



www.cnrs.fr

DOSSIER DE PRESSE

Du kilo à l'ampère en passant par la mole et le kelvin : les unités de mesure à l'aube d'un changement historique

Conférence de presse

Vendredi 14 septembre 2018 à 10h

Siège du CNRS

3 rue Michel-Ange, 75016 Paris



© djama/AdobeStock.com

Contact presse CNRS

Véronique Etienne | T 01 44 96 51 37 | veronique.etienne@cnrs.fr



www.cnrs.fr



SOMMAIRE

Invitation presse	p.4
Les intervenants	p.6
Dossier « Mesures : le grand renversement » (CNRS le Journal)	p. 8
Evénements à venir	p. 18
- « Tous mesureurs, tous mesurés. La science au cœur de la société » – colloque au CNRS	p. 18
- « Sur mesure, les 7 unités du monde » – une exposition au musée des Arts et Métiers	p. 19
- La 26 ^e Conférence générale des poids et mesure	p. 20
Pour en savoir plus	p. 21
- Autres articles de CNRS le Journal	p. 21
- Photos	p. 21
- Autres experts scientifiques	p. 22
- Un cycle de conférences proposé par le LNE	p. 22



INVITATION PRESSE | PARIS | 04 SEPTEMBRE 2018

Du kilo à l'ampère en passant par la mole et le kelvin : les unités de mesure à l'aube d'un changement historique

Conférence de presse
Vendredi 14 septembre 2018 de 10h à 12h
Siège du CNRS

« Des mesures pour tous, en tout temps et en tout lieu ». Voici l'objectif, hérité de la Révolution française, que souhaite atteindre la communauté scientifique mondiale avec la refonte du système international de mesures. Comment ? En ne basant plus la définition des unités de mesure sur des étalons « matériels », à l'image du « grand K » ou prototype international du kilogramme conservé à Sèvres depuis 1889, mais sur des constantes fondamentales. Quatre des sept unités du système international de mesures seront ainsi redéfinies : le kilogramme, la mole, le kelvin et l'ampère.

Ce processus de refonte s'appuie sur l'établissement d'une convention internationale entre 58 États dont le point d'orgue sera la 26^e Conférence générale des poids et mesures, du 13 au 16 novembre 2018 à Versailles, qui officialisera cette redéfinition majeure des unités de mesure.

En amont de cet événement historique, le CNRS organise un colloque les 18 et 19 octobre 2018 à Paris afin d'engager une réflexion interdisciplinaire sur le rôle et les enjeux de la mesure pour les sciences. Quelle place occupe la mesure, dans la construction des savoirs et des normes scientifiques et, au-delà, pour la société dans son ensemble ? Comment se construit la confiance dans la mesure, aussi bien dans l'élaboration des savoirs que dans la prise de décision politique ? Voici quelques-unes des questions qui seront abordées lors de ce colloque.

Pour préparer ces événements, nous vous invitons à une conférence de presse qui abordera les questions suivantes :

- **Retour sur un précédent changement historique**

Par **Nicole Capitaine**, astronome émérite de l'observatoire de Paris au laboratoire Syrte (CNRS/Observatoire de Paris-PSL/Sorbonne Université)

- **Zoom sur les quatre unités à redéfinir : mode d'emploi et changements à venir**

Par **François Nez**, directeur de recherche CNRS en physique au Laboratoire Kastler Brossel (CNRS/ENS/Collège de France/Sorbonne Université)



- **L'importance des constantes : des sciences à la société**

Par **Jean-Philippe Uzan**, directeur de recherche CNRS en physique théorique à l'Institut d'astrophysique de Paris (CNRS/Sorbonne Université)

- **Deux événements pour préparer le nouveau système de mesures**

Par **Marie Gaille**, directrice adjointe scientifique à l'Institut des sciences humaines et sociales du CNRS et directrice de recherche CNRS en philosophie au laboratoire Sciences – philosophie – histoire (Sphere, CNRS/Université Paris Diderot/Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne)

Et **Noël Dimarcq**, directeur de recherche CNRS en physique, au laboratoire Artemis (CNRS/Observatoire de la Côte d'Azur/Université Nice Sophia Antipolis)

LES INTERVENANTS



© Laurent Arthuin / UPMC

Nicole Capitaine est astronome émérite de l'Observatoire de Paris, où elle a notamment dirigé le département d'astronomie fondamentale (laboratoire « Systèmes de référence temps-espace », commun avec le CNRS et Sorbonne Université). Elle est correspondante de l'Académie des sciences et membre du Bureau des longitudes. Son activité scientifique porte sur la théorie des systèmes de référence, l'astrométrie de haute précision, la rotation de la Terre et la géodésie spatiale. Elle est représentante de l'Union astronomique internationale (UAI) au Comité consultatif des unités (CCU). À l'Académie des sciences, elle est membre du comité « Science et métrologie » et préside le « Comité français des unions scientifiques internationales ». Au sein de l'UAI, elle a présidé la division « Astronomie fondamentale » et a fait partie du groupe d'experts qui a élaboré le « Système UAI 2009 de constantes astronomiques » et la redéfinition 2012 de l'unité astronomique de longueur.

Contact : nicole.capitaine@obspm.fr



© Hubert Raguet / CNRS Photothèque

François Nez est directeur de recherche CNRS au sein du Laboratoire Kastler Brossel (CNRS/ENS-PSL/Collège de France/Sorbonne Université). Ses travaux de recherche portent sur la métrologie des systèmes simples et sur des tests fondamentaux de la physique. Ses activités récentes sont la spectroscopie laser à haute résolution de l'atome d'hydrogène, celle de l'hydrogène et du deutérium muonique et le test du principe d'équivalence avec l'anti-hydrogène. Ces deux dernières activités sont faites dans le cadre de collaborations internationales, respectivement *Charge Radius Experiment with Muonic Atoms* (CREMA) à l'institut Paul Scherrer (Suisse) et *Gravitational Behaviour of Anti-hydrogen at Rest* (GBAR) au CERN. Depuis 1998, il est l'un des 13 membres du sous-groupe « constantes fondamentales » du *Committee on Data for Science and Technology* (CODATA) dont la mission est de déterminer les valeurs les plus probables des constantes fondamentales à partir de toutes les mesures de haute précision réalisées dans le monde. C'est ce groupe qui a déterminé les valeurs numériques des 4 constantes qui vont entrer dans les nouvelles définitions du Système International d'unité.

Contact : francois.nez@lkb.upmc.fr — 01 44 27 72 48



© Xin Liu

Jean-Philippe Uzan est physicien théoricien, directeur de recherche au CNRS. Spécialiste de gravitation et de cosmologie, il travaille à l'Institut d'astrophysique de Paris (CNRS/Sorbonne Université) après avoir été de 2013 à 2017 directeur adjoint de l'Institut Henri Poincaré (CNRS/Sorbonne Université). Ses travaux sur les constantes fondamentales sont mondialement reconnus. Il a obtenu plusieurs contraintes sur leur constance et exploré leur rôle dans les théories de la physique. Ces recherches ont mené à deux ouvrages, *Les constantes fondamentales* (Belin, 2005) avec Roland Lehoucq et *De l'importance d'être une constante* (Dunod, 2005) avec Bénédicte Leclercq. Il collabore



depuis une quinzaine d'années avec l'université du Cap et enseigne régulièrement en Afrique via le réseau AIMS (*African Institute for Mathematical Sciences*) dont il fait partie du comité scientifique. En marge de sa recherche, il développe une activité de diffusion des connaissances, en particulier auprès des enfants hospitalisés avec l'association Les p'tits cueilleurs d'étoiles. Il a publié plusieurs ouvrages grand public dont certains pour les enfants. Il travaille aussi avec plusieurs artistes afin d'explorer la porosité entre art et science. Son prochain livre, *Big-bang* (Flammarion, octobre 2019) décrit 20 ans de recherches en cosmologie.

Contact : uzan@iap.fr — 01 44 32 80 26



Marie Gaille est directrice adjointe scientifique à l'Institut des sciences humaines et sociales du CNRS. Philosophe de formation, elle est rattachée au laboratoire Sphere – Sciences, Philosophie, Histoire (CNRS/Université Paris Diderot/Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne), spécialisé en histoire et philosophie des sciences. Elle travaille sur la relation entre médecine, anthropologie et philosophie, s'intéressant à l'expérience de la maladie, aux dimensions normatives de la décision médicale, en particulier sur la question des seuils de la vie valant d'être vécue, et à la relation entre santé, pathologie et milieu de vie.

Contact : marie.gaille@cnrs-dir.fr



Noël Dimarcq est directeur de recherche au CNRS. Son domaine de recherche concerne la métrologie et l'exploitation du caractère ondulatoire de la matière pour des mesures de très haute précision, en particulier la mesure du temps et des fréquences avec des horloges atomiques. Avant de rejoindre, en 2018, le laboratoire Artemis (CNRS/Observatoire de la Côte d'Azur/Université de Nice Sophia Antipolis) spécialiste de la détection optique des ondes gravitationnelles, Noël Dimarcq a dirigé au laboratoire Syrte (CNRS/Observatoire de Paris/Sorbonne Université) le réseau d'excellence FIRST TF (first-tf.fr) regroupant les acteurs majeurs en

France de la métrologie temps-fréquence (laboratoires, industriels, centres techniques).

Contact : noel.dimarcq@oca.eu



Mesures: le grand renversement

MATIÈRE

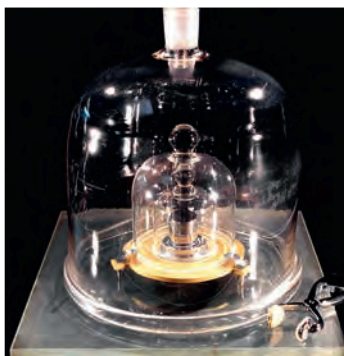
SOCIÉTÉS

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

L'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.



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.

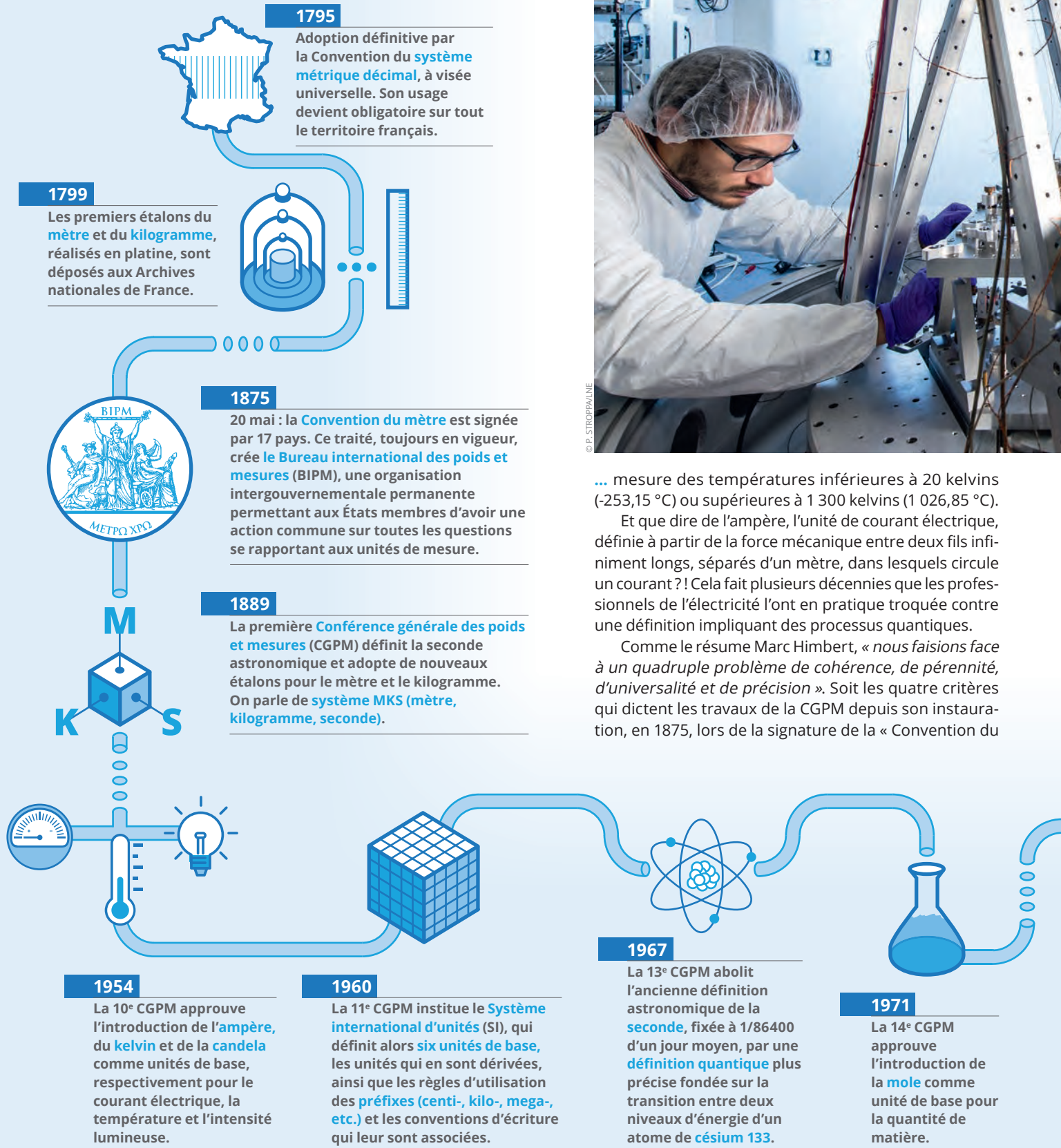
Des unités devenues imprécises

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)

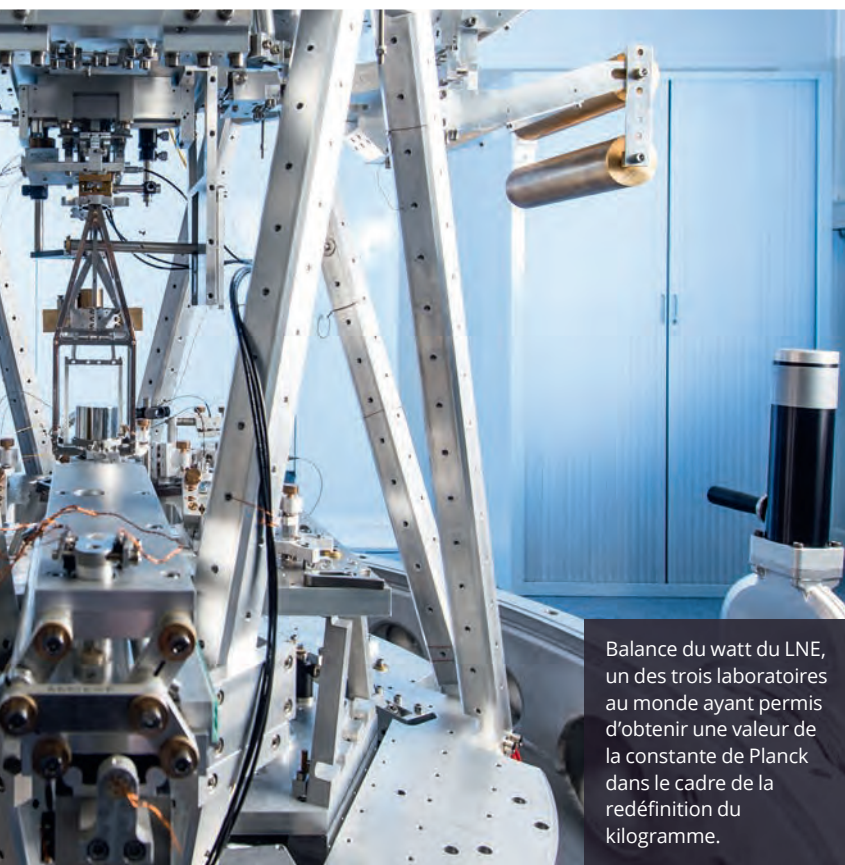


© P. STROPPALINE

... 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 faisons 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



Balance du watt du LNE, un des trois laboratoires au monde ayant permis d'obtenir une valeur de la constante de Planck dans le cadre de la redéfinition du kilogramme.

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.

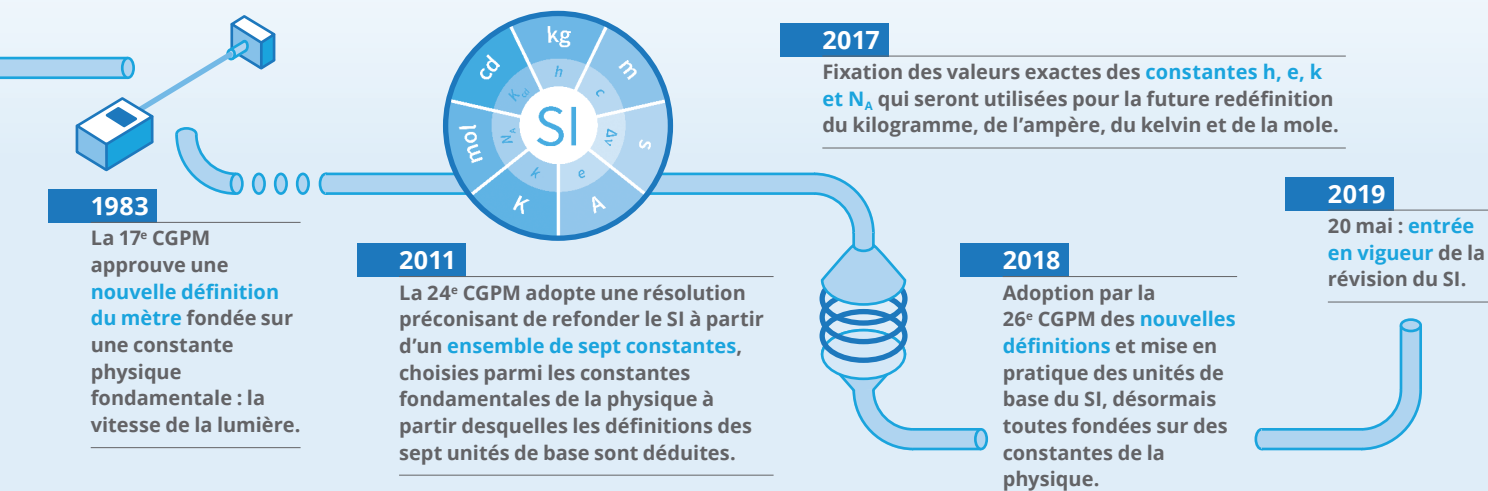
En plus de ces considérations pratiques, la normalisation des unités de mesure est également portée par l'idéal d'universalité du siècle précédent, incarné en particulier par la Révolution française. En 1791, l'Assemblée constituante décide de définir « une unité qui ne renferme ni d'arbitraire ni de 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. ...

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 XIX^e 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



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

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 $\Delta\nu_{\text{Cs}}$. ”

h

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 césium. 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 soupesé 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 électriciens 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’on 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 ...

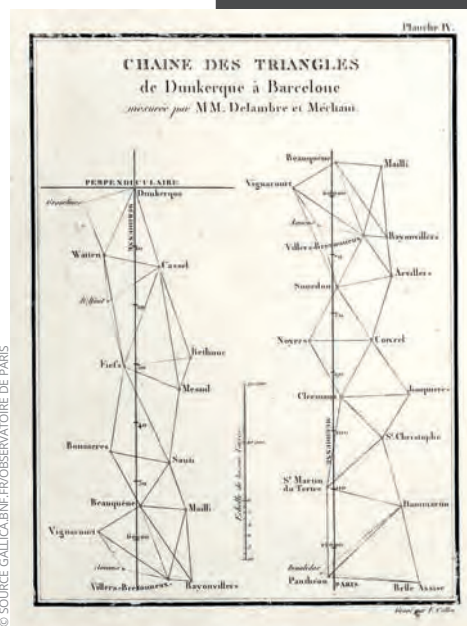
Les métamorphoses du mètre

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 $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ ».

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 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 ».



© SOURCE GALICIA/BNF/OBSERVATOIRE DE PARIS

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.

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 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 ; $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ = fréquence de la transition hyperfine de l’état fondamental de l’atome de césium.

“Le nouveau SI renouvellera 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-espace⁷. 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 ». **II 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 :

- h** * **La constante de Planck** est fixée et strictement égale à $6,626\ 070\ 15 \times 10^{-34}$ J.s (ou $m^2.kg/s$ en unités de base)
- c** **La vitesse de la lumière dans le vide** est fixée et strictement égale à $299\ 792\ 458$ m/s
- $\Delta\nu_{Cs}$** **La fréquence de la transition hyperfine** de l’état fondamental de l’atome de césium 133 non perturbé est fixée et strictement égale à $9\ 192\ 631\ 770$ Hz
- e** * **La charge élémentaire** est fixée et strictement égale à $1,602\ 176\ 634 \times 10^{-19}$ C (ou A.s en unité de base)
- k** * **La constante de Boltzman** est fixée et strictement égale à $1,380\ 649 \times 10^{-23}$ J/K (ou $m^2.kg/s^2.K$ en unités de base)
- N_A** * **La constante d’Avogadro** est fixée et strictement égale à $6,022\ 140\ 76 \times 10^{23}$ mol⁻¹
- K_{cd}** **L’efficacité lumineuse d’un rayonnement monochromatique** de fréquence 540×10^{12} Hz est fixée et strictement égale à 683 lm/W (ou $lm.s^3/m^2.kg$ en unités de base)

* Constantes dont les valeurs n’étaient pas fixées avant 2017.

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'étalon 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'étalon 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'étalon 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 Boltzmann 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.

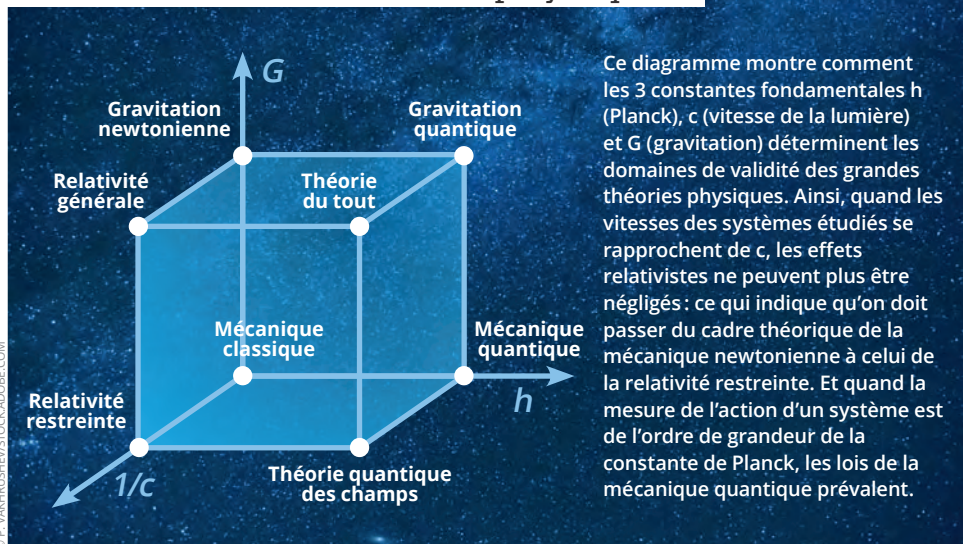
Réaliser les unités

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,

Constantes et théories physiques





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/2Lkknw>

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 calorie est devenue obsolète.* » **II 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 » fixées 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.



www.cnrs.fr

EVENEMENTS A VENIR

Tous mesureurs, tous mesurés. La science au cœur de la société

Colloque pluridisciplinaire

18-19 octobre 2018

Siège du CNRS

3 rue Michel-Ange, Paris 16^e

Gratuit, sur inscription.

À l'occasion de la réforme du Système international des unités de mesure, le CNRS a voulu engager une réflexion interdisciplinaire sur le rôle et les enjeux de la mesure pour les sciences et la société.

Un espace « démo » présentera aux visiteurs innovations, expériences et dispositifs autour de la mesure.

Programme et inscriptions :

mesures.sciencesconf.org

TOUS MESUREURS TOUS MESURÉS

la science au cœur de la société

18-19 OCTOBRE 2018

CNRS – Campus Issard-Mège
3 rue Michel-Ange, Paris 16^e





Sur mesure, les 7 unités du monde

Exposition

Musée des Arts et Métiers
du 16 octobre 2018 au 5 mai 2019

En écho à la 26^e Conférence générale des poids et mesures qui, du 13 au 16 novembre 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.



En savoir plus : www.arts-et-metiers.net/musee/sur-mesure-les-7-unites-du-monde-lexposition-qui-donne-la-mesure-au-musee-des-arts-et-metiers

Le CNRS fait son *live* !

Partenaire de l'exposition, le CNRS vous la fait découvrir en avant-première et en vidéo, le 15 octobre à 13h30. Sur la page Facebook du CNRS, les internautes pourront poser leurs questions en direct au commissaire de l'exposition et à d'autres spécialistes.

Rendez-vous sur : www.facebook.com/cnrs.fr



La 26^e Conférence générale des poids et mesures

Le système international d'unités de mesure achève cette année une profonde refonte : 4 des 7 unités fondamentales — le kilogramme, la mole, le kelvin et l'ampère — sont redéfinies, sur la base de constantes fondamentales et non plus de références matérielles. 2018 voit ainsi disparaître le dernier étalon matériel, le fameux kilo étalon conservé au Bureau international des poids et mesures, à Sèvres. Cette redéfinition majeure des unités de mesure sera actée à la 26^e Conférence générale des poids et mesures, du 13 au 16 novembre, à Versailles.

La séance de travail dédiée à cette résolution, le 16 novembre matin, sera ouverte à la presse et retransmise par webcast. Plus d'informations : www.bipm.org/fr/cgpm-2018/

Programme :



General Conference on Weights and Measures (CGPM)
Palais des Congrès, Versailles
Friday 16th November 2018

Open session to consider the redefinition of the SI base units.

8:30 - Start of session

- Opening of the session
Sébastien Candel (*Président de l'Académie des Sciences*)/Barry Inglis (CIPM President)
- Progress towards a redefinition of the SI and report from the CCU
Joachim Ullrich (CIPM Vice-President)
- Achievements in the measurement of k and report from the CCT
Yuning Duan (CIPM)
- Achievements with the quantum electrical effects and report from the CCEM
Gert Riaveld (CIPM)
- Achievements in the measurement of h and report from the CCM
Philippe Richard (CIPM)
- Questions and discussion followed by coffee

10:50 - Start of webcast

Keynote lectures

- "The quantum Hall effect and the revised SI"
Klaus von Klitzing (Nobel laureate, Max Planck Institute, Stuttgart)
- "The role of the Planck constant in physics"
Jean-Philippe Uzan (*Centre national de la recherche scientifique (CNRS)*, Paris)
- "Optical atomic clocks – opening new perspectives on the quantum world"
Jun Ye (JILA, Boulder)
- "Measuring with fundamental constants; how the revised SI will work"
Bill Phillips (Nobel laureate, NIST, Gaithersburg)

- Introduction to the Resolution "On the revision of the International System of Units (SI)"
Martin Milton (BIPM Director)
- Voting on Draft Resolution A and closing remarks
Barry Inglis

13:25 - End of session



POUR EN SAVOIR PLUS

Autres articles de CNRS le Journal

« **La démesure de la précision** » (Point de vue, CNRS le Journal, 11 octobre 2016)

La mesure du temps atteint aujourd'hui des précisions vertigineuses, grâce notamment aux apports de l'optique et de la photonique. Or la recherche de la précision ultime est une course de longue haleine qui est loin d'être achevée.

lejournal.cnrs.fr/billets/la-demesure-de-la-precision

« **Les nouveaux maîtres du temps** » (vidéo, CNRS le Journal, 2 octobre 2017)

Il y a cinquante ans, le 13 octobre 1967, la seconde, unité de mesure du temps, était définie non plus par les astres mais par les atomes. Dans cette quête de la précision, les scientifiques inventent aujourd'hui les horloges du futur, qui permettront non seulement d'exprimer le temps avec encore plus de finesse, mais de revisiter les lois fondamentales de la physique.

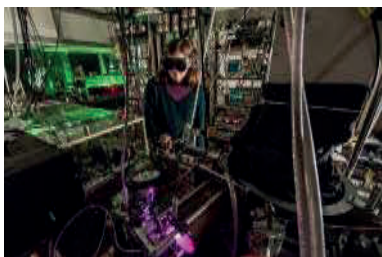
lejournal.cnrs.fr/videos/les-nouveaux-maitres-du-temps

« **De la mesure en toutes choses** » (podcast, CNRS le Journal, 14 juin 2018)

Fin 2018, le kilogramme va changer de définition, tout comme l'ampère, la mole et le kelvin. Lucile Julien, professeur émérite en métrologie à l'université Pierre-et-Marie-Curie, nous explique l'objectif de ces modifications du Système International de mesures dans ce nouveau podcast.

lejournal.cnrs.fr/nos-blogs/que-reste-t-il-a-decouvrir/de-la-mesure-en-toutes-choses

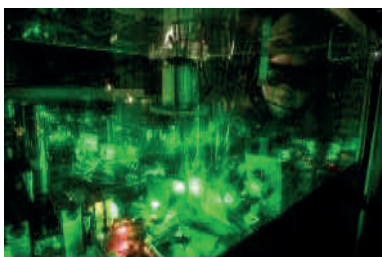
Ressources visuelles à la photothèque du CNRS



Expérience de spectroscopie à haute résolution de l'atome d'hydrogène : au premier plan, la source d'hydrogène (décharge rose). En arrière-plan, le laser d'excitation. La lumière laser envoyée sur un atome d'hydrogène permet de mesurer sa structure. La comparaison entre cette mesure et sa valeur théorique contribuera à déterminer des constantes fondamentales. C'est sur de telles constantes que s'appuiera en 2018 la redéfinition de quatre unités du système international : le kilogramme, le kelvin, la mole et l'ampère.

© Hubert RAGUET/LKB/CNRS Photothèque

Référence : 20160010_0031 – Lien externe : https://phototheque.cnrs.fr/i/20160010_0031



Expérience de spectroscopie à haute résolution de l'atome d'hydrogène : vue du laser titane-saphir d'excitation. La lumière laser envoyée sur un atome d'hydrogène permet de mesurer sa structure. La comparaison entre cette mesure et sa valeur théorique contribuera à déterminer des constantes fondamentales. C'est sur de telles constantes que s'appuiera en 2018 la redéfinition de quatre unités du système international : le kilogramme, le kelvin, la mole et l'ampère.

© Hubert RAGUET/LKB/CNRS Photothèque

Référence : 20160010_0035 – Lien externe : https://phototheque.cnrs.fr/i/20160010_0035



www.cnrs.fr



Scientifique réglant des composants optiques pour aligner le faisceau d'un laser dans une cavité Fabry Perot constituée de deux miroirs se faisant face. Des molécules de tétr oxyde d'osmium sont introduites dans cette cavité. Sur le laser est posé le lecteur d'une jauge mesurant la pression dans la cavité et permettant de contrôler la quantité de tétr oxyde d'osmium injecté. La fréquence de vibration de ces molécules sert alors de référence pour stabiliser la fréquence du laser à CO₂. Une fois stabilisé en fréquence, la pureté spectrale de ce laser à CO₂ est d'une qualité exceptionnelle. Avec, il est possible de mesurer des fréquences de vibrations moléculaires très précises, jusqu'à 14 ou 15 chiffres significatifs. Ceci permet de mettre en évidence des effets physiques très subtils. Ce laser à CO₂ est utilisé pour l'expérience de mesure de la constante de Boltzmann, liée à la redéfinition des unités (kelvin). Il s'agit à ce jour de l'expérience la plus sensible réalisée dans un laboratoire du CNRS.

© Cyril FRESILLON/ LPL / FIRST-TF /CNRS Photothèque

Référence : 20180037_0011 – Lien externe : https://phototheque.cnrs.fr/i/20180037_0011

Ces photos font partie de reportages qui contiennent d'autres visuels.

D'autres photos sont disponibles sur la métrologie ou la mesure de manière plus générale. Vous pouvez consulter le site phototheque.cnrs.fr ou adresser votre demande à phototheque@cnrs.fr

Autres experts scientifiques

Le bureau de presse du CNRS se tient à votre disposition pour vous indiquer d'autres chercheuses et chercheurs sur les unités de mesure ou le thème de la mesure.

Vous pouvez vous adresser à Véronique Etienne (01 44 96 51 37 / veronique.etienne@cnrs.fr) ou à 01 44 96 51 51 / presse@cnrs.fr.

« Évolution des unités de mesure : une révolution ? »

Cycle de conférence proposé par le LNE

À l'occasion de la redéfinition du Système international d'unités (SI), le Laboratoire national de métrologie et d'essais organise à Paris, de mai à novembre, un cycle de conférences grand public consacré à chacune des sept unités que comprend le SI, sur le thème : « Évolution des unités de mesure : une révolution ? »
En savoir plus : www.lne.fr/fr/actualites/cycle-conferences-unites-mesure-si

Le LNE dans la révision du système international d'unités : www.lne.fr/fr/comprendre/revision-systeme-international-unites