

Les 7 unités du Système International



Emmanuelle Poncet
Année 2018-2019

Master 2
Préparation à l'agrégation de physique
ENS Montrouge

Nous mesurons ou sommes mesurés à longueur de journée : la vitesse de notre voiture, le temps qui passe, la température, notre monnaie, les gigaoctets de nos ordinateurs... Ces actes sont tellement présents que nous n'y prêtons plus attention.

Pourtant, ces mesures n'ont de sens que parce que nous partageons les mêmes unités, les mêmes modes de mesurage. C'est au cours de la Révolution française qu'une commission de savants a imaginé et mis en œuvre un système cohérent d'unités et d'étalons. Toujours en usage, il n'a jamais cessé d'être précisé, complété, disséminé sur toute la planète.

Le Système international d'unités (SI) est composé de sept unités de base adoptées au niveau international:


- ✚ Le kilogramme (kg, unité de masse)
- ✚ Le mètre (m, unité de longueur)
- ✚ La seconde (s, unité de temps)
- ✚ L'ampère (A, unité d'intensité électrique)
- ✚ Le kelvin (K, unité de température)
- ✚ La mole (mol, quantité de matière)
- ✚ La candela (cd, unité d'intensité lumineuse)

En 2018 la Conférence générale des poids et mesures (CGPM) franchit une étape majeure vers la dématérialisation totale des unités, rendue indispensable pour permettre les développements futurs des technologies et des sciences. En effet, quatre unités ont été revues : le kilogramme, l'ampère, le kelvin et la mole.

Dans ce dossier nous allons étudier la définition de chacune des 7 unités du système international.

I. Le mètre

Carte d'identité du mètre



Définition officielle (1983 - 17e CGPM)
Symbole : m
Grandeur : longueur
Unités dérivées du mètre : mètre carré, mètre cube, mètre par seconde, ...

1) Historique

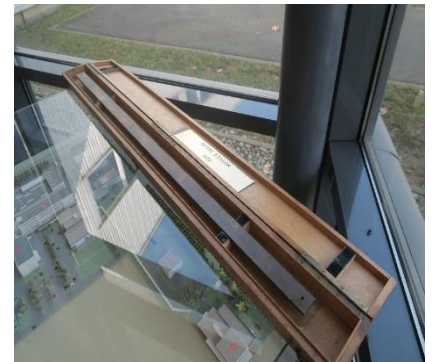
Jusqu'au 18^e siècle, on utilisait essentiellement comme unité de mesure des éléments du corps humain. Par exemple « une coudée » qui correspondait à 32 doigts 24 pouces et également à 2 pieds du roi. Le problème est que ces étalons étaient différents d'un pays à l'autre voire d'une région à une autre et entraînait donc des difficultés pour le commerce, les constructions.

A la fin du 18^e siècle on décide donc d'unifier le système et d'imposer le mètre.

L'origine de cette unité vient du latin « metrum » et du grec « metron » qui signifient mesure.

En 1791, la longueur du mètre était établie comme égale à la dix millionième partie du quart du méridien terrestre. C'est en utilisant le système de la triangulation que les scientifiques (Mechain et Delambre) sont parvenus à déterminer la longueur du quart du méridien.

Il fut par la suite construit un mètre étalon en platine iridié (métal noble) pour que l'étalon soit le plus stable possible dans le temps.




Mètre étalon

En 1960, la CGPM a apporté une modification significative en définissant désormais le mètre à l'aide d'une longueur d'onde atomique, celle d'une transition de résonance entre certains niveaux d'énergie d'un atome particulier (l'atome de krypton, isotope 86). Il s'agissait alors de la première unité du Système international d'unités (SI) à bénéficier d'une définition établie sur la physique quantique.

À la fin des années 70 des chercheurs américains mesurent la vitesse c de propagation de la lumière dans le vide avec une précision inégalée. Le mètre est alors rattaché directement à la seconde en 1983.

2) La définition actuelle

Définition du mètre



Le mètre est la longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière pendant une durée de $1/299\,792\,458$ de seconde.

Cette définition fixe la valeur numérique de la célérité c de la lumière dans le vide, par définition, à $299\,792\,458\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

II. La seconde

Carte d'identité de la seconde



Définition officielle (1967/68 - 13e CGPM)

Symbole : s

Grandeur : temps, durée

Unités dérivées de la seconde : hertz, becquerel, sievert

1) Historique

Au départ, la seconde relevait du domaine de l'astronomie : définie à l'origine comme la fraction $1/86\,400$ du jour solaire moyen (le jour moyen étant la durée que met la Terre pour faire une révolution sur elle-même, définie par les astronomes), cette première définition souffrait des irrégularités de la rotation de la Terre. En 1960, la seconde est alors redéfinie comme la fraction $1/31\,556\,925,9747$ de l'année tropique (1900), et gagne en précision. Mais cela étant difficilement reproductible les scientifiques ont alors décidé de se baser sur une transition entre deux niveaux d'énergie les comportements des atomes de césium. Il faudra sept années de travaux pour que la CGPM considère que « *l'étalon de fréquence est maintenant suffisamment éprouvé et suffisamment précis pour servir à une définition de la seconde répondant aux besoins actuels* » et adopte la nouvelle définition de la seconde.

2) Définition

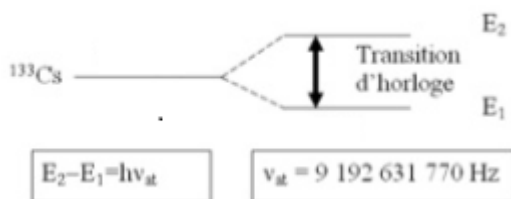
Définition de la seconde



La seconde est la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133, la définition de la seconde, fondée sur une propriété de la matière, relève désormais du domaine de la physique.

3) Mesure des périodes de l'atome de césium 133

Pour mesurer ces périodes de l'atome de césium 133, on utilise des horloges atomiques. Actuellement, les meilleures horloges atomiques (les fontaines atomiques), utilisant les atomes froids de césium, ont des incertitudes de fréquence relatives de quelque 10^{-16} .



Horloge atomique

III. Le kilogramme

Carte d'identité du kilogramme



Définition officielle (2018 – 26e CGPM)

Symbole : kg

Grandeur : masse

Unités dérivées du kilogramme : newton, pascal, joule, watt

1) Historique

Le gramme est originellement défini en 1795 comme la masse d'un centimètre cube « *d'eau pure* » à 4 °C, faisant du kilogramme l'égal de la masse d'un litre d'eau.

Le prototype du kilogramme, fabriqué en 1799 et sur lequel s'appuie le kilogramme jusqu'à mai 2019, possède une masse égale à celle d'1,000 025 L d'eau pure.

Depuis 1889 la définition de l'unité de masse était réalisée par un cylindre de platine iridié conservé au Bureau international des poids et mesures (BIPM), à Sèvres. L'IPK (*international prototype of kilogram*) est gardé, dans un caveau, sous trois cloches de verre : sa masse est par définition exactement égale à 1 kg. Mais cet artéfact matériel disponible que dans un seul lieu, n'est pas stable dans le temps car non lié à un invariant de la nature.

En effet, au cours de quatre comparaisons effectuées en un siècle et demi, des incohérences entre la masse de l'IPK et des autres prototypes, de forme et de composition quasi-identiques ont été notés. Les comparaisons effectuées ont révélé que la masse du prototype de référence a varié d'environ 50 microgrammes par rapport à celle des autres prototypes et qu'il ne permet plus aujourd'hui une mesure certaine des masses.



Étalon national du kilogramme

Outre le problème d'un étalon de masse inconstant, cette dérive se propage par ailleurs à d'autres unités (newton, joule, watt...) définies à partir du kilogramme. Pour s'affranchir de ces limites, le Comité international des poids et mesures (CIPM) a redéfini le kilogramme à partir d'une constante fondamentale de la nature : la constante de Planck (h), à la fois immatérielle, stable et universelle.

2) Une nouvelle définition à partir de mai 2019

Définition proposée pour la redéfinition en novembre 2018



Le kilogramme, kg, est l'unité de masse; sa valeur est définie en fixant la valeur numérique de la constante de Planck à exactement $6,626\ 070\ 15 \times 10^{-34}$ quand elle est exprimée en $s^{-1} m^2 kg$, ce qui correspond à des J s

3) Mesure de la constante de Planck pour redéfinir le kilogramme

En 2017, les scientifiques du Laboratoire National de Métrologie et d'Essais (LNE), du Conservatoire National des Arts et Métiers (Cnam) et l'Observatoire de Paris, ainsi que d'autres laboratoires à travers le monde, ont mesuré cette constante fondamentale avec une précision sans précédent.

La 26^{ème} CGPM, en novembre 2018 a décidé que le calcul du kilogramme se ferait par la balance du watt (ou balance de Kibble)

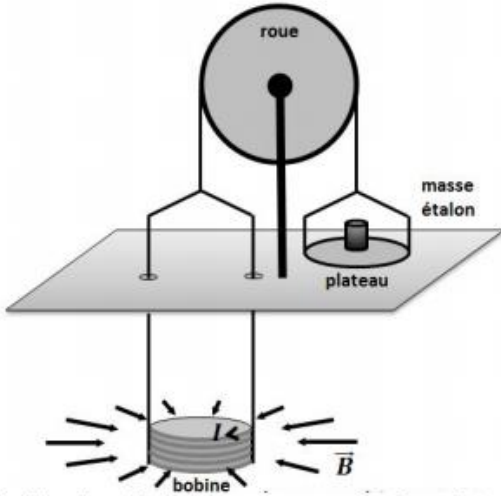
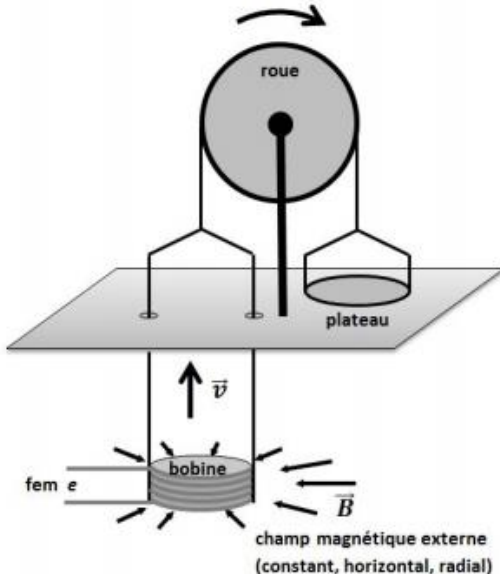
Expérience de la balance du watt (ou balance de Kibble)

Pour mesurer la constante de Planck, on utilise une balance du watt (ou de Kibble) qui permet de comparer des puissances électrique et mécanique.

Son principe : une balance dont l'un des bras supporte une masse et dont l'autre est relié à une bobine placée dans un champ magnétique. Par une mesure en deux temps, il est alors possible de relier cette masse, exprimée en kilogramme, à une tension aux bornes de la bobine et un courant y circulant. Le lien avec la constante de Planck se fait via des phénomènes quantiques (les effets Josephson et Hall quantique) impliquant cette tension et ce courant.



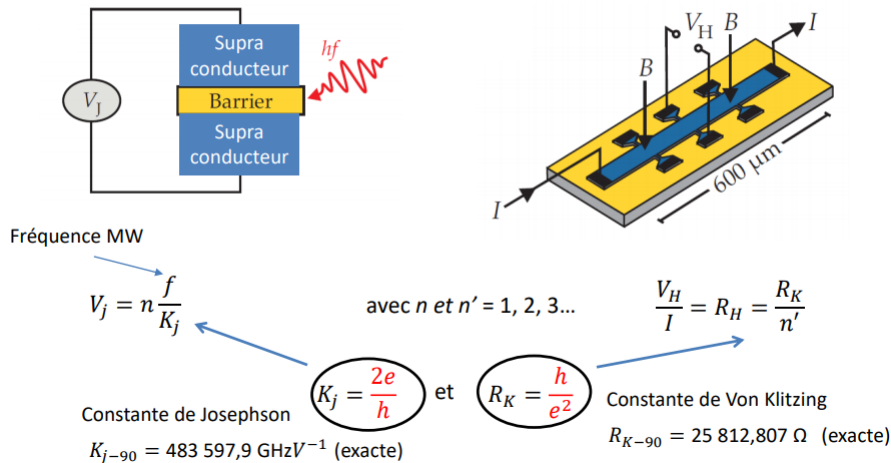
Balance du watt du LNE utilisée pour produire la valeur de de la constante de Planck, h

Mode STATIQUE	Mode DYNAMIQUE
 <p>On équilibre le poids de la masse m, avec une force de Laplace exercée sur la bobine. L'intensité du courant circulant dans la bobine est alors ajustée avec précision. La force de Laplace est donnée (en intégrant sur toute la longueur L de la bobine) par :</p> $\vec{F} = \int_0^L I d\vec{l} \wedge \vec{B} = ILB\vec{e}_z$ <p>Si l'on néglige toute autre action (frottements sur la poulie, poussée d'Archimède exercée par l'air ambiant,...), on a $P = F$:</p> $mg = ILB = \frac{ULB}{R} \quad (1)$ <p>Le terme « LB » délicat à mesurer précisément sera déterminé avec le mode dynamique.</p> <p>L'intensité I est déterminée par la mesure d'une résistance R et d'une tension U, liées à des grandeurs quantiques.</p>	 <p>On enlève la masse étalon. Un moteur translate la bobine verticalement à vitesse constante v, dans le champ \vec{B}. Une ddp d'induction e apparaît alors, égale à la variation de flux magnétique ϕ à travers la bobine (loi de Lenz-Faraday) :</p> $e = -\frac{d\phi}{dt} = -\frac{d}{dt} \left(\iint_{S_{Bob.}} \vec{B} \cdot \vec{n} \cdot dS \right)$ $= - \left(\iint_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot \vec{n} \cdot dS + \oint_C (\vec{B} \wedge \vec{v}) \cdot d\vec{l} \right)$ <p>Il vient (comme \vec{B} est constant) :</p> $e = LBv \quad (2)$
<p>En combinant les équations (1) et (2), il vient :</p> $m = \frac{eU}{Rgv}$ <p>Pour mesurer m, il convient de déterminer :</p> <ul style="list-style-type: none"> - l'intensité de la pesanteur locale : des corrections sont effectuées à chaque mesure, qui tiennent compte des marées, qui influent sur le champ de pesanteur local ! - la vitesse v, mesurée par interférométrie laser (rapidité avec laquelle des franges d'interférence défilent). - e et U sont déterminées par effet Josephson. - R est une résistance de Von Klitzing. 	

De plus, les constantes de Josephson et de Von Klitzing sont fixées :

○ **L'effet Josephson**

○ **L'effet Hall quantique**



On a donc $U = \frac{n_1 f_1}{K_J}$ et si on pose A constante égale à $A = \frac{n_1 f_1 n_2 f_2 i}{k}$

$$R = \frac{k R_K}{i}$$

$$e = \frac{n_2 f_2}{K_J}$$

Il vient que $m = h \times \frac{A}{4gv}$

La stratégie est la suivante :

- S'assurer que l'on sait mesurer h à partir du kilogramme étalon de manière fiable et reproductible, dans plusieurs labos
- Fixer alors la valeur de h
- En déduire la nouvelle valeur du kilogramme (on évite les problèmes liés au kg étalon)

IV. L'ampère

Carte d'identité de l'ampère

Définition officielle (1948 - 9e CGPM)

Symbole : A

Grandeur : intensité d'un courant électrique

Unités dérivées de l'ampère: coulomb, volt, ohm, farad, henry, tesla

1) Historique


Depuis 1948 l'ampère est défini comme :

« Un ampère est l'intensité d'un courant constant qui, s'il est maintenu dans deux conducteurs linéaires et parallèles, de longueurs infinies, de sections négligeables et distants d'un mètre dans le vide, produit entre ces deux conducteurs une force linéaire égale à 2×10^{-7} newton par mètre »

Cependant, en pratique, cette définition est difficile à réaliser avec l'incertitude de mesure requise. Du reste, elle n'exprime pas ce qu'est fondamentalement un courant électrique, à savoir un flux de charges élémentaires par unité de temps. D'où l'idée de redéfinir l'ampère en fixant la valeur de la charge élémentaire, e. En vue de cet objectif, les chercheurs du LNE ont réalisé un étalon matérialisant cette nouvelle définition avec une incertitude relative record de 10^{-8} .

2) Définition

Définition de l'ampère



L'ampère, unité de courant électrique du SI, est défini en prenant la valeur numérique fixée de la charge élémentaire, e , égale à $1,602\ 176\ 634 \times 10^{-19}$ lorsqu'elle est exprimée en C, unité égale à A·s, la seconde étant définie en fonction de $\Delta\nu_{Cs}$.

3) Etalon de courant électrique

En pratique, dans les laboratoires de métrologie on réalise l'étalon de courant électrique à partir de deux étalons de tension et de résistance. Leurs unités – le volt et l'ohm – peuvent en effet être réalisées à 10^{-9} près grâce à deux effets quantiques (l'effet Josephson et l'effet Hall quantique) qui ne dépendent que de e et de la constante de Planck. (voir III.3)

L'effet Josephson a été découvert en 1962 par Brian David Josephson, ce qui lui a valu le Prix Nobel de physique en 1973. Cette découverte a été très importante dans tout le domaine de la nanoélectricité, mais aussi et surtout en métrologie de l'électricité : en effet cela permet d'étalonner immédiatement, avec une « grande » précision, tout étalon de tension, V , via une mesure de fréquence f : $V=hf/2e$

Où h est la constante de Planck et e la charge élémentaire de l'électron.

La constante universelle $2e/h$ s'appelle constante de Josephson, et $K_J = 483\ 597,891\ \text{GHz}\cdot\text{V}^{-1}$

L'effet Hall quantique est une version en mécanique quantique de l'effet Hall mise en évidence en 1980 par le physicien allemand Klaus von Klitzing (Prix Nobel de physique en 1985)

La quantification de la conductivité de Hall a la propriété importante d'être excessivement précise. Des mesures expérimentales de cette conductivité se sont révélées à être des multiples entiers ou fractionnaires de e^2/h à une précision de près de 10^{-12} . Cette quantification a ainsi permis la création d'une nouvelle unité de mesure pour la résistance électrique donnée par la constante de von Klitzing $R_K = h/e^2 = 25812.807557\ \Omega$

L'ampère est alors réalisé en appliquant la loi d'Ohm qui relie tension, courant et résistance. Néanmoins, concrètement, on applique cette loi à des dispositifs physiques qui, dérivent dans le temps, ainsi l'incertitude relative sur l'ampère est typiquement de 10^{-6} . Pour faire mieux, les scientifiques du LNE ont récemment mis au point un circuit quantique permettant d'appliquer directement la loi d'Ohm aux étalons quantiques de tension et de résistance. Ce générateur quantique de courant, via les effets Hall quantique et Josephson, il délivre un courant proportionnel à la charge élémentaire avec une incertitude de 10^{-8} .

V. Le kelvin

Carte d'identité du kelvin



Définition officielle (2018 – 26e CGPM)

Symbole : K

Grandeur : température thermodynamique

Unités dérivées du kelvin : degré Celsius, watt par mètre kelvin, mètre carré kelvin par watt, joule par kelvin

Une expérience à l'exactitude record, ayant livré, en 2017 une valeur de la constante de Boltzmann avec une incertitude relative de $0,57 \times 10^{-6}$.

Une fois le kelvin redéfini, les températures seront mesurables avec une incertitude pouvant être meilleure que la partie par million de manière pérenne sur l'ensemble de l'échelle de température. Et ce du (presque) zéro absolu jusqu'à plusieurs milliers de degrés Celsius.

VI. La mole

Carte d'identité de la mole



Définition officielle (1971 - 14e CGPM)

Symbole : mol

Grandeur : quantité de matière

Unités dérivées de la mole : mole par mètre cube, katal

1) Historique

L'origine de la mole est d'abord liée au besoin de définir une unité propre à la chimie et de mettre fin aux questions relatives à l'unité de masse chimique. Ainsi, en 1971, l'introduction de la mole, a permis de disposer d'une unité reconnue dédiée au domaine de la chimie.

Pour répondre aux besoins croissants au service de la société dans les domaines de l'environnement, de la santé ou encore de l'alimentation, la CGPM a adopté, en 1971, la mole comme unité de base du système SI en la définissant comme :

« La mole (mol) est la quantité de matière d'un système contenant autant d'entités élémentaires qu'il y a d'atomes dans 0,012 kilogramme de carbone 12. »

La définition précise également que « lorsqu'elle est employée, les entités élémentaires doivent être spécifiées et peuvent être des atomes, des molécules, des ions, des électrons, d'autres particules ou des groupements spécifiés de telles particules ».



Représentation d'une mole de différentes espèces

En pratique, mesurer un nombre de moles revient souvent à mesurer une masse de l'élément ou de la molécule spécifiée, voire même un rapport de masse ou de quantité de matière.

Si depuis son introduction au SI la définition de la mole n'a pas varié d'un iota, en novembre 2018, tout change. La mole va être redéfinie à partir de la valeur numérique fixée de la constante d'Avogadro.

2) Une nouvelle définition

Définition de la mole à partir du 20 mai 2019



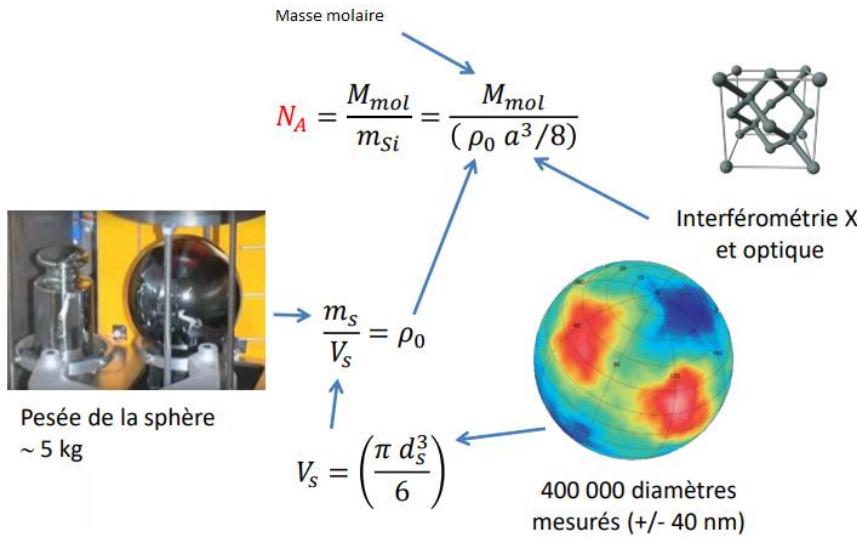
La quantité de matière, symbole n , d'un système représente un nombre d'entités élémentaires spécifiées. Une entité élémentaire peut être un atome, une molécule, un ion, un électron, ou toute autre particule ou groupement spécifié de particules;

Sa valeur est définie en fixant la valeur numérique du nombre d'Avogadro à exactement $6,022\ 140\ 76 \times 10^{23}$ quand elle est exprimée en mol^{-1} .

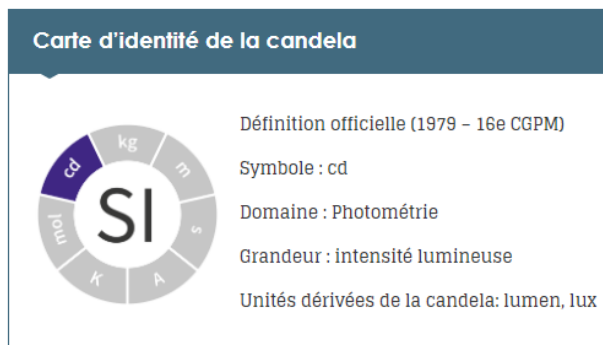
3) Détermination de la constante d'Avogadro pour redéfinir de la mole

L'expérience de la sphère d'Avogadro

Cette expérience consiste à compter le nombre d'atomes de silicium contenus dans une sphère quasi parfaite de silicium et de déterminer ainsi la constante d'Avogadro



VII. Le candela



1) Historique

La candela, unité de mesure de l'intensité lumineuse, est sans aucun doute la plus humaine des unités de base du Système international d'unités (SI) puisqu'elle est définie en référence à la sensibilité de l'œil humain et mesure la lumière telle que perçue par celui-ci.

En 1946, le Comité international des poids et mesures (CIPM) définit l'unité d'intensité lumineuse, la « Bougie nouvelle » comme : « la grandeur de la bougie nouvelle est telle que la brillance du radiateur intégral à la température de solidification du platine soit de 60 bougies nouvelles par centimètre carré. ». Cette décision est ratifiée en 1948 par la Conférence générale des poids et mesures (CGPM) qui adopte également un nouveau nom pour cette unité : la candela, dont le symbole est « cd ». L'unité sera introduite dans le Système international d'unités quelques années plus tard en 1954, en même temps que l'ampère et le kelvin.

En 1967, afin de clarifier le cadre de sa mise en pratique, la CGPM modifie légèrement de la définition de l'unité d'intensité lumineuse. Elle devient : « la candela est l'intensité lumineuse, dans la direction perpendiculaire, d'une surface de 1/600 000 mètre carré d'un corps noir à la température de congélation du platine sous la pression de 101 325 newtons par mètre carré. »

A cette époque, les mesures radiométriques (mesures énergétiques du rayonnement optique) sont devenues très performantes. De son côté, la candela est fragilisée par les fluctuations de la température assignée au point fixe du cuivre, qui varie en fonction des différentes révisions de l'échelle internationale des températures (EIT) et à partir de laquelle la température de congélation du platine est extrapolée. En effet, si cette température varie, le rayonnement du corps noir varie et la candela aussi.

En 1979, la CGPM, adopte une nouvelle définition de la candela liée à une unité énergétique qui permet de rompre le lien à la température de fusion du platine.

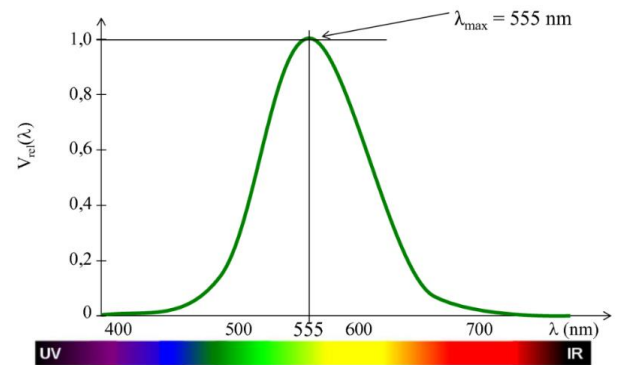
2) Définition

Définition de la candela



La candela est l'intensité lumineuse, dans une direction donnée, d'une source qui émet un rayonnement monochromatique de fréquence $540 \cdot 10^{12}$ hertz et dont l'intensité énergétique dans cette direction est $1/683$ watt par stéradian.

Cette définition permet de rattacher l'intensité lumineuse [cd], grandeur liée à la sensation visuelle, à une grandeur physique, l'intensité énergétique [$W \cdot sr^{-1}$]. Ce rattachement s'effectue en fixant la constante K_m , appelé constante d'efficacité maximale de l'observateur photopique, qui assure la correspondance entre ces deux grandeurs pour une radiation monochromatique à la longueur d'onde de 555 nm (ou de fréquence $540 \cdot THz$). Cette longueur d'onde correspond au maximum de sensibilité de l'œil humain. Elle a été déterminée expérimentalement et adoptée par la Commission Internationale de l'Éclairage



Courbe $V(\lambda)$

Ainsi, aujourd'hui, la candela est réalisée par des méthodes radiométriques, grâce à l'emploi de radiomètres dont la sensibilité simule la sensibilité spectrale de l'observateur humain : les photomètres. Toutefois des lampes à incandescence sont toujours utilisées pour conserver l'unité ou pour transférer les références aux industriels.

Lampe étalon d'intensité lumineuse Toshiba, faisant face au photomètre PH04B, un des 4 photomètres primaires impliqués dans la mise en pratique de la candela



À ce jour, le système international d'unités, le SI, est donc constitué de sept unités définies à partir de constantes:

- le mètre (m), défini à partir de la vitesse de la lumière dans le vide fixée à $299792458 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
- le kilogramme (kg), défini à partir de la constante de Planck égale à $6,62607015\cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$
- la seconde (s), définie à partir de la fréquence de la transition hyperfine de l'état fondamental de l'atome de césium 133 égale à $9\ 192\ 631\ 770 \text{ Hz}$
- l'ampère (A), défini à partir de la charge élémentaire égale à $1,602176634\cdot 10^{-19} \text{ C}$
- le kelvin (K), défini à partir de la constante de Boltzmann égale à $1,380649\cdot 10^{-23} \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$
- la candela (cd), définie à partir de l'efficacité lumineuse d'un rayonnement monochromatique de fréquence $540\cdot 10^{12} \text{ Hz}$ égale à $683 \text{ lm}\cdot\text{W}^{-1}$
- la mole (mol), définie à partir de la constante d'Avogadro égale à $6,02214076\cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$



Les enjeux de notre époque sont majeurs, en particulier dans l'industrie et pour l'économie : il faut que les unités s'adaptent aux progrès technologiques, d'où leur évolution 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 : on parle de « traçabilité » des mesures.

Par exemple, dans les télécoms ou en astronomie, il faut des mesures hautes fréquences 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 accrus dans des champs de mesure nouveaux, d'où la nécessité de la redéfinition de la plupart des unités l'année dernière.

Sur les sept unités du SI, quatre ont ainsi fait l'objet d'une redéfinition profonde en 2018: le kilogramme, l'ampère, le kelvin et la mole. La seconde et la candela devraient être les prochaines à voir leur définition évoluer, mais elles nécessitent encore des travaux complémentaires avant des modifications de fond.

Dans la vie quotidienne des chimistes et des physiciens, il n'y aura pas vraiment de changements. Les laboratoires d'étalonnage ne modifieront pas leurs processus. Seuls les laboratoires de métrologie auront accès à des réalisations avec de meilleurs incertitudes qui pourront continuer à s'améliorer, car les instruments évoluent d'année en année. Les bénéfices de cette redéfinition sont multiples, puisque toutes les unités reposent sur des constantes dont les valeurs ont été une fois pour toutes déterminées. Elles pourront être réalisées partout et à n'importe quel moment

Sources et bibliographies :

- ✚ L'exposition « Sur mesure, les 7 unités du monde » au Musée des Arts et Métiers du 16 octobre 2018 au 5 mai 2019
- ✚ <https://www.arts-et-metiers.net>
- ✚ <https://www.lne.fr>
- ✚ <https://fr.wikipedia.org>
- ✚ <https://www.bipm.org>
- ✚ <http://culturesciencesphysique.ens-lyon.fr>:
- Conférence : « Enjeux et perspectives de la refonte du système international d'unités » par Christophe Daussy le 05/03/2018
- Conférence : « De la métrologie électrique quantique à la nanométrie » par Nicolas Feltin le 19/02/2014
- ✚ <https://services.la-croix.com> : Article « poids et mesures, le grand ménage » par Audrey Dufour et Denis Sergent,
- ✚ article dans Le Monde, du 9 octobre 2017
- ✚ article dans Pour la Science, mars 2017