis admis pour des besoins de cohérence théorique, découverts enfin, les atomes ont connu une histoire qui est un peu celle des gènes en biologie : après avoir été prévue, la chose découverte révèle une complexité

---

2. Un système est chaotique si une modification infime de son état initial ou de son environnement change dramatiquement son évolution. Comme on ne peut jamais connaître conditions initiales et environnement avec une précision infinie, ces systèmes, bien qu'obéissant à une loi connue, sont imprédictibles au-delà d'un certain temps. Ce temps peut varier de quelques jours pour la météorologie à des centaines de millions d'années pour le mouvement des planètes.

3. Piaget (1965) (1896-1980) dénonçait « le faux idéal d'une connaissance supra-scientifique » en parlant de sa « déconversion » d'une philosophie qui jugerait en dernière instance de la valeur de travaux scientifiques sur la base d'une « sagesse » qui lui serait propre.

insoupçonnée. Les réponses posent des questions, formant la spirale infinie de la recherche scientifique. Le « fait atomique » n'explique peut-être pas *en dernière instance*, mais permet de comprendre mieux – au sens étymologique de ce verbe.

## La science explique-t-elle ?

On rencontre souvent l'idée que la science n'explique pas, elle serait juste capable de répondre à la question du « comment ? » : seule la philosophie – voire la religion – saurait répondre à la question du « pourquoi ? ». C'est un peu la thèse du NOMA<sup>4</sup> de Gould (1999), par ailleurs non croyant, qui écrit :

*[...] la science couvre le domaine de l'expérience : en quoi l'univers est constitué (le fait) et pourquoi il marche ainsi (la théorie). Le magistère de la religion s'étend aux questions de la signification ultime [souligné par nous N. d. A.] et à la valeur morale.*

Pourquoi les corps tombent-ils ? À cause de la loi de la chute des corps. Pourquoi cette loi ? À cause de la loi universelle de gravitation de Newton. Qu'est-ce qui explique cette loi ? C'est un cas particulier des équations d'Einstein... On voit là une chaîne sans fin où les réponses aux pourquoi successifs se situeraient dans des emboîtages de théories de plus en plus générales (Weinberg, 1992)<sup>5</sup>. Comme la réponse au « pourquoi » d'une théorie se trouve dans la suivante, la physique serait muette sur tout pourquoi ultime. Le croyant peut toujours mettre fin à cette chaîne en interposant Dieu. Notons que cette place est mobile : elle recule en fonction des avancées de la science.

Il faut signaler que, si on considère que la science décrit sans expliquer, elle le fait quelquefois avec une précision diabolique. Prenons un exemple : l'évaluation de  $g$ , ici le facteur de Landé de l'électron<sup>6</sup>. La théorie initiale

---

4. Ce sont les *Non-Overlapping Magisteria*, magistères ne se recoupant pas.

5. En termes savants, c'est le problème dit de « la régression épistémologique ». Pour un bon résumé, voir Mouchet (2013), p. 189.

6. Il importe peu ici de savoir ce que c'est. Disons seulement que ce facteur permet d'obtenir les propriétés magnétiques de l'électron.

de Dirac donnait  $g_{\text{th}} = 2$ . Mais en 2008, on trouvait *expérimentalement*<sup>7</sup> :

$$g_{\text{exp}} = 2,002\ 319\ 304\ 361\ 46 \pm 0,000\ 000\ 000\ 000\ 56.$$

Les raffinements *théoriques* actuels<sup>8</sup> prévoient :

$$g_{\text{th}} = 2,002\ 319\ 304\ 363\ 56 \pm 0,000\ 000\ 000\ 001\ 54.$$

Soit 12 chiffres significatifs c'est-à-dire une incertitude relative comparable à celle de l'épaisseur d'un cheveu sur la distance Paris-New York !

Même si « prédire, ce n'est pas expliquer » (Thom, 2009), se limiter à qualifier cette physique de simple « description » de la nature est un peu court. Les équations de Maxwell *prévoient* les ondes électromagnétiques (c'est-à-dire la radio, la télévision, les fours à micro-ondes, les téléphones portables, le GPS, bref ce qui est convenu d'appeler la « civilisation »). L'équation de Dirac *prévoyait* l'électron positif découvert quatre ans plus tard ; les équations d'Einstein *prévoient* la courbure des rayons lumineux, etc. La liste serait longue. Cette potentialité extraordinaire de la théorie renvoie à *la déraisonnable efficacité des mathématiques*, pour reprendre ce titre de Wigner (1960), problème que nous n'aborderons pas<sup>9</sup>.

Mais en admettant un instant ce modeste rôle de la science, on essaiera, par un exemple fantaisiste, de cerner ce que pourrait être un véritable « pourquoi ». Considérons une loi empiriquement bien établie qui stipulerait « tous les bouchers pèsent le papier qui enveloppe la viande et la viande en même temps ». Cette loi décrit ; elle ne répond pas à la question du « pourquoi ». Une réponse possible, hors l'hygiène, serait : ils font ainsi payer en moyenne 20 euros le kilo un papier qu'ils ont acheté seulement 1 euro. S'il y a là une explication du « pourquoi », c'est qu'il y a une *intention* chez les bouchers : celle d'un gain facile.

Peut-on généraliser ? Sauf intervention divine, on ne voit pas quelles seraient les intentions de la Nature. Par exemple, nous, êtres humains, existons comme résultat d'un processus de sélection darwinien, pas d'un

---

7. *In Phys. Rev. Lett.* 100, 120801 (2008).

8. *In Phys. Rev. Lett.* 109, 111807 (2012). L'incertitude théorique a plusieurs sources. Entre autres, la troncature d'une série et l'utilisation d'une constante, la constante de structure fine, connue expérimentalement, donc avec une précision limitée.

9. Pour des articles récents de discussion voir (Hamming, 1980, Krivine, 2004, Raskin, 2007).

« dessein intelligent ». Ceux qui pensent qu'il faut laisser à la religion le monopole du « pourquoi ultime » ont peut-être raison, mais au prix d'un anthropomorphisme naïf (aujourd'hui) comme celui qui stipulait jadis que la Nature a horreur du vide. Aristote et même Kepler (1571-1630) savaient répondre au « pourquoi » du mouvement des planètes : c'est qu'elles ont une âme...

Le « pourquoi » n'aurait-il de sens que dans le cadre des activités humaines – voire animales – parce qu'elles impliquent une intention ? Reprenons l'exemple du boucher. L'appât du gain est-il une explication finale valable ? Mais, à son tour, d'où vient cet appât du gain ? N'est-ce pas seulement une « explication effective » – c'est-à-dire résumant une masse d'autres explications plus élémentaires que nous ignorons ? On pourrait considérer que, sur toutes sortes de bouchers plus ou moins intéressés, seuls ont survécu ceux qui faisaient le plus de profit, les autres ayant disparu par l'effet d'une compétition de type darwinien. Dès lors, plus besoin d'invoquer l'intention.

Alors, pas plus dans les activités humaines en général que dans les activités scientifiques, la question du « pourquoi ultime » n'a-t-elle de sens. Les hommes peuvent avoir des plans et des intentions, la Nature, jamais<sup>10</sup>. Ainsi l'expression « lois de la physique » nous paraît plus adaptée que « lois de la nature », qui risque de renvoyer à un démiurge qui, comme les humains, fabriquerait des lois *devant* être respectées.

De même que les vérités – quand elle sont scientifiques – disposent toujours d'un domaine d'application (que le progrès accroît ou restreint), la science, modestement, sait répondre à des « pourquoi locaux ». En ce sens, nous rejoignons volontiers l'opinion commune qui veut que la théorie atomique *explique* les propriétés de la matière que nous connaissons<sup>11</sup>.

## Quel point de départ d'une découverte ?

La distinction entre source théorique ou expérimentale d'une découverte est passablement artificielle. Par définition, on ne cherche que ce qu'on n'a pas trouvé, mais :

- on peut trouver ce qu'on ne cherche pas ;
- on peut trouver ce qu'on cherche ;

---

10. Dawkins (2009) en offre une magnifique démonstration.

11. Voir par exemple l'insistance de Deutsch (1997) sur ce point.

- on peut aussi ne pas le trouver ;
- on peut enfin – rarement dans les disciplines scientifiques – prétendre ne rien chercher du tout <sup>12</sup>.

Le premier mécanisme, qui suppose le primat de l'expérience dans la découverte, serait emblématiquement illustré par quelques-unes des plus grandes découvertes scientifiques. Pour n'en citer qu'un échantillon :

- Galilée découvrit l'isochronisme <sup>13</sup> approximatif des oscillations du pendule en observant le mouvement d'un chandelier du *Duomo* de Pise ;
- Hooke (1635-1703) découvrit la cellule sous son microscope ;
- Ørsted (1777-1851) découvrit en 1820 un lien entre magnétisme et électricité, base du développement ultérieur de la théorie électromagnétique de Maxwell et de toute la technologie électrique. En voulant illustrer l'effet Joule, ou comment le courant électrique d'une pile Volta chauffe un fil, Ørsted (ou du moins un de ses étudiants) constata que l'aiguille d'une boussole utilisée au cours précédent bougeait à chaque passage du courant ;
- Fleming (1881-1955) découvrit la pénicilline comme champignon perturbant malencontreusement ses cultures ;
- Becquerel (1852-1908) découvrit la radioactivité en observant un noircissement non prévu de plaques photo sur lesquelles avaient été déposés des sels d'uranium pourtant non exposés au soleil ;
- Claude Bernard (1813-1878) découvrit la fonction glycogénique du foie grâce à l'urine acide de lapins attaquant la table, par chance en marbre.

Peut-on dire que ces savants ont trouvé par hasard, grâce à une observation originale et intelligente, ce qu'ils ne cherchaient pas <sup>14</sup> ? Voire ! Christophe Colomb a-t-il découvert l'Amérique par hasard ? Non, car il disposait d'une théorie très forte : la Terre étant sphérique, on devait nécessairement rencontrer un continent en piquant droit vers l'ouest <sup>15</sup>.

L'exemple de Claude Bernard ou de Galilée (pour ne pas parler de la pomme de Newton !) montre que le « hasard » ne fait bien les choses

---

12. Ce qui n'interdit pas de trouver, éventuellement !

13. C'est-à-dire le fait que sa période ne dépend pas de son amplitude tant qu'elle reste faible.

14. Il y a un mot savant pour exprimer cela : la sérendipité.

15. Il aurait minimisé la valeur de son rayon pour raccourcir le temps estimé de voyage et obtenir ainsi des crédits. On n'a de ce point de vue rien inventé !

que s'il intervient sur un terrain bien préparé. Ørsted avait déjà publié des *Recherches sur l'identité des forces électriques et chimiques*<sup>16</sup>, Fleming disposait d'une solide expérience et notoriété sur les maladies infectieuses.

La découverte « par hasard » n'est pas séparée par une muraille de Chine du second mécanisme : la découverte par la théorie. Ainsi :

- Le Verrier (1811-1877) et la découverte de Neptune par Galle (1812-1910).  
Cette découverte est emblématique du triomphe de la mécanique céleste : observant que la trajectoire d'Uranus violait – légèrement – les lois de Newton, Le Verrier, convaincu de leur exactitude, postula l'existence d'une planète inconnue perturbatrice. À la suite d'un long calcul, il envoya les coordonnées de cet astre supposé à son collègue suisse qui confirma. Notons une ombre à ce si beau tableau : Le Verrier a dû utiliser une formule purement empirique : la loi de Bode (1747-1826) qui « prévoit » une quantification des distances des planète au Soleil. Le Verrier, enhardi par son succès, a recherché une autre planète inconnue pour expliquer les anomalies du périhélie (point de l'orbite le plus proche du Soleil) de Mercure. Las ! c'est la théorie de Newton qui était en défaut. On avait besoin de la théorie de la relativité générale.
- Les équations de Maxwell (1831-1879) prévoient les ondes radio mises en évidence vingt ans plus tard par Hertz (1857-1894).
- Pauli prévoit en 1930 l'existence du neutrino comme nécessaire à la conservation de l'énergie dans la désintégration  $\beta$ , neutrino mis en évidence en 1956.
- L'équation de Dirac (1902-1984) admet comme solution un électron de charge positive, découvert ensuite par Anderson.
- Copernic n'a pas développé son modèle pour répondre aux imprécisions observationnelles de celui de Ptolémée – il n'est de ce point de vue pas meilleur, compte tenu des données de l'époque –, mais pour des raisons théoriques : le modèle de Ptolémée était inconsistant avec l'impératif du mouvement circulaire uniforme régissant le monde supra-lunaire selon Aristote.
- Les théories de la relativité restreinte et de la relativité générale

---

16. L'idée était dans l'air : dix-huit ans auparavant, Gian Domenico Romagnosi avait déjà fait cette découverte du lien entre électricité et magnétisme, mais l'avait publiée dans le très peu connu *Journal de Trente et Rovereto*.

n'ont pas été formulées pour résoudre des puzzles expérimentaux. Ce n'est qu'ensuite, à la lumière de ces théories, qu'on a compris les expériences de Michelson-Morley montrant l'invariance de la vitesse de la lumière ou l'anomalie de la trajectoire de Mercure.

- Aujourd'hui, le boson de Higgs, prévu par la théorie, activement recherché, a maintenant été trouvé par le CERN.

La genèse de la découverte de l'atome illustre bien celle des découvertes de la physique moderne : l'aboutissement d'une longue quête mêlant intimement théories et expériences. D'abord prédit, ce n'est que récemment que l'atome est devenu presque aussi visible que la cellule. Il a été découvert – « vu » si l'on ose dire (voir fig. 14), comme Perrin l'avait prophétiquement annoncé – bien après qu'on eût été convaincu de son existence. Le parallèle

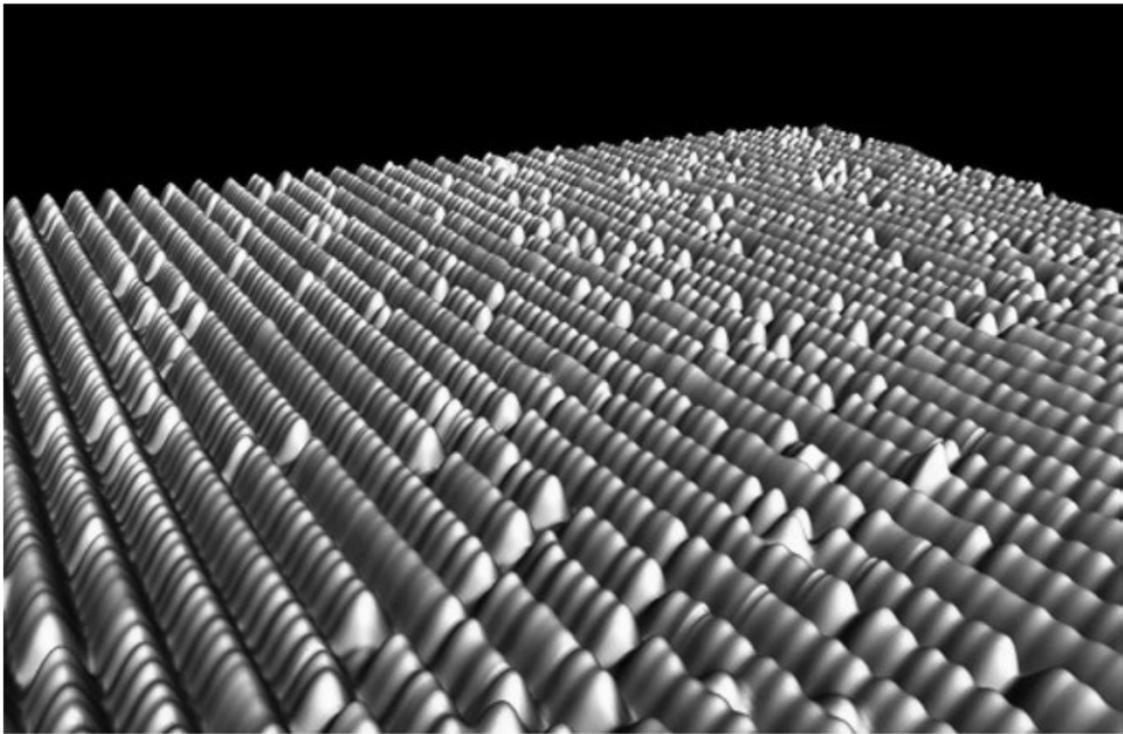


FIGURE 14. *Chaînes d'atomes d'or sur une surface de silicium, « vues » au microscope à effet tunnel.*  
*Photo Corsin Battaglia (FNS).*

avec le matériel génétique, des gemmules (de Darwin) aux gènes actuels – souvent d'ailleurs appelés « atomes de l'hérédité » – est frappant. Depuis les travaux de Darwin et de Mendel (1822-1884), il fallait bien trouver un

support matériel à l'hérédité. La certitude qu'il en existait un poussera à sa découverte <sup>17</sup>.

« Il fallait bien qu'il existe » : certes, mais la prudence s'impose. Cette « nécessité » n'économise jamais la démonstration empirique de l'existence. On pensait jadis qu'« il fallait bien » que l'éther existe pour transmettre les ondes électromagnétiques. Il n'a jamais été mis en évidence ; la théorie de la relativité a prouvé qu'on en n'avait pas besoin. De même, la majorité des physiciens avait pensé qu'« il fallait bien » que le boson de Higgs (comme l'atome) existe. Il est maintenant très certainement au rendez-vous <sup>18</sup>. Heureusement, car son absence avérée mettrait en question la validité du « Modèle Standard » <sup>19</sup>.

## L'imbrication des connaissances

**Pour juger de la validité d'une théorie, l'expérience, sa cohérence et son intrication avec le reste des connaissances acquises restent l'arbitre décisif. Cette opinion, banalement partagée par la grande majorité des scientifiques, est loin de faire l'unanimité dans le monde intellectuel en général. Les extraits suivants plaident pour la rupture avec une forme de sociologie des sciences « vétérinaire » que nous dénonçons en introduction, celle qui se refuse même à considérer ce que disent les scientifiques de leur travail <sup>20</sup>.**

Cette façon d'étayer une connaissance scientifique en l'appuyant sur

---

17. Notons que l'idée de l'existence des gènes – longtemps définis de façon opératoire – était bien plus abstraite que celle des atomes.

18. *Phys. Lett.* B716, 2012. Plus de 2800 chercheurs ont signé cette publication, nouvelle image du gigantisme d'une telle recherche !

19. On appelle ainsi le modèle couramment admis en physique des particules. Ses prédictions ont toutes été couronnées de succès remarquables, comme le calcul du facteur de Landé (voir *supra*). Le problème majeur est qu'on ne sait pas y introduire la gravitation.

20. On appréciera cette jolie citation de Bruno Latour tirée de *The Sciences*, 1995, p. 6-7 et citée par Moatti (2006) :

*Pour commencer, les opinions des scientifiques sur les sciences studies n'ont pas beaucoup d'importance. Les scientifiques sont les informateurs dans nos investigations sur la science, et pas nos juges. La vision que nous développons de la science ne doit pas ressembler à ce que les scientifiques pensent de la science.*

Entre la naïveté de prendre pour argent comptant la vision des scientifiques et ne pas même l'envisager il y a quand même un saut !

l'expérience et l'observation, *ainsi que ses relations avec les autres connaissances*, Perrin l'a explicitée à propos de l'atomisme, mais elle est clairement généralisable.

*On est saisi d'admiration devant le miracle de concordances aussi précises à partir de phénomènes si différents. D'abord qu'on retrouve la même grandeur [le nombre d'Avogadro, N. d. A.], pour chacune des méthodes, en variant autant que possible les conditions de son application, puisque les nombres ainsi définis sans ambiguïté par tant de méthodes coïncident, cela donne à la réalité moléculaire une vraisemblance bien voisine de la certitude. Pourtant, et si fortement que s'impose l'existence des molécules ou des atomes, nous devons toujours être en état d'exprimer la réalité visible sans faire appel à des éléments encore invisibles. Et cela est en effet très facile. Il nous suffirait d'éliminer l'invariant N entre les 13 équations qui ont servi à le déterminer pour obtenir 12 équations où ne figurent plus que des réalités sensibles, qui expriment des connexions profondes entre des phénomènes de prime abord aussi complètement indépendants que la viscosité des gaz, le mouvement brownien, le bleu du ciel, le spectre du corps noir ou la radioactivité. Par exemple, en éliminant les éléments moléculaires entre l'équation du rayonnement noir et l'équation de la diffusion par mouvement brownien, on trouvera tout de suite une relation qui permet de prévoir la vitesse de diffusion de sphérules de 1 micron dans de l'eau à la température ordinaire, si l'on a mesuré l'intensité de la lumière jaune dans le rayonnement issu de la bouche d'un four où se trouve du fer en fusion. En sorte que le physicien qui observe le four sera par là en état de relever une erreur dans les pointés microscopiques de celui qui observe l'émulsion ! Et cela sans qu'il soit besoin de parler de molécules. Mais, sous prétexte de rigueur, nous n'aurons pas la maladresse d'éviter l'intervention des éléments moléculaires dans l'énoncé des lois que nous n'aurions pas obtenues sans leur aide. Ce ne serait pas arracher un tuteur devenu inutile à une plante vivace, ce serait couper les racines qui la nourrissent et la font croître.*

Jean Perrin, Les Atomes.

Comment ne pas croire à l'existence des atomes quand 12 (douze !) méthodes indépendantes permettent de les compter et fournissent – aux incertitudes expérimentales près – le même nombre ?

Poincaré (1918) ne dit rien d'autre quand il écrit à propos des conceptions de Copernic (héliocentrisme) et de Ptolémée (géocentrisme) :

*Mais si l'une nous révèle des rapports vrais que l'autre nous dissimule, on pourra néanmoins la regarder comme physiquement plus vraie que l'autre, puisqu'elle a un contenu plus riche. Or à cet égard aucun doute n'est possible. Voilà le mouvement diurne apparent des étoiles, et le mouvement diurne des autres corps célestes, et d'autre part l'aplatissement de la Terre, la rotation du pendule de Foucault, la giration des cyclones, les vents alizés, que sais-je encore ? Pour le Ptoléméen, tous ces phénomènes n'ont entre eux aucun lien ; pour le Copernicien, ils sont engendrés par une même cause. En disant, la Terre tourne, j'affirme que tous ces phénomènes ont un rapport intime, et cela est vrai, et cela reste vrai bien qu'il n'y ait pas et qu'il ne puisse y avoir d'espace absolu.*

*Voilà pour la rotation de la Terre sur elle-même ; que dire de sa révolution autour du Soleil. Ici encore, nous avons trois phénomènes qui pour le Ptoléméen sont absolument indépendants et qui pour le Copernicien sont rapportés à la même origine ; ce sont les déplacements apparents des planètes sur la sphère céleste, l'aberration des étoiles fixes, la parallaxe de ces mêmes étoiles.[...] Adopter le système de Ptolémée, c'est répondre oui ; adopter celui de Copernic, c'est répondre non ; c'est affirmer qu'il y a un lien entre les trois phénomènes et cela encore est vrai bien qu'il n'y ait pas d'espace absolu.*

*Dans le système de Ptolémée, les mouvements des corps célestes ne peuvent s'expliquer par l'action de forces centrales, la mécanique céleste est impossible. Les rapports intimes que la mécanique céleste nous révèle entre tous les phénomènes célestes sont des rapports vrais ; affirmer l'immobilité de la Terre, ce serait nier ces rapports, ce serait donc se tromper.*

Comme Perrin, Poincaré montre que la Nature est sommée de répondre à une série de questions *entrelacées*, et pas seulement par oui ou non à *une* expérience baptisée « cruciale » pour la circonstance.

On trouve enfin sous la plume d'Alfred Wegener (1915), inventeur de la tectonique des plaques (dérive des continents), la même idée :

*Pour dévoiler les états antérieurs du globe, toutes les sciences*

*s'occupant des problèmes de la terre doivent être mises à contribution et ce n'est que par la réunion de tous les indices fournis par elles que l'on peut obtenir la vérité ; mais cette idée ne paraît toujours pas être suffisamment répandue parmi les chercheurs. [...] Ce qui est certain, c'est qu'à une époque donnée la Terre ne peut avoir eu qu'une seule face sur laquelle elle ne nous fournit pas de renseignements directs. Nous sommes devant la Terre comme un juge devant un accusé refusant toute réponse, et nous avons la tâche de découvrir la vérité à l'aide de présomptions. Toutes les preuves que nous pouvons fournir présentent le caractère trompeur des présomptions. Quel accueil réserverions-nous au juge qui arriverait à sa conclusion en utilisant seulement une partie des indices à sa disposition ? Ce n'est qu'en réunissant les données de toutes les sciences qui se rapportent à l'étude du globe que nous pourrions espérer obtenir la « vérité », c'est-à-dire l'image qui systématise de la meilleure façon la totalité des faits connus et qui peut, par conséquent, prétendre être la plus probable. Et, même dans ce cas, nous devons nous attendre à ce qu'elle soit modifiée, à tout moment, par toute nouvelle découverte, quelle que soit la science qui l'ait permise.*

Le juge est donc ainsi ce « travailleur de la preuve » que Bachelard voyait dans le scientifique. Et pourquoi pas également le médecin qui cherche à établir un diagnostic en croisant les symptômes ?

Typiques furent les différentes réactions du monde savant à deux annonces majeures faites en 2012 : une vitesse des neutrinos peut-être plus rapide que celle de la lumière <sup>21</sup> ; une mise en évidence du boson de Higgs. La seconde confirmait une théorie ayant déjà fait ses preuves. La première, en violant la théorie de la relativité si bien établie par ailleurs, cassait passablement le puzzle bien enchâssé de nos connaissances. Malgré le conservatisme tant de fois dénoncé de la science dite « officielle », cette hypothèse iconoclaste a été prise en considération <sup>22</sup>, mais avec la plus grande méfiance. À juste titre peut-on dire maintenant : malgré des vérifications

---

21. À cette occasion, bien des journalistes ont donné l'impression que, pour eux, la théorie de la relativité était une « opinion », celle de Monsieur Einstein, et comme toute opinion, sujette à caution. L'anecdote racontée par Étienne Klein dans sa préface renvoie peu ou prou à cette philosophie.

22. arXiv:1109.4897v1.

soignées, l'erreur avait été créée par la mauvaise connexion d'une fibre optique.

Un très bel exemple moderne d'imbrication des connaissances – et des doutes – relie l'infiniment grand à l'infiniment petit ; c'est la recherche de la matière noire. Son existence éventuelle repose, comme nous l'avons vu, sur des considérations cosmologiques, mais sa détection reposera sur des expériences très délicates de physique de particules à très haute énergie, comme celles du CERN.

La philosophe anglaise Susan Haack (Sokal, 2013) donne une image très parlante de cet enchevêtrement des connaissances : une grille de mots croisés. On peut dans certains cas y changer un mot fautif au prix de petites modifications locales, mais hélas ! généralement on doit en bouleverser des pans entiers. En d'autres termes, le poids d'une connaissance intégrée s'alourdit du poids des autres.

## La science, une « construction sociale » ?

Cette version de la validité des connaissances scientifiques est radicalement mise en question par les héritiers du « programme fort »<sup>23</sup>, résumé par Latour (1988),

*[...] la revendication téméraire du programme fort – i.e. que le contenu de n'importe quelle science est social de part en part – reste un programme pour les études de terrain à venir*<sup>24</sup>.

Nous allons développer la critique de ce type de conceptions minutieusement exprimées par Latour (1987) dans son livre *La science en action*. Nous le faisons parce que, outre le retentissement international qu'a connu cet ouvrage, il nous paraît emblématique de tout un courant de pensée qui a irrigué bien au-delà du domaine de la sociologie des sciences et qui reste actuel. Même s'il affirme (Latour, 2001), contre toute évidence à notre avis, que sa philosophie des sciences n'est pas relativiste, elle l'est dans ce livre. Aussi allons-nous nous limiter essentiellement à son contenu. Nous ne

23. Attaché aux noms de David Bloor et Barry Barnes dans les années 1970.

24. Il est amusant de constater que les divers tenants de cette philosophie, qui sont certainement à mille lieues de l'opposition science bourgeoise-science prolétarienne, en partagent les prémisses. On se souvient que cette théorie, en vogue dans l'URSS stalinienne, opposait la vérité de la science soviétique supposée d'origine prolétarienne à la fausseté de la science bourgeoise.

sommes pas certains que Bruno Latour maintienne aujourd'hui l'intégralité de ce qu'il écrivait. Nous ne prétendons certainement pas juger l'ensemble de l'œuvre de cet écrivain par ailleurs extrêmement prolifique.

Pour éviter tout malentendu sur le relativisme que nous attaquons, il nous faut peut-être préciser ce qui suit.

Les connaissances scientifiques sont réfutables. C'est cette « faiblesse » qui leur permet de progresser et fait leur force par rapport aux vérités révélées. Ses fragilités sont bien sûr inégales comme on l'a vu en étudiant le passage de l'hypothèse atomique d'Avogadro à la théorie atomique actuelle. Ce qu'on peut modestement appeler vérités scientifiques sont les connaissances les plus robustes, celles qui ont résisté aux tests expérimentaux (et aux critères de cohérence interne) les plus sévères. Les conditions de production des théories scientifiques sont évidemment sociales et tributaires de la culture d'une époque et des savants concernés. Par exemple, l'atmosphère générale de la Renaissance et la conviction qu'avait Kepler de l'existence de symétries divines a joué un rôle déterminant dans son travail. Mais quand on étudie les lois de Kepler <sup>25</sup>, on le fait indépendamment de cet environnement socio-culturel. En d'autres termes, les critères de validité d'une théorie scientifique ne sont pas identifiables à ses conditions de production. Venons-en au livre. Le point de départ, comme très souvent chez cet auteur, est délibérément paradoxal. La science est découpée en deux.

Il y a la science déjà faite qui est « rébarbative et fermée » pour le profane <sup>26</sup>. Ainsi remarque-t-il de façon apparemment ingénue « peu de gens lisent les articles scientifiques », ou « les textes scientifiques ont l'air ennuyeux et ternes si on les regarde d'un point de vue superficiel ». Ce qui n'est pas trop étonnant puisque, pour lui, « la science est d'abord conçue (*sic* !) pour exclure de force la plupart des gens » (p. 129) <sup>27</sup> et par ailleurs « Les textes scientifiques [...] ne sont pas écrits par des auteurs différents de ceux qui écrivent les articles de journaux ou les romans <sup>28</sup> » (p. 82).

---

25. Pas plus qu'on se souvient du système compliqué de poulies et d'engrenages qui ont inspiré Maxwell pour sa théorie de l'électromagnétisme.

26. Pour une fois, nous serons plus relativiste que Bruno Latour : la science déjà faite n'est évidemment pas « indiscutable » (p. 50), mais, tout au plus, généralement indiscutée.

27. Les numéros de page renvoient ici à la version française du livre *La science en action*.

28. Dans un domaine voisin, on trouve chez Lévy-Leblond (2010) une critique de ceux qui identifient naïvement démarches scientifique et artistique.

D'autre part, il y a la science en action (la recherche), « ouverte et facile d'accès ». Ce découpage est si strict qu'il permet une provocation attentatoire au sens commun :

*Le paradoxe est qu'il n'y a guère de rapport entre la science et la recherche scientifique (p. 29).*

Passons sur une question béante : si la science en train de se faire n'est pas héritière de la science déjà faite, d'où vient-elle ? Comme l'illustre bien l'histoire de l'atomisme, il n'y a pas de rupture entre ces deux sciences. Les atomes de Perrin ou de Rutherford sont-ils de la science déjà faite ?

Il y a bien sûr une différence entre les équations de la relativité – science (en principe) déjà faite – dont le bien-fondé est attesté par des milliards d'utilisations (on a qu'à songer aux téléphones portables et au GPS) et celles de la théorie des cordes<sup>29</sup>, emblématique de la science en action. Mais *les critères de véracité sont les mêmes*. Une masse de littérature a été écrite sur ces critères : la réfutabilité, la reproductibilité (c'est-à-dire l'accord répété avec l'expérience), l'universalité, la parcimonie (l'économie de moyens, voire l'élégance), le succès des prévisions, la cohérence interne, etc. en sont les attributs habituels. Il y a enfin – et peut-être surtout – l'imbrication des connaissances dont nous avons parlé plus haut. Tous sont pertinents, mais aucun n'est nécessaire ou suffisant<sup>30</sup>.

Ajoutons que si une théorie des cordes se révélait fondée, elle renverrait la relativité, science « déjà faite » au statut de « science en train de se faire ». Alors, encore une fois, ce fossé entre science et recherche scientifique illustre soit une banalité, à savoir qu'il y a des branches de la connaissance inégalement établies, soit une provocation intellectuelle inutile (et fausse).

Nous pensons platement l'inverse de ce qu'affirme Latour : la science stabilisée – en fait temporairement –, mieux formalisée et dépouillée de ses branches devenues inutiles, est plus facile d'accès que la science actuelle ; de plus, sa compréhension est malheureusement indispensable à qui veut saisir de façon non anecdotique la nature des débats en cours dans la science en train de se faire, puisqu'elle se fait en appui et en contradiction éventuelle avec elle.

---

29. Théorie très hypothétique pour l'instant, tentant d'unifier la relativité et la mécanique quantique.

30. La capacité du darwinisme à prévoir n'est pas évidente, l'âge de la Terre ne peut pas directement résulter d'expériences reproductibles, etc.

Mais d'où vient ce paradoxe qu'on disposerait d'une plus grande facilité d'accès à la controverse qu'aux connaissances établies ? Bruno Latour en donne la clé dans la règle n° 3 :

*Il nous faudra donc adopter deux discours différents selon que nous considérons un domaine stabilisé ou non de la science. Nous aussi, nous serons relativistes dans le dernier cas et réalistes dans le premier. Lorsque nous étudierons des controverses comme nous l'avons fait jusqu'ici nous ne pouvons pas être moins relativistes que les chercheurs et ingénieurs que nous accompagnons ; ils n'utilisent pas la nature comme un juge extérieur [souligné par nous, N.d.A.] et, comme il n'y a aucune raison d'imaginer que nous sommes plus intelligents qu'eux, nous n'avons pas, nous non plus, à l'utiliser.*

Plus loin (p. 237), il précise :

*[...] c'est en analysant les alliés et les façons dont se règle une controverse que nous comprendrons tout ce qu'il y a à comprendre dans les techno sciences... C'est tout le contenu de ce livre qui est en cause ici.*

Nous comprenons cette règle ainsi : en ce qui concerne les controverses scientifiques, point n'est besoin de comprendre la physique puisque la nature n'y joue aucun rôle – et il est heureux qu'il en soit ainsi, sinon, nous, sociologues n'aurions rien à dire. Tel un anthropologue étudiant des Papous dans la jungle (Latour *et al.*, 2005), il suffit d'aller dans les labos et d'écouter. Pour Bruno Latour on n'entend jamais les chercheurs invoquer la Nature dans leurs controverses, mais bien plutôt la volonté des laboratoires d'obtenir des crédits, de passer avant tel autre, en bref, d'assurer des positions de pouvoir et de prestige d'institution ou de personne. Notre sociologue multiplie les anecdotes de ce type ; certaines sont savoureuses et bien observées. Ce genre de discussions qu'il a surpris utilise une langue naturelle (le français ou le plus souvent l'anglais) ; aussi le sociologue peut-il les comprendre sans avoir à dominer les équations de Maxwell ou la théorie de la relativité (science déjà faite ou « boîte noire », selon lui).

Les 663 pages du livre sont essentiellement occupées à décrire la science en action comme le lieu où chacun cherche diverses stratégies pour « affaiblir ses ennemis », « paralyser ceux qu'on ne peut pas affaiblir », « aider ses alliés quand ils sont attaqués », « obliger ses ennemis à se combattre les uns les autres » (p. 97), etc. C'est un travail de correspondant de guerre minutieux.

De la même façon, en rapportant les dialogues crus des soldats dans les tranchées ainsi que les ambitions et petites manœuvres des généraux, on démystifie utilement une vision cocardière et naïve de la guerre de 14-18, mais on n'explique ni son origine ni son développement.

Reste donc chez Latour un grand absent : le rapport à l'expérience. Synthétiquement, ce courant de pensée considère naïf de faire jouer la vérification expérimentale comme arbitre des controverses scientifiques ; ou, plus subtilement, ne la considère que comme un argument rhétorique supplémentaire. Qu'est-ce qui décide alors de la clôture d'une controverse ?

Il ne reste que le rapport de forces entre les différents réseaux (hommes et machines) protagonistes du débat. Bruno Latour multiplie les anecdotes pour montrer comment les ruses, les « trucs », les alliances et les enrôlements créent ce rapport des forces et fondent *in fine* la supériorité d'une théorie<sup>31</sup>.

Si supériorité signifie seulement victoire, c'est une lapalissade : par définition, le plus fort gagne. Qui s'oppose à la constatation que l'opium fait dormir parce qu'il a une vertu dormitive ?

Typique encore est l'affirmation d'Isabelle Stengers :

*Un concept n'est pas doué de pouvoir en vertu de son caractère rationnel, il est reconnu comme articulant une démarche rationnelle parce que ceux qui le proposaient ont réussi à vaincre le scepticisme d'un nombre suffisant d'autres scientifiques, eux-mêmes reconnus comme « compétents » [...]*

Isabelle Stengers, avec le sage recul de l'historienne au-dessus de la mêlée, ne prend aucun risque : qui peut en effet nier qu'un concept est *reconnu* vrai (quelque soit sa validité), si « un nombre suffisant d'autres scientifiques » l'estime ainsi ? Aucun cas de figure ne peut échapper à ce schéma : sur l'héliocentrisme, Ptolémée *versus* Copernic, ou sur l'atomisme, Duhem *versus* Perrin. Mais derrière cette lapalissade, se profile dans le début de la phrase toute la confusion entre le « vrai » et le « reconnu vrai » puisque le caractère rationnel du concept – c'est-à-dire sa logique interne, son accord avec l'expérience et son intégration dans le reste des connaissances – ne jouerait *aucun rôle*. Ce n'est pas vrai, même avec une théorie erronée. Par exemple, si la physique d'Aristote, qui affirme que pour avoir un mouvement il faut une force, a pu si longtemps triompher c'est bien à cause de son

---

31. On trouvera par exemple dans Sokal (2008) (p. 123), une comparaison édifiante entre la façon de discuter du puzzle des neutrinos solaires par le physicien et par le sociologue.

caractère rationnel : l'expérience prouve toujours que quelle que soit la matière dont est constituée un billard, quelle que soit la vitesse initiale de la boule, cette dernière finira par s'arrêter si aucune force ne la maintient en mouvement. Grâce au principe d'inertie de Galilée, on a appris que cette rationalité était bancale (voir la note 2 de la p. 29).

Par contre si supériorité d'une théorie dans le rapport de forces entre réseaux signifie *validité*, c'est faux, tout simplement. Faut-il rappeler Galilée ?

Comme en politique, l'explication par le « rapport des forces » n'est jamais fautive, c'est un truisme qui ne répond pas à la question intéressante : qu'est-ce qui détermine à terme ce rapport ? Pourquoi évolue-t-il ? Pourquoi Ostwald a-t-il abandonné son anti-atomisme ? Parce que le rapport des forces avait changé et que le réseau pro-atomique avait supplanté celui de ses opposants ? Certes, mais comment et pourquoi ?

Comment alors expliquer le succès relatif – dans des milieux généralement non scientifiques, il est vrai – de ces théories « inexplicatives », et si on veut être plus savant, « non falsifiables » ?

### *Du trivialement vrai au trivialement faux*

Le discours tient parce que Bruno Latour identifie – ou donne l'impression d'identifier –, l'existence d'un phénomène ou d'une chose avec sa découverte ou sa représentation<sup>32</sup>. Par exemple, on trouve (Latour *et al.*, 2005) :

*[...] et – ce qui est plus important – si la réalité est la conséquence et non la cause de cette construction [des faits], cela signifie que l'activité du scientifique est dirigée, non vers la « réalité », mais vers ces opérations sur les énoncés.*

Et comment comprendre autrement cette confusion patente entre « nature » et « représentation de la nature » si nécessaire à la logique de sa règle n° 3 ?

*[...] étant donné que le règlement d'une controverse est la cause de la représentation de la nature et non sa conséquence, on ne doit jamais avoir recours à l'issue finale – la nature – pour expliquer comment et pourquoi une controverse a été réglée.*

---

32. Noté aussi par Amsterdamska (1990), Bouveresse (2011), Sokal et Bricmont (1997).

De la constatation triviale : on ne peut pas avoir recours à *la représentation de la nature* pour expliquer ... la représentation de la nature, on glisse par identification à : on ne peut pas avoir recours à *la nature* pour en expliquer sa représentation (l'issue finale). C'est alors proférer une énormité avec l'évidence tranquille d'une lapalissade.

Cette confusion n'est pas un accident. On trouve encore sous sa plume dans le n° 307 de *La Recherche*, déjà mentionné à la note de la page 19 :

*Avant Koch le bacille [de la tuberculose, N.d.A.] n'a pas de réelle existence.*

On peut reprendre la même gymnastique. Soit, au sens commun, avant Koch, le bacille n'existait pas, ce qui est grotesque : comment découvrir un microbe qui n'existait pas ? Soit avant sa découverte – et ce serait le sens de l'adjectif « réelle » –, il n'existait pas « dans la connaissance des hommes », ce qui est une tautologie. Pour brouiller cette alternative, on a droit à une redéfinition *ad hoc* d'un temps à deux dimensions (Latour, 2001) (voir la critique de Gauthier (2011)). Faut-il lire Bruno Latour comme les textes sacrés, en distinguant le sens obvie – le sens littéral et manifestement erroné – du sens caché réservé aux savants ? Même s'il s'en défend, Bruno Latour donne ici le sentiment d'être dans la tradition du *esse est percipere aut percipi* de ce champion de l'idéalisme qu'a été l'évêque Berkeley (1685-1753) (« être c'est percevoir ou être perçu »).

Dans l'article cité de *La Recherche*, Bruno Latour affirme :

*La réponse de bon sens [...] consiste à dire que les objets (bactéries ou ferments)<sup>33</sup> étaient déjà là depuis des temps immémoriaux, et que « nos savants » les ont simplement tardivement découverts [...] Dans cette hypothèse, l'histoire des sciences n'a qu'un intérêt fort limité.*

Paraphrasons ce passage : *La réponse de bon sens [...] consiste à dire que l'Amérique était déjà là depuis des temps immémoriaux, et que « nos navigateurs » l'ont simplement tardivement découverte [...] Dans cette hypothèse, l'histoire des explorations n'a qu'un intérêt fort limité.*

Où est la différence ? Nous n'en voyons qu'une, et elle est de taille – si on ose dire : le continent américain est grand et serait visible (donc évident ?) à l'œil nu, pas le bacille. Mais ce n'est même pas si vrai : pour voir l'Amérique il fallait déjà s'en approcher, et par ailleurs en s'approchant suffisamment près (ce que fait le microscope), on voit le bacille.

33. On pourrait ajouter les atomes (N.d.A.).

Parce que nous partageons platement « la réponse de bon sens<sup>34</sup> », il s'ensuit pour nous que c'est « l'histoire des sciences [selon Latour] qui n'a qu'un intérêt fort limité ». Voilà pourquoi nous n'avons pas centré la genèse de la théorie atomique sur les alliances, subterfuges et autres « trucs » rhétoriques employés par les divers protagonistes, mais sur la confrontation permanente entre les théories et les expériences, indépendamment des intentions supposées des acteurs.

En bref, pour nous la théorie atomique n'est pas une construction sociale qui a fait exister l'atome. Au contraire, c'est l'existence de l'atome qui a permis – moyennant bien sûr toutes sortes de conditions sociales et à un certain moment – la construction de cette théorie.

Le commentaire suivant de Bouveresse (2012) sur Spengler<sup>35</sup> conserve toute sa pertinence :

*Spengler – dont certains de nos philosophes des sciences « postmodernes », qui connaissent aujourd'hui un succès comparable au sien, ne semblent toujours pas avoir remarqué à quel point il les avait devancés – s'est contenté de sauter immédiatement à la conclusion qu'il n'y avait pas de réalité, que la nature était une simple fonction de la forme culturelle variable dans laquelle elle s'exprime, autrement dit, que c'est la nature qui est une fonction de la représentation que nous en construisons, et non pas, comme on pouvait le croire et l'espérer jusqu'à présent, l'inverse. Et il est parvenu à la conclusion que les questions épistémologiques étaient, en fin de compte, uniquement des questions de style, les systèmes physiques se distinguant les uns des autres et s'opposant les uns aux autres comme les tragédies, les symphonies et les tableaux, en termes d'écoles, de traditions, de manières et de conventions (c'est à peu près textuellement ce qui est affirmé dans Le Déclin de l'Occident).*

---

34. Avec la mécanique quantique, l'affirmation « Avant sa mesure, la valeur de la projection du spin de l'électron n'a pas de réelle existence » serait discutable, mais pas grotesque. Mais pour petit qu'il soit, le microbe n'obéit pas à la mécanique quantique. De toute façon, le spin existe et c'est même pour cela qu'on l'a découvert !

35. Philosophe allemand (1880-1936), dont l'œuvre majeure est *Le Déclin de l'Occident*.

## Pour un scepticisme bien placé

Le relativisme sociologique cristallise une méfiance légitime envers l'impérialisme d'une « vérité scientifique incontestable<sup>36</sup> », souvent convoquée pour justifier n'importe quelle barbarie. Face à la morgue de certains experts, toute désacralisation de la science est bonne à prendre. C'est en particulier le cas des mal nommées « sciences économiques », où l'administration de la preuve est difficile et le poids des intérêts économiques, colossal. Il ne s'agit alors plus de « science en action » mais d'idéologie.

D'autre part, ces théories apparaissent beaucoup plus réalistes<sup>37</sup> que la conception naïve (qu'aucun scientifique adulte ne défend par ailleurs) selon laquelle « la nature s'exprime directement, les faits sont là » (p. 243). Heisenberg (2000) résume bien de quoi il s'agit en réalité :

*Ce que nous observons n'est pas la Nature elle-même, mais la Nature soumise à notre méthode de questionnement.*

Notons que dans les sciences physiques, la « Nature » est généralement bien définie et c'en est une toute petite partie bien confinée par le laboratoire qui est étudiée. Ce n'est pas toujours le cas dans les sciences du vivant où la notion d'environnement peut être difficile à préciser de même que les temps pertinents d'observation. Ceci ne transforme pas pour autant les « vérités biologiques » difficiles à établir en « vérité sociologiques » plus faciles d'accès<sup>38</sup>.

Heisenberg aurait pu ajouter que l'expérience peut signaler des questions non posées, questions que de grands savants comme Becquerel, Fleming ou Claude Bernard sauront identifier.

La popularité du relativisme sociologique en science est surtout due au fait qu'il introduit un recul critique et souvent salutaire dans l'examen de ce qui est un fourre-tout, appelé indifféremment science ou technoscience, qui va de la théorie de la relativité à la justification de la construction d'un métro Aramis en passant par les affirmations du Pentagone sur les missiles de croisière MX. Nous croyons qu'effectivement existe dans ce fourre-tout

---

36. Ce qui est un oxymore : presque par définition, toutes les vérités scientifiques sont contestables ; seules les vérités révélées ne le sont pas.

37. En particulier, le détail des descriptions des conflits de clocher peut faire mouche.

38. Voir par exemple les controverses sur les OGM ou les nanotechnologies.

une distinction à opérer, mais cette distinction n'oppose pas, comme l'affirme Bruno Latour, la « science en action » à la science faite.

Il y a d'une part la science conçue comme la somme des connaissances acquises et la recherche rationnelle de lois permettant de comprendre (et d'agir sur) les processus de la nature (voire de la société), laquelle aboutit à des résultats universels. Résultats indépendants de la personnalité de celui qui les énonce ; même s'il est en général, aujourd'hui, mâle, blanc, écrivant l'anglais et d'origine sociale plutôt favorisée, même s'il travaille pour l'armée ou l'académie pontificale. Ces lois sont donc en principe testables par n'importe quelle fraction de la communauté humaine. Ce ne sont pas des vérités révélées ; elles peuvent être modifiées et le progrès scientifique consiste souvent, sur la base d'expériences ou de réflexion théorique plus poussée, à en élargir ou rétrécir les domaines d'application.

Il y a d'autre part les applications de cette science qui vont de la bombe atomique au BCG en passant par les OGM. Faut-il être sceptique pour cette acception de la science ? Oui, si on entend par là que l'utilisation massive et en plein champ d'OGM, la construction du métro Aramis ou la multiplication des centrales nucléaires dépendent de décisions politiques qui, à l'évidence, sont socialement construites. *Ici*, il est correct d'affirmer que bien souvent des vérités baptisées de « scientifiques » ne sont assénées que comme des arguments rhétoriques au service d'intérêts particuliers (voir par exemple Oreskes et Conway (2010)). Peut-être la différence entre science et applications se situe ainsi : ces dernières doivent être prises démocratiquement ; mais on ne vote ni les équations de Maxwell (dont la validité est très certaine) ni l'existence de cordes cosmiques (tout à fait hypothétiques).

Si on ne peut pas isoler les applications de la science des intérêts sociaux en jeu, il ne faut pas se tromper de cible : Einstein qui a découvert la célèbre formule  $E = mc^2$  n'est pas plus responsable par cette formule<sup>39</sup> du lancement de la bombe atomique sur Hiroshima que Galilée ne l'est de l'écrasement d'un Boeing sous prétexte qu'il a découvert la loi de la chute des corps. Sceptique, il faut l'être également vis-à-vis des déclarations de scientifiques, dont rien ne prouve *a priori* qu'elles satisfont aux critères de

---

39. Il est d'ailleurs naïf de croire que cette formule ne sert qu'à rendre compte de l'énergie dégagée par la fission nucléaire ; l'équivalence entre la masse et l'énergie qu'elle stipule est tout à fait générale et est un des fondements de toute la physique actuelle. C'est grâce à l'énergie due à une perte de masse 4,5 millions de tonnes par seconde, que le Soleil nous chauffe !

rationalité, surtout quand lesdits scientifiques s'expriment en dehors de leur domaine de compétence. La science est faite par les scientifiques, mais les scientifiques ne font pas toujours de la science.

Dans son livre, Bruno Latour mêle donc systématiquement des controverses scientifiques et d'autres qui ne le sont pas. De ce point de vue, on peut avec profit lire *La science en action* pour apprécier comment l'administration Bush a utilisé toute sorte de subterfuges, d'alliances et de réseaux pour vendre l'existence d'armes de destruction massive en Irak. Cet immense jeu de rôles qui nous est présenté comme de la science en action – où revient d'ailleurs inlassablement l'expression « mise en scène » – a en effet l'avantage de décrire aussi bien la fabrication de « la fraude en action ». C'est la fameuse « symétrie » du « programme fort » qui propose d'analyser sur le même pied la fabrication des théories scientifiques et celle des mythes.

Le relativisme que nous critiquons insiste à juste titre sur l'imbrication du pouvoir et de la science. Mais il inverse les rôles : c'est l'effectivité de la science (sa part de vérité) qui procure de la puissance au pouvoir et pas le contraire (la position de pouvoir qui fabriquerait de la vérité). C'est aussi à juste titre qu'il insiste sur la « solidité des liens des réseaux mis en compétition » – c'est sa façon d'évoquer l'intrication dont nous avons parlé –, mais là encore il inverse les rôles : nous pensons platement que cette solidité est une conséquence de la validité d'une théorie, pas sa cause.

Il est vrai qu'il est difficile de tracer une frontière nette entre science et non-science, et ce, d'autant plus qu'on prétend le faire *en général*, comme Popper (1902-1994) s'y est notamment essayé<sup>40</sup>. Remarquons que les situations particulières offrent souvent moins de problèmes : on n'a pas besoin d'une définition achevée de la démarche scientifique pour savoir que la thèse de sociologie de madame Teissier, astrologue de son état, est une escroquerie intellectuelle<sup>41</sup>. Cette difficulté à établir la « démarcation » est aussi vraie dans bien d'autres domaines, par exemple entre honnêteté et malhonnêteté, ou entre justice et injustice : les secondes se parent toujours des plumes des premières. Cette difficulté peut engendrer une forme de cynisme généralisé : comme il n'y a ni « vraie » science, ni « vraie » justice,

---

40. Pour illustrer cette continuité, Sokal (2008) dessine un axe qui va du plus prouvé (la théorie atomique) au plus imaginé (les superstitions, les religions) en passant par le légitimement questionnable (la théorie des cordes).

41. Dont le chapitre III s'intitule : « Des preuves irréfutables en faveur de l'influence planétaire ».

tout est permis<sup>42</sup>. Il n'empêche, qu'à moins de se contenter d'une production purement littéraire – voire mondaine –, il est indispensable d'établir cette différence dans l'activité pratique du scientifique et du citoyen.

Nous avons critiqué une certaine vision de la science « socialement construite ». Mais nous ne croyons pas pour autant que les polémiques scientifiques aient bénéficié d'un monde aseptisé, sans blocage psychologique, sans intérêts sociaux ni sans privilèges à défendre. Qui peut nier que toutes sortes de retards dus à des ambitions, des rivalités d'écoles, des vanités ont existé – et existent encore ? Nous avons signalé, par exemple, l'attitude de Berthelot ou de Dumas utilisant leur position académique contre la théorie atomique. Même si les motifs subjectifs de ces résistances ne sont pas toujours nobles, elles peuvent peser parce qu'elles expriment *aussi*, à leur façon, autre chose : l'exigence que les nouvelles théories fassent leurs preuves expérimentales et théoriques. On a vu les résistances des « énergétistes » comme Mach ou Duhem à l'hypothèse atomique. Mais l'argument de la violation du second principe de la thermodynamique était fondé : comment expliquer une évolution irréversible à partir de lois microscopiques réversibles ? Rabattre cet argument sur la défense d'un réseau n'est évidemment pas faux, c'est seulement superficiel.

L'analogie suivante résumera notre critique. Pour se prémunir d'une vision naïve de l'évolution des idées allant nécessairement du faux au vrai, on peut – si on y tient – considérer le triomphe d'une théorie scientifique sur d'autres comme l'aboutissement d'un processus darwinien. Or, considérer la sélection darwinienne comme la victoire « du plus fort » n'est évidemment pas faux, mais c'est la rabaisser au niveau d'une lapalissade. Le point essentiel y est la possibilité de prolifération des descendants des individus génétiquement les mieux adaptés à *un environnement donné*. Oublier ce « détail » de l'environnement dans la compétition biologique, c'est oublier le nœud de la théorie darwinienne. De la même façon, oublier le « détail » du rôle de la Nature, c'est-à-dire de l'expérience, dans la victoire d'une théorie scientifique comme le font nos relativistes, c'est oublier le point crucial.

---

42. La formule provocatrice de Feyerabend (1975) (1924-1994) : *Anything goes* (Tout est bon) peut être quelque fois stimulante, mais elle ne constitue pas une méthode – ce qui est loin d'être un inconvénient pour ce philosophe. Nous enseignons le contraire à nos étudiants. À tort ? On doit pouvoir former sans formater.

## *En guise de conclusion*

Auprès des professionnels des sciences dites dures, qui de façon générale – et à tort – se désintéressent de la sociologie des sciences, les théories relativistes sont peu connues, et en tout cas sans influence<sup>43</sup>.

Alors, pourquoi s’y intéresser ?

Le monde n’est – heureusement – pas composé principalement de scientifiques. Nous avons donné de l’importance à ces théories dans la mesure où elles en ont peu ou prou pour pas mal de journalistes et décideurs politiques, voire pour certains enseignants. Sciences Po, par exemple, censé former nos futures « élites » avait choisi comme directeur scientifique un sociologue flirtant avec le relativisme : Bruno Latour. Ces théories ne sont pas directement responsables des politiques scientifiques actuelles mais en constituent d’excellents compagnons de route. En effet, si le succès d’une théorie scientifique sur ses concurrentes est dû à la constitution d’un lobbying assurant la meilleure publicité, voire la meilleure propagande, mieux vaut alors développer dans les universités le budget « com », assurer le meilleur réseau, développer la visibilité, la concurrence et l’« excellence ». Cette conception cynique d’une recherche mue par le désir de pouvoir se rapproche du coup d’un désir d’enrichissement personnel<sup>44</sup>. On comprend alors le rôle croissant que veulent faire jouer les gestionnaires à la prime au mérite et la tendance à faire du facteur *h* le critère de la valeur d’un chercheur et du classement de Shangai, celui d’une université<sup>45</sup>. Dans cette période d’austérité, c’est un choix plus économique que celui d’une formation de masse et d’expériences coûteuses dont les résultats ne sont jamais garantis. Il ne s’agit pas de stopper la recherche, mais de la ramener à ce qu’elle vaut : un argument de plus dans la rhétorique de la compétition. Le malheur voudrait que cette philosophie déviante devienne auto-réalisatrice. Alors, on

---

43. Weinberg (1992), qui ne s’en désintéressait pas, livre néanmoins – à propos de la philosophie en général – cette observation amère :

*Les intuitions de philosophes se sont révélées profitables aux physiciens, mais généralement de façon négative – en les protégeant des idées préconçues d’autres philosophes.*

44. C’est également ainsi que Bourdieu (2001) caractérise la vision du travail des savants selon Bruno Latour.

45. Ou *h-index* en anglais. Un scientifique avec un indice de *h* a publié *h* articles qui ont été cités au moins *h* fois. Un seul nombre, donc, caractérise un chercheur, et les machines peuvent se charger du classement !

ne formera plus des chercheurs, mais des gagnants ou des « communicateurs », visant à se faire une place sur un marché des connaissances.

Il y a une deuxième raison. On voit depuis quelque temps reflourir divers fondamentalismes religieux appuyés sur la lecture obvie (directe) des livres sacrés (Bible ou Coran) considérés comme sources fiables de cosmologie, de science naturelle ou d'histoire. Ces lectures peuvent justifier des attitudes sociales ou politiques nocives. Mais si on considère que l'âge de la Terre estimé à 4,55 milliards d'années est « socialement déterminé », quel argument peut-on opposer aux créationnistes de tout poil ?

Le passage de l'« hypothèse » à la théorie atomique que raconte ce livre montre ce qui a permis à *une* controverse scientifique de se clore. Certes, toutes n'ont pas eu le même scénario ; on pourrait évoquer les grandes controverses sur l'âge de la Terre, la théorie de l'évolution, l'héliocentrisme, la dérive des continents, la génération spontanée, la relativité, ou la mécanique quantique. Les rapports entre théorie et expériences (ou observations) étaient différents. Il reste qu'à chaque fois leur étude infirme l'idée selon laquelle la science ne serait qu'une construction sociale dont les prétentions à l'objectivité seraient trompeuses puisque la Nature n'y jouerait – presque – aucun rôle.

Galilée avait osé affirmer, contre Aristote, que les montagnes de la Lune et les satellites de Jupiter n'étaient pas des artefacts de sa lunette comme l'affirmait le Saint Siècle. Il a finalement gagné parce que montagnes et satellites étaient bien là, tout simplement.

Tout simplement ? Mais les satellites de Jupiter et les montagnes de la Lune étaient là depuis des milliards d'années et personne ne les avaient vus. Pour ce faire, il fallait de l'audace, une certaine curiosité et surtout disposer de la lunette des Hollandais. Audace, curiosité et lunettes ne tombent pas du ciel ; ce sont clairement les productions d'une société à un certain moment. Mais ceci ne fait pas des montagnes de la Lune une construction sociale.

L'histoire de l'atomisme est analogue, même si la lunette qui a permis de « voir » les atomes est autre chose qu'un tube muni d'une lentille convergente à un bout et divergente à l'autre – pour ne pas mentionner la « lunette » qui a permis de « voir » le boson de Higgs. C'est à la construction de cette « longue-vue » qu'on a assisté, pas à celle des atomes !

Nous avons voulu faire partager au lecteur la beauté de cette construction inachevée et inachevable.



## Annexes

*Ce qui périt par un peu plus de précision est un mythe.*

Paul Valéry, *Petite Lettre sur les mythes, Variété II (1930)*

*Car l'imprécision possède un pouvoir d'agrandissement et d'ennoblissement.*

Robert Musil, *L'homme sans qualités, Tome I*

### Lettre de Charpak et Hennion à Benveniste

***Nous publions cette lettre de Charpak sur la « mémoire de l'eau » pour montrer que pour stupéfiante que pouvait paraître cette « découverte », elle n'a pas été ignorée par la science dite officielle.***

Paris, le 18 Juillet 1995

Monsieur,

Nous avons en mains votre lettre du 21 Mai 1995 dans laquelle vous nous annoncez la réussite d'une dizaine d'expériences en aveugle, analogues à celles que l'un d'entre nous – Georges Charpak – a pu voir dans votre laboratoire en 1993.

Il nous semblait très probable que l'opération de transport des propriétés d'un produit chimique encapsulé, vers une eau pure encapsulée également, par les vertus d'un amplificateur qui oscille en permanence, était soit un artefact, soit une supercherie<sup>46</sup>. En raison de vos titres, de votre position dans une communauté scientifique importante, et devant votre enthousiasme, et votre bonne foi, nous avons pensé vous rendre service en vous proposant

---

46. Dans sa réponse, Benveniste écrivait : « Ce dernier terme est diffamatoire. Je vous recommande de ne pas en faire état en public ou dans un document distribué à des tiers (diffamation privée). Je poursuivrai toute personne dans cette situation avec condamnation certaine puisqu'il n'y a aucun commencement d'argument en ce sens. » Voilà qui donne une image de la tension qui régnait !

d'effectuer les opérations de transfert à l'École de Physique et de Chimie, sous le contrôle de l'un d'entre nous – Claude Hennion. Au total, 20 expériences ont clairement montré un effet totalement aléatoire [...]

Vous aviez, lors d'un contrôle fait par vous, où vous connaissiez le résultat d'avance, observé que lorsque le résultat était connu, vous ou vos collaborateurs trouvaient la bonne réponse. Vous vous êtes demandé alors, si vous n'étiez pas trahi dans votre laboratoire.

Vous avez rejeté cette hypothèse mais vous avez inventé des raisons expliquant pourquoi l'expérience ne marchait pas à l'École de Physique et de Chimie dans une claire fuite en avant, où vous ne preniez en compte que les expériences qui confirmaient votre hypothèse.

Il est intéressant de noter également que vous accordez foi à des publications qui vont dans votre sens et que vous trouvez les raisons les plus baroques pour expliquer les échecs.

Vous accordez de l'importance à des publications grotesques, par exemple l'article intitulé « Human Consciousness Influence on Water Structure » écrit par deux Russes dans le *Journal of Scientific Exploration* (vol. 9, n° 1, p. 85, 1995). Ils démontreraient l'influence de la présence de certains individus sur des paramètres physiques de l'eau. Et vous invitez la communauté scientifique à se passionner pour cela !

Vous nous avez donné également les textes d'un théoricien italien, professeur d'université. Nous avons donné son texte à analyser aux meilleurs théoriciens français. Ils ont dit que c'était truffé d'hypothèses grossièrement fausses. Mais comme c'est écrit dans un langage opaque à 99% des physiciens, nous comprenons qu'il puisse vous leurrer par ses encouragements amicaux.

Meilleures salutations.

Georges Charpak, Claude Hennion

## Qu'est-ce que l'entropie ?

Ce n'est pas un concept simple (Depondt, 2001). Nous allons essayer d'en donner une vision intuitive à partir de considérations microscopiques. Dans une enceinte qu'on suppose isolée et fermée<sup>47</sup> contenant un fluide hors d'équilibre, une partie initialement plus chaude que la moyenne va toujours se refroidir au profit de son voisinage qu'elle va réchauffer. Par contre, on ne verra jamais spontanément monter la température d'une partie d'un système

---

47. Qui n'échange ni énergie, ni particules avec l'extérieur et dont le volume reste invariant.

isolé à l'équilibre, compensée par la baisse de température du reste. On ne verra jamais non plus toutes les molécules d'un gaz se rassembler dans une seule moitié de l'enceinte. Pourtant ces deux phénomènes, créateurs d'inhomogénéité, pourraient se produire sans violation de la conservation d'énergie (premier principe de la thermodynamique). Ces impossibilités sont érigées en principe par Carnot (1824) ; elles seront plus tard théorisées par Clausius qui introduisit en 1865 une fonction de l'état du système : l'*entropie*, distincte d'une autre fonction comme l'énergie. Le *deuxième principe de la thermodynamique* stipule que l'entropie d'un système isolé ne peut que croître jusqu'à ce que l'équilibre soit atteint. C'était, comme nous l'avons vu, la mesure thermodynamique de l'irréversibilité. Ainsi, la notion de flèche du temps exprime la constatation que certaines transformations se déroulent toujours dans le même sens.

La mécanique statistique de Boltzmann fondée sur l'existence des atomes a donné une explication lumineuse à cette fonction entropie un peu mystérieuse. Résumons-la très schématiquement.

On appelle *micro-état* l'ensemble (à chaque instant) des positions et des vitesses de tous les atomes du système. Un micro-état comporte donc un nombre démesuré de données, typiquement de l'ordre de grandeur du nombre d'Avogadro, soit  $10^{23}$ , évidemment impossibles à répertorier. En revanche, l'état macroscopique de ce même système ou *macro-état* est caractérisé par très peu de quantités qui, elles, sont expérimentalement accessibles, comme le volume, l'énergie, le nombre de particules, la densité, la température, etc. Ce macro-état résulte en principe de la valeur de *toutes* les positions et vitesses individuelles. Le point important est qu'un même macro-état peut être réalisé par *un nombre gigantesque* de micro-états différents qu'il est hors de question d'examiner en détail.

Prenons une image pour faire comprendre la philosophie de la mécanique statistique : le tirage d'une pièce à pile ou face. La face sur laquelle va tomber la pièce dépend d'une multitude de paramètres incontrôlables : vitesse et direction du lancer, hauteur de chute, courants d'air, etc. Ce sont un peu les analogues des micro-états. Il est pratiquement impossible de prévoir en partant de ces données quel « macro-état » (pile ou face) va sortir. On doit alors abandonner le calcul prévisionnel *ab initio* et se rabattre sur un calcul de probabilité ; on suppose qu'en l'absence d'information sur le truquage éventuel de la pièce, rien, sur un grand nombre de tirages, dont tous les « micro-états » sont différents, ne favorise systématiquement une face plutôt que l'autre. On posera donc en principe qu'il y a probabilité égale de pile et de face. On vérifie bien que toutes les conséquences expérimentale-

ment observées concordent avec ce postulat : on arrive ainsi à prévoir avec une très grande précision sur des millions de tirages la fréquence relative des piles (et des faces) en faisant l'économie d'un calcul microscopique – de plus impossible à réaliser. Voici comment Poincaré (1918) décrit cette démarche :

*Vous me demandez de vous prédire les phénomènes qui vont se produire. Si, par malheur, je connaissais les lois de ce phénomène, je ne pourrais y arriver que par des calculs inextricables et je devrais renoncer à vous répondre ; mais comme j'ai la chance de les ignorer, je vais vous répondre tout de suite. Et, ce qu'il y a de plus extraordinaire, c'est que ma réponse sera juste.*

Boltzmann va adopter une approche analogue. Il divise l'espace des positions et vitesses en petites cellules élémentaires, ce qui lui permet de compter le nombre <sup>48</sup> de micro-états,  $\Omega$ , accessibles au système, c'est-à-dire respectant les données du macro-état (nombre de particules, énergie, volume...). Sans cette discrétisation, ce nombre serait infini puisque positions et vitesses sont des grandeurs qui varient continûment. À chaque instant, les milliards de milliards de particules du système qui s'entrechoquent passent d'un micro-état à un autre. Pendant un temps très court, elles vont décrire une fraction significative de tous ces micro-états. Boltzmann va introduire l'hypothèse que, dans un système isolé, l'équilibre est atteint lorsque tous les micro-états sont parcourus de façon équiprobable.

Et la réversibilité ? La mécanique classique, remarque Boltzmann, ne se résume pas aux lois du mouvement, lesquelles, effectivement, sont réversibles : on doit considérer aussi les conditions initiales du système hors d'équilibre qui généralement correspondent à une répartition exceptionnelle des micro-états. Cette répartition, rapidement oubliée par la succession des collisions des particules entre elles, devient irrécupérable <sup>49</sup>, même si elle reste « mathématiquement » possible. Il démontre alors, qu'à l'équilibre, l'entropie de Clausius est simplement proportionnelle au logarithme de  $\Omega$ . C'est la célèbre formule gravée sur la tombe de l'illustre physicien autrichien :

$$S = k_B \log \Omega,$$

où  $k_B$  est la constante de Boltzmann, nécessaire pour faire coïncider la définition thermodynamique (macroscopique) et la définition statistique (microscopique).

---

48. Nombre qui, rappelons-le défie toute imagination : ainsi pour une mole de gaz parfait aux conditions normales de température,  $\Omega \simeq 10^{5 \cdot 10^{24}}$ .

49. Il y a le contre-exemple très instructif du phénomène « d'écho de spin » (voir Balian (2010)), très utilisé en imagerie médicale (IRM).

Que l'équiprobabilité des configurations microscopiques corresponde au désordre maximum peut se comprendre facilement avec l'image suivante. Si on se limite au seul espace des positions, il est clair que la situation où toutes les particules seraient confinées dans une partie de l'enceinte du gaz correspond à plus d'ordre macroscopique que si elles pouvaient être n'importe où ; mais en même temps, on est à la fois loin de l'équiprobabilité des micro-états et de l'équilibre.

## Marche au hasard

**Le mouvement brownien peut être idéalisé par un modèle mathématique simple, celui de la marche au hasard : un mobile effectue à chaque seconde un saut de longueur fixe, mais dans une direction aléatoire.**

Une bonne image de ce qu'on appelle cette marche au hasard à une dimension est donnée par celle d'un individu soûl sur une route, si soûl qu'il fait un pas en avant ou un pas en arrière avec la même probabilité  $1/2$ , *quel que soit le pas précédent*. Question : s'éloignera-t-il finalement de son point de départ  $O$ , ou bien oscillera-t-il indéfiniment autour ? Imaginons la route comme une ligne horizontale, soit  $l$  la longueur de son pas et  $s_n$  son abscisse au  $n$ ème pas. On aura par exemple :

$$s_n = l + l - l - l + \dots + l,$$

qu'on peut écrire plus généralement :

$$s_n = x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + \dots + x_n,$$

où les  $x_i$  valent  $l$  quand l'ivrogne avance et  $-l$  quand il recule. On ne peut évidemment pas prévoir  $s_n$ . Tout ce qu'on peut en dire est que sa valeur est comprise entre  $-n \times l$  et  $n \times l$  (si tous les pas, exceptionnellement, avaient eu lieu dans le même sens). Il vaut zéro s'il y a eu autant de pas en avant que de pas en arrière ; plus généralement il peut prendre toute valeur multiple de  $l$  comprise entre  $-n \times l$  et  $n \times l$ <sup>50</sup>. On suspecte néanmoins que si on renouvelle souvent l'expérience d'une marche en  $n$  pas de notre ivrogne, la valeur zéro de  $s_n$  est beaucoup plus fréquente que la valeur extrême  $n \times l$  ; en effet pour ce dernier cas, il n'y a qu'une seule possibilité : que tous les pas aient été faits

50. Avec la limitation que ces valeurs sont des multiples pairs ou impairs de  $l$  suivant la parité de  $n$ .

en avant, alors que le premier cas suppose seulement qu'il y ait eu au total autant de pas en chaque sens, ce qui peut se réaliser de bien des manières.

La répétition de cette marche à  $n$  pas issue de l'origine (par le même ivrogne ou par une assemblée de ses compagnons de beuverie) donne une suite de valeurs de  $s_n$  dont on peut faire la moyenne, ce qu'on appelle moyenne statistique. À cause de la symétrie (gauche et droite jouant le même rôle), sur un grand nombre de répétitions, valeurs positives et valeurs négatives de  $s_n$  tendent à s'équilibrer. Ce qui fait que cette valeur moyenne appelée  $\bar{s}_n$  est nulle<sup>51</sup>.

Peut-on en conclure qu'en moyenne l'ivrogne ne s'éloigne pas ? C'est-à-dire qu'en répétant très souvent cette marche, l'ivrogne ne s'éloignera en général pas. Non, parce que ce qui caractérise la distance parcourue depuis l'origine n'est pas  $s_n$ , mais plutôt  $s_n^2$ . En effet qu'importe s'il s'éloigne à droite ( $s_n > 0$ ) ou à gauche ( $s_n < 0$ ), il s'éloigne si la valeur absolue de  $s_n$ ,  $|s_n|$  croît. Mais, puisque  $|s_n| = \sqrt{s_n^2}$ , l'usage est de considérer  $s_n^2$ , plus facile à étudier que la valeur absolue. Aussi c'est la moyenne statistique de  $s_n^2$  qu'il faut calculer et elle n'est pas le carré de  $\bar{s}_n$ , qui est rappelons-le, nulle. On commence par écrire :

$$\begin{aligned} s_n^2 &= (x_1 + x_2 + \dots + x_n)^2 \\ &= x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2 + 2(x_1x_2 + x_1x_3 + \dots + x_{n-1}x_n). \end{aligned}$$

Comme tous les  $x^2$  valent  $l^2$  (que  $x$  vaille  $l$  ou  $-l$ ), il reste :

$$s_n^2 = nl^2 + 2(x_1x_2 + x_1x_3 + \dots + x_{n-1}x_n),$$

dont on va prendre la moyenne statistique. Prenons par exemple celle de  $x_1x_2$ . Cette quantité vaut  $l^2$  si  $x_1$  et  $x_2$  sont de même signe (deux cas possibles, de même probabilité que les précédentes) et  $-l^2$  s'ils sont de signes différents (encore deux cas possibles de même probabilité) ; donc comme pour la valeur moyenne de  $x_1$ , la valeur moyenne de  $x_1x_2$  est nulle<sup>52</sup>. Reste donc ce résultat fondamental et non intuitif que

$$\overline{s_n^2} = nl^2.$$

51. De façon plus savante, la moyenne statistique des  $s_n$  est la somme des moyennes statistiques des  $x$ . Or les  $x$  valant  $\pm l$  avec la même probabilité, les valeurs moyennes des  $x$  sont nulles, donc nulle est leur somme.

52. De façon plus savante encore, on peut dire que comme les pas sont tirés indépendamment, la moyenne de  $x_1x_2$  est égale au produit des moyennes de  $x_1$  et  $x_2$ , donc nulle.

La valeur moyenne du carré de la distance à l'origine est donc proportionnelle au carré du pas, ce qui n'est pas étonnant, mais aussi *seulement* proportionnelle au nombre de pas. Si on suppose que le marcheur fait un pas par seconde, ce nombre de pas indique le temps de marche. Pour une marche ordinaire, c'est-à-dire toujours dans le même sens, la distance à l'origine est proportionnelle au temps et donc son carré est proportionnel à  $n^2$  et pas à  $n$  comme ici. Le mouvement ordinaire est appelé balistique (c'est celui d'une balle de fusil), celui de la marche aléatoire, diffusif : c'est l'idéalisation de celui d'une molécule de gaz choquant en permanence les autres.

Le fait que le marcheur s'éloigne en moyenne ne viole pas la symétrie du problème : il ira en moyenne aussi souvent à droite qu'à gauche, voilà pourquoi on a bien  $\bar{s}_n = 0$ .

*Le propre de la marche aléatoire est que la distance parcourue depuis l'origine croît comme la racine du temps.*

Cette propriété se généralise facilement à une marche sur un plan ou dans l'espace et au mouvement brownien.

## Équation barométrique

**Densité d'un gaz pesant.** Soit  $n(z)$  le nombre de molécules par unité de volume,  $m$  leur masse,  $z$  leur altitude et  $P(z)$  la pression.

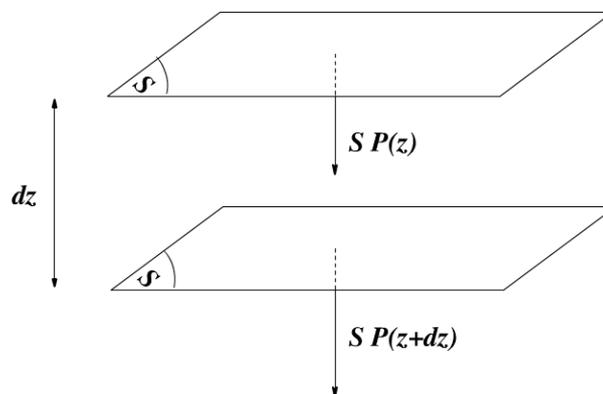


FIGURE 15. Différence de pression équilibrant le poids de gaz  $n(z)mgSdz$ .

Dans l'hypothèse d'une gravité  $g$  constante, évidemment valable à l'échelle du laboratoire, pour une température  $T$  fixée, l'équation barométrique s'écrit :

$$n(z) = n(0)e^{-\frac{mg}{k_B T}z}. \quad (I)$$

La démonstration la plus élémentaire consiste à écrire que la force créée par la différence de pression entre les altitudes  $z$  et  $z + dz$  doit équilibrer le poids de gaz compris entre deux surfaces  $S$  parallèles distantes de  $dz$ . Soit

$$n(z)mgSdz = -[P(z + dz) - P(z)]S,$$

et donc que

$$\frac{dP(z)}{dz} = -n(z)mg.$$

Par ailleurs, de l'équation des gaz parfaits  $P = \frac{N}{V}k_B T$ , on tire que localement  $P(z) = n(z)k_B T$ , et donc

$$\frac{dP(z)}{dz} = k_B T \frac{dn(z)}{dz}.$$

En égalant ces deux expressions il vient

$$\frac{dn(z)}{dz} = -\frac{mg}{k_B T}n(z). \quad (2)$$

Ce qui par intégration donne l'équation (1).

**La généralisation d'Einstein.** Nous avons conduit une dérivation macroscopique, sans supposer l'existence de molécules, de la loi barométrique. Nous aurions pu obtenir la même formule – et beaucoup plus rapidement – en utilisant la théorie microscopique de Boltzmann. L'apport d'Einstein (1905) a été de démontrer qu'en utilisant l'approche de Boltzmann, on pouvait étendre cette loi exponentielle non seulement à des molécules dissoutes dans un solvant, mais encore à de petites particules en suspension dans un fluide.

## Formule d'Einstein

On a vu plus haut que la moyenne du carré de la distance  $\overline{r^2}$  parcourue par un ivrogne était proportionnelle au temps écoulé. Cette propriété se maintient dans le cas du mouvement brownien et plus précisément on peut démontrer qu'à 3 dimensions :

$$\overline{r^2} = 6Dt, \quad (3)$$

où  $t$  est le temps, et  $D$  le coefficient de diffusion défini par la loi de Fick :

$$n(z)\overline{v} = -D \frac{dn(z)}{dz}, \quad (4)$$

qui exprime simplement que la vitesse moyenne  $\bar{v}$  des particules n'est plus nulle, mais proportionnelle à la variation de densité du milieu  $n(z)$ .

La formule d'Einstein s'applique à des particules en suspension dans un liquide<sup>53</sup>. Elle relie le coefficient de diffusion connu expérimentalement à l'aide de la formule (3) au nombre d'Avogadro :

$$N_a = \frac{RT}{D} \frac{1}{6\pi r \eta}. \quad (5)$$

Dans cette formule,  $R$  est la constante des gaz parfaits,  $T$ , la température,  $r$  est le rayon des particules supposées sphériques et  $\eta$ , le coefficient de viscosité du liquide.

Pour démontrer sa formule, Einstein va utiliser la loi de Stokes, qui relie, aux faibles vitesses de chute, la vitesse limite et la force de pesanteur :

$$mg = 6\pi r \eta \bar{v}. \quad (6)$$

En combinant cette formule avec les équations (4) et (2), on obtient immédiatement la formule d'Einstein (en se souvenant que  $k_B N_a = R$ ).

## Le modèle d'Ehrenfest

**Un exemple simple, imaginé par Paul et Tatiana Ehrenfest en 1907 illustre bien les problèmes d'irréversibilité.**

Deux chiens  $A$  et  $B$  portent en tout  $N$  puces. La règle est la suivante : on considère au hasard une des  $N$  puces, si elle est sur  $A$  on la fait sauter sur  $B$  et réciproquement. Supposons qu'au départ les  $N$  puces soient sur le chien  $A$ , la première puce tirée au hasard sera nécessairement en  $A$ , la seconde puce le sera très probablement (avec une probabilité  $1 - 1/N$ ), etc. et très rapidement on s'attend à ce que le nombre de puces sur le chien  $A$  oscille autour de  $N/2$ . Intuitivement, on voit par quel mécanisme les chiens tendront à égaliser leur colonie de puces puisque *a priori* une puce tirée au hasard sautera le plus souvent du chien le plus parasité vers le chien le moins parasité, réduisant ainsi les écarts de population de puces.

Soit  $s$  le nombre de sauts de puces et  $N/2 + n(s)$  le nombre de puces portées par  $A$  au  $s$ -ème saut. Ici  $n(s)$  est l'excès (ou le défaut, suivant son

---

53. Pour plus de détails, voir :

<http://www2.cndp.fr/themadoc/mouvbrown/apropos.htm>

signe) de puces par rapport à la limite  $N/2$  escomptée. On peut établir qu'en moyenne <sup>54</sup>  $n(s)$  tend exponentiellement vers zéro comme :

$$\langle n(s) \rangle = n(0) \left(1 - \frac{1}{N}\right)^s \simeq n(0)e^{-s/N}. \quad (7)$$

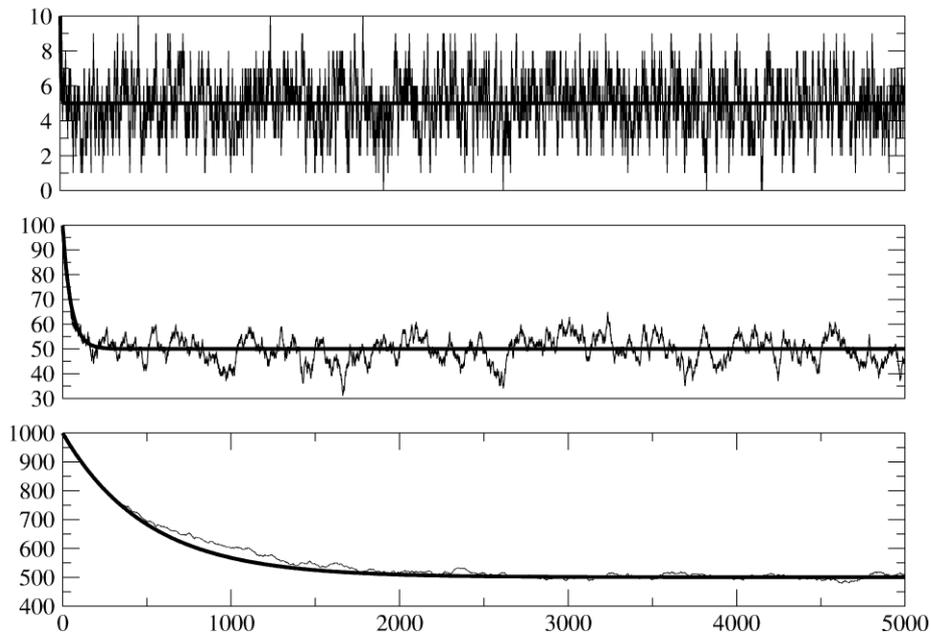


FIGURE 16. *Modèle d'Ehrenfest. Dessin de  $n(s)$ , respectivement pour  $N = 10, 100, 1\,000$  avec 5 000 itérations. En gras, la courbe « asymptotique » tendant vers  $N/2$ .*

La figure 16 donne la distribution de la population de puces sur le chien  $A$  en fonction du temps représenté par le nombre de sauts  $s$ . On suppose 5 000 sauts avec les 3 conditions initiales  $n(0) = N = 10, 100$  et  $1\,000$ . On voit clairement que pour  $N$  petit, on repasse assez vite par la condition initiale (toutes les puces sur  $A$ ), puis quand  $N$  augmente, les fluctuations diminuent et les points semblent converger irrévérablement vers la courbe d'équation (7). Mais si on attendait suffisamment longtemps on retomberait sur la condition initiale.

Plus généralement, on peut montrer que le temps moyen entre deux retours à la situation initiale est de  $2^N$ . Ce qui veut dire que si on a un saut toutes les 100 picosecondes (soit  $10^{-10}$  seconde, ordre de grandeur séparant

<sup>54</sup>. Par moyenne on entend la moyenne arithmétique d'un très grand nombre d'essais.

deux chocs de molécules de gaz aux conditions normales), pour  $N = 30$  ce temps moyen serait de 0,1 seconde ; il serait de 4,2 milliards de milliards d'années pour  $N = 120$ , c'est-à-dire de l'ordre d'un milliard de fois l'âge de la Terre. Pour ne rien dire de  $N_A \simeq 6 \times 10^{23}$ , le nombre d'Avogadro.

Il n'y a donc pas contradiction entre ce qui semble à *l'échelle de nos mesures* une tendance « irréversible » vers l'équilibre et la récurrence de Poincaré qui ne se produit en général qu'à des temps hors d'atteinte.



## Glossaire

**Atome.** La plus petite quantité de matière caractéristique d'un élément. L'atome est indestructible par les seuls procédés chimiques.

**Corps pur.** À la différence d'un mélange, il ne contient qu'une espèce de molécule. Il peut être :

- simple, soit constitué d'un seul type d'atome. Il peut alors être moléculaire comme l'hydrogène dont la molécule est diatomique, ou bien sous forme de cristaux, avec un arrangement périodique dans l'espace, comme le cuivre.

- composé, soit constitué d'atomes différents. Il peut être également moléculaire ou cristallin.

**Gaz parfait.** C'est une idéalisation des gaz réels d'autant meilleure que les densités sont faibles et les températures élevées. Elle suppose que, *du point de vue de l'énergie*, les molécules n'interagissent qu'avec les parois et par des rebonds élastiques. Elles se choquent néanmoins, sinon l'équilibre ne pourrait pas être atteint.

**Ion.** Atome, ou groupement d'atomes, chargé électriquement par perte ou gain d'électrons.

**Isotope.** Des éléments isotopes ont même nombre de protons et d'électrons, donc mêmes propriétés chimiques. Ils diffèrent par leur nombre de neutrons.

**Libre parcours moyen.** Dans un fluide, distance moyenne parcourue par une molécule entre deux chocs.

**Masse atomique.** Masse de l'atome exprimée comme multiple d'une masse élémentaire de référence. Cette masse élémentaire de référence est actuellement fixée au  $1/12$  de la masse du carbone-12. À la différence du nombre de masse dont elle est proche, elle n'est pas entière car c'est la moyenne des masses atomiques des isotopes généralement présents. De plus, à cause de

l'énergie de liaison, la masse d'un atome est très légèrement inférieure à la somme des masses de ses nucléons.

**Masse molaire.** C'est la masse d'une mole.

**Mole.** La mole est la quantité de matière d'un système contenant autant d'entités élémentaires qu'il y a d'atomes dans 12 grammes de carbone-12. Par définition donc, une mole de carbone-12 contient  $N_A$  atomes et pèse exactement 12 grammes. Une mole d'eau pèse sensiblement 18 grammes, une mole d'oxygène, 16 grammes, etc. Jadis, on parlait de molécule-gramme ou d'atome-gramme, ce qui spécifiait la nature des entités élémentaires.

**Molécule.** Le plus petit regroupement stable d'atomes caractéristique des propriétés chimiques de la substance en question.

**Nombre d'Avogadro.** C'est le nombre d'atomes contenu dans 12 grammes de carbone-12. C'est approximativement le nombre de molécules d'un volume de 22,4 litres de gaz parfait dans les conditions normales.

**Nombre de masse.** Nombre entier qui représente le nombre total de nucléons d'un élément.

**Numéro atomique.** C'est le nombre de protons du noyau ; il caractérise un élément chimique.

## Bibliographie

Olga AMSTERDAMSKA : Surely You Are Joking, Monsieur Latour ! *Science, Technology, & Human Values*, 15(4), 1990.

Birk ANDREAS *et al.* : Determination of the Avogadro Constant by Counting the Atoms in a  $^{28}\text{Si}$  Crystal. *Physical Review Letters*, 106, January 2011.

Amadeo AVOGADRO : Essai de déterminer les masses relatives des molécules élémentaires des corps, et les proportions dans lesquelles elles entrent dans ces combinaisons. *Journal de Physique*, 73, 1811.

Roger BALIAN. In Étienne KLEIN et Michel SPIRO, éditeurs : *Le temps et sa flèche*, chapitre « Le temps macrocopique ». Frontières, 1994.

Roger BALIAN : Le paradoxe de l'irréversibilité. *Pour la science*, n° 397, novembre 2010.

Anouk BARBEROUSSE : Ludwig Boltzmann, les théories physiques et les atomes. In *Images de la Physique*. CNRS, 2007.

Peter BECKER : History and progress in the accurate determination of the Avogadro constant. *Rep. Prog. Phys.*, 64, November 2001.

Peter BECKER et Michael GLÄSER : Primary mass standard based on atomic masses. *International Journal of Mass Spectrometry*, 251, 2006.

Bernadette BENSAUDE-VINCENT et Catherine KOUNELIS : *Les atomes, une anthologie historique*. Presses Pocket, 1991.

Francesco BERETTA : Doctrine des philosophes, doctrine des théologiens et inquisition romaine au 17<sup>e</sup> siècle : aristotélisme, héliocentrisme, atomisme. In *Vera Doctrina : Zur Begriffsgeschichte der Lehre von Augustinus bis Descartes*. Wiesbaden : Harrassowitz in Kommission, 2009.

Henri BERGSON : *La pensée et le mouvant*. PUF, 1938.

Danielis BERNOULLI : *Hydrodynamica*. Argentorati, 1738. Trad. du latin par Jean Peyroux, Éd. A. Blanchard, 2004.

Horst BETTIN *et al.* : Accurate measurements of the Avogadro and Planck constants by counting silicon atoms. *Ann. Phys. (Berlin)*, June 2013.

Leo BLITZ : Le côté obscur de la voie lactée. *Pour la Science*, n° 410, décembre 2011.

Pierre BOURDIEU : *Science de la science et réflexivité*. Raisons d'agir, 2001.

Jacques BOUVERESSE : Mathématiques, physique et philosophie. Journée du centenaire de la mort de Ludwig Boltzmann (1844-1906). *In La Lettre du Collège de France*, volume n° 19. 2006.

Jacques BOUVERESSE : *Préface de La Terre, des mythes au savoir*. Cassini, 2011.

Jacques BOUVERESSE : Ce que les auteurs infréquentables ont à dire à ceux qui ne veulent pas leur ressembler. *Agone*, 48, 2012.

Jean BRICMONT : Science of chaos or chaos in science. *Physicalia Magazine*, n° 17, 1995. Disponible sur le web.

Stephen G. BRUSH : *The kind of motion we call heat. A history of the kinetic theory of gases in the 19th century*. Physics and the Atomists. North-Holland, 1986.

Christiane CHABAS-BUÈS : *Histoire du concept de mole (1869-1969) : à la croisée des disciplines physique et chimie*. Thèse de doctorat, dépt. de philosophie, Université Paris 10, 1999.

Michel COLETTI : À la recherche d'une démonstration d'une activité clinique spécifique (suite). *Prescrire*, n° 193, mars 1999.

Marie-Neige CORDONNIER : Le mouvement brownien en temps réel. *Pour la science*, n° 393, juillet 2010.

John DALTON : *A new system of chemical philosophy*, volume I. Robert Bickerstaff, 1808.

Richard DAWKINS : *The Greatest Show on Earth : The Evidence for Evolution*. Bantam Press, 2009. Trad. fr. par Marie France Desjeux, *Le plus grand spectacle du monde*, 2010, Robert Laffont.

Philippe DEPONDT : *L'entropie et tout ça : le roman de la thermodynamique*. 2001.

R. D. DESLATTES *et al.* : Avogadro Constant—Corrections to an Earlier Report. *Phys. Rev. Lett.*, 36, 1976.

David DEUTSCH : *The Fabric of Reality*. Penguin Books, 1997. Trad. fr. par F. Balibar, *L'étoffe de la réalité*, Cassini, 2003.

- Denis DIDEROT : *Le rêve de D'Alembert*. Éd. consultée Gallimard, 2008, 1782.
- Bernard DIU : *Les atomes existent-ils vraiment ?* Odile Jacob, 1997.
- Pierre DUHEM : *Le système du monde*, volume III. Hermann, 1913.
- Jean-Baptiste DUMAS : *Leçons sur la philosophie chimique professées au Collège de France*. Gauthier-Villars, 2<sup>nd</sup>e édition, 1878.
- Alain DUMON et Robert LUFT : *Naissance de la chimie structurale*. EDP sciences, 2008.
- Bertrand DUPLANTIER : Le mouvement brownien « divers et ondoyant ». *In Séminaire Poincaré I*. avril 2005.
- Nicolaidis EFTHYMIOS : *Science and eastern orthodoxy*. John Hopkins University Press, 2011.
- Albert EINSTEIN : Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen. *Ann. Phys. (Berlin)*, 17:549–560, 1905.
- Edzard ERNST et Simon SINGH : *Trick or Treatment : Alternative medicine on trial*. Bantam Press, 2008. Trad. fr. par Marcel Blanc, *Médecines douces : info ou intox ?*, 2014, Cassini.
- Egidio FESTA : *Galileo, La lotta per la scienza*. Laterza, 2007.
- Paul FEYERABEND : *Against Method*. New Left Books, 1975. Trad. fr. par B. Jurdant et A. Schlumberger, *Contre la méthode, Esquisse d'une théorie anarchiste de la connaissance*, 1979, Seuil.
- Richard FEYNMAN : *The Strange Theory of Light and Matter*. Penguin Book, 1990.
- Gilles GAUTHIER : Une critique du constructivisme de Bruno Latour. une conception du temps qui confond connaissance et réalité. *Les Cahiers Rationalistes*, (615), 2011.
- Hans GEIGER et Ernest MARSDEN : On a diffuse reflection of the  $\alpha$ -particles. *In Proc. R. Soc. A 31*, volume 82, july 1909.
- Gérard GENEVÈS *et al.* : La balance du watt : vers une nouvelle définition de l'unité de masse ? *Revue française de métrologie*, (9), 2007.
- Stephen Jay GOULD : *Rocks of Ages, Science and Religion in the Fullness of Life*. Ballantine Books, 1999.
- Samuel HAHNEMANN : *Doctrine médicale homéopathique ou organon de l'art de guérir*. J.-B. Baillière, 1834.

Richard Wesley HAMMING : The unreasonable effectiveness of mathematics. *The American Mathematical Monthly*, 87(2), February 1980.

Maurice HANRIOT : *Hypothèse actuelle sur la constitution de la matière*. Germer Baillière, 1880.

Robert M. HAWTHORNE, JR. : Avogadro's number : Early values by Loschmidt and others. *Journal of Chemical Education*, 47(11), 1970.

Werner HEISENBERG : *Physics and Philosophy, The Revolution in Modern Science*. Penguin, 2000. Trad. fr. par J. Hadamard *Physique et philosophie. La science moderne en révolution*, Albin Michel, 1971.

François JACOB : *Le jeu des possibles. Essai sur la diversité du vivant*. Fayard, 1981.

Jules JAMIN : *Cours de physique de l'École Polytechnique*. Gauthier-Villars, 1868.

Jean-Pierre KAHANE : Le mouvement brownien et son histoire, réponses à quelques questions. *In Images des Mathématiques*. CNRS, 2006.

Jean-Pierre KAHANE : Communication privée. 2013.

Didier KAHN : *Alchimie et paracelsisme en France (1567-1625)*. Droz, 2007.

Eugen KAPPLER : Versuche zur Messung der Avogadro-Loschmidt Zahl aus der Brownshen Bewegung einer Drehwaage. *Ann. Phys. (Berlin)*, 11, 1931.

Étienne KLEIN : *Le facteur temps ne sonne jamais deux fois*. Flammarion, 2009.

Étienne KLEIN : Communication privée, 2013. Voir le travail de Heinz Wisman, à paraître.

Hubert KRIVINE : *La Terre, des mythes au savoir*. Cassini, 2011.

Jean-Louis KRIVINE : Wigner, Curry et Howard, La déraisonnable efficacité des mathématiques. *In Exposé au colloque ARCo'04, Sciences cognitives*. Université de Compiègne, Décembre 2004. <http://www.pps.jussieu.fr/~krivine/articles/arco.pdf>.

Henk KUBBINGA : *L'histoire du concept de molécules*. Springer, 2002.

Bruno LATOUR : *Science in action. How to Follow Scientists and Engineers though Society*. Harvard University Press, 1987. Trad. fr. par M. Biezunski, *La science en action*, La découverte, 2005.

Bruno LATOUR : A relativistic account of Einstein's relativity. *Social Studies of Science*, 18, 1988.

Bruno LATOUR : *L'espoir de Pandore, pour une vision réaliste de l'activité scientifique*. La Découverte, 2001.

Bruno LATOUR *et al.* : *Laboratory life : the construction of scientific facts*. Sage Publications, 2005. Trad. fr. par M. Biezunski, *La vie de laboratoire, la production de faits scientifiques*, La Découverte, 1988.

Gottfried Wilhelm LEIBNIZ : 1672. Éd. consulté Gottfried Wilhelm Leibniz, Correspondance avec Thomasius, Vrin, 1993.

Don LINCOLN : Au cœur des quarks. *Pour la Science*, (428), juin 2013.

Johann LOSCHMIDT : Zur grösse der luftmolekule. *Sitzungsberichte der kaiserlichen Akademie der Wissenschaften Wien*, 52, 1865. On the Size of the Air Molecules, trad. publiée in the *Journal of Chemical Education*, Oct. 1995, vol 72, n°10.

Robert LUFT : *Dictionnaire des corps purs simples de la chimie*. IUFM Des Pays De La Loire, 1997.

Claude LÉCAILLE : *L'atome, chimère ou réalité?* Vuibert, 2009.

Jean-Marc LÉVY-LEBLOND : *La science n'est pas l'art*. Hermann, 2010.

Christian MAGNAN : *Le théorème du jardin*. amds-édition, 2011.

Pradip Kr. MAJUMDAR : The Baudha atomism. *Department of Ancient Indian History and Culture*, pages 65–67, June 2002. University of Calcutta.

Karl MARX : *Les différences particulières de la physique chez Démocrite et chez Épicure*. 1841. Éd. consultée, Tome III des Œuvres, Gallimard, La Pléiade, 1982.

Jean-Paul MATHIEU : Histoire de la constante d'Avogadro. *Cahiers d'Histoire et de Philosophie des Sciences*, (9), 1984.

Jean-Paul MATHIEU : Essai sur les modèles d'atomes. *Cahiers d'Histoire et de Philosophie des Sciences*, (12), 1985.

Sylvain MATTON : Note sur quelques critiques oubliées de l'atomisme : À propos de la transsubstantiation eucharistique. *Revue d'histoire des sciences*, 55(2), 2002.

James Clerk MAXWELL : On the dynamical theory of gases. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 157:49–88, 1867.

James Clerk MAXWELL : Adress by J. Clerk Maxwell, LL.D., F.R.S., President of the Section. *Report Brit. Association Adv. Science XL, Math. Phys. Sec*, page 1, 1870.

James Clerk MAXWELL : Molecules. *Nature*, 8, 1873.

- Georges MINOIS : *Histoire de l'athéisme*. Fayard, 1998.
- Alexander MOATTI : *Les indispensables mathématiques et physiques pour tous*. Odile Jacob, 2006.
- Amaury MOUCHET : *L'étrange subtilité quantique, quintessence de poussières*. Dunod, 2010.
- Amaury MOUCHET : *L'élégante efficacité des symétries*. Dunod, 2013.
- Iraj NIKSERESHT : *Démocrite, Platon et la physique des particules élémentaires*. L'Harmattan, 2007.
- Sylvie NONY : *Abu I-Barakat al-Bagdadi : une théorie physique de la variation du mouvement au xii<sup>e</sup> siècle, à Bagdad*. Thèse de doctorat, Université Paris-Diderot Paris 7, décembre 2010.
- Mary Joe NYE : The Question of the atom, from the Karlsruhe congress to the first Solvay Conference, 1860-1911. *In The History of Modern Physics, 1800-1950*, volume 4. Tomash Publishers, Los Angeles- San Francisco édition, 1986.
- Naomi ORESKES et Eric M. CONWAY : *Merchants of Doubt : How a Handful of Scientists Obscured the Truth on Issues from Tobacco Smoke to Global Warming*. Bloomsbury Publishing USA, 2010. Trad fr. par Jacques Treiner, *Les Marchands de doute*, 2012, Le Pommier.
- Philip PEARLE *et al.* : What Brown saw and you can too. *Am. J. Phys.*, 78 (12), December 2010.
- Jean PERRIN : Les hypothèses moléculaire. *La Revue Scientifique*, 4<sup>e</sup> série, XV(15), avril 1901.
- Jean PERRIN : *Les atomes*. Felix Alcan, 1913.
- Jean PIAGET : *Sagesse et illusions de la philosophie*. PUF, 1965.
- Natalie PIGEARD-MICAULT : Wurtz et l'hypothèse atomique. *Pour la Science*, n° 413, 2012.
- Shlomo PINES : *Studies in Islamic Atomism*. The Magnes Press, 1997. trad. de l'al. Michael Schwarz, *Beiträge zur islamischen Atomlehre*, 1936.
- PLATON : *Timée*. env. 360 av. J.-C. Trad. fr. facilement accessible : *Timée – Critias*, Garnier-Flammarion, 1999.
- Henri POINCARÉ : *Science et Méthode*. Flammarion, 1918.
- William PROUT : On the relation between the specific gravities of bodies in their gaseous state and the weights of their atoms. *Annals of Philosophy*, 6, 1815.

- Bernard PULLMAN : *L'atome dans l'histoire de la pensée humaine*. Fayard, 1995.
- Peter. N PUSEY : Brownian motion goes ballistic. *Science*, 332(6031), 2011.
- Pierre RADVANYI : *Histoire de l'atome, de l'intuition à la réalité*. Belin, 2007.
- Jef RASKIN : A reply to Eugene Wigner's paper, "the unreasonable effectiveness of mathematics in the Natural Sciences" and Hamming's essay, "the unreasonable effectiveness of mathematics". *Akadeemia*, (7), 2007.
- Pietro REDONDI : *Galilée hérétique*. Gallimard, 1985.
- Jürgen REN : Einstein's invention of Brownian motion. *Ann. Phys. (Leipzig)*, 14, 2005. Supplement.
- Jean SALEM : *Démocrite*. Vrin, 1996.
- Jean SALEM : *L'atomisme aux xvii<sup>e</sup> et xviii<sup>e</sup> siècles*. Publications de la Sorbonne, 1999.
- Eric SCERRI : *The Periodic Table - A Very Short Introduction*. Oxford University Press, 2011. Trad. fr. par R. Luft *Le tableau périodique - Son histoire et sa signification*, EDP Sciences, 2011.
- Eric SCERRI : Des failles dans le tableau périodique. *Pour la Science*, (432), octobre 2013.
- Daniel SCHWARTZ : Peut-on évaluer les médecines douces? *Sciences Sociales et Santé*, IV(2), juin 1986.
- Aijing SHANG *et al.* : Are the clinical effects of homoeopathy placebo effects? Comparative study of placebo-controlled trials of homoeopathy and allopathy. *The Lancet*, 366, August 2005.
- Alan SOKAL : *Beyond the hoax, Science, Philosophy and Culture*. Oxford University Press, 2008.
- Alan SOKAL : Communication privée. 2013.
- Alan SOKAL et Jean BRICMONT : *Impostures intellectuelles*. Odile Jacob, 1997.
- Jean-Servais STAS : *Œuvres complètes*. Librairie européenne, C. Muquardt, 1894.
- G. Johnstone STONEY : The internal motions of gases compared the motions of waves of light. *Philosophical Magazine*, 36(241), December 1868.
- G. Johnstone STONEY : Of the "Electron," or Atom of Electricity. *Philosophical Magazine*, 38, October 1894.

Charles TANFORD : *Ben Franklin Stilled the Waves : An Informal History of Pouring Oil on Water with Reflections on the Ups and Downs of Scientific Life in General*. Oxford University Press, 2004.

Fabien TARRADE : La découverte du boson de Higgs. *Pour la science*, n° 419, septembre 2012.

René THOM : *Prédire n'est pas expliquer*. Flammarion, 2009.

Jacques TREINER : *Quel âge a la Terre ?* Pommier, 2011.

Bernard VIDAL : *Histoire de la chimie*. PUF, 1985.

Alfred WEGENER : *Die Entstehung der Kontinente und Ozeane*. Vieweg, 1915. Trad. fr. par Armand Lerner, *La genèse des continents et des océans*, Réimp. C. Bourgeois, 1991.

Steven WEINBERG : *Dreams of a final theory*. Pantheon, 1992. Trad. fr. par J. P. Mourlon, *Le rêve d'une théorie ultime*, Odile Jacob, 1997.

S. WEINER : Chemical semantics. *J. Chem. Educ.*, pages 372–375, August 1942.

Eugène WIGNER : The Unreasonable Effectiveness of Mathematics in the Natural Sciences. *Communications in Pure and Applied Mathematics*, 13(1), February 1960.

Adolphe WURTZ : *La théorie atomique*. Alcan, 1886.

## Index

- aberration des étoiles, 102  
Al-Biruni, Abu al-Rayhan, 31  
Al-Razi, Mohammad Ibn Zakariya, 31  
Alembert, Jean Le Rond d', 34  
Ampère, André-Marie, 53  
Anderson, Carl, 98  
Aristote, 15, 28, 30–33, 77, 78, 96, 98, 108, 117  
Autrécourt, Nicolas d', 31  
Averroès, 31  
Avicenne, 31  
Avogadro, Amadeo, 35, 36, 44, 46, 52–57, 60, 75, 82  
Avogadro, loi d', 24, 44, 57
- Bachelard, Gaston, 103  
balance du Watt, 81  
Becquerel, Henri, 97, 112  
Benveniste, Jacques, 75, 76, 119  
Bergson, Henri, 31  
Berkeley, George, 110  
Bernard, Claude, 97, 112  
Bernoulli, Daniel, 35–37, 47  
Berthelot, Marcellin, 52, 115  
Berthollet, Claude Louis, 49, 52, 56  
Berzelius, Jöns Jacob, 57, 59  
Bode, Johann Elerte, 98  
Bohr, Niels Henrik David, 84, 93  
Boltzmann, Ludwig, 35, 36, 41, 43, 71, 84, 91, 121, 122, 126  
bouddhisme, 32  
Bouveresse, Jacques, 16, 111  
Boyle, Robert, 36
- brahisme, 32  
Broglie, Louis Victor de, 84  
Brown, Robert, 62
- Cannizzaro, Stanislao, 35, 60  
Carnot, Nicolas Léonard Sadi, 121  
Casimir, effet, 89  
Charpak, Georges, 76, 119, 120  
Clausius, Rudolf, 37, 44, 45, 121, 122  
clinamen, 27  
Colomb, Christophe, 19, 97  
Comte, Auguste, 39  
Conches, Guillaume de, 30  
Copernic, Nicolas, 59, 78, 92, 98, 102, 108  
Curie, Marie, 85
- Dalton, John, 13, 35, 36, 48–52, 54, 56, 57  
Darwin, Charles, 91, 99  
Dawkins, Richard, 16  
De Clave, Étienne, 33  
De Villon, Antoine, 33  
Démocrite, 27, 30, 32  
Descartes, René, 33, 34  
Deutsch, David, 16  
Diderot, Denis, 33, 34  
Dirac, Paul, 84, 95, 98  
Duhem, Pierre, 38, 39, 85, 108, 115  
Dulong, Pierre-Louis, 58  
Dumas, Jean-Baptiste, 35, 52, 56, 57, 61, 115

Einstein, Albert, 10, 11, 35, 58, 61, 62,  
 69–71, 84, 85, 88, 93–95, 103,  
 113, 126, 127  
 entropie, 40, 43, 44, 120–122  
 Épicure, 27, 30  
  
 falasifa, 31  
 Faraday, Michael, 58  
 Fermi, Enrico, 84  
 Feyerabend, Paul, 115  
 Feynman, Richard, 92  
 Fleischmann, Martin, 75  
 Fleming, Alexander, 97, 98, 112  
 Foucault, pendule de, 102  
 Franklin, Benjamin, 46  
  
 Galilée, Galileo, 14, 33, 59, 78, 82, 97,  
 109, 113, 117  
 Galle, Johann Gottfried, 98  
 Gassendi, Pierre, 33  
 Gaudin, Marc Antoine, 60  
 Gay-Lussac, loi de, 53, 57  
 Gay-Lussac, Louis Joseph, 36, 52, 53,  
 55, 56  
 Gould, Stephen Jay, 94  
 Gouy, Louis-Georges, 69  
  
 Hahnemann, Samuel, 74, 75  
 Hegel, Georg Wilhelm Friedrich, 93  
 Heisenberg, relation d'incertitude de,  
 88  
 Heisenberg, Werner, 84, 93, 112  
 Hertz, Heinrich Rudolf, 98  
 Higgs, boson de, 14, 87, 88, 99, 100  
 hinayana, 32  
 Hooke, Robert, 97  
 Hume, David, 9, 33  
  
 jaïnisme, 32  
  
 kalam, 31, 32  
 Kanada, 32  
 Kant, Emmanuel, 93  
 Kappler, Eugen, 73  
 karaïte, 31  
  
 Kepler, Johannes, 96  
 Krönig, August Karl, 37  
 Kuhn, Thomas Samuel, 92  
  
 Laplace, Pierre-Simon de, 29  
 Latour, Bruno, 17, 19, 100, 105–111,  
 113, 114, 116, 117  
 Lavoisier, Antoine Laurent de, 35, 47,  
 48  
 Le Verrier, Urbain Jean Joseph, 89, 98  
 Lederman, Léon Max, 13  
 Leibniz, Gottfried Wilhelm, 33, 34  
 Leucippe, 27, 30  
 Lorentz, Hendrik Antoon, 85  
 Loschmidt, Johann Josef, 44–46, 82  
 Loschmidt, paradoxe de, 38, 39, 42, 44,  
 90, 92  
 Lucrèce, 27–30, 33  
  
 Mach, Ernst, 38, 39, 115  
 Maïmonide, Moïse, 31  
 Mandelbrot, Benoît, 69  
 Mariotte, Edme, 36  
 matière noire, 89, 104  
 Maxwell, James Clerk, 35–37, 45, 46,  
 83, 84, 95, 98, 105, 107, 113  
 Mendel, Johann Gregor, 99  
 Mendeleïev, Dimitri, 20, 86  
 Mendeleïev, tableau de, 20–22, 86, 92  
 Millikan, Robert Andrews, 36  
 mole, 25, 71, 122, 132  
 Molière, 33, 74  
 monade, 33  
 Musil, Robert, 119  
 Müller, Erwin Wilhelm, 16  
  
 Nagaoka, Hantaro, 83  
 Newton, Isaac, 33, 38, 40, 41, 49, 89, 94,  
 97, 98  
 Nietzsche, Friedrich, 8  
 Noether, Amalie Emmy, 86  
 nombre d'Avogadro, 15, 17, 24–26, 36,  
 42, 44, 47, 61, 69, 71–74, 80–  
 83, 101, 121, 127, 129, 132

Occam, Guillaume d', 31  
 Ørsted, Hans Christian, 97  
 Ostwald, Wilhelm, 38, 40, 85, 109  
  
 Paracelse, 33  
 parallaxe, 102  
 Pascal, Blaise, 33, 34, 75  
 Pauli, Wolfgang Ernst, 84, 98  
 période radioactive, 81  
 Perrin, Jean, 7, 15, 35, 47, 61, 65, 68, 71, 72, 85, 99, 101, 102, 106, 108  
 Petit, Alexis Thérèse, 58  
 phlogistique, 47  
 Piaget, Jean, 93  
 Planck, constante de, 88  
 Planck, Max, 11, 84  
 Platon, 30, 34  
 Poincaré, Henri, 38, 67, 90, 92, 102, 129  
 Poincaré, récurrence de, 38, 39, 42, 70  
 Pons, Stanley, 75  
 Popper, Karl Raimund, 114  
 Proust, Joseph-Louis, 35, 36, 48, 52, 53  
 Prout, William, 57–59  
 Ptolémée, Claude, 19, 92, 98, 102, 108  
  
 Raoult, François-Marie, 47  
 Rayleigh, John William Strutt, 46  
 Riemann, Georg Friedrich Bernhard, 67  
 Rømer, Ole Christensen, 82  
 Russell, Bertrand, 16  
 Rutherford, Ernest, 21, 83, 84, 87, 106  
  
 Schrödinger, Erwin, 84, 92  
 Smoluchowski, Marian, 69  
 Socrate, 30  
 Soddy, Frederick, 21  
 Sokal, Alan, 16  
 Spengler, Oswald, 111  
 Stahl, Georg Ernst, 47  
 Stengers, Isabelle, 108  
 Stoney, George Johnstone, 46, 83  
  
 Thomson, William, 91  
 Tycho Brahé, 57  
  
 vaisheshika-sūtra, 32  
 Valéry, Paul, 119  
 Van Der Waals, Johannes Diderik, 46  
  
 Wegener, Alfred, 57, 102  
 Weierstrass, Karl Theodor Wilhelm, 67  
 Weinberg, Steven, 16, 85, 93  
 Wiener, Christian, 69  
 Wiener, Norbert, 69  
 Wurtz, Charles Adolphe, 35