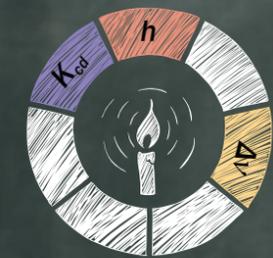


Le système international d'unités

PRINCIPE

Le système international d'unités (SI) est un ensemble de grandeurs physiques qui permet de tout mesurer, de l'infiniment petit à l'infiniment grand. Il compte sept unités primaires, et leurs unités dérivées par « filiation ».

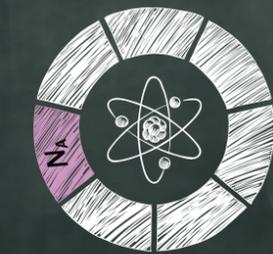


Intensité lumineuse. CANDELA (cd)

1^{re} définition en 1954, remplaçant l'unité de la bougie établie à 60 bougies par centimètre carré.
Définition actuelle (depuis 1979) basée sur la constante K_{cd} : intensité lumineuse d'un rayonnement monochromatique de fréquence 540×10^{12} hertz (Hz), dont la valeur est 683.

$$1 \text{ cd} = 2,614\,830... \times 10^{10} (\Delta\nu_{cs})^2 h K_{cd}$$

- Flux lumineux. LUMEN (lm) : $\text{cd}\cdot\text{sr} = \text{m}^2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{cd}$
- Éclairement lumineux. LUX (lx) : $\text{lm}\cdot\text{m}^{-2} = \text{m}^{-2}\cdot\text{cd}\cdot\text{sr}$



Quantité de matière. MOLE (mol)

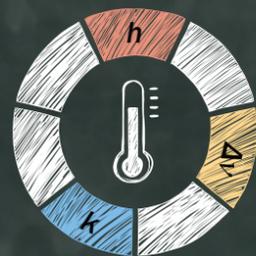
1^{re} définition en 1971, relative à la quantité de matière d'un système contenant autant d'entités élémentaires (atomes, ions, électrons, etc.) qu'il y a d'atomes dans 0,012 kg de carbone 12.
Nouvelle définition (2018), à partir de la constante d'Avogadro (N_A) : nombre d'entités élémentaires dont la valeur est $6,022\,140\,76 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$.

$$1 \text{ mol} = 6,022\,140\,76 \times 10^{23} / N_A$$

- Concentration molaire. MOLE / MÈTRE CUBE : $\text{mol}\cdot\text{m}^{-3}$
- Activité catalytique. KATAL (kat) : $\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$



Dépendance de la définition d'une unité primaire (ici le kelvin) avec d'autres (ici la seconde et le kilogramme).

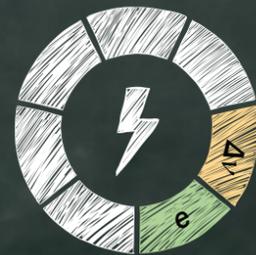


Température. KELVIN (K)

1^{re} définition en 1954, correspondant au degré d'agitation des molécules basée sur une fraction de la température thermodynamique du point triple de l'eau (à la fois liquide, solide et gazeuse). $1 \text{ K} = 1/273,15$.
Nouvelle définition (2018) selon la constante de Boltzmann (k) dont la valeur est $1,380\,649 \times 10^{-23} \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$.

$$1 \text{ K} = 2,266\,665... \Delta\nu_{cs} h / k$$

- Température Celsius. DEGRÉ CELSIUS (°C) : $T/\text{K} - 273,15$
- Conductivité thermique. WATT / MÈTRE KELVIN : $\text{m}\cdot\text{kg}\cdot\text{s}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$
- Résistance thermique surfacique. MÈTRE CARRÉ KELVIN / WATT : $\text{kg}^{-1}\cdot\text{s}^3\cdot\text{K}$
- Capacité thermique. JOULE / KELVIN : $\text{m}^2\cdot\text{kg}\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$

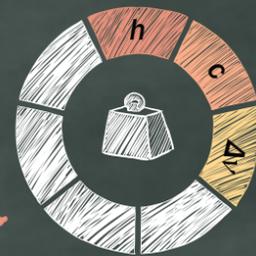


Intensité électrique. AMPÈRE (A)

1^{re} définition en 1946 correspondant au transport d'une charge électrique d'1 coulomb par seconde (C/s) à travers une surface.
Nouvelle définition (2018) relative à la constante de la charge élémentaire de l'électron ou du proton (e) dont la valeur est $1,602\,176\,634 \times 10^{-19} \text{ C}$.

$$1 \text{ A} = 6,789\,687... \times 10^8 \Delta\nu_{cs} \times e$$

- Charge électrique. COULOMB (C) : $\text{s}\cdot\text{A}$
- Différence du potentiel électrique. VOLT (V) : $\text{m}^2\cdot\text{kg}\cdot\text{s}^{-3}\cdot\text{A}^{-1}$
- Résistance électrique. OHM (Ω) : $\text{m}^2\cdot\text{kg}\cdot\text{s}^{-3}\cdot\text{A}^{-2}$
- Capacité électrique. FARAD (F) : $\text{m}^{-2}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{s}^4\cdot\text{A}^2$
- Inductance électrique. HENRY (H) : $\text{m}^2\cdot\text{kg}\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{A}^{-2}$
- Induction magnétique. TESLA (T) : $\text{kg}\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{A}^{-1}$



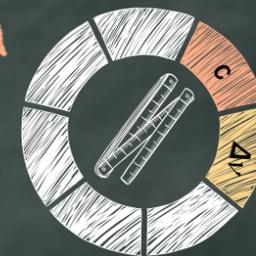
Masse. KILOGRAMME (kg)

1^{re} définition en 1799, établie à partir d'un objet matériel : un étalon en alliage de platine et d'iridium.

Nouvelle définition (2018) basée sur la constante de Planck (h) dont la valeur est fixée à $6,626\,070\,15 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$

$$1 \text{ kg} = 1,475\,521... \times 10^{40} h \Delta\nu_{cs} / c^2$$

- Force. NEWTON (N) : $\text{m}\cdot\text{kg}\cdot\text{s}^{-2}$
- Pression. PASCAL (Pa) : $\text{m}^{-1}\cdot\text{kg}\cdot\text{s}^{-2}$
- Différence de potentiel électrique. VOLT (V) : $\text{m}^2\cdot\text{kg}\cdot\text{s}^{-3}\cdot\text{A}^{-1}$
- Énergie. JOULE (J) : $\text{m}^2\cdot\text{kg}\cdot\text{s}^{-2}$
- Puissance, flux énergétique. WATT (W) : $\text{m}^2\cdot\text{kg}\cdot\text{s}^{-3}$



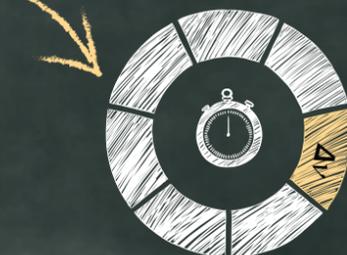
Longueur. MÈTRE (m)

1^{re} définition en 1791, basée sur la circonférence de la terre (1 m = 10 millièmes du méridien entre le pôle nord et l'équateur).

Définition actuelle (depuis 1983) basée sur la constante de la vitesse de la lumière dans le vide (c) égale à $299\,792\,458 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

$$1 \text{ m} = 30,663\,319... c / \Delta\nu_{cs}$$

- Surface. MÈTRE CARRÉ : m^2
- Volume. MÈTRE CUBE : m^3
- Angle plan. RADIAN (rad) : $\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$
- Angle solide. STÉRADIAN (sr) : $\text{m}^2\cdot\text{m}^{-2}$
- Dose absorbée. GRAY (Gy) : $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}$



Durée. SECONDE (s)

1^{re} définition en 1889 fondée sur la durée du jour terrestre divisée en 24 h de 60 min de 60 s.

Définition actuelle (depuis 1967) basée sur une constante ($\Delta\nu$) : nombre (9 192 631 770) d'oscillations (exprimé en fréquence Hz) de l'atome de césium 133.

$$1 \text{ s} = 9\,192\,631\,770 / \Delta\nu_{cs}$$

- Fréquence. HERTZ (Hz) : s^{-1}
- Activité d'un radionucléide. BECQUEREL (Bq) : s^{-1}
- Équivalent de dose. SIEVERT (Sv) : $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}$
- Dose absorbée. GRAY (Gy) : $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}$

NOTION CLÉ

Constantes fondamentales de la nature

Quantité physique dont la valeur numérique est fixe : invariable dans le temps et dans l'espace, et indépendante de tous les paramètres utilisés pour la mesurer.



TOUT
S'EXPLIQUE



© Philippe Stroppe

Un kilogramme pèsera toujours un kilogramme !

Dans le système international d'unités (SI), le kilogramme a fait figure d'exception. C'est la dernière des sept unités de base de mesure à être déterminée à partir d'un objet matériel : un cylindre de platine iridié conservé sous une triple cloche de verre dans un coffre-fort du Bureau international des poids et mesures (BIPM) à Sèvres. Depuis le 16 novembre 2018, il est défini à partir d'une constante fondamentale de la nature, la constante de Planck (h). Une définition qui, avec celles des six autres unités de base (mètre, seconde, ampère, kelvin, candela et mole), fait basculer le SI dans le monde ultra-précis du quantique !

La perte de poids du prototype du kilogramme

Depuis 1889, le prototype international du kilogramme, baptisé le grand K, était la référence des étalons de masse de tous les pays. Or, au fil du temps, ce cylindre de platine iridié a perdu de la masse ! En effet, une fois tous les cinquante ans, le grand K est comparé à six copies officielles « témoins ». La première comparaison, en 1889, avait permis de déterminer précisément une différence, laquelle s'est avérée varier de 30 microgrammes en 1946 et de 50 microgrammes en 1992. Le grand K ne pouvait plus demeurer la référence certaine du kilogramme, qui plus est lorsque cette unité de base intervient dans d'autres unités dérivées (le newton, le joule ou le watt)...

S'appuyer sur une constante physique immuable

Pour contourner cet écueil, le Comité international des poids et mesures recommanda en 2005 de redéfinir le kilogramme à partir d'une constante fondamentale de la nature, à la fois immatérielle, stable et universelle ; à l'instar de ce qui avait été réalisé en 1983 pour le mètre (constante de la vitesse de la lumière dans le vide - c). L'étalon ultime du kilogramme proposé est la constante de Planck, h , constante phare de la physique quantique qui sert à définir la plus petite quantité d'énergie qui puisse exister, sachant qu'énergie et masse s'équivalent ($E = mc^2$). L'énergie minimale de la constante de Planck définit donc naturellement une quantité de masse minimale, la plus petite mesurable sur Terre et dans tout l'Univers : le nouvel étalon.

Réduire la marge d'incertitude de la valeur de Planck

Restait encore à déterminer avec une marge infime d'incertitude (estimée à $2 \cdot 10^{-8}$) la valeur de ladite constante de Planck. Une exigence telle qu'elle fut hors de portée des instruments, jusqu'à la balance quantique du watt de Kibble en 2011. Principe : l'un des bras de la balance supporte une masse, l'autre est relié à une bobine placée dans un champ magnétique ; en appliquant une tension à cette borne, un courant circule ; le lien avec la constante de Planck se fait alors *via* des phénomènes quantiques impliquant cette tension et ce courant.

De nombreuses équipes de par le monde menèrent des « expériences de Kibble ». En 2017, le LNE, le Cnam et l'Observatoire de Paris parvinrent à définir la valeur de h avec une incertitude de $5,7 \cdot 10^{-8}$, contribuant avec d'autres à valider la nouvelle définition « quantique ».

Une nouvelle définition quantique

Désormais, le kilogramme correspond à $1,475 521 10^{40}$ fois la masse équivalente à l'énergie ondulatoire d'une particule de lumière se propageant dans le vide. À noter que cette définition fait intervenir deux autres unités primaires du SI, le mètre et la seconde, également définis à partir des propriétés les plus intimes et infimes de la matière... Même si, dans le quotidien, un kilogramme pèsera toujours un kilogramme !

© www.groupeorangevif.fr

les défis 233
du cea



TOUT
S'EXPLIQUE

Sept unités pour tout mesurer !

Voici ce que permet le système international d'unités (SI) : des mesures précises, de l'infiniment petit à l'infiniment grand, renforcées par les nouvelles définitions de 2018 à partir de constantes fondamentales de la nature.

Un enjeu de précision, indispensable aux développements technologiques.

ENJEUX TECHNOLOGIQUES ET INDUSTRIELS



Sans une mesure précise de la seconde, le GPS n'aurait jamais pu voir le jour. Il en est ainsi : le système international d'unités (SI) doit s'adapter aux progrès technologiques considérables de notre époque. En d'autres termes, la définition des unités doit évoluer pour permettre des mesures avec des précisions de plus en plus fines, tout en assurant une comparabilité fiable à long terme et une uniformité en tout lieu. Par exemple, dans les télécoms ou en astronomie, les mesures hautes fréquences doivent être de plus en plus exactes, de même pour les très hautes températures dans l'industrie. La percée des nanotechnologies et le développement des nouvelles technologies quantiques créent également des besoins de précision accrues dans de nouveaux champs de mesure. C'est tout l'enjeu de la révolution métrologique, qui a eu lieu le 16 novembre 2018 sous l'égide du

Comité international des poids et mesures, avec la redéfinition de quatre unités : le kilogramme, l'ampère, la candela et la mole. Désormais, les sept unités de base du SI sont déterminées sur la base de constantes fondamentales de la nature, immuables et universelles. Ce qui laisse envisager de nouveaux progrès. Par exemple, le fait de pouvoir s'appuyer sur la constante de Planck (base de la nouvelle définition du kilogramme) et sur la constante de la charge électrique fondamentale (pour l'ampère) va permettre des développements toujours plus innovants pour l'industrie de l'électronique. D'autant qu'avec ce nouveau système, qui signe l'avènement de l'approche quantique, les mesures pourront être réalisées à toutes les échelles... de la plus minuscule des particules jusqu'au corps céleste le plus massif.