

Mesures: le grand renversement

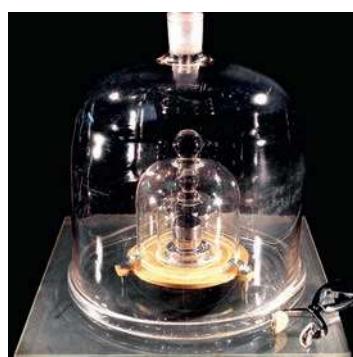
Matière ► Sociétés

Du 13 au 16 novembre 2018 à Versailles, les unités de base du Système international seront toutes redéfinies en référence à sept constantes physiques dont la valeur exacte sera alors définitivement fixée. Retour sur les raisons et les enjeux d'une réforme attendue depuis 30 ans et qui devrait entrer en vigueur en mai 2019.

UN DOSSIER RÉALISÉ PAR MATHIEU GROUSSON ET YAROSLAV PIGENET

'univers de la métrologie s'apprête à vivre une véritable révolution. Dans quelques mois, le « grand K » ou prototype international du kilogramme (PIK), ce cylindre de platine iridié conservé au Bureau international des poids et mesures (BIPM), à Sèvres – qui depuis 1889 définit l'unité de masse – prendra sa retraite. Le vieil étalon cédera alors sa place à une nouvelle définition du kilogramme, formulée à partir de la constante de Planck de la physique quantique. C'est en tout cas ce que devrait acter la Conférence générale des poids et mesures (CGPM) lors de sa 26^e réunion qui se tiendra du 13 au 16 novembre 2018 à Versailles.

Ce n'est pas tout : simultanément, la vénérable institution en profitera pour redéfinir trois autres des sept unités¹ que compte le Système international, le fameux SI, également à partir de constantes fondamentales. Et pour l'ensemble, une définition explicitement fondée sur ces dernières sera adoptée. De quoi conférer aux unités de base un caractère réellement pérenne et universel : la fin d'un long processus de mise en cohérence sans précédent dans l'histoire de la métrologie.



© BIPM

Le « grand K », étalon matériel du kilogramme, conservé sous trois cloches de verre à Sèvres (Hauts-de-Seine), sera bientôt remplacé par une constante de la physique, immatérielle.

Des unités devenues imprécises

À l'évidence, il était temps d'y mettre bon ordre. « Toutes les définitions des unités étaient plus ou moins devenues pathologiques », lâche simplement Marc Himbert, du Conservatoire national des arts et métiers (Cnam). Qu'on en juge : alors que science et industrie sont entrées dans l'ère du nano-monde, la totalité des références de masse sur la planète sont aujourd'hui étalonnées à partir d'un artefact dont la masse a lentement varié d'environ 50 microgrammes par rapport à celle de ses copies. Sans compter que, comme le fait remarquer François Nez, du Laboratoire Kastler-Brossel (LKB)², « imaginez que l'on fasse tomber l'étalon de masse, c'en serait alors fini du kilogramme ! » Et de proche en proche, des unités qui en dépendent, tels le newton, le joule ou le watt.

Quant au kelvin, l'unité de température, il est actuellement défini comme une fraction de la température thermodynamique du point triple de l'eau – où l'eau coexiste à l'équilibre sous les trois phases : solide, liquide et vapeur. Or, cette définition dépend de la qualité de l'eau (impuretés, composition isotopique...) utilisée pour la mettre en œuvre. Du reste, liée à une température particulière, elle est peu adaptée à la ...

¹ Le mètre, le kilogramme, la seconde, l'ampère, le kelvin, la mole et la candela. ² Unité CNRS/ENS/UPMC/Collège de France.

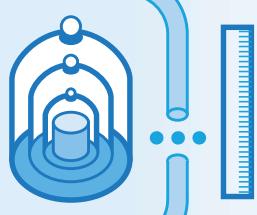
Chronologie du Système international d'unités (SI)

1795

Adoption définitive par la Convention du **système métrique décimal**, à visée universelle. Son usage devient obligatoire sur tout le territoire français.

1799

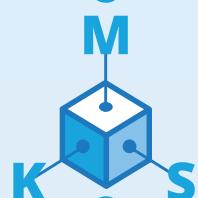
Les premiers étalons du **mètre** et du **kilogramme**, réalisés en platine, sont déposés aux Archives nationales de France.

**1875**

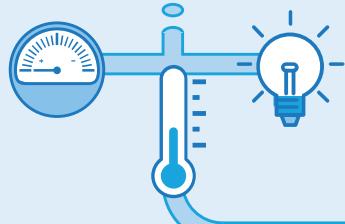
20 mai : la **Convention du mètre** est signée par 17 pays. Ce traité, toujours en vigueur, crée le **Bureau international des poids et mesures** (BIPM), une organisation intergouvernementale permanente permettant aux États membres d'avoir une action commune sur toutes les questions se rapportant aux unités de mesure.

1889

La première **Conférence générale des poids et mesures** (CGPM) définit la seconde astronomique et adopte de nouveaux étalons pour le mètre et le kilogramme. On parle de **système MKS** (**mètre**, **kilogramme**, **seconde**).

**1954**

La 10^e CGPM approuve l'introduction de l'**ampère**, du **kelvin** et de la **candela** comme unités de base, respectivement pour le courant électrique, la température et l'intensité lumineuse.

**1960**

La 11^e CGPM institue le **Système international d'unités** (SI), qui définit alors **six unités de base**, les unités qui en sont dérivées, ainsi que les règles d'utilisation des **préfixes** (**centi-, kilo-, mega-, etc.**) et les conventions d'écriture qui leur sont associées.



© P. STROPPA/LEADER

... mesure des températures inférieures à 20 kelvins (-253,15 °C) ou supérieures à 1 300 kelvins (1 026,85 °C).

Et que dire de l'ampère, l'unité de courant électrique, définie à partir de la force mécanique entre deux fils infiniment longs, séparés d'un mètre, dans lesquels circule un courant ?! Cela fait plusieurs décennies que les professionnels de l'électricité l'ont en pratique troquée contre une définition impliquant des processus quantiques.

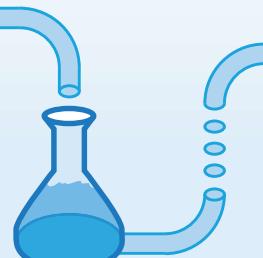
Comme le résume Marc Himbert, « nous faisions face à un quadruple problème de cohérence, de pérennité, d'universalité et de précision ». Soit les quatre critères qui dictent les travaux de la CGPM depuis son instauration, en 1875, lors de la signature de la « Convention du

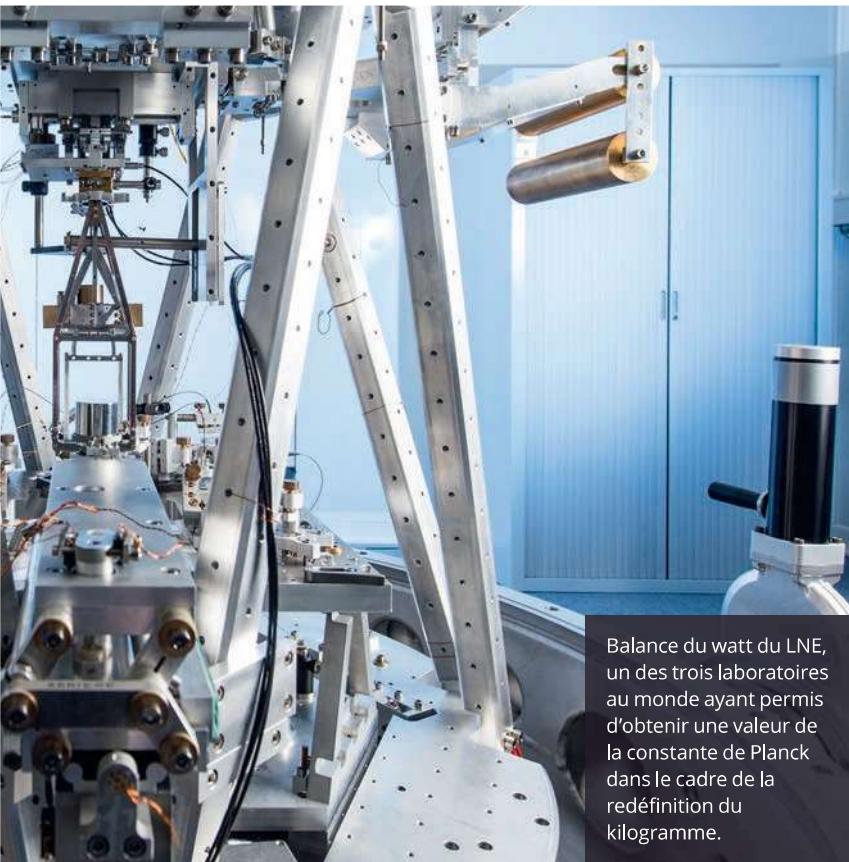
1967

La 13^e CGPM abolit l'ancienne définition astronomique de la **seconde**, fixée à 1/86400 d'un jour moyen, par une **définition quantique** plus précise fondée sur la transition entre deux niveaux d'énergie d'un atome de **césium 133**.

1971

La 14^e CGPM approuve l'introduction de la **mole** comme unité de base pour la quantité de matière.





mètre³ », rien moins que le plus ancien traité international aujourd'hui en vigueur.

Un idéal d'universalité

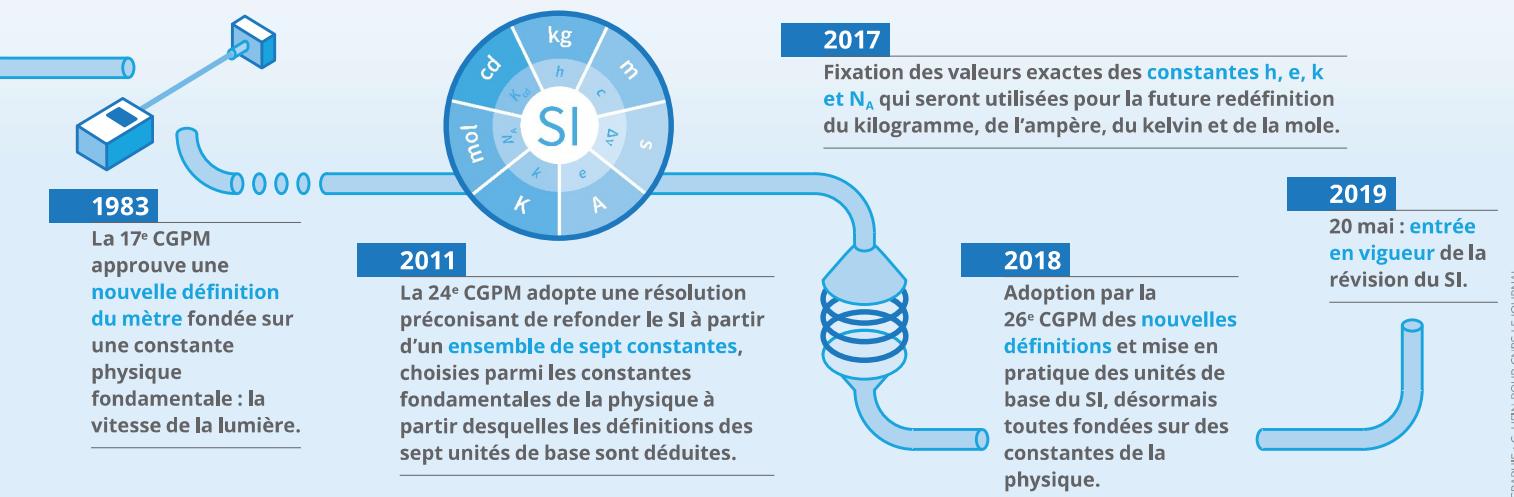
Comme l'explique Matthias Dörries, aux Archives Henri-Poincaré⁴, à l'université de Strasbourg, « *dans le courant du xixe siècle, à la faveur de la révolution industrielle et de l'émergence d'un vaste marché international, les grandes nations ont pris conscience de la nécessité de mettre en place un système de normes communes* ». D'un mot, il s'agit alors d'assurer qu'un kilogramme de sucre est bien le même à Paris, à New York ou à Londres. Tout comme aujourd'hui, l'objectif était d'établir une

Il s'agit d'assurer qu'un kilogramme de sucre est bien le même à Paris, à New York et à Londres.

confiance dans les mesures, seule à même d'élaborer sur une base fiable savoirs scientifiques, décisions politiques et échanges commerciaux.

En plus de ces considérations pratiques, la normalisation des unités de mesure est également portée par l'idéal d'universalité du siècle précédent, incarné en particulier par la Révolution française. En 1791, l'Assemblée constituante décide de définir « *une unité qui ne renferme ni d'arbitraire ni de particulier à la situation d'aucun peuple sur le globe* ». Proclamation à l'origine de l'épopée scientifique des deux astronomes Delambre et Méchain qui, pendant sept ans, mesureront une fraction du méridien de Paris, entre Dunkerque et Barcelone, d'où ils déduiront la longueur d'un mètre, jetant les bases du système métrique, ancêtre du SI. Une formidable aventure où, jusqu'aujourd'hui, s'articulent science fondamentale, technologie et politique.

C'est ainsi qu'en 2011, la CGPM prenait acte de l'intention du Comité international des poids et mesures (CIPM)⁵ de proposer une révision du SI, et adoptait en 2014 une résolution sur sa révision à venir. Le principe de cette dernière ? Refonder le SI sur ce que la physique offre aujourd'hui de plus universel et de plus intangible : les constantes fondamentales, en particulier celles de la mécanique quantique – physique de l'infiniment petit –, où la régularité des phénomènes, de même que leur précision, offrent des références à nulle autre pareilles. ...



3. Consultable sur le site : www.bipm.org 4. Unité CNRS/Univ. de Strasbourg/Univ. de Lorraine. 5. Sous l'autorité de la CGPM, le CIPM dirige et supervise les activités du BIPM.

Le kilogramme nouveau est arrivé

ANCIENNE DÉFINITION

adoptée à la première réunion de la CGPM en 1889

“ Le kilogramme est l’unité de masse ; il est égal à la masse du prototype international du kilogramme. ”



Pèse par définition
1 kilogramme



h est mesurée à partir du prototype international du kilogramme (PIK) au moyen d’une balance de Kibble.

h

Le 20 mai 2019, un kilogramme pèsera toujours un kilogramme, mais celui-ci ne sera plus défini par rapport à un prototype matériel pesant par définition exactement un kilogramme, mais par rapport à la valeur exacte désormais fixée de la constante de Planck (h).

NOUVELLE DÉFINITION

devant être adoptée à la 26^e réunion de la CGPM en octobre 2018

“ Le kilogramme (kg) est l’unité de masse du SI. Il est défini en prenant la valeur numérique fixée de la constante de Planck (h) égale à $6,626\,070\,15 \times 10^{-34}$ lorsqu’elle est exprimée en J.s, unité égale à $\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$, le mètre et la seconde étant définis en fonction de c et $\Delta\nu_{\text{Cs}}^6$. ”



Vaut exactement
 $6,62607015 \times 10^{-34}$ J.s



Un étalon du kilogramme est réalisé à partir de h au moyen d’une balance de Kibble.

... « Le moteur du changement en cours est assurément l’émergence de la mécanique quantique dans l’univers de la métrologie », confirme Christian Bordé, président du Comité science et métrologie de l’Académie des sciences.

Le sacre de la mécanique quantique

Concrètement, la mécanique quantique fait son entrée dans le SI en 1967, avec la redéfinition de la seconde en référence à la fréquence de transition de deux niveaux de l’atome de césum. Puis, en 1983, le mètre devient la longueur parcourue par la lumière en une fraction de seconde, unité qui se déduit donc de la réalisation de la seconde et d’une valeur fixée pour la vitesse de la lumière. La réforme en cours s’inscrit dans cette perspective.

Ainsi, le kilogramme sera bientôt redéfini à partir de la constante de Planck, h (voir infographie ci-dessus). Celle-ci est en effet le produit d’une énergie par un temps, et l’énergie est reliée à la masse via l’équation $E = mc^2$. Pour sa part, le kelvin sera redéfini à partir de la constante de Boltzmann (k), liée à la mesure de l’agitation thermique des constituants fondamentaux d’un corps. Quant à l’ampère, qui n’est autre qu’une charge par unité de temps, il sera relié à la charge élémentaire (e). Enfin, la mole, l’unité de quantité de matière, sera définie directement en fixant la constante – ou nombre – d’Avogadro (N_A).

CGPM CONFÉRENCE GÉNÉRALE DES POIDS ET MESURES

Elle rassemble tous les 4 à 6 ans des délégués représentant chacun des 59 pays membres. Cet organisme est chargé de débattre sur – et d’éventuellement soutenir – les modifications du SI proposées par le CIPM.

Pour en arriver là, les experts internationaux ont souposé de nombreux critères. Quelle est la façon la plus cohérente de définir les unités au vu des connaissances en physique fondamentale ? Est-il possible de réaliser physiquement les définitions envisagées ? Comment, ensuite, utiliser ces réalisations pour disséminer les unités auprès des utilisateurs ? Par exemple, dans le cas de l’ampère, une partie de la discussion a porté sur le fait de savoir s’il fallait définir celui-ci à partir de la permittivité diélectrique du vide ou bien de la charge élémentaire. « La première possibilité était plutôt défendue par les opticiens et les physiciens des milieux dilués, la seconde par ceux de la matière condensée, détaille Marc Himbert. In fine, c’est cette dernière qui l’a emporté dans la mesure où elle est plus conforme à la façon dont les électriques mesurent effectivement un courant électrique. » Illustration du fait qu’en matière de métrologie, les questions pratiques ont un poids au moins équivalent à celui des considérations fondamentales.

Tout changer... pour que rien ne change

Si tel est bien le cas, faut-il s’attendre à des bouleversements instantanés ? « Très clairement, non », indique Marc Himbert. Et pour une raison simple : tout a été fait pour assurer une continuité maximale entre l’ancien et

“Le GPS aurait été quasi impossible à développer sans la redéfinition du mètre, en 1983.”

le nouveau système. En effet, les valeurs des constantes fondamentales participant à la définition du nouveau SI ont pu être fixées une bonne fois pour toutes après avoir été mesurées très précisément – donc avec une très faible incertitude – selon les anciennes définitions. L'incertitude de la mesure porte donc désormais sur les anciens étalons de référence.

Dans ce cas, quel est l'intérêt de changer de références ? Tout simplement parce qu'une fois le kelvin fondé sur une constante fondamentale, sa définition n'impliquera plus aucune température particulière, évitant très concrètement la propagation d'erreurs dans l'étalonnage des thermomètres au fur et à mesure que l'on s'éloigne du point triple de l'eau. Idem avec le kilogramme, qui désormais ne fera plus aucune référence à un étalon matériel. Etc.

Ainsi, « les premiers bénéficiaires du nouveau kelvin devraient être les industries concernées par les hautes températures », analyse Marc Himbert. Ce qui n'est pas rien. En effet, « 60 % des capteurs présents dans l'industrie sont des capteurs de température », précise le métrologue. Mais aussi les laboratoires de recherche fondamentale, concernés par les très basses températures, de même que par les propriétés de la matière aux échelles les plus fines. Avec des conséquences impossibles à anticiper. Par exemple, « le GPS aurait été quasi impossible à développer sans la redéfinition du mètre, en 1983. Mais celle-ci ne le préfigure aucunement », souligne Marc Himbert.

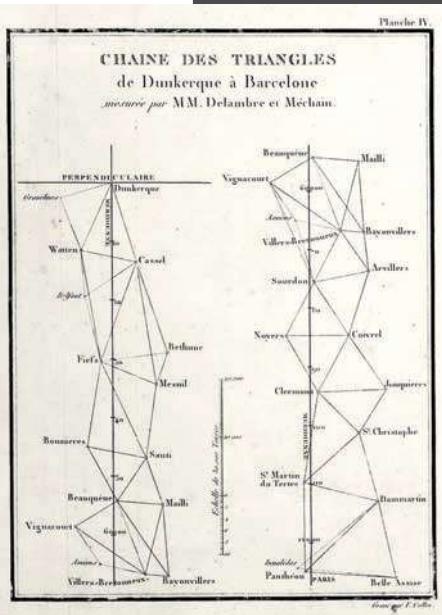
Une réforme pour renouveler la confiance

Au-delà, « le nouveau SI renouvellera notre confiance dans les unités fondamentales et leur caractère universel », ajoute Christian Bordé. Sans pour autant éviter ici ou là quelques résistances. « Il a fallu une génération pour que s'impose le système métrique via l'école, rappelle Matthias Dörries. Et pour certaines applications, on compte encore en douzaines ! » Et pas seulement sur les marchés.

Ainsi, le 23 septembre 1999, la sonde Mars Climat Orbiter s'est écrasée sur Mars. En cause, un logiciel de vol exprimant la poussée des micropropulseurs en unités de mesure anglo-saxonnes, quand celui de l'équipe de navigation qui recevait ces données pour calculer les corrections de trajectoire les exprimait dans les unités du système métrique... Or, fait remarquer Marc Himbert, « si elle est édifiante, cette anecdote ne met pas en cause le SI, mais l'usage qu'en fait ».

Quoi qu'il en soit, le nouveau SI, fondé sur la physique la plus fondamentale, sera-t-il l'ultime système d'unités ? Rien n'est moins sûr. Pour de nombreux scientifiques, la candela, unité d'intensité lumineuse, n'a rien à y faire. « La candela n'a aucun caractère fondamental, admet Marc Himbert. Pour autant, elle est très importante pour l'industrie de l'éclairage, avec de réels enjeux ...

© SOURCE GALlica.BN/F/observatoire de Paris



Les métamorphoses du mètre

Tout comme le kilogramme, l'ampère, le kelvin ou la mole, le mètre et la seconde changeront de définition à l'occasion de la 26^e réunion de la CGPM. Toutefois, cette redéfinition du mètre sera plus superficielle que celle du kilogramme : elle ne consistera qu'à expliciter la constante physique sur laquelle est construite l'unité de longueur, en l'occurrence c , la vitesse de la lumière dans le vide. Ainsi, le mètre était jusqu'ici défini comme « la longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière pendant une durée de $1/299\ 792\ 458$ de seconde ». À partir de 2019, entrera en vigueur une définition rigoureusement équivalente, mais dite à constante explicite, où le mètre sera « défini en prenant la valeur numérique fixée de la vitesse de la lumière dans le vide, c , égale à $299\ 792\ 458$ lorsqu'elle est exprimée en m/s, la seconde étant définie en fonction de $\Delta\nu_{Cs^*}$ ».

Défini dès 1791 comme le dix millionième de la longueur du méridien passant par Paris, le mètre fut mesuré avec précision par les astronomes Delambre et Méchain. C'est à partir de cette définition qu'a été réalisé le premier étalon matériel du mètre.

Le mètre a aussi été la première unité à être redéfinie à partir d'une constante physique atomique. En effet, avant de se baser sur la vitesse de la lumière (fixée en 1983), le CGPM avait abandonné dès 1960 toute référence à l'étalon-mètre construit en 1889 et défini le mètre par

sous la Révolution française, les astronomes Delambre et Méchain mesurèrent, grâce à la triangulation, une portion du méridien de Paris, d'où ils tirèrent la valeur du mètre.

rapport à la « longueur d'onde dans le vide de la radiation correspondant à la transition entre les niveaux $2p_{10}$ et $5d_5$ de l'atome de krypton 86 ».

6. J.s = joule seconde ; c = vitesse de la lumière ; $\Delta\nu_{Cs}$ = fréquence de la transition hyperfine de l'état fondamental de l'atome de césum.

“Le nouveau SI renouvelera notre confiance dans les unités fondamentales et leur caractère universel.”

... économiques, de sécurité et de santé. » Idem pour la mole, définie à partir du nombre d'atomes contenus dans un gramme de carbone 12 et qui, selon certains, n'aurait pas plus de signification que la douzaine pour les œufs, tout en étant pourtant très utilisée pour toute la chimie et ses applications.

Mais ce n'est pas tout. D'aucuns font remarquer que la seconde reste tributaire des propriétés d'un atome particulier, le césium. « Sur le papier, il faudrait introduire G , la constante fondamentale de la gravitation, dans le SI, afin de définir la seconde. C'est ce qu'il y a de plus naturel pour un physicien », plaide Christian Bordé, avant

d'ajouter : « Sauf qu'il n'existe aujourd'hui aucune façon de mesurer G avec la précision requise. » À l'inverse, la définition en vigueur permet une incertitude relative de 10^{-16} , ce qu'aucune autre unité ne peut revendiquer, avec pour conséquence de placer la seconde au sommet de tout l'édifice du SI. « Si vous avez une belle définition, mais impossible à réaliser, ça n'a aucun sens, argumente Noël Dimarcq, du laboratoire Systèmes de référence temps-espaces⁷. La force de la définition de la seconde, c'est aujourd'hui sa précision. » Sans compter que l'unité de temps est actuellement la seule que l'on puisse transférer d'un point à un autre du globe par satellite ou fibre optique.

« Au mieux, le SI reflète la connaissance que l'on a de la physique sur les plans fondamental et expérimental à un moment donné », résume François Nez. « De ce point de vue, le nouveau système est le meilleur dont on puisse aujourd'hui se doter », conclut Christian Bordé. Ce qui justifie aisément d'en finir avec le « grand K ». ■ M. G.

Sept constantes pour tout mesurer

Le futur SI sera le système d'unités selon lequel les valeurs des sept constantes physiques suivantes seront fixées exactement. Les unités hertz (Hz), joule (J), coulomb (C), lumen (lm) et watt (W) sont reliées aux unités seconde (s), mètre (m), kilogramme (kg) ampère (A), kelvin (K), mole (mol) et candela (cd) représentées ici :



7. Unité CNRS/Observatoire de Paris/UPMC/LNE.

En rattachant explicitement toutes les unités de base à des constantes fondamentales, la future réforme du SI parachèvera l'objectif d'universalité et de stabilité des mesures des inventeurs du système métrique. Mais sur quoi au juste repose ce lien entre mesures, unités et constantes ?

De l'importance des constantes

En physique, comme dans la vie quotidienne, mesurer revient à déterminer le rapport entre deux quantités de même nature dont l'une – supposée constante – fait office d'étalement ou d'unité. Le corps humain a longtemps fourni des étalons pratiques et toujours disponibles pour, par exemple, mesurer en pieds, en pouces ou en coudées, la distance entre deux objets. L'ennui avec ce genre d'étalement est que si tout le monde a un pied, tout le monde n'a pas la même pointure. Pour rendre fiables et comparables les mesures, mais aussi faciliter les échanges, il faut assurer un minimum de constance... On a donc fini par adopter des étalons de longueur basés sur un pied invariant, connu et reconnu par le plus grand nombre – en l'occurrence, en France, celui du roi. Le défaut majeur de ce système était que selon le pays, la région ou même l'époque, l'étalement pied n'était pas le même : le pied romain était plus court que le pied anglais, lui-même moins grand que le pied de roi français. Le problème était d'ailleurs le même avec les unités de poids et de volume, qui elles aussi reposaient sur des étalons anthropomorphiques tels que la livre ou la poignée. Avec l'essor des sciences et des échanges internationaux, le besoin d'unités plus précises et plus universelles s'est fait de plus en plus sentir tout au long du siècle des Lumières.

Du système royal à la mécanique quantique

Les révolutionnaires français, qui comptaient parmi eux de nombreux scientifiques et qui venaient de couper la tête de Louis XVI, ont donc dans la foulée aboli le pied du roi. Près de 800 unités alors en usage sur le territoire ont été remplacées par un tout nouveau système d'unités



décimales : mètre, kilogramme et seconde. Celles-ci ne se référaient plus à des étalons anthropomorphiques, mais pour la première fois à des valeurs astronomiques mesurées précisément et que l'on considérait alors comme constantes, naturelles et universelles telles la durée d'un jour terrestre ou la longueur d'un méridien. Depuis, le système métrique a connu de multiples évolutions et redéfinitions, mais il s'est toujours, même indirectement, fondé sur des constantes physiques. « Un système d'unités est une construction humaine et les définitions du SI se ...

... sont donc à l'origine appuyées sur la physique classique. Les changements successifs de définition ont découlé de la volonté d'utiliser des mesures plus stables et plus fondamentales, accompagnant ainsi les progrès de la physique », explique Jean-Philippe Uzan, physicien à l'Institut d'astrophysique de Paris¹. Pas étonnant dès lors que la future révision du SI fasse la part belle aux constantes issues de la mécanique quantique et de la relativité.

Des unités nées des constantes

La redéfinition des sept unités de base reposera donc sur une formulation à constante explicite, c'est-à-dire une définition dans laquelle l'unité est définie indirectement en donnant une valeur exacte à une constante fondamentale reconnue. « Nous définissons comme constante fondamentale d'une théorie physique tout paramètre dont cette théorie ne peut prédire la valeur », précise Jean-Philippe Uzan. Cette valeur ne peut donc être obtenue qu'empiriquement, par une mesure. Les progrès de l'instrumentation ont d'ores et déjà permis des mesures suffisamment précises pour que l'on décide d'établir conventionnellement des valeurs exactes pour certaines d'entre elles. Ainsi, après la valeur de c , la vitesse de la lumière, fixée depuis 1983, c'est au tour de h , la constante de Planck, de e , la charge électrique de l'électron, de k , la constante de Boltzman et de N_A , la constante d'Avogadro, d'être désormais gravées dans les tables du SI.

La CGPM a ainsi fourni une feuille de route très détaillée sur la manière dont les différentes constantes fondamentales impliquées dans le nouveau SI devraient être remesurées², avant de fixer leurs valeurs numériques de manière définitive. Par exemple, pour la constante de

“Les constantes permettent l'émergence de nouveaux concepts.”

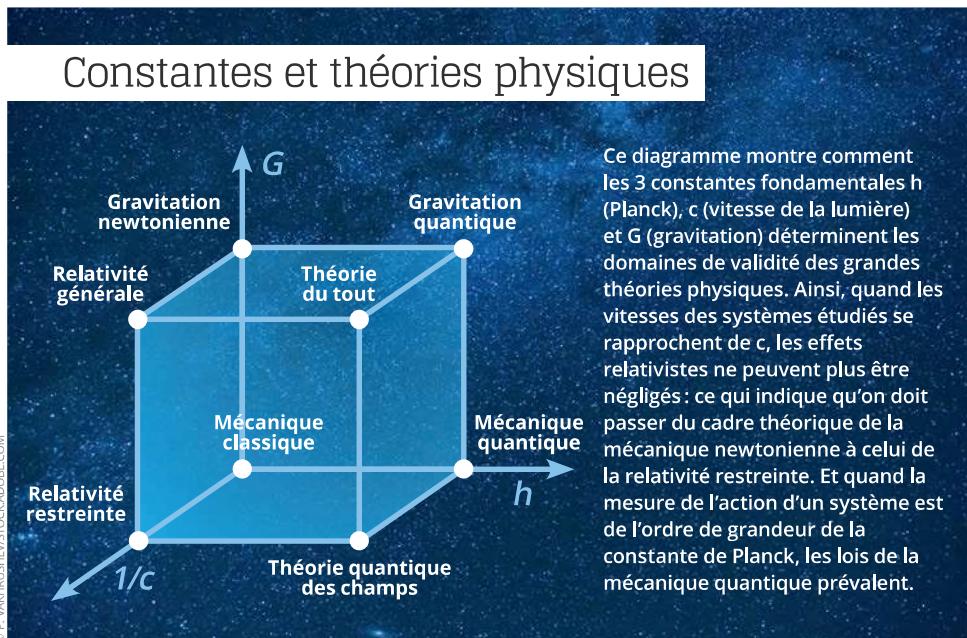
Planck, la Conférence a exigé deux méthodes indépendantes, chacune mise en œuvre dans plusieurs laboratoires de métrologie à travers le monde. La première est fondée sur une balance de Kibble (dite aussi balance du watt), qui permet d'équilibrer des masses avec des forces électromagnétiques. La seconde consiste à compter les atomes d'une sphère de silicium de 10 centimètres de diamètre pour définir la constante d'Avogadro, puis en déduire une valeur de la constante de Planck en utilisant d'autres constantes fondamentales connues.

Réaliser les unités

Là encore, les discussions ont été tendues. « Les deux méthodes ne donnent pas exactement le même résultat. Du coup, certains auraient préféré retarder un peu l'échéance pour adopter le nouveau système », relève Christian Bordé. Pour autant, « les différentes mesures sont toutes dans les marges d'erreur fixées par le Comité consultatif des masses et des grandeurs associées », précise François Nez. Une façon de dire qu'il faut bien finir par trancher.

Pour la petite histoire, c'est une équipe française du Laboratoire commun de métrologie LNE-Cnam qui a fourni la valeur de la constante de Boltzmann (k) avec l'incertitude relative la plus faible, soit $0,57 \times 10^{-6}$, inférieure d'un facteur trois à l'état de l'art antérieur. Si bien que la valeur obtenue par les physiciens français contribuera pour 55 % de la valeur de k , qui sera *in fine* gravée dans le marbre. Par ailleurs, la France contribue à la valeur de h grâce à la balance de Kibble du Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE) de Trappes, et la mesure d'autres constantes fondamentales au Laboratoire Kastler-Brossel.

Précisément, ces ajustements fins sont l'œuvre du Comité des données pour la science et la technologie (Codata)³, chargé de tenir à jour la liste et la valeur des constantes fondamentales de la physique depuis 1966. « Notre travail consiste à réaliser la synthèse des différentes mesures jugées valides pour déterminer les constantes fondamentales. Leurs valeurs les plus probables sont obtenues par un ajustement de type « moindres carrés » à partir de toutes les mesures et des relations de la physique qui relient ces constantes. On garantit ainsi la cohérence de l'ensemble », explique François Nez,





Les Arts et Métiers donnent la mesure

En écho à la 26^e réunion de la Conférence générale des poids et mesures qui, du 13 au 16 novembre 2018 à Versailles, officialisera les nouvelles définitions du kilogramme, de l'ampère, du kelvin et de la mole, l'exposition « Sur mesure, les 7 unités du monde », conçue par le Conservatoire national des

arts et métiers (Cnam) avec le Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE), et dont le CNRS est partenaire, sera présentée au musée des Arts et Métiers à Paris du 16 octobre 2018 au 5 mai 2019. S'adressant à un large public, l'exposition se décline en cinq chapitres permettant d'explorer l'omniprésence de la mesure dans notre quotidien, son histoire, sa symbolique, la complexité de l'acte de mesurer à travers la profusion des instruments présentés, et enfin ses applications dans de nombreux secteurs d'activités. Des vidéos invitent le visiteur à « rencontrer » chercheurs et spécialistes pour comprendre pourquoi et comment sont définies les sept unités fondamentales qui nous permettent de quantifier le monde.

» www.arts-et-metiers.net

Par ailleurs, le CNRS a voulu engager une réflexion interdisciplinaire sur le rôle et les enjeux de la mesure pour les sciences, à travers le colloque « Tous mesureurs, tous mesurés. La science au cœur de la société », organisé au siège de l'organisme les 18 et 19 octobre. Un espace « démo » présentera parallèlement aux visiteurs innovations, expériences et dispositifs autour de la mesure.

» <https://bit.ly/2LkkbnW>

phénomènes physiques. « En établissant des ponts entre des quantités autrefois jugées incommensurables, les constantes permettent l'émergence de nouveaux concepts, remarque Jean-Philippe Uzan. Par exemple, c fait la synthèse entre espace et temps, la constante de Planck h permet de relier les concepts d'énergie et de fréquence et la constante gravitationnelle G crée un lien entre matière et espace-temps. » (Voir infographie page 22.) Une unification conceptuelle qui change le statut des constantes en question et peut même aboutir à l'abandon de certaines grandeurs et unités. « La découverte par Joule du fait que chaleur et énergie étaient deux formes d'énergie a fait que la constante de Joule, qui exprime la proportionnalité entre travail et chaleur, a perdu tout sens physique et qu'elle est devenue un simple facteur de conversion entre unités mesurant la chaleur (calories) et le travail (joule). De nos jours la caloricie est devenue obsolète. » || Y. P.

membre du Codata. Cohérence que le CIPM a jugée suffisante fin 2017 lors de sa 106^e session, prenant acte que les conditions fixées pour procéder à la révision du SI étaient remplies, ce qui a ouvert la voie à l'adoption du nouveau système par la CGPM prévue en novembre.

Des valeurs non calculables

« La valeur numérique de n'importe quelle constante dépend complètement du système d'unités choisi », rappelle toutefois Jean-Philippe Uzan. Par exemple, les physiciens des hautes énergies ont parfois recours aux unités de Planck, pour lesquelles les valeurs des constantes h , c et G sont par convention toutes fixées à 1, ce qui simplifie considérablement l'écriture des équations décrivant les lois physiques... mais donne des unités peu pratiques dès qu'on quitte le domaine de l'infiniment petit.

Le physicien et épistémologue Jean-Marc Lévy-Leblond⁴ note que « ces constantes universelles ne jouent pas seulement un rôle d'étalon dans la définition et la mesure des quantités physiques. Elles sont en outre utilisées comme normes de validité pour les théories physiques. Cet aspect se résume souvent dans des assertions telles que : "la relativité galiléenne est obtenue à partir de la relativité einsteinienne quand la constante c tend vers l'infini", ou encore : "la mécanique quantique se ramène à la mécanique classique lorsque la constante de Planck tend vers zéro" ».

Les constantes « exactes » fixée par le SI ne sont en fait qu'un sous-ensemble de la trentaine que l'on retrouve dans les équations décrivant les lois physiques qui régissent notre Univers : cela va de la constante de gravitation aux masses des particules élémentaires en passant par les constantes de couplage des différentes forces de la nature. Ne pouvant pas être calculées, ces constantes fondamentales soulignent aussi les limites de nos théories physiques. « La plupart des physiciens sont convaincus qu'une future théorie des particules fondamentales expliquera (ou du moins devrait expliquer) la diversité de leurs masses à partir de quelques constantes d'un niveau plus profond, que ce soit les masses de constituants plus élémentaires, ou une certaine longueur caractéristique, relève ainsi Jean-Marc Lévy-Leblond. Quand on aura construit cette théorie, ces masses sortiront complètement du tableau des constantes fondamentales, et leur statut deviendra celui de quantités dérivées. »

Synthétiser des concepts

Le nombre et le statut des constantes auxquelles ont recours les physiciens reflètent l'évolution des théories physiques en rendant explicite l'unité de certains

¹. Unité CNRS/Sorbonne Université ². Bureau international des poids et mesures, The International System of Units (SI), 9^e édition. PDF consultable sur le site : www.bipm.org ³. « The CODATA 2017 Values of h , e , k , and N_A for Revision of the SI », D. B. Newell et al., *Metrologia*, 2018, vol. 55. ⁴. « Sur la nature conceptuelle des constantes physiques », J.-M. Lévy-Leblond, *Cahiers philosophiques*, 2013, vol. 135 (4) : 92-112.