

LA MATIÈRE

... expliquer du visible compliqué par de l'invisible simple...

Jean Perrin

Les éléments

Atoutes les époques de l'histoire, les hommes ont imaginé l'univers comme constitué d'un nombre limité de constituants fondamentaux. Dans le *Timée*, Platon, à la suite d'Empédocle, considérait que toute matière était formée de quatre éléments : la terre, l'eau, l'air et le feu. Description moins naïve qu'il n'y paraît, si l'on considère ces trois premiers éléments comme symbolisant les solides, les liquides et les gaz ; ce sont justement les trois états de la matière que décrit la première leçon d'un manuel élémentaire de sciences physiques pour les écoliers contemporains.

Les savants et les philosophes, de l'Antiquité jusqu'à la fin du XIX^e siècle, ont été réduits à *imaginer* la nature de la matière ; ce n'est que depuis un peu plus d'un siècle qu'on est passé du stade des hypothèses plus ou moins gratuites à celui des observations et des théories résumant ces observations.

Pour le sens commun, la matière c'est d'abord « quelque chose » qui possède une certaine *étendue*, qui occupe un certain espace, quelque chose qui se voit, qui se touche, qui se sent. Ce n'est pas forcément un objet qui a une certaine forme, puisque les liquides sont déformables, ni même qui a un volume défini, puisque les gaz sont compressibles. C'est aussi toujours quelque chose qui *résiste* à mon corps, lui-même matériel. Ainsi, nous n'avons conscience de l'existence de l'air dans lequel nous vivons que lorsque nous sentons le vent sur notre peau. Que ce soit l'air qui se déplace, ou nous-mêmes qui nous déplaçons dans l'air, il y a donc toujours une nécessité de *mouvement*.

Dans un texte célèbre (2^e Méditation) Descartes nous propose :

Prenons pour exemple ce morceau de cire qui vient d'être tiré de la ruche, il n'a pas encore perdu la douceur du miel qu'il contenait, il retient encore quelque chose de l'odeur des fleurs dont il a été recueilli : sa couleur, sa figure, sa grandeur, sont apparentes : il est dur, il est froid, on le touche, et si vous le frappez, il rendra quelque son.

Ces qualités énumérées par le philosophe sont souvent appelées des « qualités secondes ». Si l'on approche du feu le morceau de cire,

l'odeur s'évanouit, sa couleur se change, sa figure se perd, sa grandeur augmente, il devient liquide...

Bref, il perd toutes les qualités secondes qu'il avait pour en acquérir d'autres ; malgré tout je suis certain qu'il s'agit du même morceau de cire. Pourquoi ? Parce que je suppose que, sous les qualités secondes, il y a quelque chose qui demeure, qui ne change pas, quelque chose qui est doué d'étendue et de mouvement. Ces deux qualités sont « premières », elles soutiennent les qualités secondes et elles sont atteintes par l'entendement et non par les sens.

Si la matière possède une étendue, cela implique que l'on peut la découper, la diviser en parties aussi petites que le permet la précision des instruments ; lorsque le découpage d'une portion de matière n'est plus possible techniquement, on peut toujours le poursuivre par l'esprit et l'on parvient à cette idée que toute matière est divisible à l'infini.

À première vue, les objets matériels semblent être « pleins » : on ne voit aucun vide dans une bille d'acier posée sur une table. Ce fut, pendant longtemps, une idée fondamentale de l'esprit humain que la matière ne comprenait pas de vide.

Ces deux thèses, la divisibilité infinie et la continuité de la matière, ont été répudiées par la science du XX^e siècle : un atome comprend bien plus de « vide » que de « plein », un électron ne peut pas être séparé en composants plus petits.

Des penseurs grecs, deux mille ans avant la naissance de la théorie atomique moderne, avaient cependant déjà forgé la notion d'atome pour désigner les éléments premiers, insécables et indestructibles dont se compose toute réalité. Le terme *a-tome* signifie « qui ne peut pas être découpé ». La tradition voit en Leucippe l'ancêtre mythique de cette théorie au V^e siècle avant J.-C. Nous ne

possédons cependant aucune de ses œuvres à proprement parler et ses idées ont été reprises par Démocrite, de 40 ans son cadet. Ce dernier était un personnage fort célèbre, abondamment décrit par les historiens antiques. Il serait mort à l'âge de 103 ans (entre 366 av. J.-C. et 356 av. J.-C.), après avoir beaucoup étudié et voyagé, peut-être après avoir hérité d'une grande somme d'argent de son père. Selon certains commentateurs anciens, son œuvre égalerait, en ampleur, celle d'Aristote. Épicure (341 av. J.-C.–270 av. J.-C.) reprend la théorie atomique, dans le jardin athénien où il réunit ses disciples. Ce « Jardin d'Épicure » a d'ailleurs fini par désigner sa doctrine. Le Latin Lucrèce (96 av. J.-C.–53 av. J.-C.) contribue lui aussi à diffuser l'atomisme dans le poème *De Rerum Natura* (*De la Nature des choses*).

Les Grecs étaient d'immenses théoriciens mais s'intéressaient fort peu à l'observation et à l'expérimentation. La théorie atomique et la théorie des quatre éléments — parmi d'autres — sont des hypothèses philosophiques qui ne peuvent être départagées. Elles ont le mérite de fournir un cadre conceptuel et un vocabulaire utiles à une approche scientifique ultérieure.

Ce sont les Arabes, en particulier Abu Musar Djabir (VIII^e siècle), appelé aussi Geber, qui prennent au Moyen Âge le relais de la civilisation grecque, qu'ils complètent et transmettent à l'Occident chrétien. Le mot « alchimie » provient de l'arabe *al-kīmiyâ*, et désigne la pierre philosophale. Celle-ci serait le cinquième élément, et devrait permettre la transmutation des métaux, c'est-à-dire la transformation des métaux « vils » comme le plomb en métaux « nobles » comme l'argent ou l'or. Le terme de *chimie* provient lui-même du latin médiéval *chimia*, évolution de *alchemia*. On connaît cependant des pratiques alchimiques beaucoup plus anciennes dans l'Égypte, l'Inde et la Chine. La chimie, science moderne de la constitution et des transformations de la matière, aurait donc été précédé d'une proto-chimie. Cette interprétation, popularisée par Marcellin Berthelot (1827-1907) dans l'esprit positiviste de son époque, laisse pourtant de côté tout l'aspect spirituel et symboliste de l'alchimie. Quoi qu'il en soit, le laboratoire chimique doit beaucoup à l'alchimie, qui a inventé nombre d'instruments et de techniques (bain-marie, distillation, acides sulfurique et nitrique, médicaments).

Robert Boyle, physicien et chimiste irlandais (1627-1691), consacre son immense fortune à l'avancement des sciences expérimentales. Il introduit en 1661 la notion

moderne de *corps simple* dont tous les autres sont composés. Pour atteindre définitivement le concept d'élément, il faut cependant attendre l'œuvre décisive de Lavoisier (1743-1794).

Mesurer la matière

Toute activité scientifique sérieuse se doit d'être quantitative. Les hommes n'ont pas attendu le XVIII^e siècle pour mesurer la matière. Dès le début de l'ère historique — et probablement avant — ils ont pesé des métaux pour pratiquer le commerce. L'évaluation de la quantité de matière devient plus difficile lorsqu'il s'agit, non pas de comparer deux blocs d'or ou d'argent, mais de comparer deux substances différentes : certains de nos contemporains ont du mal à concevoir qu'un kilo de plumes pèse comme un kilo de plomb.

Dans ce domaine, Archimède (287 av. J.-C.–212 av. J.-C.) peut être considéré comme un précurseur : le premier, il résout le problème consistant à mesurer la quantité de matière d'un des composants d'un mélange. Le roi l'avait chargé de déjouer les fraudeurs qui fondaient de l'argent ou du plomb avec l'or des bijoux qu'ils lui offraient. Archimède mesure par immersion dans l'eau le volume d'une couronne et compare sa masse volumique avec celle de l'or pur. La légende l'a immortalisé surgissant de sa baignoire et courant nu dans les rues en criant *Eureka!* (« J'ai trouvé! »). Il fut tué par un soldat romain pendant la prise de Syracuse car, absorbé par un problème, il ne lui répondit pas assez vite.

Au XVII^e siècle, les chimistes et physiciens anglais s'intéressent beaucoup à l'air et aux gaz en général. Boyle perfectionne la machine pneumatique d'Otto von Guericke et découvre, avant Mariotte, la loi de compressibilité des gaz. Ces travaux préparent ceux du fondateur de la chimie moderne, Antoine Laurent de Lavoisier (1743-1794).

Au XVII^e siècle, le plus grand problème était celui relatif à la nature de la chaleur et de la combustion. La théorie en vogue à l'époque était que la chaleur était constituée d'un fluide, le *phlogistique*, substance incolore, inodore et impondérable qui était dégagée par les corps lors de la combustion. L'expérience que réalise Lavoisier en 1777 est la plus célèbre de toute la chimie : il chauffe du mercure dans un vase clos en présence d'air et constate que la masse totale est conservée. Il peut ainsi faire l'analyse de l'air, puis reconstituer ce dernier à partir

de ses composants. Il nomme une partie de l'air oxygène (du grec «générateur d'acide») et l'autre azote («sans vie»). En introduisant l'usage systématique de la balance et en comptabilisant soigneusement les gaz absorbés ou produits, il montre que la masse est toujours conservée au cours d'une réaction chimique. Cette loi de Lavoisier :

... car rien ne se crée, ni dans les opérations de l'art, ni dans celles de la nature, et l'on peut poser en principe que, dans toute opération, il y a une égale quantité de matière avant et après l'opération...

pose la véritable définition opérationnelle de la matière : la matière est ce que l'on peut peser, ce qui a une masse.

En 1776 Henry Cavendish (1731-1810) isole l'hydrogène, qui était déjà connu des alchimistes sous le nom d'«air inflammable». Lavoisier montre, avec Laplace, que l'eau est obtenue par la combustion de l'hydrogène. La *Méthode de nomenclature chimique* (1787), fruit d'un travail commun de Lavoisier, Berthollet, Fourcroy et Guyton de Morveau, conçoit un système de noms encore en usage aujourd'hui.

Lavoisier, en plus de ses nombreux travaux scientifiques, participe à la vie politique de son temps et est nommé fermier général c'est-à-dire collecteur d'impôts. Cette source de revenus sera la cause de sa perte : le 24 novembre 1793, la Convention décrète l'arrestation de tous les fermiers généraux. Lavoisier se constitue prisonnier et demande un sursis pour terminer une expérience. «La République n'a pas besoin de savants», lui répond le juge. Le 8 mai 1794, il est guillotiné. Son épouse et collaboratrice, Marie-Anne Pierrette Paulze, épousée à l'âge de 13 ans, avait dessiné toutes les planches de son traité de chimie et traduit en français diverses publications anglaises. Elle fait publier ses mémoires inachevés et épouse en 1804 le physicien américain Benjamin Thompson.

La Révolution française commet des crimes, mais l'humanité lui est redevable de réformes qui traversent les siècles : le 7 avril 1795 est décidé l'unification des poids et mesures régionales de l'Ancien Régime. Tout système de mesure a besoin d'un étalon, le plus précis possible. Le gramme est initialement défini comme la masse d'un centimètre cube d'eau à la température de 4 °C (c'est la température où l'eau est la plus dense). Puis, le 22 juin 1799, un cylindre d'un kilogramme en platine, métal supposé inaltérable, est déposé aux Archives de France. C'est alors la définition légale de l'unité de masse. D'abord limité à la

France, le système métrique devient bientôt le système international (SI). En 1889, le kilogramme des Archives est remplacé par un autre cylindre, un alliage de platine et d'iridium, placé au Bureau international des poids et mesures, à Sèvres. Il est conservé sous trois cloches de verre scellées, d'où il n'est extrait que pour réaliser de rarissimes étalonnages.

L'unité de masse est la seule du système SI qui dépende d'un objet matériel : le mètre et la seconde sont en effet définis aujourd'hui par des vibrations atomiques, qui peuvent être reproduites par n'importe quel laboratoire équipé d'une horloge atomique. S'il arrive quelque chose au Pavillon de Breteuil qui abrite le kilogramme étalon, on doit se reposer sur des copies de ce kilogramme. Ceci n'est évidemment pas satisfaisant, pour le principe tout d'abord, mais aussi parce que le cylindre peut être altéré à la longue par les manipulations ou la contamination. Il est probable que l'unité de masse sera, comme celles de temps et de longueur, redéfinie par un dispositif expérimental très précis basé sur un paramètre atomique.

Le poids de la Lune

La balance est donc l'instrument le plus courant pour mesurer une masse de matière. Ce n'est cependant pas le plus fondamental. Pour s'en convaincre, observons un film où des cosmonautes évoluent dans leur station spatiale, en orbite autour de la Terre. Ils sont en apesanteur, ils ne pèsent rien, et une balance ne leur serait d'aucune utilité. C'est que la balance utilisée habituellement par un chimiste, celle qui a un plateau sur lequel on pose l'objet à mesurer et un autre où l'on rétablit l'équilibre en posant différentes masses marquées, procède indirectement. Cet instrument mesure en fait deux *poids*, c'est-à-dire deux forces d'attraction que la Terre exerce sur les deux masses à comparer.

Isaac Newton (1642-1727) est l'auteur d'une des plus grandes contributions de la science de tous les temps. Ses travaux sur la mécanique sont rassemblés dans un ouvrage publié en 1687, *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, l'ouvrage de physique le plus important écrit par un homme seul. Avant lui, on distinguait une mécanique terrestre, celle de Galilée, et une mécanique céleste, celle de Kepler : les deux semblaient soumises à des lois différentes. Sur la Terre, les objets sont attirés vers le bas, c'est-à-dire vers le centre de la Terre puisqu'on sait

depuis les Grecs que la Terre est ronde. Ils tombent. À moins qu'ils ne flottent ou montent, mais dans ce cas c'est simplement qu'ils sont plongés dans un milieu moins dense : leur poids est inférieur à celui du fluide qu'ils déplaceraient vers le haut s'ils tombaient (théorème d'Archimède). Dans le ciel, au contraire, tout est ordonné et stable, les étoiles sont apparemment fixes et les autres astres, Lune et planètes, décrivent des trajectoires parfaitement prévisibles et immuables. La Terre elle-même a d'ailleurs le même statut que les autres planètes depuis la révolution de Copernic : elle tourne autour du Soleil. Ces trajectoires sont bien décrites par trois lois énoncées par Kepler entre 1604 et 1618. Kepler utilise pour établir sa loi les observations très précises de Tycho Brahé. Ce dernier est un Danois fort riche qui possède une île près de Copenhague et y fait construire les meilleurs instruments de l'époque.

Tout le monde a vu une pomme tomber, mais un seul homme a énoncé la loi de la gravitation universelle ! Qu'importe l'anecdote, à laquelle il faut probablement accorder le même degré de défiance qu'à celle de la baignoire d'Archimède. Ce qui est important, c'est la question posée : si la pomme tombe, pourquoi la Lune ne tombe-t-elle pas sur la Terre ? Justement, dit Newton, elle tombe ! Elle est attirée par la Terre, comme n'importe quel objet de notre environnement terrestre, mais comme elle possède une grande vitesse horizontale et qu'elle est située très haut, elle se « rattrape » (figure 1). Finalement on peut comprendre pourquoi sa trajectoire autour de la Terre est à peu près circulaire. C'est là que le génie mathématique de Newton intervient : il imagine une loi générale qui s'applique non seulement à la pesanteur terrestre, à la Lune, mais encore au mouvement de toutes les planètes autour du Soleil. Six planètes sont connues à son époque, Terre comprise. Cette loi s'énonce alors ainsi : tous les corps exercent entre eux une force proportionnelle à leur masse et inversement proportionnelle au carré de leur distance.

L'histoire de la découverte de la loi de la gravitation illustre de façon parfaite quels sont les ingrédients nécessaires au progrès scientifique. Une idée simple, mais discutable, celle de l'héliocentrisme (Copernic). Des observations minutieuses, nuits après nuits, après avoir construit ce que la technique peut offrir de plus pointu (Tycho Brahé). Une analyse rigoureuse des résultats en les comparant avec l'idée de base, pour en tirer des lois empiriques aussi simples que possible (Képler). Enfin, une hypothèse théorique qui explique ces lois empiriques, tout

en étant capable de prédire quantitativement des phénomènes nouveaux non encore observés (Newton). Le tour de force de Newton est la première unification de la physique. Ce génie est largement reconnu par ses contemporains, quoique les relations avec certains d'entre eux fussent particulièrement injustes, comme en témoignent ses disputes acharnées contre l'astronome John Flamsteed ou le philosophe et mathématicien Gotfried Leibniz.

On peut donc comparer deux masses quelconques sur la Terre avec une balance. En effet l'attraction terrestre est identique puisque les deux plateaux de la balance sont à la même distance du centre de la Terre. On pourrait d'ailleurs faire aussi cette mesure sur la Lune, les poids seraient six fois plus faibles, mais resteraient égaux. La gravitation est *universelle*, mais implique-t-elle nécessairement un corps de grande masse comme une planète ? Deux choses quelconques s'attirent-elles vraiment l'une l'autre ? Pour le vérifier, Cavendish, qui est physicien autant que chimiste construit en 1798 un appareil très sensible, appelé balance de torsion (figure 2). Il suspend une tringle portant deux boules à un fil de quartz très fin. De part et d'autre des deux boules, il place deux autres grosses boules de plomb. L'attraction entre ces boules provoque une torsion du fil, très légère car la force gravitationnelle est en fait très faible. Cavendish dit qu'ainsi il « pèse la Terre ». Plus précisément, il compare l'attraction de la Terre — la pesanteur — avec celle produite par une masse connue, celle des boules. Incidemment il mesure aussi la masse du Soleil et de tout le reste dans l'univers, grâce aux lois de Kepler.

Un siècle auparavant, un autre géant de la science se rend célèbre grâce à des expériences menées avec des boules : Galileo Galilei, dit Galilée (1564-1642). Il fait tomber deux boules de masse ou de matière différente du haut de la tour de Pise. Si les deux boules sont assez lourdes, c'est-à-dire si la résistance de l'air ne perturbe pas trop leur mouvement, les deux boules atteignent le sol en même temps : la chute des corps est universelle. On savait intuitivement qu'un corps en chute libre tombe de plus en plus vite. Galilée montre que la vitesse augmente proportionnellement au temps : dix mètres par seconde la première seconde, 20 mètres la deuxième seconde, 30 la troisième et ainsi de suite. Avec Galilée, la physique devient une science expérimentale, et surtout quantitative. Dans une déclaration célèbre, il affirme que le monde est mathématique. Il est probable que les expériences de Galilée sont plutôt réalisées avec des plans inclinés car la mesure de la chute du haut de la tour de Pise est imprécise. En passant