

Les unités de mesure font peau neuve

Le Système international compte sept unités de base, censées quantifier des grandeurs physiques indépendantes, possédant chacune un symbole :



Grandeur	Symbole de la grandeur	Symbole de la dimension	Unité SI	Symbole associé à l'unité
Masse	m	M	kilogramme	kg
Longueur	$l, x, r...$	L	mètre	m
Temps	t	T	seconde	s
Intensité électrique	I, i	I	ampère	A
Température	T	Θ	kelvin	K
Quantité de matière	n	N	mole	mol
Intensité lumineuse	I_v	J	candela	cd

De ces unités de base on déduit des unités dérivées, par exemple l'unité de vitesse du Système international, le mètre par seconde. Certaines de ces unités possèdent un nom particulier.

https://fr.wikipedia.org/wiki/Syst%C3%A8me_international_d%27unit%C3%A9s

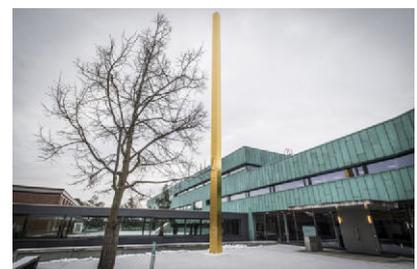
Quatre de ces unités ont été redéfinies fin 2018.

Ici =====>
en très bref
les nouvelles définitions

base unit	symbol	defining constants	symbol	Value
kilogram	kg	Planck constant	h	$6.626\,070\,15 \times 10^{-34} \text{ J s}$
metre	m	speed of light in a vacuum	c	$299\,792\,458 \text{ m/s}$
second	s	hyperfine transition frequency of caesium atom	$\Delta\nu_{\text{Cs}}$	$9\,192\,631\,770 \text{ Hz}$
ampere	A	elementary charge	e	$1.602\,176\,634 \times 10^{-19} \text{ C}$
kelvin	K	Boltzmann constant	k	$1.380\,649 \times 10^{-23} \text{ J/K}$
mole	mol	Avogadro constant	N_A	$6.022\,140\,76 \times 10^{23} / \text{mol}$
candela	cd	luminous efficacy of monochromatic radiation of frequency 540 THz	K_{cd}	683 lm/W

Sur les pages suivantes =>

- 1 Les raisons du changement de ces définitions. 3 pages origine =>
- 2 7 pages provenant du document metas info_2018_02 de l' Institut Fédéral de Métrologie METAS
- 3 Institut fédéral de métrologie 3003 Berne-Wabern
L'endroit où l'on mesure tout. **LA LIBERTÉ** 10.04.2018 2 pages
<https://www.metas.ch/>
- 4 Les préfixes du système international d'unités
- 5 1875 - 1975 Les 100 ans de la convention du mètre 1 page
- 6 Autres sources d'infos



Plus de deux siècles après la première définition du mètre à partir d'un invariant de la nature qui a conduit à sa redéfinition en fixant la valeur numérique de la vitesse de la lumière en 1983, nous sommes aujourd'hui en mesure d'étendre cette approche à l'ensemble des unités pour instaurer le premier système d'unités entièrement défini à partir de constantes universelles. Cette évolution historique verra l'entrée en vigueur le 20 mai 2019 du système d'unités le plus invariable et le plus universel jamais établi par l'Homme.

En décidant de fixer certaines constantes universelles, les métrologistes s'apprêtent à changer notre façon de mesurer le monde. Cette révolution sera marquée par une réforme majeure du Système international d'unités (le SI) qui sera décidée à Versailles, lors de la 26^e Conférence générale des poids et mesures (CGPM), du 13 au 16 novembre. Le nouveau SI entrera ensuite en vigueur le 20 mai 2019 à l'occasion de la journée mondiale de la métrologie. L'ambition de cette grande réforme est d'établir un système d'unités plus cohérent, plus stable et universel.



Les sept unités de base du SI. © BIPM

Quelles sont ces constantes universelles sur lesquelles vont dorénavant reposer toutes nos mesures ?

Notre SI compte sept unités de base (voir illustration ci-dessus), autant de constantes seront donc nécessaires pour construire le nouveau système :

- La fréquence de transition entre deux niveaux de l'état fondamental de l'atome de césium 133 (notée Cs) basée sur la quantification des niveaux d'énergie à l'échelle atomique.
- La vitesse de la lumière dans le vide (notée c) en tant que vitesse limite dans le cadre de la théorie de la relativité restreinte.
- La constante de Planck (notée h) introduite par la mécanique quantique.
- La charge élémentaire (notée e) de l'électromagnétisme.
- La constante de Boltzmann (notée k) introduite en thermodynamique.
- La constante d'Avogadro (notée NA) particulièrement utilisée en chimie.
- Le rendement lumineux (noté Kcd) utilisé en photométrie.

Dans l'ancien SI, les valeurs numériques de $\Delta\nu_{Cs}$, Kcd et c sont déjà fixées implicitement par les définitions respectivement de la seconde, de la candela et du mètre. Ainsi la définition du mètre par exemple, donnée depuis 1983 par la longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière pendant une durée de $1/299.792.458^e$ de seconde, impose que c soit égal à 299.792.458 m/s exactement. Au cours de la 26^e Conférence générale des poids et mesures, à ces trois constantes viendront s'ajouter h, e, k et NA dont les valeurs numériques seront fixées à des valeurs exactes pour redéfinir le kilogramme, l'ampère, le kelvin et la mole (voir tableau ci-dessous).

Constante	Symbole	Valeur numérique exacte	Définition de l'unité du SI
Fréquence de transition entre les deux niveaux de l'atome de césium	$\Delta\nu_{Cs}$	9 192 631 770 Hz (avec Hz = s ⁻¹)	La seconde (s) est définie en fixant la valeur de $\Delta\nu_{Cs}$ exprimée en s ⁻¹
Vitesse de la lumière dans le vide	c	299 792 458 m/s	A partir de la seconde, le mètre (m) est défini en fixant la valeur de c exprimée en m s ⁻¹
Constante de Planck	h	6,626 070 15 × 10 ⁻³⁴ J s (avec J = m ² kg s ⁻²)	A partir de la seconde et du mètre, le kilogramme (kg) est défini en fixant la valeur de h exprimée en kg m ² s ⁻¹
Charge élémentaire	e	1,602 176 634 × 10 ⁻¹⁹ C (avec C = A s)	A partir de la seconde, l'ampère (A) est défini en fixant la valeur de e exprimée en A s
Constante de Boltzmann	k	1,380 649 × 10 ⁻²³ J/K (avec J = m ² kg s ⁻²)	A partir de la seconde, du mètre et du kilogramme, le kelvin (K) est défini en fixant la valeur de k exprimée en K ⁻¹ kg m ² s ⁻²
Constante d'Avogadro	N_A	6,022 140 76 × 10 ²³ mol ⁻¹	La mole (mol) est définie en fixant la valeur de N_A exprimée en mol ⁻¹
Rendement lumineux d'une radiation monochromatique de fréquence 540.10 ¹² Hz	K_{cd}	683 lm/W (avec lm = cd m ² m ⁻² = cd sr et W = m ² kg s ⁻³)	A partir de la seconde, du mètre et du kilogramme, la candela (Cd) est définie en fixant la valeur de K_{cd} exprimée en cd sr kg ⁻¹ m ⁻² s ³

Construction du nouveau Système international d'unités ou SI

Pourquoi a-t-on choisi ces constantes ?

Ces quatre grandeurs ont été retenues pour les raisons suivantes :

- Chacune s'exprime en fonction de l'unité que l'on cherche à définir (et éventuellement d'autres unités de base elles-mêmes définies par d'autres constantes).
- Ce sont des invariants de la nature (indépendant du temps et de l'espace) à caractère universel ce qui permettra d'assurer la stabilité à long terme des nouvelles définitions.
- Elles ont été mesurées avec une très faible incertitude dans l'ancien SI, ce qui permettra de fixer la valeur numérique de chaque constante en garantissant la continuité entre l'ancien et le nouveau système de mesure.

Mais pourquoi donc redéfinir le kilogramme, la mole, l'ampère et le kelvin ?

Plusieurs difficultés intrinsèquement liées à l'ancien SI seront surmontées dès la mise en place du nouveau système en 2019.

Le kilogramme repose depuis 1889 sur un objet matériel particulier, le prototype international du kilogramme (noté K). Cette définition qui privilégie une masse particulière (K=1 kg) conduit à une qualité des pesées dégradée pour les masses inférieures au kilogramme. Les pesées à l'échelle du milligramme sont ainsi 2.500 fois moins précises que celles réalisées autour de 1 kilogramme. Un autre problème bien connu concerne la stabilité - ou plutôt l'instabilité - à long terme du kilogramme. On sait en effet que les masses des différents étalons (K et ses copies) sont instables et ont varié les unes par rapport aux autres d'environ 50 µg en un siècle ! Dans ces conditions, que dire par exemple de la stabilité de la masse de l'électron ou du proton sur la même période ?



Le prototype international du kilogramme (alliage de platine et d'iridium) défini en 1889

Le PIK et ses six copies sont stockés au Bureau international des poids et mesures, protégés chacun par trois cloches de verre scellées dans un coffre-fort spécial à « l'environnement contrôlé » dans la cave la plus basse du pavillon de Breteuil à Sèvres, dans la banlieue de Paris

Trois clés indépendantes sont nécessaires pour ouvrir ce coffre. Des copies officielles du PIK sont réalisées pour les États afin de servir de standards nationaux. Le PIK n'est extrait de son coffre que pour en réaliser des étalonnages tous les 50 ans environ (cette opération n'a eu lieu que trois fois depuis sa création), afin de fournir une traçabilité des mesures locales.

(wikipedia)

La définition de la mole qui exprime la quantité de matière contenue dans 0,012 kg de carbone 12 repose sur la définition du kilogramme. Elle est donc directement impactée par les problèmes liés à l'unité de masse et la quantité de matière contenue aujourd'hui dans une mole n'est pas strictement la même qu'en 1971 lorsqu'elle a été introduite dans le SI !

En reposant sur des invariants de la nature, la nouvelle définition du kilogramme assurera la stabilité de l'unité tout en ne privilégiant aucune masse particulière. On peut également noter que la nouvelle définition de la mole déconnectera cette dernière de la définition du kilogramme.

Un autre problème majeur actuel est posé par l'expérience idéale qui, depuis 1948, sert à définir l'ampère : la force mécanique entre deux fils infiniment longs, séparés d'un mètre, dans lesquels circule un courant. Depuis plusieurs décennies les mesures électriques n'utilisent plus cette définition qui en pratique a été remplacée par des étalons bien plus performants : un étalon de tension et un étalon de résistance qui reposent respectivement sur un effet quantique dans un semi-conducteur (l'effet Hall quantique) et sur un effet qui apparaît à basse température dans un supraconducteur (l'effet Josephson). Ces étalons font intervenir e et h , deux constantes qui seront fixées dans le nouveau SI. La nouvelle définition de l'ampère permettra donc de réconcilier définition et réalisations pratiques des unités électriques.

Pour finir l'unité de température, le kelvin. Elle repose depuis 1954 sur un système physique particulier, le point triple de l'eau choisi comme point fixe fondamental auquel est attribué par convention la température exacte de 273,16 K (soit 0,01 °C). Toute mesure de température doit donc se référer à cette température particulière, contrainte qui pose de grandes difficultés particulièrement pour les thermomètres fonctionnant à très basses températures (au-dessous de 20 K) ou à très hautes températures (au-dessus de 1.300 K). Fixer k plutôt que la température du point triple de l'eau permettra de ne privilégier aucune température particulière et de lever cette difficulté.

La réalisation du kilogramme

Dans le SI révisé, la définition du kilogramme devient:

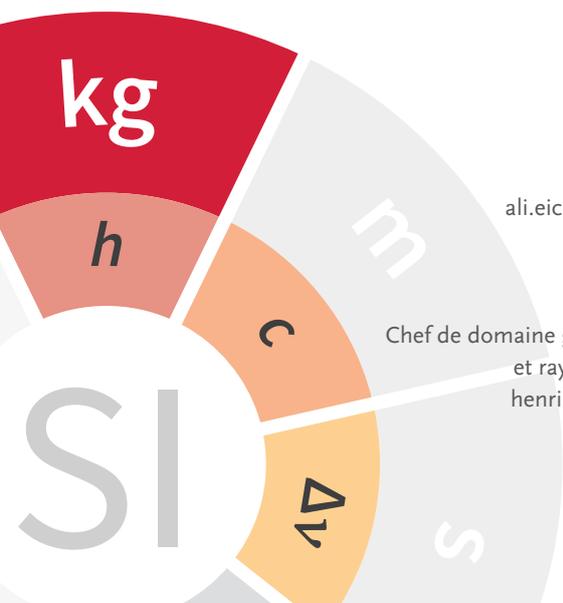
Le kilogramme, symbole kg, est l'unité de masse du SI. Il est défini en prenant la valeur numérique fixée de la constante de Planck, h , égale à $6.626\,070\,15 \times 10^{-34}$ lorsqu'elle est exprimée en J s, unité égale à $\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$, le mètre et la seconde étant définis en fonction de c et $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.

Aujourd'hui, il existe deux possibilités de réalisation directe de la nouvelle unité de masse basée sur la constante de Planck. La première est un instrument appelé balance du watt, ou balance de Kibble, qui effectue une comparaison des puissances électrique et mécanique virtuelles. La seconde approche fait intervenir une sphère monocristalline de silicium. Pour le moment, aucune de ces expériences n'a atteint le niveau requis pour procéder à une réalisation directe. Pendant une période transitoire d'une durée indéterminée, la nouvelle unité de masse sera réalisée par l'intermédiaire d'une comparaison circulaire d'un ensemble de masses entre les différents laboratoires possédant une possibilité de réalisation du kg selon la nouvelle définition.

METAS poursuit la mise au point d'une balance du watt depuis plusieurs années. La version 2 (voir photo 1) est en phase d'optimisation pour participer à la comparaison circulaire qui sera mise en place dans le courant de l'année 2019. La balance de METAS est le résultat d'une collaboration avec METTLER-TOLEDO, le CERN et l'EPFL. La comparaison entre puissances électrique et mécanique virtuelles s'effectue par l'intermédiaire de deux phases de mesure. La première, dite statique, résulte de l'équilibre du poids de la masse de test avec la force électromagnétique produite par un courant circulant dans une bobine plongée dans un champ magnétique. La seconde, dite, dynamique permet un étalonnage du circuit électromagnétique en mesurant la tension induite aux bornes de la bobine lors d'un déplacement vertical de celle-ci.



1: Balance du watt de METAS



Contact:
Dr. Ali Eichenberger
ali.eichenberger@metas.ch
+41 58 387 05 51

Dr. Henri Baumann
Chef de domaine grandeurs mécanique
et rayonnements ionisants
henri.baumann@metas.ch
+41 58 387 05 51



Die Realisierung des Meters

Im revidierten SI erhält die Definition der Einheit Meter eine neue Formulierung:

Der Meter (Symbol m) ist die SI Einheit der Länge. Er wird definiert durch die Konstante der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum c . Der Zahlenwert dieser Konstante ist auf 299 792 458 festgelegt, wenn sie in der Einheit m s^{-1} angegeben wird und die Sekunde durch $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ definiert ist.

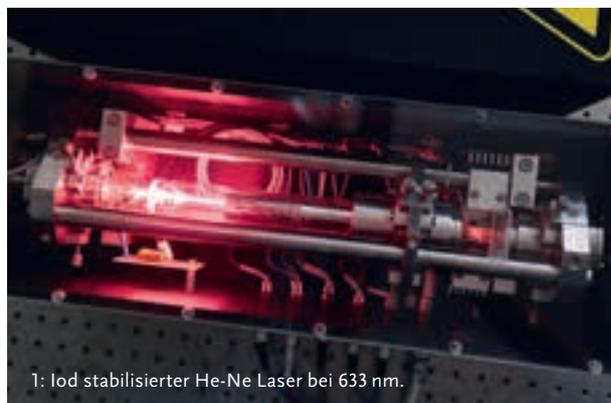
Mit dieser neuen Formulierung wird noch deutlicher betont, dass durch die Meterdefinition der Lichtgeschwindigkeit ein exakter Wert, in der Einheit m/s , zugeordnet wird. Inhaltlich bleibt die neue Definition zur heute gültigen von 1983 unverändert. Davor basierte die Definition der Einheit Meter auf der Wellenlänge der Krypton 86 Strahlung. Diese wurde 1960 eingeführt, um den Meter-Prototyp aus Platin-Iridium aus dem Jahr 1889 abzulösen.

Die praktische Umsetzung dieser Definition für eine Längenmessung geschieht entweder über eine Laufzeitmessung des Lichtes über die zu messende Wegstrecke (so funktionieren optische Distanzmessgeräte), oder für genauere Messungen mithilfe der Interferometrie. Dabei werden Wellenlängen eines Laserlichtstrahls auf einer abgefahrenen Wegstrecke entlang einer Massverkörperung abgezählt und interpoliert. Dies ermöglicht einen ausserordentlich grossen Messbereich von mehreren Dutzend Metern bis zu Bruchteilen von Nanometern. Über die Beziehung $\lambda = c/\nu$ kann über die festgelegte Lichtgeschwindigkeit c die Wellenlänge λ einer monochromatischen elektromagnetischen Welle im Vakuum in Bezug zu deren Frequenz ν gebracht werden. Letztere ergibt sich aus der Definition der Sekunde.

Die sogenannte «mise en pratique» listet optische Frequenzen einer grossen Zahl von Absorptionslinien auf und beschreibt Verfahren und Parameter, um Laser auf diese Frequenzen zu stabilisieren. Am METAS wird der Meter seit knapp 30 Jahren durch Helium-Neon-Laser realisiert, deren optische Frequenz auf einen Hyperfeinstrukturübergang des Iodmoleküls $^{127}\text{I}_2$

stabilisiert wird. Damit wird eine relative Messunsicherheit von $2.5 \cdot 10^{-11}$ erreicht, was einer Länge von 1 mm bezogen auf den Erdumfang entspricht.

Um die Realisierungen der Einheit Meter am METAS zu validieren, werden die iodstabilisierten Laser regelmässig untereinander und auch international verglichen. Seit der Erfindung des optischen Frequenzkamms 1998 gibt es eine elegante und relativ einfache Möglichkeit, optische Frequenzen direkt in Bezug zur Definition und Realisierung der Sekunde zu bringen. So können heute die iodstabilisierten Laser der Meter-Basis über eine Glasfaser und einen zwischengeschalteten Diodenlaser direkt mit dem faseroptischen Femtosekunden-Frequenzkamm des Labors Photonik, Zeit und Frequenz verglichen und damit auf die Zeit-Basis des METAS zurückgeführt werden.



1: Iod stabilisierter He-Ne Laser bei 633 nm.



Kontakt:
Dr. Felix Meli
Laborleiter Länge, Nano- und Mikrotechnik
felix.meli@metas.ch
+41 58 387 03 46

La réalisation de la seconde

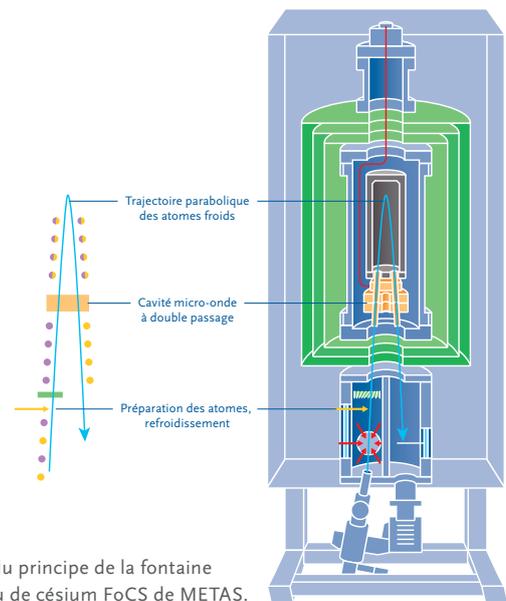
Dans le SI révisé, la définition de la seconde devient:

La seconde, symbole s, est l'unité de temps du SI. Elle est définie en prenant la valeur numérique fixée de la fréquence du césium $\Delta\nu_{\text{Cs}}$, la fréquence de la transition hyperfine de l'état fondamental de l'atome de césium 133 non perturbé, égale à 9 192 631 770 lorsqu'elle est exprimée en Hz, unité égale à s^{-1} .

D'un point de vue historique, la seconde a tout d'abord été définie par l'observation de la rotation de la Terre autour de son axe la mesure de la durée du jour solaire moyen. Une journée comptant 86 400 secondes, il était ainsi possible d'en déduire la valeur de la seconde. Une telle réalisation n'était cependant pas satisfaisante du fait de l'instabilité naturelle de la vitesse de rotation de la Terre. Les progrès réalisés en physique atomique ont permis d'envisager une toute nouvelle approche, se basant cette fois-ci sur la mesure de fréquences de transitions atomiques très stables. Cette approche a donné naissance à une nouvelle définition de la seconde, entrée en vigueur en 1967. Cette définition est toujours utilisée, et l'introduction de la nouvelle révision du Système international d'unités (SI) aura pour unique conséquence que la fréquence de la transition $\Delta\nu_{\text{Cs}} = 9\,192\,631\,770$ Hz permettra d'exprimer la seconde au travers des formules suivantes :

$$1 \text{ Hz} = \frac{\Delta\nu_{\text{Cs}}}{9\,192\,631\,770} \quad \text{ou} \quad 1 \text{ s} = \frac{9\,192\,631\,770}{\Delta\nu_{\text{Cs}}}$$

La seconde est l'unité dont dépendent directement le mètre, le kilogramme, l'ampère, le kelvin et la candela. Sa réalisation se fait aujourd'hui à l'aide de fontaines à jets de césium, comme la fontaine à jet de césium continu FoCs de METAS[1]. Dans un tel étalon primaire, les atomes sont tout d'abord refroidis à des températures de l'ordre de quelques micro kelvin, à l'aide de faisceaux lasers. Ils sont ensuite lancés sur une trajectoire parabolique, comme le schéma de la figure 1 le montre. Tout au long de leur trajectoire, les atomes vont ainsi pouvoir passer deux fois à travers une cavité micro-onde. Une telle méthode, dite interrogation de Ramsey, permet une mesure très exacte de la fréquence de la transition. De telles fontaines permettent d'atteindre des incertitudes relatives de l'ordre de quelques 10^{-15} à 10^{-16} sur la détermination de la

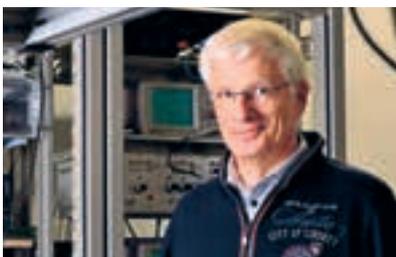


1: Schéma du principe de la fontaine à jet continu de césium FoCS de METAS.

fréquence de transition. Il existe de par le monde une vingtaine de fontaines contribuant à l'ajustage du Temps Atomique International (TAI). La réalisation de TAI, ainsi que du Temps Universel Coordonné (UTC) qui en découle, se fait à travers la comparaison à distance d'un grand nombre d'horloges atomiques plus simples que les fontaines, et possédant une très bonne stabilité, mais étant moins exactes. Le résultat de ces comparaisons fournit une réalisation de la seconde très stable, mais dont la vraie valeur est ensuite ajustée grâce aux contributions des fontaines.

Référence

- [1] A. Jallageas, L. Devenoges, M. Petersen, J. Morel, L.G. Bernier, D. Schenker, P. Thomann and T. Südmeyer, «First uncertainty evaluation of the FoCS-2 primary frequency standard». Metrologia, 55, (3), 366–385.

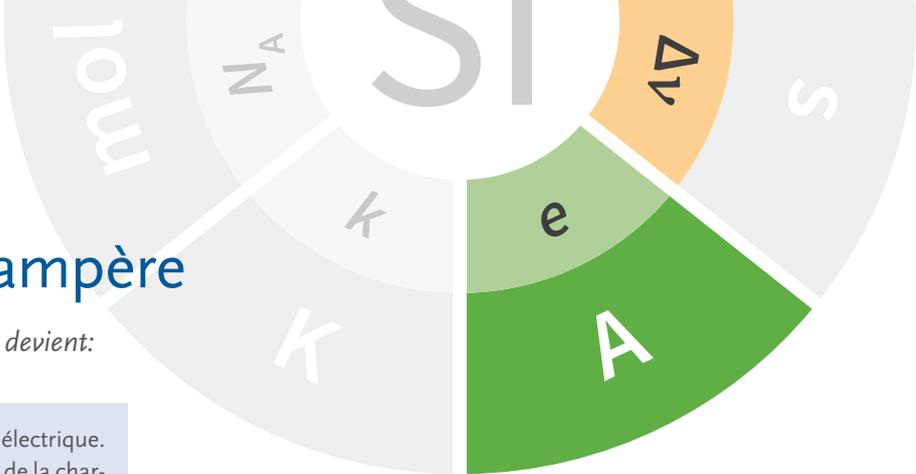


Contact:
Dr. Jacques Morel
Chef du laboratoire photonique, temps et fréquence
jacques.morel@metas.ch
+41 58 387 03 50

La réalisation de l'ampère

Dans le SI révisé, la définition de l'ampère devient:

L'ampère, symbole A, est l'unité SI du courant électrique. Il est défini en prenant la valeur numérique fixe de la charge élémentaire e à $1.602\,176\,634 \times 10^{-19}$, exprimée dans l'unité C, qui est égale à As , où la seconde est définie en terme de $\Delta\nu_{Cs}$.



À METAS, depuis le début des années 1990, les unités électriques ne sont pas réalisées grâce à l'ampère, mais grâce à deux effets quantiques: l'effet Hall quantique et l'effet Josephson [1–2], qui permettent d'obtenir de bien meilleures incertitudes de mesure pour la résistance et la tension électrique.

L'effet Hall quantique se produit à température cryogénique dans un gaz d'électron bidimensionnel (cf. fig. 1). La résistance de Hall est quantifiée et donnée par : $R_H(i) = h/ie^2$ ou h est la constante de Planck, e la charge élémentaire et i l'indice du plateau (cf. fig. 1). La résistance de Hall est une grandeur universelle qui ne dépend d'aucun paramètre de l'échantillon tel que le matériel utilisé pour la croissance du gaz bidimensionnel, l'indice du plateau, la largeur, la mobilité ou la température [1].

L'effet Josephson est observé dans des jonctions à effet tunnel, formées de deux électrodes supraconductrices séparées par une mince couche d'isolant [2]. Une fois refroidie à température cryogénique et soumise à une radiation électromagnétique de fréquence f , la tension aux bornes de la jonction est quantifiée et donnée par : $V_n = n h/2e f$. La tension de Josephson V_n est également une valeur universelle, liée à la quantification du flux magnétique et à l'invariance de jauge [2]. Actuellement, la valeur de la constante de von Klitzing $R_K = h/e^2$ et la valeur de la constante de Josephson $K_J = 2e/h$ sont fixées depuis 1990 à des valeurs conventionnelles R_{K-90} et K_{J-90} , dépourvues d'incertitude.

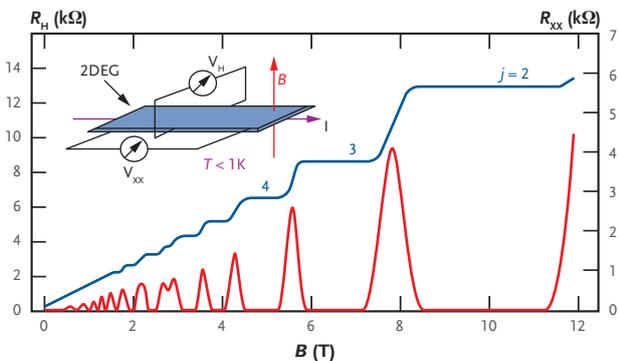
En 2019, la redéfinition du SI va donner une valeur fixe, sans incertitude à la charge élémentaire e et à la constante de Planck h (cf. 2). Cette nouvelle définition va conduire à des valeurs numériques différentes de R_{K-90} et K_{J-90} . Néanmoins, la différence sera faible, imperceptible pour la plupart des utilisateurs du SI. En effet, l'écart relatif sur K_J sera de -0.107 ppm et de 0.018 ppm sur R_K .

$e = 1.602\,176\,634 \times 10^{-19}$ C (exacte)
 $h = 6.626\,070\,150 \times 10^{-34}$ Js (exacte)
 $K_J = 483\,597.848\,416\,984$ GHz/V
 $R_K = 25\,812.807\,459\,304\,5$ Ω

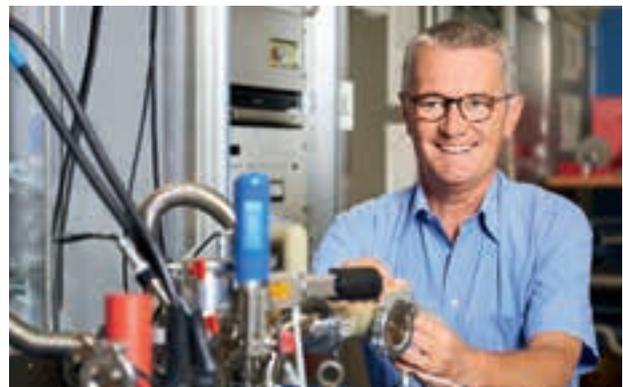
2: Valeurs exactes données à la charge élémentaire et à la constante de Planck ainsi que les valeurs calculées à 15 digits pour les constantes de von Klitzing et de Josephson.

Références

- [1] B. Jeckelmann and B. Jeanneret, The quantum Hall effect as an electrical resistance standard, Rep. Prog. Phys. 64, pp. 1603–1655, 2001.
- [2] B. Jeanneret and S. P. Benz, Application of the Josephson Effect in Electrical Metrology, Eur. Phys. J. Special Topics 172, pp. 181–206, 2009.



1: Observation de l'effet Hall quantique dans un gaz bidimensionnel d'électrons refroidi à $T < 1K$. Pour certaines valeurs du champ d'induction B , la résistance de Hall R_H est quantifiée en unité de h/e^2 , et la résistance longitudinale R_{xx} s'annule.



Contact:
 Dr. Blaise Jeanneret
 blaise.jeanneret@metas.ch, +41 58 387 03 03

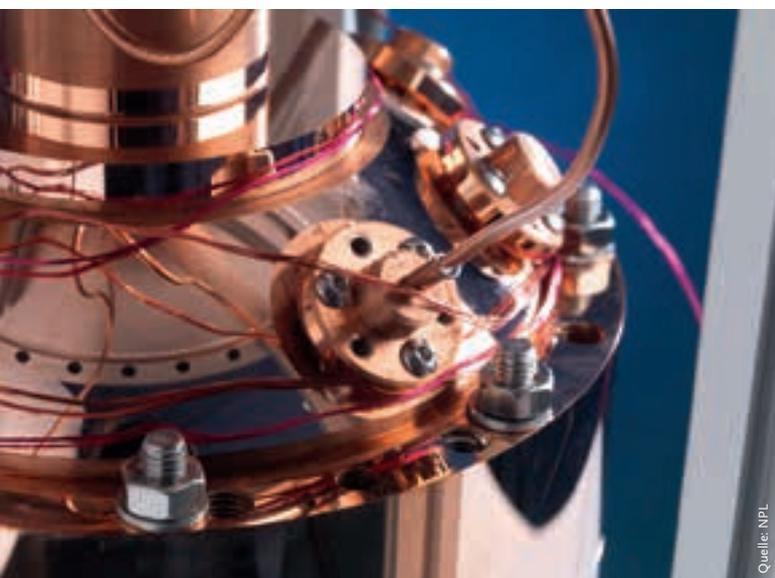
Die Realisierung des Kelvin

Im revidierten SI ist die Temperatureinheit Kelvin wie folgt definiert:

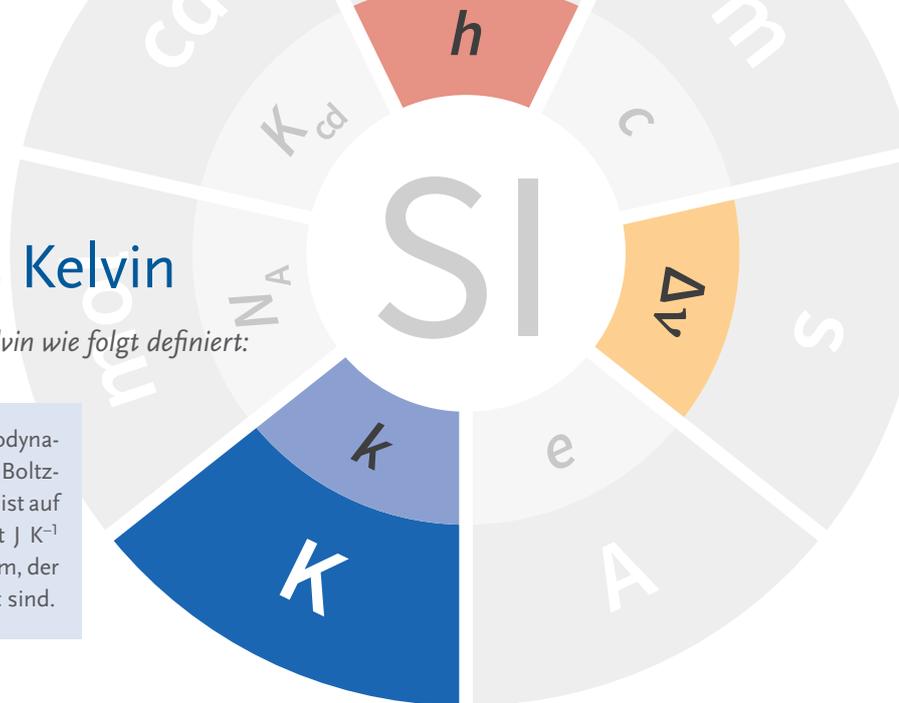
Das Kelvin (Symbol K) ist die SI-Einheit der thermodynamischen Temperatur. Es wird definiert durch die Boltzmann-Konstante k . Der Zahlenwert dieser Konstante ist auf 1.380649×10^{-23} festgelegt, wenn sie in der Einheit J K^{-1} bzw. $\text{kg m}^2 \text{s}^{-2} \text{K}^{-1}$ angegeben wird und das Kilogramm, der Meter und die Sekunde durch h , c und $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ definiert sind.

Die neue Kelvin-Definition besagt, dass 1 Kelvin einem Bereich der thermodynamischen Temperatur T entspricht, der eine Änderung der thermischen Energie kT um $1.380649 \times 10^{-23} \text{ J}$ bewirkt.

Das Kelvin wurde 1948 als Basiseinheit in das metrische System aufgenommen. Von diesem Zeitpunkt bis zur aktuellen Revision war die thermodynamische Temperaturskala durch zwei Fixpunkte definiert; einerseits durch den naturgesetzlich vorgegebenen absoluten Nullpunkt und andererseits durch den Tripelpunkt des Wassers, dem der Wert 273.16 K zugeordnet wurde. Der Tripelpunkt des Wassers ist der Zustand, in dem alle drei Phasen des Wassers, fest, flüssig und gasförmig, miteinander im Gleichgewicht sind. Das neu definierte Kelvin ist jetzt direkt von der Energieeinheit Joule abgeleitet, indem der Boltzmann-Konstanten und damit dem Proportionalitätsfaktor zwischen thermodynamischer Temperatur und thermischer Energie ein fixer Wert zugeordnet wird. Der Ursprung dieser Definition ist die statistische Mechanik, wo die thermodynamische Temperatur in einem System als ein Mass für die mittlere thermische Energie pro Freiheitsgrad steht. Die Celsius-Skala behält auch im revidierten SI ihre Gültigkeit. Diese ist definiert durch $T - 273.15 \text{ K}$. Die Einheit Celsius, Symbol $^{\circ}\text{C}$, ist per Definition gleich gross wie das Kelvin.



Quelle: NPL



Der Wert der Boltzmann-Konstanten ist so gewählt, dass die Temperatur des Tripelpunkts T_{TPW} zum Zeitpunkt der Revision bei 273.16 K bleibt. Gegenüber früher hat jedoch T_{TPW} eine relative Standard-Unsicherheit von 3.7×10^{-7} (= ca. 0.1 mK). Dabei handelt es sich um die Unsicherheit, mit der k vor der Revision experimentell bestimmt werden konnte.

Für die Realisierung der Temperatur-Einheit können verschiedene primäre Methoden eingesetzt werden. Im Raumtemperaturbereich ist die genaueste Methode die sog. Akustische Gas-Thermometrie. Diese Methode beruht auf der Beziehung der Schallgeschwindigkeit u in einem idealen Gas und der thermodynamischen Temperatur T über $u^2 = \gamma kT/m$. Dabei ist γ das Verhältnis der spezifischen Wärme bei konstantem Druck und konstantem Volumen und m die mittlere molare Masse des Gases. Im Experiment wird die Schallgeschwindigkeit in einem Kugelresonator bestimmt (siehe Bild).

Die Realisierung der Temperaturskala über einen grossen Temperaturbereich mit primären Methoden ist (immer) noch sehr aufwendig. In der Praxis wird man deshalb auch in Zukunft die sog. «praktische» Temperaturskala, im Moment die Internationale Temperaturskala ITS-90, anwenden. In dieser Skala sind eine ganze Reihe von hochstabilen Temperaturfixpunkten festgelegt. Das sind in der Regel Tau- oder Schmelzpunkte von Metallen, deren Temperaturen mit primären Methoden ermittelt und danach definitionsgemäss fixiert werden. Zwischen den Fixpunkten werden die Temperaturen mit Hilfe von in der Definition der Skala ebenfalls festgelegten Thermometertypen interpoliert. Im Bereich zwischen $-38.8344 \text{ }^{\circ}\text{C}$ und $29.7646 \text{ }^{\circ}\text{C}$ beispielsweise sind der Tripelpunkt des Quecksilbers und des Wassers sowie der Schmelzpunkt des Galliums als Fixpunkte und das Platinwiderstandsthermometer als Interpolationsinstrument vorgeschrieben.

Das METAS ist in den Experimenten zur Bestimmung der absoluten thermodynamischen Temperatur nicht aktiv. Die nationale Temperaturskala in der Schweiz beruht auf der aktuell gültigen praktischen Temperaturskala (zurzeit ITS-90).

Die Realisierung des Mols

Im revidierten SI ist das Mol wie folgt definiert:

Das Mol (Symbol mol) ist die SI-Einheit der Stoffmenge. Ein Mol enthält exakt $6.022\,140\,76 \times 10^{23}$ Einzelteilchen. Diese Zahl wird Avogadro-Zahl genannt und entspricht der Avogadro-Konstante N_A , wenn diese in der Einheit mol^{-1} angegeben wird.

Die Stoffmenge (Symbol n) eines Systems ist ein Mass für die Anzahl an bestimmten Einzelteilchen. Einzelteilchen können Atome, Moleküle, Ionen, Elektronen, andere Partikel oder Entitäten oder Gruppen von Partikeln oder Entitäten sein.



Die neue Definition ersetzt diejenige von 1971, wo ein Mol der Stoffmenge eines Systems entspricht, welches aus ebenso vielen Einzelteilchen besteht, wie Atome in 0.012 Kilogramm des ^{12}C enthalten sind. Der neue Wortlaut, mit der Definition der Einheit über die Avogadro Zahl und anschliessende Definition der Grösse Stoffmenge, wird durch die anfänglich sehr skeptisch eingestellten chemischen Gesellschaften unterstützt und kann einfach vermittelt werden.

Die Definition des Mols setzt kein bestimmtes Experiment für die Realisierung voraus [1]. Vielmehr kann jede Methode, welche die Anzahl Mol rückführbar auf die sieben Referenzkonstanten bestimmt, angewandt werden. Die momentan genaueste Realisierung des Mols resultierte aus dem Experiment zur Bestimmung der Avogadro-Konstante und beinhaltete die Bestimmung der Anzahl ^{28}Si in einem mit ^{28}Si angereicherten Silizium-Einkristall mittels volumetrischer und Röntgen-interferometrischer Messungen. In diesem Experiment konnte das Mol mit einer relativen Unsicherheit unter 2×10^{-8} realisiert werden.

In der Praxis verlangen alle chemischen Messungen die Realisierung abgeleiteter Einheiten der Stoffmenge, wie beispielsweise die Stoffmengenkonzentration (mol/m^3), der Stoffmen-

gehalt (mol/kg) oder der Stoffmengenanteil (mol/mol). Hierzu werden an den nationalen Metrologieinstituten primäre Methoden verwendet. Als primär gelten Methoden, welche die höchsten metrologischen Eigenschaften aufweisen, d.h. ihre Anwendung ist vollständig beschrieben und verstanden, ein vollständiges Messunsicherheitsbudget in SI-Einheiten kann erstellt werden und sie beziehen sich nicht auf eine Referenz derselben Grösse.

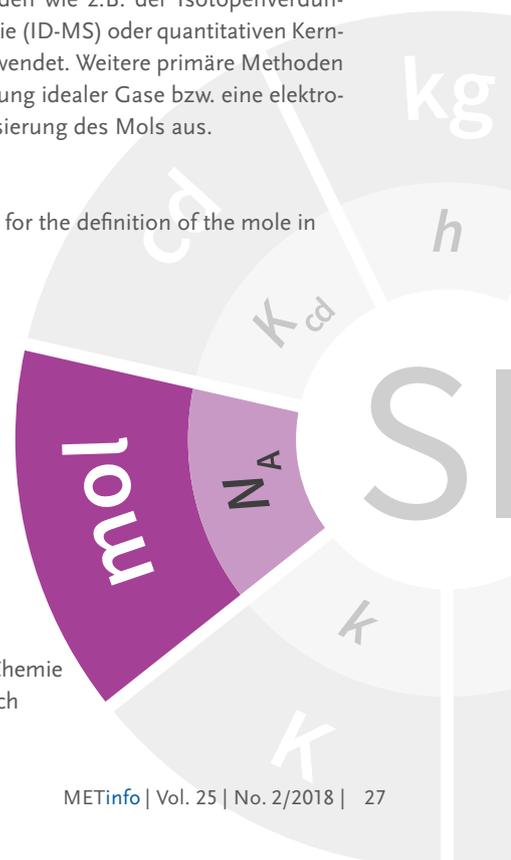
Die am häufigsten verwendete primäre Methode zur Realisierung des Mols ist die Gravimetrie, da die Masse einer Probe relativ einfach und genau bestimmt werden kann. Bei der Verwendung hochreiner Substanzen kann das Mol mit relativen Unsicherheiten unter 1×10^{-4} realisiert werden. Diese zertifizierten Substanzen werden anschliessend für die Rückführung primärer Vergleichsmethoden wie z.B. der Isotopenverdünnungs-Massenspektrometrie (ID-MS) oder quantitativen Kernspinresonanz (qNMR) verwendet. Weitere primäre Methoden nutzen die Zustandsgleichung idealer Gase bzw. eine elektrolytische Reaktion zur Realisierung des Mols aus.

Referenz

[1] Draft mise en pratique for the definition of the mole in the SI, www.bipm.org.



Kontakt:
Dr. Hanspeter Andres
Bereichsleiter Analytische Chemie
hanspeter.andres@metas.ch
+41 583 87 09 46



Die Realisierung der Candela

Im revidierten SI ist die Candela wie folgt definiert:

Die Candela (Symbol cd) ist die SI Einheit für die Lichtstärke in einer bestimmten Raumrichtung. Sie wird definiert durch die Konstante K_{cd} , dem photometrischen Strahlungsäquivalents einer monochromatischen Strahlung von $540 \cdot 10^{12}$ Hz. Der Zahlenwert dieser Konstante ist auf 683 festgelegt, wenn sie in der Einheit $\text{lm} \cdot \text{W}^{-1}$ bzw. $\text{cd} \cdot \text{sr} \cdot \text{W}^{-1}$ oder $\text{cd} \cdot \text{sr} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^3$ angegeben wird und das Kilogramm, der Meter und die Sekunde durch h , c und $\Delta\nu_{CS}$ definiert sind.

Die neue Definition ist inhaltlich äquivalent zur bisherigen Definition. Im Wesentlichen beschreibt das photometrische Strahlungsäquivalent K_{cd} den Zusammenhang zwischen den photometrischen Messgrößen (Lichtstrom, Lichtstärke, Beleuchtungsstärke, und Leuchtdichte) zu den entsprechenden radiometrischen Messgrößen (Strahlungsfluss, Strahlstärke, Bestrahlungsstärke und Strahldichte).

In diesem Sinn basiert die bisherige Definition, die 1979 eingeführt wurde, bereits nicht mehr auf einem Artefakt oder einer präzisen Anleitung zur Einheitenrealisierung. Der Vorteil der aktuellen und auch der neuen Definition ist, dass sie losgelöst von einer vorgeschriebenen Technologie realisiert werden kann und daher universell ist. Eine Eigenheit bleibt hingegen bestehen: Die Candela ist für eine monochromatische Strahlung der Frequenz $540 \cdot 10^{12}$ Hertz definiert, dies entspricht rein-grünem Licht der Wellenlänge von ungefähr 555 nm. In der Beleuchtungstechnik wird aber in der Praxis hauptsächlich weisses Licht verwendet. Umso wichtiger ist daher die «mise-en-pratique» der Einheit, welche beschreibt, wie polychromatisches Licht (z.B. weisses Licht einer LED-Lampe) quantifiziert wird [1]. Zu diesem Zweck wird die normierte spektrale Hellempfindlichkeitskurve des menschlichen Auges $V(\lambda)$ verwendet, welche die Hellempfindlichkeit als Funktion der Wellenlänge λ beschreibt. Beim METAS wird die Candela mittels einer Gruppe von Lichtstärkennormallampen dargestellt, das sind spezielle Glühlampen, welche Licht mit einer ähnlichsten Farbtemperatur von 2855.5 K (CIE Normlichtart A) ausstrahlen. Durch Messen der

Beleuchtungsstärke in einem definierten Abstand mittels kalibrierten Beleuchtungsstärkemessern (Luxmetern) kann die Lichtstärke dieser Normallampen bestimmt werden.

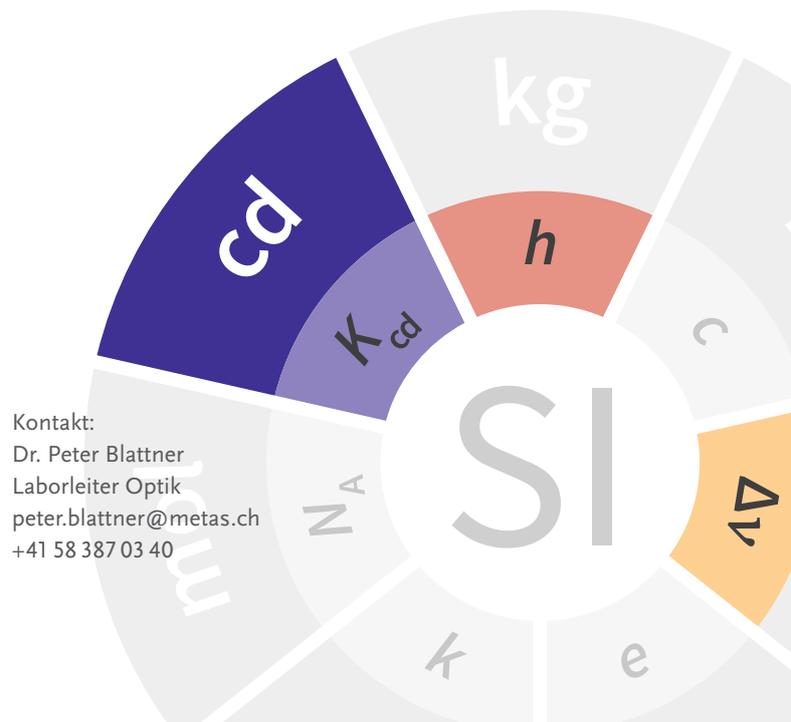
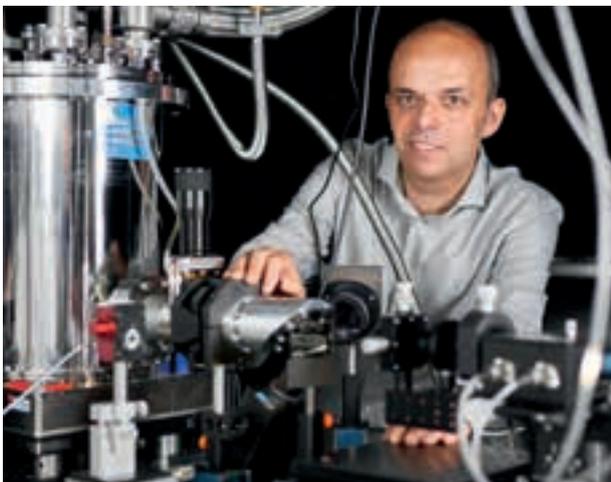
Die Luxmeter bestehen aus Siliziumdetektoren mit nahezu 100 % Quantenausbeute, einer Präzisionsblende und einem temperaturstabilisierten Farbfilter für die Anpassung an $V(\lambda)$. Sie sind ihrerseits an die Primärrealisierung der optischen Strahlungseinheit angeschlossen: ein kryogenes Absolutradiometer, das Strahlungsleistung mit elektrischer Heizleistung vergleicht. Bedingt durch die Änderung der praktischen Realisierung der elektrischen Messgrößen ergibt sich eine kleine Anpassung bei der Messung der elektrischen Leistung und somit auch der optischen Leistung mit dem kryogenen Absolutradiometer. Die relative Änderung durch das revidierte SI beträgt ungefähr 2×10^{-7} , d.h. sie ist in der Praxis für die Candela-Realisierung vernachlässigbar.

$K_{cd} = 683 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$ (exakt)

Exakter Wert des photometrischen Strahlungsäquivalents für die monochromatische Strahlung der Frequenz $540 \cdot 10^{12}$ Hertz

Referenz

- [1] Draft mise en pratique for the definition of the candela in the SI, www.bipm.org.



Kontakt:
 Dr. Peter Blattner
 Laborleiter Optik
 peter.blattner@metas.ch
 +41 58 387 03 40



L'endroit où l'on mesure tout

LA LIBERTÉ

Institut fédéral de métrologie // 30003 Berne-Wabern

METAS, l'Office fédéral de métrologie, et son obélisque. © Alain Wicht / « La Liberté » / 10.04.2018

Dans la grisaille de la banlieue bernoise, l'œil est attiré par un étrange obélisque qui (d)étonne au pied de la colline du Gurten. D'une hauteur de 24 mètres qui symbolise les heures d'une journée, pour une base de 60 centimètres fois 60 qui représente les minutes et les secondes, elle annonce la couleur : à METAS, tout est réglé au millimètre.

METAS, c'est l'acronyme de l'Office fédéral de métrologie, « souvent confondu avec la météorologie », rigole David Lehmann, responsable de la communication de l'Institut, qui nous accueille. A Wabern plus exactement, où plus de 200 employés, pour la plupart des scientifiques, s'ingénient non pas à prédire les caprices du ciel, mais à créer les conditions pour que les mesures effectuées en Suisse soient réalisées avec la précision requise.

Vous achetez 200 grammes de viande séchée des Grisons au supermarché ? C'est METAS qui a étalonné la balance, tout comme il garantit l'exactitude de l'horloge que vous consultez à la sortie du magasin. Et de toutes les autres mesures nécessaires au bon fonctionnement de l'économie, de la recherche et de l'administration. « Cela paraît anodin, mais c'est vital. Cela représente des milliards de francs chaque année », souligne notre guide du jour. Au menu : une visite des section dévolues à la mesure du temps, du poids et de la qualité de l'air, avec pour terminer l'endroit le plus impressionnant de METAS : la chambre anéchoïque.

Poids L'un des grands projets de METAS, c'est de créer un étalon d'un kilogramme. Car le seul « vrai » kilo est actuellement à Paris dans un coffre-fort, presque aussi bien gardé que les bijoux de la couronne : il faut trois clés détenues par des personnes différentes pour y accéder. Il ne sort de son écrin qu'une fois tous les cinquante ans...

Temps Comment s'assurer qu'une seconde est vraiment une seconde ? Et au fond, qu'est-ce qu'une seconde ? « Une seconde est définie par un nombre d'oscillations, 9 192 631 770 exactement, de l'atome de césium », nous explique Jacques Morel, chef du Laboratoire Photonique, temps et fréquence de METAS. C'est la raison pour laquelle l'Office fédéral a beaucoup investi d'énergie pour créer une fontaine à jets de césium, afin de réaliser la seconde la plus exacte possible. Les explications du scientifique :

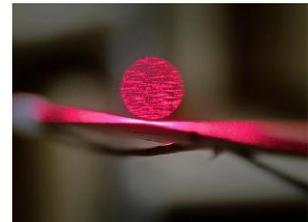
Air Les gaz font également l'objet d'une attention particulière de la part des scientifiques de Wabern. Et notamment ceux présents dans l'atmosphère, puisque METAS s'assure de la validité des appareils servant à mesurer la qualité de l'air que nous respirons.

Sons Le clou de la visite, c'est le passage dans la salle dite anéchoïque de METAS. C'est un endroit particulier où chaque son, chaque bruit est exacerbé.

La salle où l'on se mure dans le silence



Christian Hof explique le fonctionnement de la salle anéchoïque.
© Alain Wicht



Spécialisé dans les mesures, l'Institut fédéral de métrologie abrite en son sein une chambre anéchoïque

Acoustique » Christian Hof appuie sur un bouton, et devant nous la porte s'ouvre, spectaculaire avec son mètre d'épaisseur. La chambre anéchoïque de l'Institut fédéral de métrologie (METAS), à Köniz (BE), apparaît. Une pièce très spéciale, conçue pour absorber les ondes sonores et dans laquelle on peut faire l'expérience d'un silence quasi parfait (voir ci-dessous).

C'est ici que l'équipe de spécialistes en acoustique effectue certaines de ses mesures. « Nous réalisons par exemple l'étalonnage de sonomètres, un instrument utilisé par les professionnels pour évaluer la pollution sonore », explique Christian Hof, chef du laboratoire. « Il faut savoir que tous les instruments modifient le champ acoustique, et il est important de quantifier l'ampleur de ces effets. »

On se trouve ici dans le domaine de l'infiniment précis, à la lisière de l'inaudible. D'autres instruments, comme les sirènes d'alerte utilisées par exemple par la commune de Berne lorsqu'il y a des risques d'inondation, font plus de vacarme, mais passent également dans les mains des employés de METAS.

Suspendu dans le vide

Pour fabriquer la chambre la plus silencieuse possible, il ne suffit pas de tapisser un abri antiatomique de cartons d'œufs. « Je doute d'ailleurs qu'ils soient vraiment efficaces. Si vous voulez réduire le bruit dans votre local, mieux vaut miser sur les tapis », s'amuse Christian Hof. Visuellement très impressionnante, la salle anéchoïque de l'institut fédéral rappelle l'intérieur d'une ruche. En effet, elle est recouverte, du sol au plafond, de dièdres de mousse de près d'un mètre de longueur, capables d'absorber efficacement les sons.

On évolue sur un treillis métallique, suspendu à deux mètres de hauteur. Un filet est accroché en dessous. Pour éviter que les gens aient le vertige ? « Non, c'est si je perds un objet, sourit le physicien. C'est presque impossible de le récupérer sinon. »

La visite se poursuit dans les sous-sols, où, en passant une toute petite porte, on peut observer la structure de la salle de l'extérieur. On remarque alors qu'il s'agit d'un cube de béton – de 8 m de long – isolé par le vide du bâtiment qui l'abrite. La structure repose uniquement sur de très gros ressorts. « C'est pour éviter le bruit solidien », note le spécialiste. A savoir, l'interférence sonore transmise par le sol au travers des murs de l'édifice.

Bruit résiduel

Est-ce qu'il n'y a vraiment aucun son dans cette pièce ? C'est en tout cas l'impression que l'on a lorsque se referme l'imposante porte. « En réalité, il existe un bruit résiduel, mais il est si faible qu'il se situe en dessous de 0 décibel (dB). L'oreille humaine n'est donc pas capable de le saisir. »

Et d'où vient ce résidu sonore ? Christian Hof pointe du doigt un petit morceau de tissu blanc qui flotte dans un coin. « C'est la ventilation. Malgré une installation spécifique et très complexe, on n'arrive pas à la rendre totalement muette. » Autre source parasite : les lumières halogènes. « C'est vrai que l'idéal, ce serait de poser des LED. Mais franchement dit, la précision de cette pièce est tout à fait suffisante pour toutes les mesures auxquelles je peux penser. » En effet, la plupart des sonomètres ne descendent pas en dessous de 16 dB. « Vous avez plus de chances d'entendre le son qu'eux. »

C'est vrai ça ? Notre ouïe est-elle aussi bonne que ça ? « Nous avons un degré de sensibilité étonnant. Mais ça ne veut pas dire qu'on est capable de dire quel son est plus fort que l'autre. Attendez, je vais vous montrer... » Christian Hof diffuse alors une bande-son sur le haut-parleur de la salle. Les bruits se succèdent, de tous types. On croit discerner une scie électrique, peut-être une tronçonneuse. Certains sont à proprement parler insupportables, d'autres semblent beaucoup plus discrets. A la fin de l'exercice, le physicien tranche : « Ils étaient à très peu de chose près tous du même niveau sonore. » On a envie de crier « Mensonge ! » mais bon, c'est lui l'expert.

« Le bruit est un son qui nous dérange, détaille-t-il. Et cela ne tient pas forcément au volume. C'est subjectif. Prenez le bruit d'un moustique dans votre chambre, le soir en vous couchant. Pour beaucoup de gens, c'est absolument insupportable. Et pourtant, c'est à la limite de nos capacités auditives, tellement le son est faible. »

J'ai testé pour vous

Le fort bruit de ma personne

Quelques minutes seul dans la salle anéchoïque, loin du bruit du monde ? Certains prétendent que l'homme n'est pas fait pour endurer une telle épreuve, lui, le chasseur-cueilleur toujours à l'affût de la sonnerie de son téléphone portable. L'expérience irait jusqu'à provoquer des délires, mais tout c'est, semble-t-il, babil d'internet.

Pour ma part, ça faisait un bon mois que je me réjouissais d'être seule avec moi-même. Et ne croyez pas que c'est parce que je me trouve intéressante. C'est juste qu'un peu de calme, ça ne peut faire de mal à personne.

Lorsque la porte s'est refermée, j'ai très nettement eu l'impression qu'un changement de pression s'était effectué dans mes oreilles. Je me suis assise, et j'ai écouté. Et je n'ai rien entendu. Ou alors si, peut-être, un léger bourdonnement. Un instrument de mesure resté allumé ou le bruit de mon sang dans mes tempes ? J'aurais été bien incapable de le dire.

Ensuite mes oreilles sont devenues un peu cotonneuses. J'ai remarqué que ma respiration faisait très légèrement cliqueter ma ceinture. Ça m'a enquinée. J'ai changé de position. Après, il y a eu les inévitables gargouillis. J'ai fait avec. Ce qui m'a franchement amusée, ça a été de noter que ma nuque, mes épaules, même mes bras produisaient de petits « crac crac » au moindre mouvement.

La porte s'est rouverte - bien trop tôt à mon goût - sans que j'aie pu expérimenter le moindre acouphène (ceux qui en souffrent me diront tant mieux). On m'a parlé, et j'ai pu constater que le son des autres ne m'avait pas manqué. Somme toute, même au cœur du silence, j'étais restée en fort bruyante compagnie.

Aude May Lepasteur

Les préfixes du système international d'unités

Prefix	Label	Decimal Value	Scientific	Colloquial
yocto	y	0.000 000 000 000 000 000 000 001	10^{-24}	septillionth
zepto	z	0.000 000 000 000 000 000 000 001	10^{-21}	sextillionth
atto	a	0.000 000 000 000 000 000 001	10^{-18}	quintillionth
femto	f	0.000 000 000 000 001	10^{-15}	quadrillionth
pico	p	0.000 000 000 001	10^{-12}	trillionth
nano	n	0.000 000 001	10^{-9}	billionth
micro	μ	0.000 001	10^{-6}	millionth
milli	m	0.001	10^{-3}	thousandth
centi	c	0.01	10^{-2}	hundredth
deci	d	0.1	10^{-1}	tenth
---	---	1	10^0	one
deka	da	10	10^1	ten
hecto	h	100	10^2	hundred
kilo	k	1 000	10^3	thousand
mega	M	1 000 000	10^6	million
giga	G	1 000 000 000	10^9	billion
tera	T	1 000 000 000 000	10^{12}	trillion
peta	P	1 000 000 000 000 000	10^{15}	quadrillion
exa	E	1 000 000 000 000 000 000	10^{18}	quintillion
zetta	Z	1 000 000 000 000 000 000 000	10^{21}	sextillion
yotta	Y	1 000 000 000 000 000 000 000 000	10^{24}	septillion

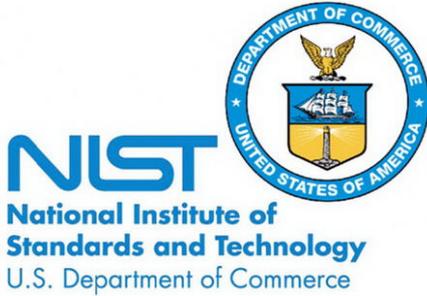
1875 - 1975 Les 100 ans de la convention du mètre



Autres sources d'infos

NIST Special Publication 330 The International System of Units (SI)

<https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/SpecialPublications/NIST.SP.330-2019.pdf>



NIST
National Institute of Standards and Technology
US Department of commerce

Wikipedia - 2019 redefinition of the SI base units

https://en.wikipedia.org/wiki/2019_redefinition_of_SI_base_units

Le Système international d'unités 9^e édition – Texte complet en français et anglais (2019)

<https://www.bipm.org/documents/20126/41483022/SI-Brochure-9.pdf/fcf090b2-04e6-88cc-1149-c3e029ad8232?version=1.18&t=1645193776058&download=true>



Pavillon de Breteuil / Parc de Saint-Cloud / F-92312 Sèvres

https://fr.wikipedia.org/wiki/Bureau_international_des_poids_et_mesures

Unités de mesure - Publications METAS / METinfo

<https://www.metas.ch/dam/metas/fr/data/Dokumentation/metas-publikationen/berichte-metas-publikationen/messbroschuere-es-f.pdf.download.pdf/messbroschuere-es-f.pdf>



Institut fédéral de métrologie