

Une étape cruciale dans le développement du Système international d'unités

La Conférence générale des poids et mesures (CGPM) a décidé le 16 novembre 2018 une révision fondamentale du Système international d'unités (SI). Un ensemble de sept constantes à valeur numérique fixée redéfinit entièrement le SI et permet de déduire la définition des unités. La révision permet notamment de relever de sa fonction, après plus d'un siècle d'utilisation, le dernier objet matériel (artefact) dans le SI, à savoir le prototype international du kilogramme, en le remplaçant par une constante de la nature pour définir l'unité de masse.

BEAT JECKELMANN

Le Système international d'unités (SI) est utilisé dans presque tous les aspects de la société contemporaine, des sciences ou de la technologie aux gestes de la vie quotidienne, en passant par la production industrielle et le commerce, pour exprimer des résultats de mesures de manière univoque et comparable. Avec les progrès réalisés dans les domaines scientifiques et techniques, le SI doit lui aussi évoluer et s'adapter aux besoins des utilisateurs. La révision décidée en novembre 2018 représente une étape cruciale dans le développement du SI. Grâce à ces modifications, les résultats des mesures seront à l'avenir encore plus cohérents, fiables et précis, ouvrant ainsi la porte à de nouvelles découvertes et innovations scientifiques.

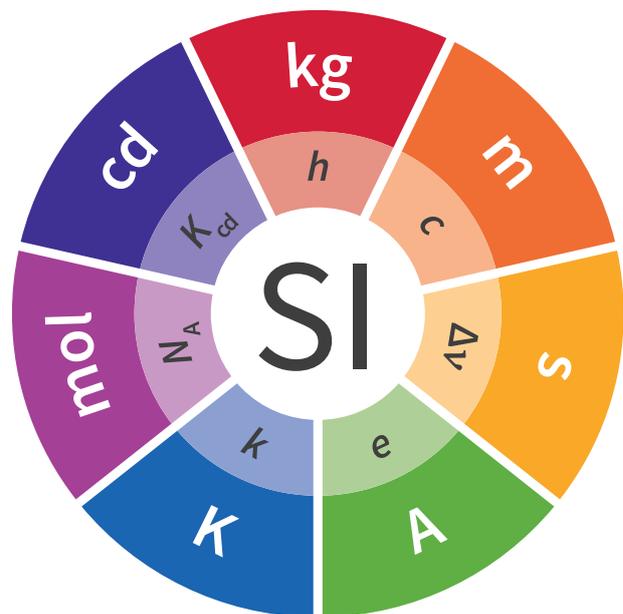
Qu'est-ce qui distingue un système d'unités ?

Le choix d'un système d'unités n'est pas un processus rigoureusement scientifique. Il est dicté par des considérations pratiques, la connaissance du contexte physique, mais aussi des restrictions historiques de compatibilité et une notion d'arbitraire. Ainsi, le SI introduit aujourd'hui à l'échelle mondiale est le fruit d'un long développement historique. Les besoins toujours croissants de précision dans les mesures ont entraîné des améliorations constantes dans la définition des unités [1]. La rétro-compatibilité constitue pour les modifications une contrainte marginale. Les résultats de mesures, telles que les données climatiques, doivent être comparables sur le long terme. Ce qui n'est possible que si les unités utilisées restent stables et comparables dans le temps, dans le cadre de la marge d'incertitude de mesure.

Dans le SI, on distingue les unités de base et les unités dérivées. Les valeurs des unités de base, actuellement au nombre de sept, sont fixées de manière arbitraire. Les unités dérivées sont définies par une combinaison d'unités de base en fonction des relations algébriques entre les valeurs en question.

Pour simplifier, la définition des unités de base, comme elles ont été utilisées au fil du temps, peut se subdiviser en diverses catégories :

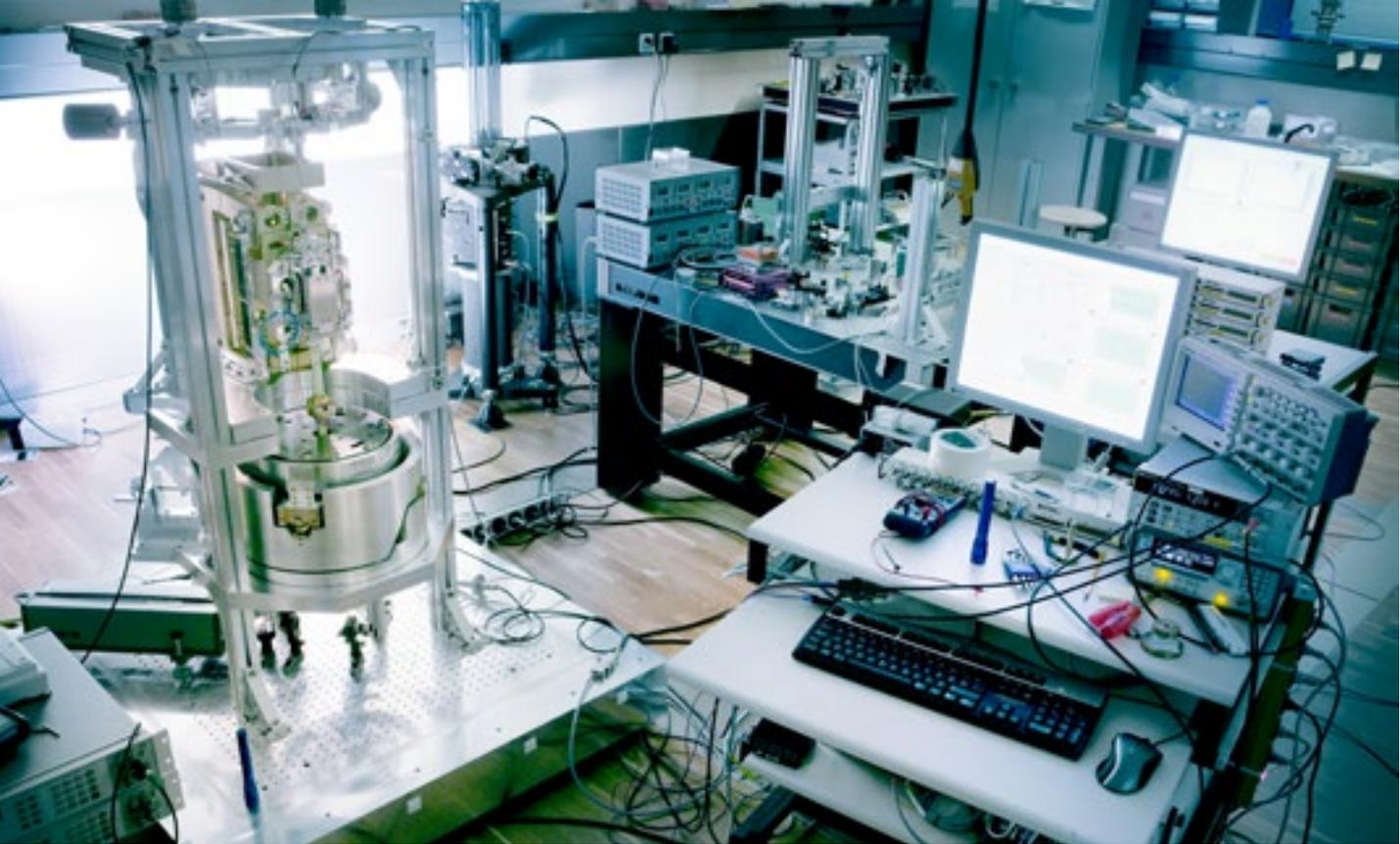
1. Un artefact adéquat est choisi comme réalisation des unités pour la valeur souhaitée. Jusqu'à la révision du SI, le kilogramme était encore défini de cette manière : le kilogramme



1 : Le SI révisé : le cercle intérieur montre les 7 constantes déterminantes. Elles constituent les piliers de la réalisation des unités du cercle externe. Les sept unités de base du SI sont représentées. Toutes les autres unités peuvent en être déduites, par combinaison des constantes. Les unités de base et dérivées sont équivalentes.

est la masse du prototype international du kilogramme, un cylindre de platine iridié conservé au BIPM à Paris. Cette définition a de toute évidence un caractère local. L'unité n'est disponible qu'à un seul endroit, au BIPM. La transmission de l'unité se fait par comparaison avec l'échantillon primaire et la précision est par conséquent restreinte en fonction de l'exactitude de la méthode comparative. Le kilogramme-étalon étant un corps macroscopique dont la surface est instable, l'évolution précise de cette unité dans le temps n'est pas connue. C'est le grand inconvénient de cette définition.

2. La réalisation des unités peut aussi se faire sur la base d'un état physique approprié. Ainsi, la seconde est définie par le nombre de périodes de radiation correspondant à la transition de l'atome de césium entre ses deux états. Pour la réalisation de l'unité de température kelvin, la base de réflexion avant la révision reposait sur le fait que la température thermodynamique de l'eau au point triple prend une valeur



La balance du watt compare la puissance mécanique et électrique et peut relier la masse à la constante de Planck.

stable et indépendante de toute influence ambiante. Le point triple est l'état dans lequel les trois phases de l'eau, à savoir les états solide, liquide et gazeux, sont en équilibre. Les réalisations d'unités reposant sur ce principe ont un caractère universel, c'est-à-dire qu'elles sont réalisables partout et en tout temps. Tous les atomes Cs ont cette même propriété qui ne change pas dans le temps. Les différents états ne peuvent toutefois être décrits avec une précision suffisante par un modèle analytique basé sur une équation. De plus, l'exactitude de la réalisation des unités est elle-même limitée par les propriétés du processus physique choisi.

3. Finalement, les unités peuvent reposer sur des constantes de la nature. Celles-ci sont aussi évoquées dans les théories physiques en tant que constantes de proportionnalité ou de points de correspondance. Leur valeur ne peut être influencée et ne change ni dans l'espace ni dans le temps. Les constantes de la nature sont par conséquent les unités «naturelles» qui constituent un fondement idéal pour déterminer les unités SI. Dans l'ancien SI, le mètre et l'ampère sont des exemples de ces catégories d'unités. La définition du mètre attribue une valeur fixe à la vitesse de la lumière dans le vide. Quant à l'ampère, il est défini par rapport à la perméabilité magnétique du vide. Les unités de base de ce type ont un caractère universel, tout comme celles de type 2. Elles ne sont toutefois liées à aucun état physique défini, ce qui permet une amélioration notable de la réalisation avec les progrès de la physique.

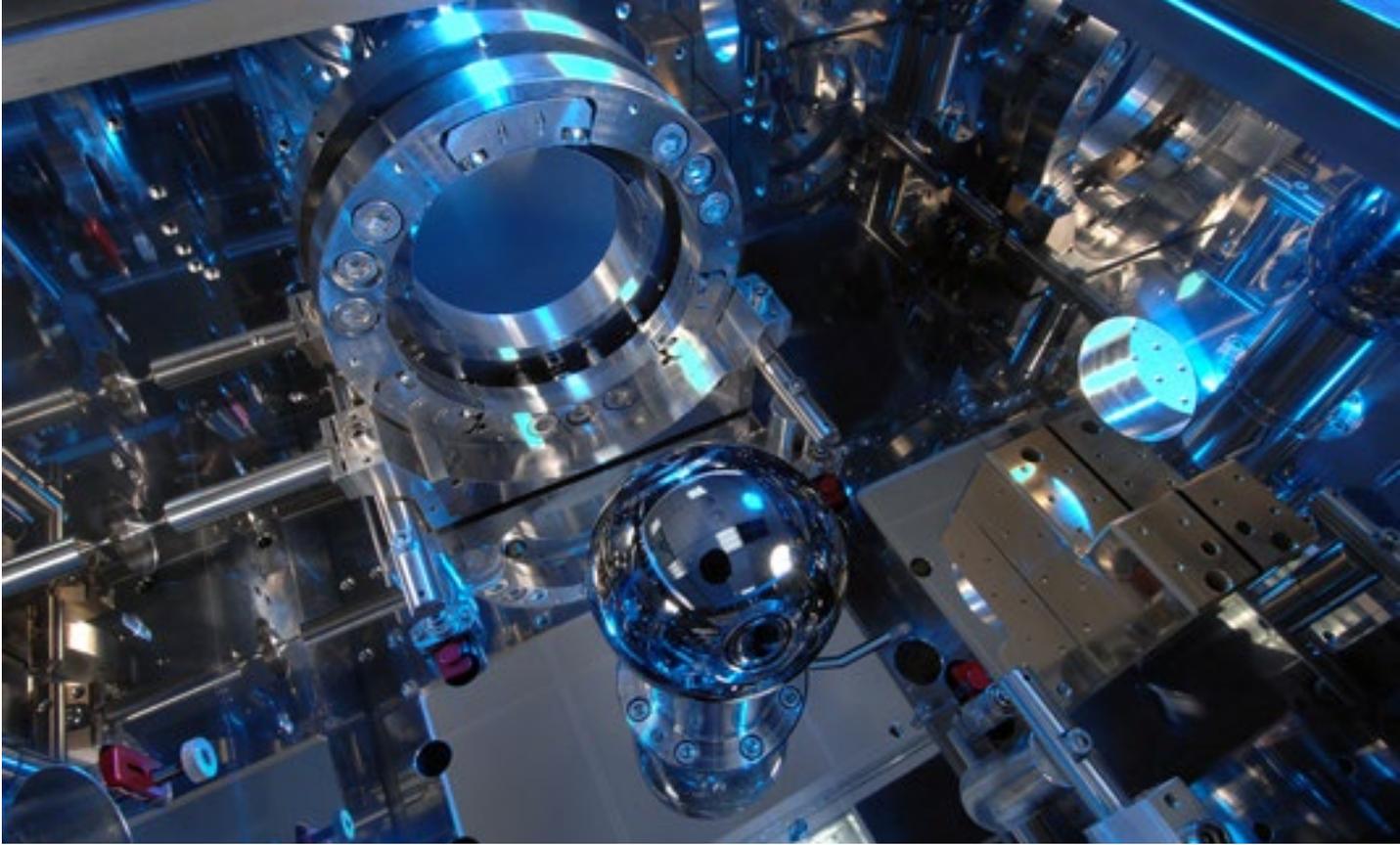
Pourquoi une révision était-elle nécessaire ?

Dans l'ancien SI, le kilogramme était la dernière unité de base reposant sur un artefact. Le kg y est défini comme la masse du prototype du kilogramme. Des copies de cet échantillon primaire sont conservées par de nombreux instituts nationaux

de métrologie (NMI). Depuis 1889, ces copies ont été comparées trois fois avec le prototype international. Une série de copies ont été réalisées plus tard et n'ont fait l'objet que de deux mesures comparatives avec le prototype.

Pour les deux catégories, on a constaté que la masse des copies nationales avait en moyenne augmenté par rapport à celle du prototype international [2] (voir aussi illustration 1). La variation moyenne relative d'environ 50 µg en 100 ans est certes très faible, mais comme les unités électriques se réfèrent à la force et donc au kilogramme, une dérive du kilogramme induit une dérive équivalente de l'unité électrique.

La **définition de l'ampère** associe des unités électriques et mécaniques. La réalisation des unités électriques nécessite des expériences électromécaniques complexes (balance du watt, condensateur calculable, etc.). Les techniques de mesure électriques modernes permettent toutefois de réaliser, avec les effets Josephson et Hall quantique, des valeurs de tension et de résistance qui, selon l'état des connaissances actuelles, ne dépendent que des constantes de la nature [3][4]. Dans ce contexte, la tension de l'étalon de Josephson est inversement proportionnelle à la constante de Josephson $K_J = 2e/h$. La résistance Hall quantique est quant à elle proportionnelle à la constante de Klitzing $R_K = h/e^2$. L'étalon de Josephson et l'étalon quantique sont ainsi directement raccordés à la charge élémentaire e et à la constante de Planck h . K_J et R_K peuvent, avec le SI actuel, être déterminés avec une incertitude relative de 10^{-7} environ, soit près de 100 fois plus que la reproductibilité des effets quantiques en laboratoire. Ces circonstances sont à l'origine de l'introduction au 1^{er} janvier 1990 par le Comité international des poids et mesures de valeurs K_{J-90} et R_{K-90} définies par convention : $K_{J-90} = 483\,597.9 \text{ GHz V}^{-1}$, $R_{K-90} = 25\,812.807 \text{ } \Omega$.



Avec l'expérience X-Ray Crystal Density (XRCD) la masse d'un atome de silicium est mesurée avec une grande précision en comptant les atomes dans un cristal Si presque parfait.

Cette décision a amélioré considérablement la cohérence mondiale des mesures électriques. D'un autre côté, elle a cependant engendré un système partiel pratique au sein du SI qui n'est pas satisfaisant d'un point de vue conceptuel.

Pour ce qui concerne la mesure des températures également, l'ancienne définition de l'unité de base **kelvin** par le biais de la cellule à point triple avec de l'eau se heurte à ses propres limites. La réalisation est sensible aux impuretés de la cellule et à la composition isotopique de l'eau utilisée. De plus, la réalisation de l'échelle en partant du point zéro et du point triple est très coûteuse.

Prérequis expérimentaux en vue d'une révision

Pour résoudre le problème que posaient les faiblesses identifiées, des travaux expérimentaux complexes étaient nécessaires sur deux fronts d'un point de vue expérimental : l'association de kg et de la constante de Planck avec une incertitude relative requise par les spécialistes de $\leq 2 \times 10^{-8}$ et la définition de la constante de Boltzmann k avec une incertitude relative de $\leq 10^{-6}$. La première problématique, en particulier, s'est révélée un défi très coriace.

Deux approches fondamentalement différentes sont suivies. Dans le cadre du X-Ray-Crystal-Density-Experiment (XRCD), la masse d'un atome de silicium est mesurée avec une grande précision par une méthode qui consiste à «compter» les atomes d'un cristal de silicium quasi parfait [5]. La masse atomique peut à son tour être associée avec une haute précision à la constante de Planck h . Ainsi, l'expérience XRCD fournit la possibilité de mettre en relation le kilogramme soit avec une masse atomique, soit avec la constante de Planck. La «balance du watt» (ou «balance de Kibble», du nom de son inventeur) constitue une autre approche expérimentale [6]. La balance compare la puissance mécanique et la puissance électrique.

Lorsque cette dernière est mesurée au moyen de standards quantiques, la masse peut être mise en relation avec la constante de Planck [5]. Bien entendu, les résultats de ces deux différentes approches doivent être concordants.

Il existe tout une série de méthodes pour définir la constante de Boltzmann [7]. La plus exacte est le thermomètre acoustique à gaz, dans lequel k est définie par la vitesse du son dans un gaz en fonction de la température.

Les exigences en termes de cohérence et d'exactitude pour la détermination des constantes de Planck ou de Boltzmann et donc les conditions d'une révision du SI ont été remplies au printemps 2017.

Une série de constantes définit le système

Dans les paragraphes précédents, nous avons vu comment la définition des unités dans le SI a évolué, d'une relation 1:1 avec un artefact (le prototype international du kilogramme) à la relation à un système ou un état physique (point triple de l'eau pour le kelvin) et finalement au recours à une constante de la nature (la vitesse de la lumière pour le mètre). Lors de la dernière étape, la réalisation de l'unité se détache conceptuellement parlant de la définition. L'état actuel de la science et de la technique permet de réaliser, conformément aux lois de la physique, une unité définie par une valeur fixe de constante de la nature. Il est possible d'en améliorer la réalisation sans avoir à redéfinir l'unité.

Avec les progrès empiriques réalisés, il est désormais possible pour la première fois de faire reposer l'entier du SI sur une série de constantes dont les valeurs sont définies avec exactitude. Dans le SI, nous avons fait le choix de définir par convention la valeur de sept unités de base. C'est la raison pour laquelle nous devons également définir sept constantes.

Cette série spécifique de constantes est la suivante (voir aussi encadré 1) :

$\Delta\nu_{\text{Cs}}$: fréquence de la transition entre deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome ^{133}Cs . Cette constante définit la seconde. La révision ne change rien à la réalisation pratique de l'unité.

c : vitesse de la lumière dans le vide. c et la seconde réalisée par $\Delta\nu$ permettent de réaliser le mètre. Là encore, la révision ne change rien en pratique.

h : constante de Planck. Grâce à c et $\Delta\nu$ et les expériences appropriées, il a été possible de faire le lien avec une masse macroscopique et donc de réaliser le kg. C'est le résultat le plus important de la révision.

e : charge élémentaire. Elle permet, conjointement à $\Delta\nu$, de redéfinir l'ampère. L'ampère peut être réalisé directement par calcul du flux de charges élémentaires par seconde. L'avantage de cette définition de e réside avant tout dans le fait que, en fixant la constante de Planck et la charge élémentaire, on fixe également la constante de Josephson et celle de Klitzing, et qu'ainsi l'effet Josephson et l'effet Hall quantique permettent de réaliser directement le volt et l'ohm dans le SI révisé. Les constantes conventionnelles $K_{\text{J-90}}$ et $R_{\text{K-90}}$ deviennent donc superflues, tout comme le sous-système pratique qui y est lié.

k : constante de Boltzmann. Grâce à $\Delta\nu$ et h et une expérience primaire appropriée (par exemple thermomètre acoustique à gaz), il est possible de réaliser le kelvin. En conséquence, la valeur du point triple de l'eau n'est plus fixe et une incertitude de mesure lui est associée.

N_{A} : nombre d'Avogadro. La détermination du nombre d'Avogadro permet de définir la mole comme la quantité de matière qui contient $6,022\,140\,76 \times 10^{23}$ entités élémentaires. Il n'y a plus, comme dans la précédente définition de la mole, de lien vers le kg. La masse molaire du ^{12}C n'a donc plus une valeur fixe, mais est assortie d'une incertitude de mesure.

K_{cd} : équivalent photométrique d'un rayonnement monochromatique de fréquence 540×10^{12} Hz. Cela étant établi, la définition de la candela reste inchangée.

Le SI est un système basé sur la pratique et, dans ce sens, il n'est pas surprenant que les constantes citées précédemment n'ont pas toutes la même importance. La vitesse de la lumière c et la constante de Planck h sont considérées en physique moderne comme des constantes réellement fondamentales. Elles se rapportent à des caractéristiques générales d'espace ou de temps et à des processus physiques qui s'appliquent indifféremment à toutes les particules et interactions. La constante de Boltzmann k peut être considérée comme un facteur de conversion de la température ou de l'énergie. La fréquence de la transition entre deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome césium 133, $\Delta\nu$, est la propriété d'un atome défini. Elle ne peut être exprimée plus simplement par des valeurs plus fondamentales. La précision de la réalisation de l'unité seconde, qui est liée à cette constante, est restreinte par la largeur naturelle de la transition de l'atome.

Des efforts considérables sont déployés en vue de définir dans un futur proche l'unité de temps par une constante plus fondamentale. Le nombre d'Avogadro N_{A} et l'intensité lumineuse K_{cd} ont été choisis pour des raisons pratiques ; les physiciens ne les considèrent en principe pas comme «fondamentaux».

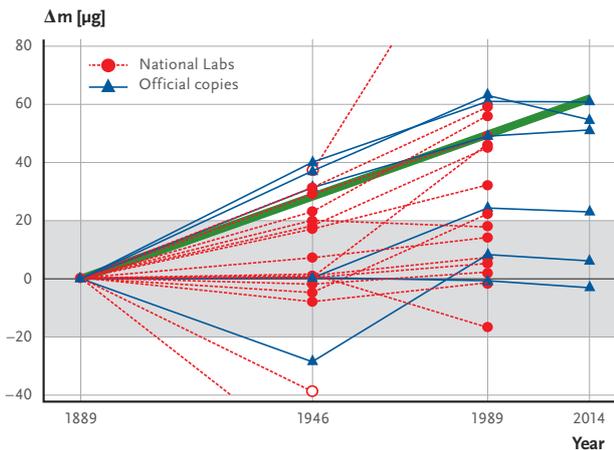
Sur la base de ces constantes fixées et à l'aide des lois de la physique, toutes les unités du SI peuvent être réalisées. Les constantes en sont les piliers et constituent des références

pour l'entier du système. Il ne sera donc plus nécessaire dans le futur de faire la distinction entre les unités de base et les unités dérivées. Toutes les unités du SI découlent des sept constantes choisies et sont donc équivalentes.

1960

1967

Les unités ont également subi des changements dans le passé. Pendant des siècles, la rotation de la terre ou la position du soleil a servi de mesure du temps. Depuis 1960, c'est la rotation annuelle uniforme de la Terre autour du Soleil. Depuis 1967, elle est déterminée par une transition dans l'atome de césium. Impact : Des systèmes de navigation globaux pourraient être développés.



1 : Vérification périodique : comparaison entre les copies nationales et officielles et le prototype international du kilogramme. Les comparaisons ont eu lieu lors de l'introduction en 1889, puis en 1946 et en 1989. La comparaison de 2014 n'est pas une «periodic verification» officielle, puisqu'elle ne concernait qu'un sous-ensemble de l'étalon.

$h = 6.62607015 \times 10^{-34} \text{ Js}$

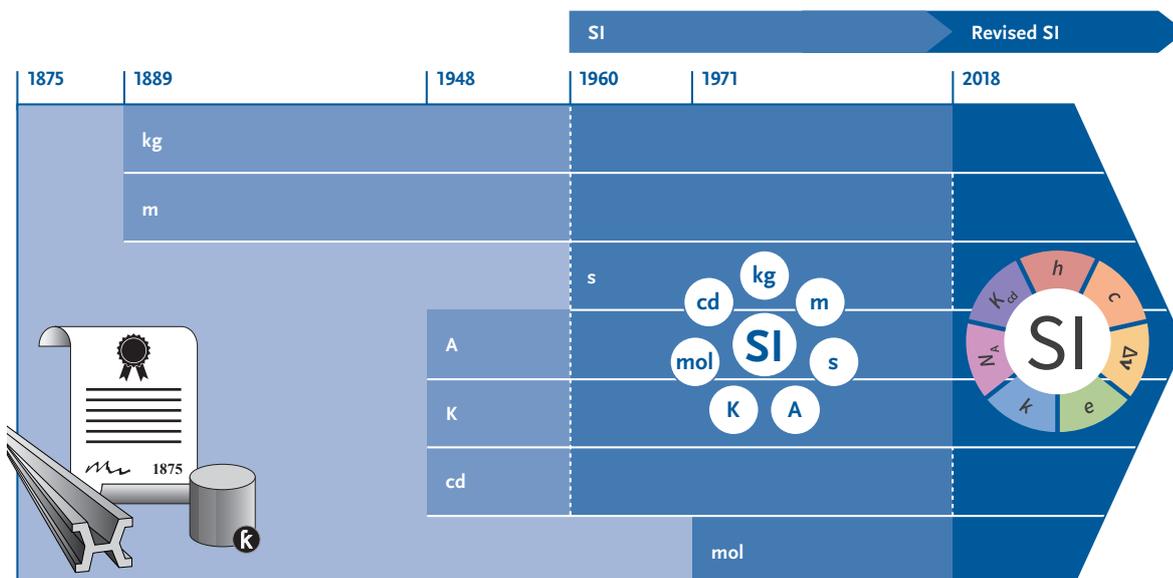
Max Planck était un physicien allemand important et est considéré comme le fondateur de la physique quantique. Le kg est redéfini à l'aide de la constante de Planck.

Tous les résultats expérimentaux publiés à fin juin 2017 ont été pris en compte pour déterminer les constantes. Par le biais de son Task Group on Fundamental Constants (TGFC), le Comité Data for Science and Technology (CODATA) met périodiquement à disposition des physiciens et des chimistes un set auto-cohérent de valeurs recommandées sur le plan international pour les constantes de la nature et les facteurs de conversion. Au vu de ce rôle qui lui est attribué, la Conférence générale des poids et mesures a invité le Task Group CODATA à effectuer un calcul de compensation pour déterminer les valeurs des constantes intervenant dans le SI révisé. Les résultats de cette adaptation figurent dans l'encadré de la page 14 [8], à savoir

les valeurs numériques de h , e , k et N_A , avec pour chacune un nombre suffisant de chiffres, afin de garantir la cohérence entre l'ancien et le nouveau SI. La prochaine modification CODATA périodique des constantes fondamentales aura lieu fin 2018. Elle sera également exceptionnelle, dans la mesure où elle reposera pour la première fois sur les constantes fixées de manière précise.

Qu'est-ce qui changera pour l'utilisateur ?

Le SI révisé entrera en vigueur le 20 mai 2019, date de la Journée mondiale de la métrologie. Même si, à cette occasion, la modification la plus décisive depuis l'introduction du SI est



Le système métrique et le SI ont toujours été adaptés au développement de la technologie et à ses besoins. Dans toute redéfinition, il est crucial que la stabilité à long terme du SI soit maintenue.

Définition du SI

Le Système international d'unités (SI) est défini par la détermination des valeurs de 7 constantes. Les chiffres proviennent des calculs de compensation de CODATA à l'été 2017.

Fréquence de la transition entre deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome ^{133}Cs

$$\Delta\nu_{\text{Cs}} = 9\,192\,631\,770 \text{ s}^{-1}$$

Vitesse de la lumière dans le vide

$$c = 299\,792\,458 \text{ m s}^{-1}$$

Constante de Planck

$$h = 6.626\,070\,15 \times 10^{-34} \text{ J s (J s = kg m}^2 \text{ s}^{-1})$$

Charge élémentaire

$$e = 1.602\,176\,634 \times 10^{-19} \text{ C (C = A s)}$$

Constante de Boltzmann

$$k = 1.380\,649 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1} \text{ (J K}^{-1} = \text{kg m}^2 \text{ s}^{-2} \text{ K}^{-1})$$

Nombre d'Avogadro

$$N_{\text{A}} = 6.022\,140\,76 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

Équivalent photométrique d'un rayonnement monochromatique de fréquence $540 \times 10^{12} \text{ Hz}$

$$K_{\text{cd}} = 683 \text{ lm W}^{-1}$$

réalisée, elle n'aura aucune incidence immédiate sur la vie quotidienne. En dépit de la nouvelle définition, les valeurs des unités kilogramme, kelvin et mole resteront dans un premier temps inchangées. Ce n'est que pour les unités électriques que de légères corrections seront nécessaires. Avec la nouvelle définition de l'ampère, les unités pratiques définies au moyen des valeurs conventionnelles des constantes de Josephson et de Klitzing deviendront obsolètes. Le «retour» au sein du SI représente une variation relative de 1.07×10^{-7} pour les mesures de tension et de 1.78×10^{-8} pour les mesures de résistance. Ces corrections sont infimes, au point qu'elles n'affecteront guère d'utilisateurs en dehors des NMI.

Conclusion

Cette révision permet au système international d'unités dans son ensemble d'être paré pour l'avenir. Il est conçu de sorte à permettre de meilleures réalisations des unités au fil du temps, sans que cela soit explicitement dicté par le système. Le SI dispose ainsi d'une base solide à long terme et reste, à l'échelle mondiale, la référence fondamentale pour les mesures dont l'exactitude répond aux besoins de la société, de l'économie et de la science.

Références

- [1] BIPM, «Measurement units: the SI.» [Online]. Available: <https://www.bipm.org/en/measurement-units/>.
- [2] G. Girard, «International Report: The Third Periodic Verification of National Prototypes of the Kilogram (1988–1992),» *Metrologia*, vol. 31, pp. 317–336, 1994.
- [3] B. Jeckelmann and B. Jeanneret, «The quantum Hall effect as an electrical resistance standard,» *Reports Prog. Phys.*, vol. 64, no. 12, pp. 1603–1655, Dec. 2001.
- [4] B. Jeanneret and S. P. Benz, «Application of the Josephson effect in electrical metrology,» *Eur. Phys. J. Spec. Top.*, vol. 172, no. 1, pp. 181–206, Jun. 2009.
- [5] K. Fujii et al., «Realization of the kilogram by the XRCM method,» *Metrologia*, vol. 53, no. 5, pp. A19–A45, 2016.
- [6] I. A. Robinson and S. Schlamminger, «The watt or Kibble balance: A technique for implementing the new SI definition of the unit of mass,» *Metrologia*, vol. 53, no. 5, pp. A46–A74, 2016.
- [7] J. Fischer et al., «The Boltzmann project,» *Metrologia*, vol. 55, no. 2, pp. R1–R20, 2018.
- [8] D. Newell et al., «The CODATA 2017 values of h, e, k, and NA for the revision of the SI,» *Metrologia*, vol. 55, no. 1, pp. L13–L16, 2018.