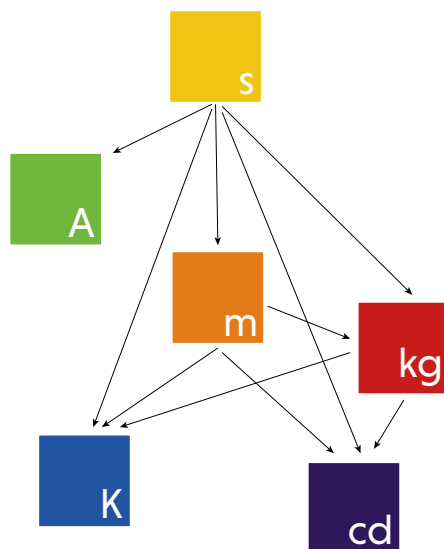


Dans le nouveau système international, toutes les unités de base, hormis la mole (non représentée), dépendent de la seconde : le mètre, par exemple, dépend d'une constante fondamentale, la vitesse de la lumière, c , et de la seconde. Il en va de même pour les autres unités du système international, car toutes sont dérivées de ces unités de base : le newton est le kilogramme mètre par seconde carrée, le joule est le newton mètre, le coulomb est l'ampère seconde, etc. Le physicien allemand Carl Friedrich Gauss a amorcé la construction de ce système en rapportant une grandeur physique, la force, à un ensemble d'unités de base et non plus à une unité propre de même nature.



➤ la constante, et par là de la première définition du mètre – le quart de la dix millionième partie du méridien terrestre, mesuré dans les années 1790 par les astronomes Jean-Baptiste Delambre et Pierre Méchain. Cette dépendance est essentielle pour maintenir la continuité historique des résultats expérimentaux ; les résultats obtenus dans l'ancien système demeurent ainsi valables dans le nouveau. Le même procédé servira à redéfinir les autres unités. Ainsi, après avoir été déterminée expérimentalement dans les unités actuelles du système international, la constante de Planck sera fixée sans incertitude à la valeur $h = 6,62607015$ kilogrammes mètres carrés par seconde, et cette valeur servira à déterminer en retour, sur la base des unités existantes du mètre et de la seconde, la « taille » de l'unité de masse, c'est-à-dire la nouvelle définition du kilogramme.

Ces explications soulèvent bien des questions. Comment comprendre le rôle des constantes fondamentales dans ce processus de redéfinition ? Le geste de fixer leur valeur ne constitue-t-il qu'une convention ou comporte-t-il une signification et des conséquences épistémiques plus profondes ? Que recouvre au juste l'inversion sur laquelle repose la redéfinition ?

Déjà à la fin du XIX^e siècle, le physicien irlandais George Stoney, puis Max Planck en 1900, avaient rêvé de mettre en place un système « naturel » d'unités fondé sur des constantes fondamentales. La réforme du système international n'a toutefois vraiment pu être envisagée qu'avec l'élaboration et la maîtrise, toute récente, d'expériences permettant de mesurer les constantes fondamentales avec une exactitude satisfaisante. Mais si les développements scientifiques et techniques du XX^e siècle sont bien au cœur de la réforme, le principe de la redéfinition des unités du système international participe, quant à lui, d'un procédé très ancien

qui gouverne à la fois le regroupement des unités en systèmes d'unités reliées entre elles et un travail de reconfiguration des concepts de la physique entérinant progressivement l'évolution de nos connaissances sur le monde au cours de l'histoire. L'exemple du concept d'aire illustre la façon dont ces deux processus s'articulent (voir l'encadré page ci-contre).

Ce procédé de redéfinition des unités a commencé à se déployer avec l'ébauche du système métrique, qui visait à promouvoir, dans le sillage de la Révolution française, un système d'unités communes « à tous les temps, à tous les peuples ». C'est en effet sur le fond de l'adoption du mètre, du kilogramme et de la seconde que Joseph Fourier a pu passer, dans sa *Théorie analytique de la chaleur* (1822), des équations abstraites de la mécanique rationnelle du XVIII^e siècle, dont les expressions, dites abrégées, étaient juste des relations de proportion réduites en équations (voir l'encadré ci-contre), à de véritables équations mathématiques entre mesures, faisant intervenir des constantes physiques susceptibles d'avoir la même signification pour tous.

Aussi n'est-ce qu'à partir du XIX^e siècle que les physiciens ont pu se mettre à mesurer des « constantes physiques » – qu'il s'agisse de constantes renvoyant à la propriété d'un système physique donné, variables de l'un à l'autre comme la masse volumique de telle substance, ou de constantes universelles valables pour tous les systèmes – et que l'activité de mesure de précision a pris son essor.

LE TOUR DE FORCE DE GAUSS

La mesure de la constante de la gravitation universelle G est l'un des innombrables fruits de cette « avalanche de nombres », comme la nomme l'épistémologue canadien Ian Hacking. C'est en effet fort tardivement, au cours du XIX^e siècle, que cette constante fut explicitement dégagée. Il fallait pour cela que la deuxième loi de Newton, qui exprimait au départ une simple proportionnalité entre force et variation de la quantité de mouvement, fût tout d'abord écrite sous la forme que nous connaissons : celle de l'équation fondamentale de la dynamique $F = MA$ liant la force F appliquée, la masse M du mobile et son accélération A .

L'histoire de cette réécriture est complexe. Mais si l'on s'en tient à l'étape décisive, accomplie par Carl Friedrich Gauss au début du XIX^e siècle, l'on peut voir dans cette équation entre grandeurs l'aboutissement d'un procédé analogue à celui que nous avons décrit pour l'aire. Gauss a cessé de considérer la force comme une grandeur indépendante, mesurée relativement à une unité propre de même nature (par exemple, le kilogramme-force), pour en faire une grandeur dérivée, définie à partir de la masse et de l'accélération, et dont l'unité devint

DES ÉQUATIONS SANS RÉALITÉ TANGIBLE

Au XVIII^e siècle, les lois de la mécanique rationnelle, énoncées sous forme de phrases, furent transcrites en équations. Mais la signification de ces équations demeurait fort abstraite, car il n'existait pas encore d'unités communes à tous les usagers :

« Il y a, dans la géométrie nouvelle, des expressions abrégées qui peuvent d'abord embarrasser ; par exemple celle-ci : la masse du Soleil étant supposée S , la force qu'il exerce à la distance r , sur une planète quelconque, est S/r^2 : il s'agit d'une force attractive, et on la suppose égale à une masse S divisée par le carré d'une distance ; or les forces, les masses et les distances sont des choses hétérogènes et de nature fort différente. On peut demander comment il peut y avoir égalité entre des choses si disparates. »

Jérôme Lalande, *Astronomie*, 1792

➤ le kilogramme mètre par seconde carrée. Ce faisant, Gauss a mis fin à plus d'un siècle de débats sur la nature de la force: en devenant une simple grandeur dérivée, la force a perdu son caractère métaphysique de cause du mouvement.

C'est à partir de cette nouvelle conception de la force et de sa mesure que l'on écrit l'équation qui exprime la loi de gravitation universelle. L'équation numérique qui lie la mesure de la force d'attraction entre deux corps – c'est-à-dire désormais la mesure de MA (en kilogrammes mètres par seconde carrée) –, la mesure des masses m et m' des deux corps en présence et celle de la distance R qui les sépare détermine un coefficient numérique de proportionnalité entre les mesures qui se trouve être le même pour tous les systèmes mécaniques. Comme dans l'exemple de l'aire, on passe de l'équation empirique entre mesures à la loi de gravitation universelle entre grandeurs, $F = G mm'/R^2$, en faisant de ce coefficient numérique une constante fondamentale dimensionnée, la constante de la gravitation universelle G , mesurée en mètres cubes par kilogramme et par seconde carrée.

Gauss, puis Wilhelm Eduard Weber et James Clerk Maxwell à sa suite, ont étendu ce processus aux grandeurs de l'électricité et du magnétisme qui constituaient jusqu'alors un domaine complètement indépendant de la mécanique. D'une part, ils ont lancé la redéfinition de l'ensemble des grandeurs physiques à partir de leurs relations empiriques avec les grandeurs mécaniques dès lors que ces relations étaient admises comme lois. Et, d'autre part, simultanément, ils ont commencé à mettre en place un système d'unités reliant en un vaste réseau les unités dérivées des grandeurs physiques aux unités de base de la mécanique. Ces dernières étaient encore, à

l'époque, définies de façon indépendante par un artéfact naturel ou artificiel (le méridien terrestre, puis le mètre des Archives pour la longueur, le kilogramme étalon pour la masse, la rotation de la Terre pour le temps). L'ensemble des concepts de la physique fut ainsi reconfiguré en termes «dynamiques». C'est en ce sens que l'on parle au XIX^e siècle d'une description mécanique de la nature.

LE STATUT DES CONSTANTES, TÉMOIN DE L'ÉTAT DE NOS CONNAISSANCES

Cependant, cette disposition à apparaître ou disparaître, semble-t-il à notre gré, lors du passage des relations de proportion aux équations entre mesures, puis aux équations entre grandeurs, donne aux constantes universelles un caractère passablement déconcertant. Comme le soulignait dans les années 1960 le physicien espagnol Julio Palacios dans son *Analyse dimensionnelle*, les constantes universelles apparaissent dans les lois physiques sans avoir été ni qualitativement ni quantitativement définies au préalable; elles ne désignent ni des attributs des corps, qui seraient variables de l'un à l'autre, ni des grandeurs physiques, car elles se présentent toujours avec la même valeur; et leur existence même apparaît de surcroît précaire puisqu'elles semblent dépendre du choix conventionnel de nos unités. Comment pourraient-elles représenter des propriétés invariantes caractéristiques de l'espace, de la matière ou de l'Univers?

Ces remarques cessent d'être déconcertantes si, au lieu d'envisager les constantes fondamentales dans une perspective ontologique, l'on prend acte, à la suite de Jean-Marc Lévy-Leblond, de leur évolution au cours de l'histoire. En 1977, ce physicien a proposé une

Au cours de l'histoire, les constantes fondamentales (ici la constante de Planck, h , la vitesse de la lumière, c et la constante de la gravitation universelle, G) jouent le rôle de synthétiseurs de concepts. D'abord juste des constantes spécifiques caractérisant un système physique particulier (en jaune), elles deviennent des constantes génériques caractérisant une classe générale de phénomènes (en bleu), puis des constantes universelles qui interviennent dans les lois fondamentales de la physique (en vert), et enfin des constantes de référence dont la valeur numérique est fixée et sert à définir une unité (en rose).

