

# La métrologie : normer les mesures

**Inter+Section : Norme**  
Aix-en-Provence, 3 avril 2019

**Thierry Masson**

Centre de Physique Théorique  
&  
Centre Gilles Gaston Granger



# Métrologie : prendre la mesure du problème...

**Mesurer** : à l'aide d'un instrument, comparer une grandeur physique inconnue avec une grandeur de même nature prise comme référence.

**Métrologie** : science de la mesure et de ses applications.

- Analyse des phénomènes physiques, chimiques, biologiques, humain...
- Garantir la confiance aux mesures :
  - ▶ étalons de référence,
  - ▶ calcul d'incertitudes...
- Interactions de systèmes technologiques : communication, repérage, sécurité...
- Normes pour la fabrication et les échanges de produits.
- Règles d'utilisation des préfixes (centi-, kilo-, mega-, *etc.*).
- Conventions d'écriture.

# Pourquoi une normalisation des mesures ?

- Besoins pour les sciences et les technologies.
    - ▶ La mesure est le fondement de toute activité scientifique.
    - ▶ Nécessité de comparer et de décrire des phénomènes selon des normes communes.
  - Besoins pour les échanges et le commerce.
    - ▶ Base d'un système qualité (mesures sur les processus de production...).
    - ▶ Permettre des transactions équitables « au delà des frontières. »
- Extraits des cahiers de doléances de 1789 :

*« Qu'ils paient désormais leurs rentes à une seule et unique mesure royale »*

*« Il y a une infinité de mesures différentes parmi les seigneurs. L'on demande que toutes les mesures soient réduites à celles du roi. »*

*« Pour que l'unité se fasse : il faudrait que chaque province fit le sacrifice d'une partie de ses us et coutumes anciennes à l'avantage d'avoir un loi unique. »*

# Le Système International d'Unités

- Il est constitué aujourd'hui de **7 unités de base** et d'unités dérivées.
- Chronologie choisie :
  - 1795 : Convention du Système Métrique Décimal** (France).
  - 1799** : définition du **mètre** (m), et du **kilogramme** (kg).
  - 20 mai 1875 : Convention du Mètre** (traité diplomatique entre 17 pays), création du **Bureau International des Poids et Mesures** (BIPM) (pavillon de Breteuil, à Sèvres).
  - 1889** : définition de la **seconde** (s).
  - 1954** : définitions de l'**ampère** (A), du **kelvin** (K) et de la **candela** (cd).
  - 1971** : définition de la **mole** (mol).

# Une bonne norme pour une unité de mesure ?

- Chaque unité de référence doit :
  - ① être universelle (critère d'objectivité),
  - ② être pérenne (critère temporel),
  - ③ être uniforme (critère spatial),
  - ④ avoir la plus grande exactitude possible (critère théorique et expérimental),
  - ⑤ suivre les besoins scientifiques, technologiques et sociétaux (critère d'actualité),
  - ⑥ être reproductible (critère pratique).
- Toutes les unités de référence ensemble doivent être cohérentes.
- Le BIPM adopte et renouvelle des **normes** pour parvenir à ces buts.
- 2018 : adoption d'un système d'unités basées sur des constantes de la physique.

## Hors norme!

- Le **pied**, le **pouce** dans certains pays anglo saxons...
- L'**acre** : surface labourable avec deux bœufs en une journée...
- Le **baril** de pétrole (= 42 gallons  $\approx$  159 litres, 1 gallon  $\approx$  230.907 in<sup>3</sup>) : fûts utilisés en Alsace (XVIII<sup>e</sup>) puis en Pennsylvanie (*Standard Oil Co. Inc*)...
- Aviation : distance en **mille marin** (vitesse en **nœud**) et altitude en **pied**...
- L'**année-lumière** en astronomie...



## Le mètre: quatre définitions en deux siècles

**1795** : Le mètre est la dix millionième partie du quart du méridien terrestre.

**10 décembre 1799** : Système métrique adopté suite à la mesure du méridien entre Dunkerque et Barcelone par P. Méchain et J.-B. Delambre entre 1792 et 1798. C'est un étalon basé sur une barre de platine. Des mètres étalons sont scellés dans les grandes villes de France.

**1889** : Barre de platine iridié au point de fusion de la glace.

**1960** : 1 650 763.73 longueurs d'onde de la lumière d'une transition spécifique de l'isotope 86 du krypton.

**1983** : Longueur de la distance parcourue par la lumière dans le vide en  $1/299\,792\,458$  de seconde.

➔ Cela revient à **fixer la vitesse de la lumière** à  $c = 299\,792\,458 \text{ m s}^{-1}$ .



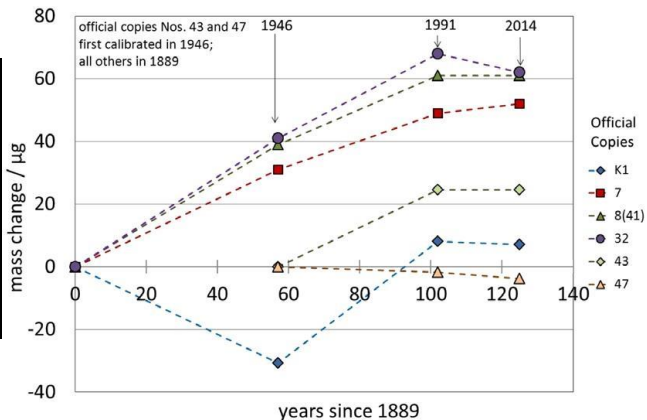
# Le kilogramme

**1<sup>er</sup> août 1793** : Le kilogramme est représenté par un décimètre cube d'eau à 0 °C.

**10 décembre 1799** : Le kilogramme est un étalon de platine.

**1889** : Nouvel étalon en platine iridié de hauteur égale au diamètre (39 mm).

Des copies sont fournies aux états membres du BIPM.



Comparaisons régulières des masses des différentes copies :  $1 \mu\text{g} = 10^{-9} \text{ kg}$ .

## La seconde

**1889 :** La seconde est la fraction  $1/86\,400$  du jour solaire terrestre moyen.  
jour solaire moyen = durée de la rotation de la Terre sur elle-même.

**1956 :** La seconde est la fraction  $1/31\,556\,925.974\,7$  de l'année tropique 1900.  
année tropique = périodicité des saisons terrestres.

**1967 :** 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.

- Cela revient à **fixer la fréquence de la transition hyperfine** de l'état fondamental de l'atome de césium à

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

- La définition repose sur une avancée technologique : les horloges atomiques.  
Précision atteinte : dérive de 1 s tous les 300 millions d'années...

### Remarque et question...

- La seconde « existe » déjà au XVI<sup>e</sup>, mais sa « normalisation » est tardive...  
➔ Mais pas d'application commerciale!
- Fin du XIX<sup>e</sup>, premières applications de l'électromagnétisme : communications à distance, utilisation du courant alternatif...  
➔ Est-ce le prétexte à cette normalisation ?

## La réforme de 2018

- Le seconde repose sur la valeur de  $\Delta\nu_{Cs}$  et le mètre sur la valeur de  $c$ .
- Les autre unités reposent sur
  - ▶ des artéfacts matériels « instables » (kilogramme, mole);
  - ▶ des expériences de pensée « irréalisables » (ampère);
  - ▶ des définitions mal adaptées aux « extrêmes » (kelvin)...
- La réforme de 2018 **fixe par convention 7 constantes fondamentales** :

**transition hyperfine...**

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

**vitesse de la lumière**

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

**constance de Planck**

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

**charge élémentaire**

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

**constante de Boltzmann**

$$k = 1.380\,469 \times 10^{-23}\text{ K}^{-1}\text{ kg m}^2\text{ s}^{-2}$$

**nombre d'Avogadro**

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

**efficacité lumineuse**

$$K_{cd} = 683\text{ cd sr W}^{-1}\text{ à }540 \times 10^{12}\text{ s}^{-1}$$

où  $W = \text{kg m}^2\text{ s}^{-2}$  est le watt.

## La cascade des unités...

- La nouvelle norme repose sur une cascade d'unités « incluses » dans les constantes fixées.
- Analyse dimensionnelle des constantes :  
**T** = Temps; **L** = Longueur; **M** = Masse; **Θ** = Température; **I** = Intensité électrique, **N** = Quantité de matière, **J** = Intensité lumineuse.

Constante	Dimension	Grandeurs accessibles
$\Delta\nu_{Cs}$	$T^{-1}$	temps <b>T</b> , fréquence $T^{-1}$ ...
$c$	$L T^{-1}$	longueur <b>L</b> , surface $L^2$ , vitesse $L T^{-1}$ ...
$h$	$M L^2 T^{-2}$	masse <b>M</b> , énergie $M L^2 T^{-2}$ , force $M L T^{-2}$ ...
$e$	$I T$	intensité élec. <b>I</b> , tension élec. $I^{-1} M L^2 T^{-3}$ ...
$k$	$\Theta M L^2 T^{-2}$	température <b>Θ</b> ...
$N_A$	$N^{-1}$	quantité de matière <b>N</b> (mole)...
$K_{cd}$	$J M^{-1} L^{-2} T^3$	intensité lumineuse <b>J</b> (candela)...

## Nouvelles définitions à compter du 20 mai 2019

- 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  $\text{s}^{-1}$ .
- Le mètre, symbole m, est l'unité de longueur du SI. Il est défini en prenant la valeur numérique fixée de la vitesse de la lumière dans le vide,  $c$ , égale à 299 792 458 lorsqu'elle est exprimée en m/s, la seconde étant définie en fonction de  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ .
- 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  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ .
- *etc...*

➔ Cohérence des définitions, même dans leur formulation !

## La norme : de la pratique à la théorie...

- La réforme actuelle est une réponse aux progrès scientifiques et technologiques, et à certains besoins de la société (vente d'électricité sur la grille européenne!).
- L'universalité tend à éliminer les artefacts matériels et expérimentaux au profit de considérations théoriques.
  - ▶ À la Révolution Française, les savants ont pris le pouvoir pour définir des normes...
  - ▶ Aujourd'hui les théoriciens prennent le pouvoir...
- Mais la réforme actuelle n'a d'application pratique que s'il existe un artefact expérimental (au moins un) qui met en place l'équivalence donnée par la définition (ex. : la balance de Watt pour la masse).
- La seconde résiste encore et toujours : référence à un atome *particulier*...  
La seconde est centrale : 5 autres unités de bases en dépendent (sauf la mole)...
- Dès 1900, M. Planck a imaginé un système d'unités naturelles basées sur les constantes fondamentales (incluant la constante de Newton  $G$ )  
*...Elles gardent nécessairement leur signification pour tous les temps et toutes les civilisations, mêmes extraterrestres et non humaines, et peuvent donc être désignées « unités naturelles »...*



Merci