

classification des constantes physiques qui met en exergue leur rôle épistémologique dans le développement de notre connaissance de la nature (voir la figure page ci-contre). L'itinéraire de la constante c illustre bien le destin d'une constante physique, qui est de gravir les échelons de cette classification, pour finalement être assimilée à une simple constante de conversion.



Avec la relativité restreinte, la vitesse de la lumière a atteint le stade ultime des constantes



La constante c fut tout d'abord introduite comme une constante spécifique, caractérisant l'une des propriétés d'une entité physique particulière: la lumière. Elle est devenue une constante générique lorsque les travaux de Maxwell ont montré que cette propriété caractérisait toute une classe de phénomènes: c est la vitesse dans le vide de l'ensemble des ondes électromagnétiques. Enfin, elle a acquis le statut de constante universelle avec la relativité restreinte, qui en a fait une constante caractéristique de la structure de l'espace-temps, liée à l'invariance des lois de la physique lorsque l'on passe d'un référentiel galiléen à un autre. C'est alors seulement que la constante c a pu atteindre le stade ultime de la classification: la valeur de c , jusqu'alors déterminée par l'expérience, a été fixée sans incertitude.

Comme le souligne Jean-Marc Lévy-Leblond, et comme dans l'exemple de l'aire, ce geste synthétise plusieurs concepts, ici ceux d'espace et de temps, combinés dans l'expression de l'intervalle d'espace-temps: $(\Delta s)^2 = c^2(\Delta t)^2 - (\Delta l)^2$. Les grandeurs d'espace et de temps cessent d'avoir une signification objective lorsqu'on les prend séparément; l'objectivité est attachée à leur combinaison au sein de l'intervalle d'espace-temps, seul à être invariant par changement de référentiel galiléen.

Cette synthèse se traduit par une redéfinition de l'unité de longueur: c'est à partir de la forme prise par l'intervalle d'espace-temps pour les ondes électromagnétiques, $\Delta l = c\Delta t$, que l'on a redéfini le mètre, en 1983, à l'aide de l'unité de temps et de la valeur, devenue fixe, de c . De la

même manière, la réforme imminente du système international consacra, en fixant k , la constante de Boltzmann, la synthèse des concepts de température et d'énergie. Et la constante de Planck, h , une fois fixée en conjonction avec c , entérinera un principe de la physique quantique – la dualité onde-corpuscule – selon lequel tous les objets physiques présentent à la fois des propriétés d'ondes et de corpuscules.

La valeur de c a été gelée à partir de sa valeur expérimentale, mesurée dans le système d'unités en vigueur avant la redéfinition, et non pas prise égale à un, comme dans l'exemple de l'aire, et comme le font souvent les théoriciens – un tel choix eût exigé la conversion de toutes les mesures de longueur effectuées avant la redéfinition. Les valeurs «commodes» des constantes choisies, que ce soit pour la redéfinition du mètre, ou celles, imminentes, de la masse, de la température, de l'ampère et de la mole, sont celles qui assurent la continuité avec les mesures antérieures.

PUIS LES CONSTANTES S'ÉVANOUISSENT

La constante c (et bientôt, avec elle, les constantes k et h) prend ainsi le chemin d'autres constantes qui ont aujourd'hui sombré dans l'oubli, comme la constante mécanique de la chaleur J . Initialement déterminée par l'expérience, cette constante liait au XIX^e siècle le travail mécanique et la chaleur. Vers la fin du XIX^e siècle, elle est devenue une simple constante de conversion entre les joules et les calories (1 calorie = 4,18 joules), entérinant l'idée que la chaleur n'est qu'une forme d'énergie: ainsi reconnaît-on que deux grandeurs, initialement tenues pour être de nature différente, renvoient en fait à la même réalité physique. Une multitude de constantes fondamentales, rendues désuètes par l'unification progressive des concepts physiques, ont ainsi été enfouies et rendues invisibles dans la trame de la physique telle qu'elle se présente à nous aujourd'hui.

Mais comment s'opèrent ces reconfigurations? On pourrait croire qu'elles découlent en quelque sorte naturellement du déploiement interne de la science et sont entérinées par une sorte de *fiat*. Mais, pour peu qu'on les regarde de près, ces processus révèlent au contraire la complexité des activités pratiques mises en œuvre au cours de l'histoire pour stabiliser l'écheveau des avancées empiriques dans un corps de connaissances et d'actions communes.

La redéfinition des unités engage des opérations de nature très différente. Mesurer la valeur d'une constante dans des unités déjà établies et redéfinir l'une de ces unités après avoir fixé la valeur de la constante ne sont pas du tout des tâches symétriques. La première relève de ➤

➤ l'expérimentateur, la seconde du métrologue. Elles ne s'inscrivent dans aucune circularité; de fait, la valeur de la constante qui est fixée et utilisée dans la redéfinition d'une unité n'est pas une valeur obtenue par la mesure! Voyons cela de plus près.

Le travail expérimental a de multiples facettes. Certains expérimentateurs utilisent les constantes physiques sans chercher à les mesurer. Par exemple, ils testent des modèles ou des théories en comparant la valeur d'une grandeur obtenue dans le modèle testé, calculée en utilisant des constantes physiques adéquates – et en particulier des constantes fondamentales disponibles dans des tables – à la valeur de cette même grandeur mesurée dans leur expérience. D'autres, en revanche, cherchent à mesurer avec la meilleure exactitude possible certaines quantités ou constantes physiques de manière à constituer les tables de valeurs utilisées par les expérimentateurs engagés dans la validation des modèles et des théories. Il s'agit par exemple de mesurer h , la constante de Planck, avec la meilleure exactitude possible.

DE L'EXPLORATEUR AU MÉTROLOGUE

Ce type de travail relève de l'exploration, car il engage une confrontation directe à la nature. Ces expérimentateurs cherchent à ajuster leur résultat au monde sans être guidés par une attente, sans savoir ce qu'ils «devraient» obtenir. Aussi leur résultat est-il irrémédiablement affecté d'une incertitude qu'ils s'efforcent d'évaluer, mais qui reste toujours susceptible d'être entachée d'une erreur systématique inconnue. Et, de fait, des désaccords apparaissent entre les résultats des différents laboratoires qui mesurent la même grandeur ou la même constante. Mais alors, comment choisir les valeurs qui figureront dans les tables de constantes physiques?

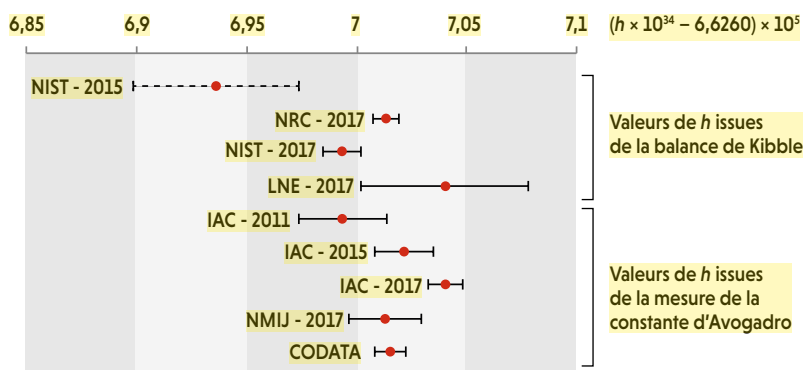
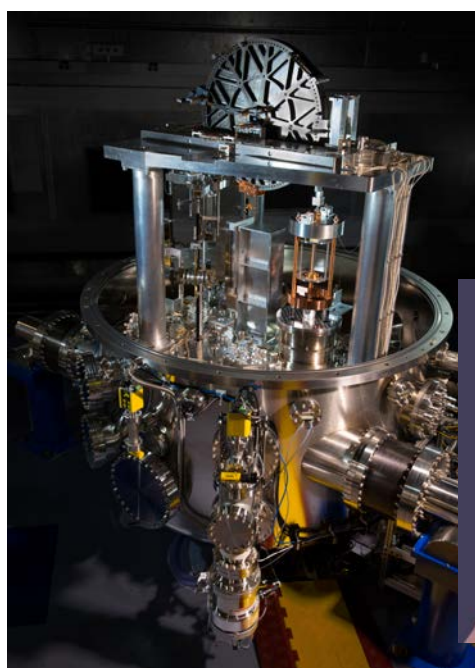
C'est simple: ces valeurs ne sont pas directement établies à partir des résultats de mesure obtenus dans les laboratoires, pas plus que celles destinées à tenir lieu de référence dans le cadre de la réforme du système international! Ces tables sont constituées par un travail métrologique qu'effectue un comité international de physiciens et de métrologues, le Committee on data for science and technology (Codata), créé en 1966. Ce comité rassemble les résultats expérimentaux «exploratoires» issus des laboratoires les plus avancés dans le monde. Ces laboratoires fournissent soit directement les valeurs des constantes cherchées, soit, plus généralement, des mesures expérimentales à partir desquelles on déduit les constantes cherchées en utilisant des relations théoriques admises.

Dans tous les cas, les valeurs des constantes physiques fondamentales peuvent être obtenues

par plusieurs voies distinctes qui mobilisent des principes de mesure et des domaines de la physique fort différents. Ainsi, certains laboratoires obtiennent leur valeur de la constante de Planck en comparant la force de pesanteur à une force électromagnétique dont la mesure est reliée à la constante de Planck – une expérience dite de la balance de Kibble. Mais d'autres déduisent leur valeur de cette même constante en évaluant le nombre d'atomes dans une sphère parfaite de silicium pur à l'aide de mesures du volume de la sphère et de la maille de sa structure cristalline. Ce nombre leur fournit une estimation du nombre d'Avogadro, dont ils déduisent une valeur de la constante de Planck à l'aide d'une équation faisant intervenir diverses autres constantes physiques comme la vitesse de la lumière et la masse de l'électron (voir la figure ci-dessous).

En général, d'une méthode à l'autre, d'un laboratoire à l'autre, les valeurs issues de ces différentes voies, accompagnées de leur incertitude de mesure, ne sont guère compatibles: l'on obtient plusieurs valeurs pour chaque constante. Le travail du Codata consiste à prendre en

Ces dernières années, plusieurs laboratoires ont fourni une valeur pour h , la constante de Planck, en utilisant soit une balance de Kibble (à gauche celle de l'Institut américain des normes et de la technologie ou NIST), soit une mesure du nombre d'Avogadro à partir d'une sphère de silicium (à droite). La valeur qui a été choisie par le Codata est un ajustement à partir des valeurs qu'il a retenues après délibération, soit toutes celles indiquées, sauf celle en pointillé (en bas).



BIBLIOGRAPHIE

T. Folger, **Vers une redéfinition du kilogramme**, *Pour la Science*, n° 473, pp. 62-69, mars 2017.

R. Davis, « **Le nouveau kilogramme sera plus pratique** », *Pour la Science*, n° 473, pp. 70-71, mars 2017.

T. J. Quinn, **From Artefacts to Atoms. The BIPM and the Search for Ultimate Measurement Standards**, Oxford university press, 2012.

J.-P. Uzan et R. Lehoucq, **Les Constantes fondamentales**, Belin, 2005.

J.-M. Lévy-Leblond, **On the conceptual nature of the physical constants**, *La Rivista del Nuovo Cimento*, vol. 7(2), pp. 187-214, 1977.
En français : <https://bit.ly/2QnQd5g>

ET LA SECONDE ?

Toutes les unités du système international (hormis la mole) vont bientôt toutes découler d'une seule unité, la seconde. Mais la définition de celle-ci, fondée sur les propriétés d'un atome, reste tributaire de nos connaissances actuelles. Pour l'instant, on ne sait pas mesurer G , la constante fondamentale de la gravitation, avec une précision suffisante pour redéfinir la seconde à partir de cette constante. Mais d'autres pistes sont à l'étude...

compte ces désaccords en déterminant, sur la base des résultats expérimentaux disponibles, la meilleure estimation possible de chaque constante. Or ce travail met en œuvre une rationalité non seulement théorique, mais aussi pratique. Confrontés à des résultats expérimentaux qui ne s'accordent pas entre eux, obtenus par une pluralité d'agents humains, les membres du Codata doivent tout d'abord passer par une phase de délibération.

Cette délibération est fondée sur un examen critique de la qualité des différentes expériences et des incertitudes qui accompagnent leurs résultats. Certes, les considérations scientifiques y sont au premier plan, mais pas seulement. Le Codata doit en effet arbitrer entre plusieurs objectifs concurrents : comment traiter les discordances ? Que faire des valeurs isolées ? Faut-il opter pour le consensus et retenir toutes les valeurs, quitte à élargir l'incertitude du résultat ? Ou plutôt réduire les incertitudes et s'exposer au dissensus et à l'erreur en écartant les valeurs discordantes ? Le conflit ne peut être tranché par la seule raison théorique, car il appelle à établir une hiérarchie entre des valeurs humaines. La délibération comporte donc nécessairement des aspects subjectifs et politiques. C'est seulement à l'issue de cette étape délibérative que commence la phase d'estimation calculatoire, où l'on déduit des résultats expérimentaux retenus la valeur de la constante, en appliquant une méthode d'ajustement de type méthode des moindres carrés.

Dans ce travail d'ajustement, l'objectif des métrologues du Codata est à l'opposé de celui des expérimentateurs qui testent les théories et des explorateurs : lorsqu'ils testent des théories, les expérimentateurs s'efforcent d'ajuster celles-ci au monde pour le décrire. Les explorateurs cherchent eux aussi à ajuster leurs valeurs au monde dans un but descriptif. Tandis que les métrologues imposent à des constantes de satisfaire les relations que dictent les théories admises, et ajustent ainsi au contraire les valeurs numériques des constantes aux théories existantes. L'objectif des métrologues du Codata est non pas de décrire la réalité, mais de fournir à tous les agents de par le monde des repères communs visant à régler leurs activités de manière à ce que les expériences, les actions et les décisions qu'ils sont susceptibles d'élaborer de façon indépendante s'accordent et soient compatibles. Par là, ils s'assurent en même temps de la cohérence de nos théories entre elles. Ainsi, l'ajustement mis en œuvre dans le processus d'estimation revêt-il une fonction pratique de coordination, et non pas une fonction descriptive attachée au monde tel qu'il est.

Cependant, la table des valeurs « recommandées » des constantes fondamentales est provisoire : le Codata la révisé tous les quatre

ans afin de tenir compte des avancées théoriques et expérimentales. Il en ira tout autrement pour les valeurs des constantes h , k , e et N_A dont le Codata a annoncé les valeurs lors d'une séance extraordinaire en septembre 2017 : ces valeurs sont désormais fixées, sans incertitude, et serviront, après la ratification définitive de la réforme lors de la Conférence générale des poids et mesures, du 13 au 16 novembre 2018, à redéfinir les unités de masse, de température, de courant électrique et de quantité de matière.

Le travail d'ajustement se prolonge ainsi par un travail normatif, un acte législatif qui participe de l'édiction d'une norme. Là encore, la démarche est opposée à celle des expérimentateurs qui testent les théories : ici, le monde est appelé à s'ajuster aux normes – non pas certes le monde réel muet, indépendant de nous, mais le monde conceptualisé, mis en forme, dans lequel se déploie l'action humaine, résultat d'un travail tout à la fois normatif, expérimental et institutionnel ; le monde social et technique construit par nous et dans lequel nous pouvons organiser et coordonner nos actions.

DEUX VISIONS, DEUX MONDES

Finalement, la réforme du système international articule deux directions d'ajustement, l'une théorique, l'autre pratique, dont la conjugaison éclaire le processus de développement de nos connaissances. D'un côté, les expérimentateurs explorateurs cherchent à s'ajuster au monde. Ils font des erreurs systématiques inassignables puisque nous sommes tous dans l'ignorance du monde réel. De l'autre, les métrologues transforment, par un travail spécifique, les tentatives de description des explorateurs en directives auxquelles devra se conformer le monde technique et social humain afin que les usagers puissent y coordonner leurs actions.

Les deux types d'ajustement ne sont pas étanches. D'un côté, l'explorateur se laisse inévitablement guider par les résultats des autres, et pas seulement par le monde réel. Ses nouveaux résultats de mesure ont ainsi tendance à se rapprocher de ceux déjà obtenus du simple fait qu'il a connaissance des résultats antérieurs. Cet effet nuit à la recherche des erreurs systématiques inconnues en masquant les désaccords qui auraient pu surgir entre les résultats. D'un autre côté, les actions des usagers, toutes charpentées qu'elles soient par l'infrastructure du monde humain construit, sont néanmoins bel et bien plongées dans le monde réel et sont toujours susceptibles de mettre au jour un écart irréductible au monde tenu pour vrai.

C'est ainsi que du nouveau, de l'inédit, peut jaillir, telle une étincelle, du frottement entre les deux mondes, jamais parfaitement ajustés l'un à l'autre. ■