

## Etalons de mesure et unités de base du système international d'unités

Dans la vie quotidienne la mesure est une composante omniprésente. De même, les expériences scientifiques requièrent des mesures qui sont ensuite interprétées. Cependant, prendre une décision à partir d'une mesure nécessite d'avoir une bonne interprétation de cette mesure : il faut donc connaître un système de référence et l'incertitude associé à la mesure.

### I - LE SYSTEME S.I.

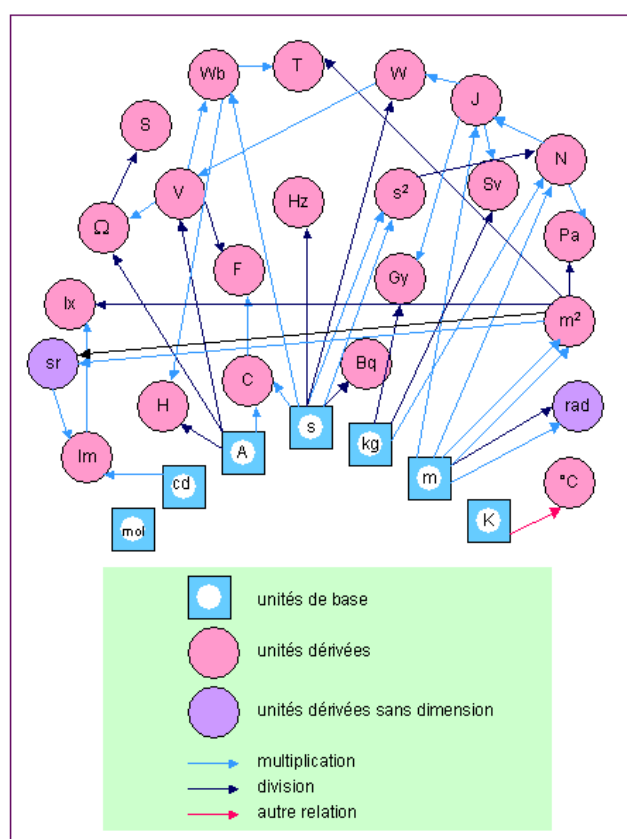
Le Système international d'unités est né officiellement lors de la onzième conférence générale des poids et mesures en 1960. Ce système comprend deux classes d'unités :

- **Les sept unités de base** : la seconde, le mètre, le kilogramme, l'ampère, le kelvin, le candela, la mole.
- **Les unités dérivées** : comme par exemple : le mètre par seconde, le hertz, le newton, le pascal, le joule, le watt, le farad, l'ohm, le volt, le henry... et aussi les unités dérivées sans dimension que sont le radian et le stéradian.

Ce système est dit « cohérent » car chaque grandeur ne peut avoir qu'une seule unité obtenue soit par multiplication soit par division des unités de base et des unités dérivées sans dimension, sachant qu'aucun autre facteur que le chiffre 1 n'est permis.

Cette présentation sera consacrée aux définitions actuelles des unités de base du système international d'unités, ainsi qu'à l'instrumentation nécessaire pour matérialiser ces unités.

Les unités et leur filiation



## II - EVOLUTION DE LA DEFINITION DES UNITES

Les définitions des sept unités de base ont évoluées dans l'histoire au fur et à mesure que les besoins de précision de certains utilisateurs n'étaient plus satisfaits. Les phases successives de la définition du mètre illustrent cette évolution :

### **1793 : Dix millionième partie du quart de méridien terrestre**

Incertitude de  $10^{-4}$  m

En 1789, la plupart des cahiers de doléances demandent l'uniformisation des poids et mesures. L'Académie des Sciences propose donc, en 1791, d'adopter « la grandeur du quart de méridien terrestre pour nouveau système de mesures ». Jean-Baptiste Joseph Delambre (1749-1822) et Pierre Méchain (1744-1804), astronomes, vont alors se charger de la mesure de l'arc du méridien de Paris par triangulation. Delambre effectue les relevés entre Dunkerque et Rodez, Méchain les effectue entre Rodez et Barcelone : les mesures vont durer de 1792 à 1798. La dix millionième partie de cet arc devient l'unité de longueur : le mètre. Il sera la base d'un système de mesures dénommées «révolutionnaires» : l'unité de surface est le carré du mètre, l'unité de volume est son cube, et l'unité de masse dépend du mètre également puisque le kilogramme est la masse d'un décimètre cube d'eau distillée.

Mais il était possible de comparer deux règles prototypes avec une incertitude plus petite que l'incertitude de mesure sur la valeur du dix millionième du quart de méridien! D'où l'abandon de cette définition (pourtant de caractère universel) au profit d'une définition basée sur la longueur d'une règle «étalon international».

### **1889 : Mètre international**

Incertitude de  $10^{-7}$  m

Étalon à traits en platine iridié (90% de platine, 10% d'iridium) déposé au BIPM (Bureau International des Poids et Mesures) localisé au Pavillon de Breteuil à Sèvres : il s'agit d'une règle dont la section a la forme d'un X à talons de longueur 102 cm sur laquelle deux traits montrent les extrémités de l'unité. Cette définition a donné satisfaction pendant plusieurs décennies, jusqu'à ce que l'étalon matériel, qui est sujet à des déformations, puisse être remplacé par un étalon de longueur naturel. L'apparition des procédés interférométriques de mesure a permis cette modification.

### **1960 : Longueur d'onde**

Incertitude de  $10^{-8}$  m

Le mètre vaut 1 650 763,73 longueurs d'ondes dans le vide de la radiation correspondant à la transition entre les niveaux  $2p^{10}$  et  $5d^5$  de l'atome de krypton 86. Cette définition a un caractère universel : le mètre peut être réalisé en tout lieu et à toute époque. Il n'est plus rattaché à un objet qui s'altère dans le temps mais à un phénomène immuable.

Toutefois, le laser était encore inconnu en 1960. Son apparition a révolutionné les techniques de mesure et la nécessité d'une nouvelle révision s'est donc imposée...

### **1983 : Rattachement à la vitesse de la lumière**

Incertitude de  $10^{-10}$  ou  $10^{-11}$  m

Le mètre est la longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière pendant une durée de  $1/299\,792\,458$  ème de seconde. Cette définition utilise le rayonnement laser. Le BIPM lui a associé une recommandation internationale donnant les valeurs des longueurs d'onde des principaux types de lasers actuels, exprimées dans l'unité ainsi définie. L'intérêt est qu'il ne sera pas nécessaire de donner une nouvelle définition du mètre, même si l'évolution des techniques de mesure modifie les valeurs des longueurs d'ondes de référence. En effet, cette définition donne à la vitesse de la lumière une valeur exacte et n'est liée à aucune réalisation particulière : cette définition ne devrait donc pas changer facilement.

Cependant, elle est liée à la définition de la seconde...

### III - LES SEPT UNITES DE BASE

#### LA SECONDE (s)

La seconde (s) 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.

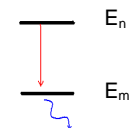
La détermination expérimentale de la seconde repose sur la propriété qu'ont les atomes d'émettre des radiations très pures lorsqu'ils sont excités : ils délivrent une période  $T=1/f$  ( $f$  : fréquence des radiations) définie très précisément. Grâce à cette propriété on peut réaliser l'étalon primaire du temps : l'horloge atomique à césium.

#### Les transitions hyperfines

D'une manière générale, l'énergie d'un atome ne peut prendre que des valeurs discrètes correspondant à ses divers états quantiques. Quand cet atome est excité, c'est-à-dire lorsqu'il absorbe une certaine quantité d'énergie fournie par un rayonnement, il passe d'un niveau d'énergie  $E_m$  à un niveau d'énergie supérieure  $E_n$ . On dit alors qu'il y a transition énergétique entre deux niveaux. Cet atome reviendra ensuite spontanément à son état stable  $E_m$  en émettant une radiation de même fréquence que la fréquence excitatrice. Cette fréquence du rayonnement électromagnétique à laquelle la transition se fait n'est pas quelconque : elle est déterminée par la relation de Planck :

$$h\nu = |E_n - E_m|$$

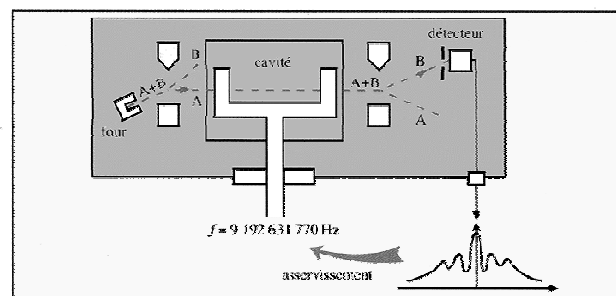
où  $h$  est la constante de Planck.



Entre les états  $F=4 m_F=0$  et  $F=3 m_F=0$  (adoptés pour définir la seconde), l'application de la relation de Planck donne :  $\nu_0 = 9,191\ 631\ 770$  GHz. Cette transition a été choisie d'une part pour la pureté de sa fréquence et d'autre part car elle se situe dans un domaine accessible aux appareillages électroniques existants.

#### L'horloge à atomes de césium

Son principe est d'irradier des atomes de césium à l'aide d'un rayonnement dont la fréquence  $\nu$  est ajustée à  $\nu_0$  afin de provoquer la transition atomique souhaitée. Lorsque le phénomène d'émission - absorption est maximal, c'est que la fréquence de la radiation incidente est en coïncidence avec la fréquence  $\nu_0$  de la transition  $F(4) \rightarrow F(3)$  du césium. Le détecteur repérant ce maximum va permettre de contrôler l'oscillateur à quartz, ce dernier va piloter le générateur de micro-ondes pour délivrer des signaux horaires définissant parfaitement la seconde.



Par ce procédé, la seconde est déterminée avec une très grande exactitude, les meilleures réalisations actuelles présentent des incertitudes de l'ordre de  $10^{-14}$  à  $10^{-15}$  seconde avec des dispositifs tels que la «Fontaine atomique» dont le mode de fonctionnement est similaire à celui de l'horloge atomique.

La qualité d'une échelle de temps atomique est telle qu'il faudrait 1 million d'années de fonctionnement, pour observer un décalage inférieur à 1 seconde sur l'échelle idéale !

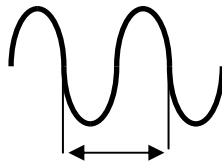
Au niveau national, la diffusion de l'échelle du temps peut atteindre différentes précisions :

- 10 ns par le GPS
- 1 ms par diffusion de signaux horaires sur France Inter G.O. (162 kHz)
- 50 ms par l'horloge parlante (n° de tel : 3669)

## LE METRE (m)

Le mètre (m) est la longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière pendant une durée de  $1/299\,792\,458^{\text{ème}}$  de seconde.

L'unité de longueur est donc désormais directement liée à l'unité de temps. Le mètre se détermine à partir d'une mesure de temps ou de fréquence (ce qui est identique). Il représente le temps mis par une impulsion lumineuse pour parcourir dans le vide une distance aller-retour, de sorte que la même horloge puisse être utilisée au départ et à l'arrivée de l'impulsion :



$$\lambda = c/f = c.T$$

$$L = c.\Delta t/2$$

L : longueur du trajet  
c : vitesse de la lumière  
 $\Delta t$  : intervalle de temps entre aller-retour

A l'heure actuelle, la précision atteinte permet de déterminer la distance Terre - Lune avec une précision de 1 à 2 centimètres !

Pour les longueurs plus courtes (de l'ordre de grandeur du mètre), on utilise les méthodes interférométriques qui consistent à comparer la longueur L (à mesurer) à la longueur d'onde  $\lambda$  d'une radiation lumineuse dont la fréquence f a pu être déterminée très précisément. Cette référence est la longueur d'onde du rayonnement d'un laser stabilisé en fréquence. Le principe de l'interféromètre repose sur la visualisation des franges d'interférence. La distance entre deux franges est directement reliée à  $\lambda$  (par la relation  $i=\lambda D/a$ ) et leur position dépend de la longueur des trajets parcourus par les deux ondes avant de se superposer.

Cette technique permet de mesurer des fractions de un millièème de frange soit de 0,03 nm.

## LE KILOGRAMME (kg)

Le kilogramme (kg) est la masse du prototype en platine iridié qui a été sanctionné par la Conférence générale des poids et mesures tenue à Paris en 1889 et qui est déposé au Bureau international des poids et mesures.

C'est la seule unité qui soit représentée par un étalon matériel unique : le prototype international du kilogramme. Des copies issues de la même coulée que le prototype international ont été attribuées à la plupart des pays et servent d'étalons nationaux de masse.

Ce prototype est en alliage de platine (90%) et d'iridium (10%). Il a la forme d'un cylindre à base circulaire dont la hauteur a été prise égale au diamètre (39 mm) afin de minimiser sa surface et donc les risques d'altération de l'étalon.



### *Vers un nouveau standard de masse*

Source : *ADIT BE Russie*, le 26/05/2005 à 16h30

*Depuis 3 ans, les scientifiques de Russie et de 8 autres pays ont entrepris de créer un nouveau standard de masse, en produisant un solide composé d'une quantité définie d'un même élément, le silicium.*

*Les premiers 140 grammes de silicium 28 pur ont été produits et 5 kg devraient l'être dans les trois prochaines années, permettant d'extraire une sphère d'un kilogramme dans laquelle le nombre exact d'atomes sera connu. Les scientifiques pourront alors préciser la constante d'Avogadro, nom donné à ce projet international.*

## L'AMPERE (A)

L'Ampère (A) est l'intensité du courant électrique constant qui, *maintenu dans deux conducteurs parallèles, rectilignes, de longueur infinie, de section circulaire négligeable et placés à une distance de 1 mètre l'un de l'autre dans le vide*, produirait entre ces conducteurs une force de  $2 \cdot 10^{-7}$  newton par mètre de longueur.

Cette définition présente l'avantage de relier les unités électriques aux unités mécaniques, mais en pratique, peu de laboratoires déterminent l'Ampère en raison de la difficulté des expériences. Celui-ci est généralement réalisé en utilisant la loi d'Ohm :  $I=U/R$ .

## LE KELVIN (K)

Le kelvin (K) est la fraction  $1/273,16$  de la température thermodynamique du point triple de l'eau.

Historiquement, on exprime la température par rapport au point de congélation de l'eau :  $t(^{\circ}\text{C}) = T(\text{K}) - 273,15 \text{ K}$ . On pourra noter que ce point de congélation est différent du point triple de l'eau : en effet, à pression atmosphérique normale le point de congélation de l'eau est à  $0^{\circ}\text{C}$  (soit  $273,15 \text{ K}$ ) tandis que le point triple est à  $0,01^{\circ}\text{C}$  (soit  $273,16 \text{ K}$ ). C'est ce point triple qui est utilisé pour la référence étalon, et pas le point de congélation.

## LA CANDELA (cd)

La candela (cd) 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.

## LA MOLE (mole)

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

## IV. CONCLUSION

Il ne faut pas croire que ce système, une fois établi, est figé. Les progrès de la science et des technologies ainsi que les besoins en terme d'exactitude amènent les chercheurs du LNE (*Laboratoire national de métrologie et d'essais*) et autres instituts nationaux de métrologie, à améliorer de façon continue la réalisation pratique de l'ensemble des unités du Système International d'unités. Il est donc nécessaire, parfois, de faire évoluer les définitions des unités ou d'en introduire de nouvelles.

## V. BIBLIOGRAPHIE

*Mesurer le monde - l'incroyable histoire de l'invention du mètre, 1792-1799* Ken Alder, Martine Devillers-Argouarc'h, Flammarion

*Unités de mesure étalons et symboles des grandeurs physiques* J.Hladik, Edition Masson

*L'épopée du Mètre* Collection Etudes, 1989

*Étalons et Unités de mesure : les bases de la métrologie en France* BNM, 1996

*Guide des unités de mesure* Jacques Libois, 1993

<http://www.lne.fr/>

<http://www.futura-sciences.com/>