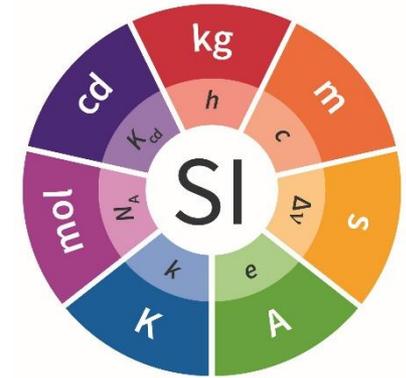




Enjeux et perspectives de la refonte annoncée du Système International d'Unités

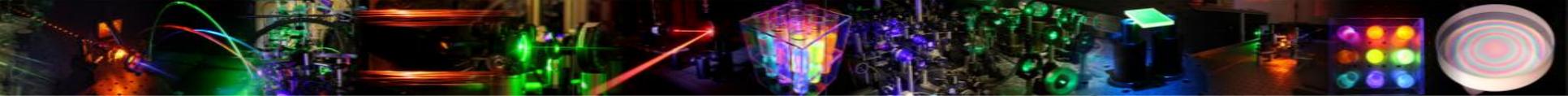


Laboratoire de Physique des Lasers
UMR 7538 – CNRS - Université Paris 13
Université Sorbonne Paris Cité

Christophe Daussy



Le 5 février 2018



Le Laboratoire de Physique des Lasers

○ Le LPL en quelques mots :

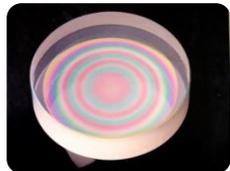
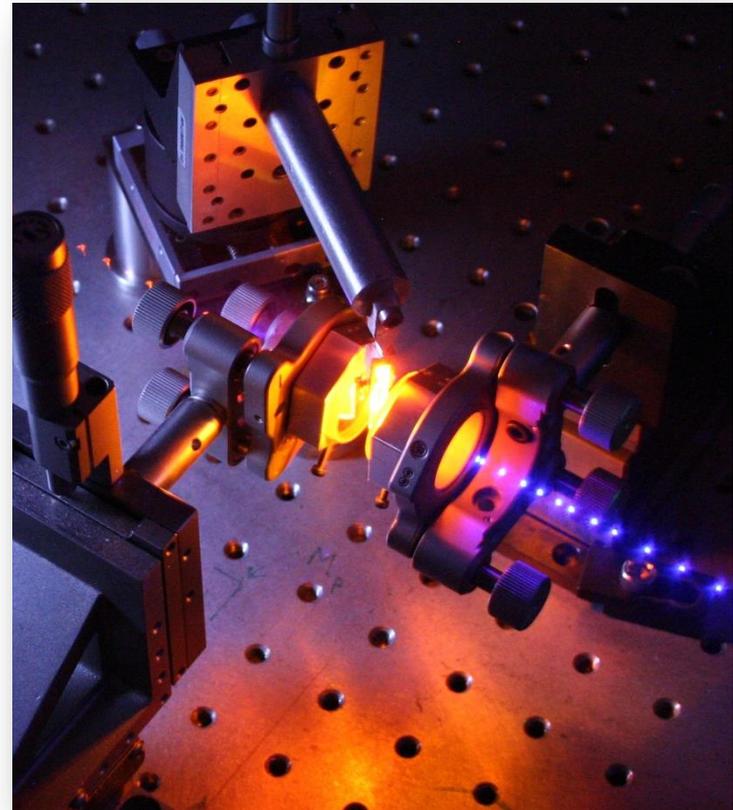
- Recherche expérimentale en physique quantique
- Mesures de ultra-haute précision
- Photonique et nanotechnologies

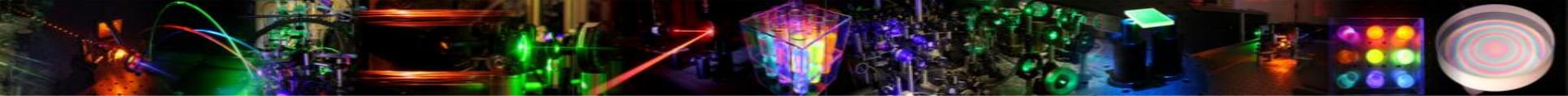
○ Le LPL en quelques chiffres :

- 80 personnes dont 45 chercheurs permanents
- 40 articles par an dans des revues internationales
- Plus de 16 projets expérimentaux
- 3 ateliers (électronique, mécanique, optique)



www.lpl.univ-paris13.fr





L'équipe Métrologie, Molécules et tests fondamentaux

○ Membres permanents



Anne Amy-Klein



Christian J. Bordé



Christian Chardonnet



Benoît Darquié



Christophe Daussey



Frédéric Du Burck



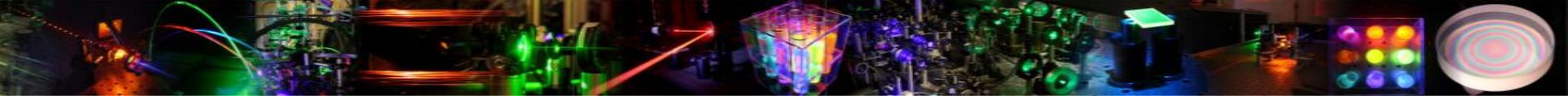
Olivier Lopez



Sean Tokunaga



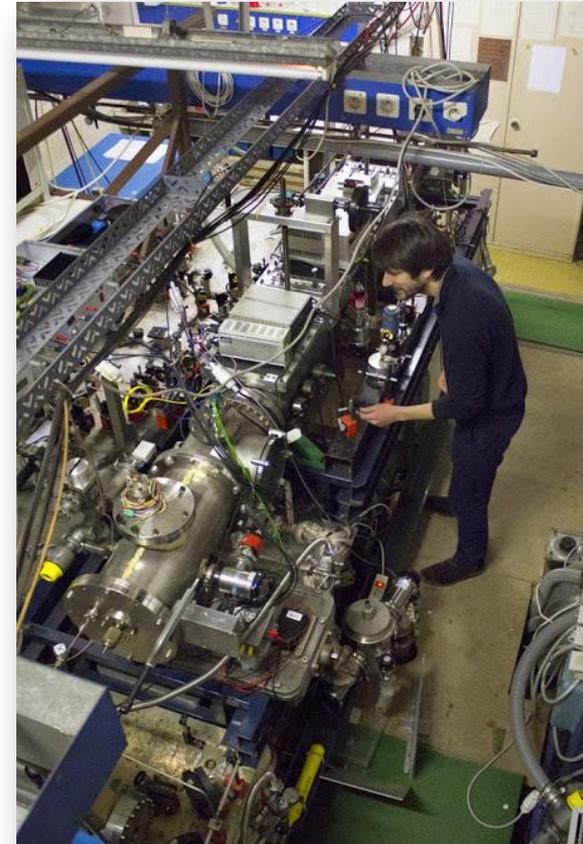
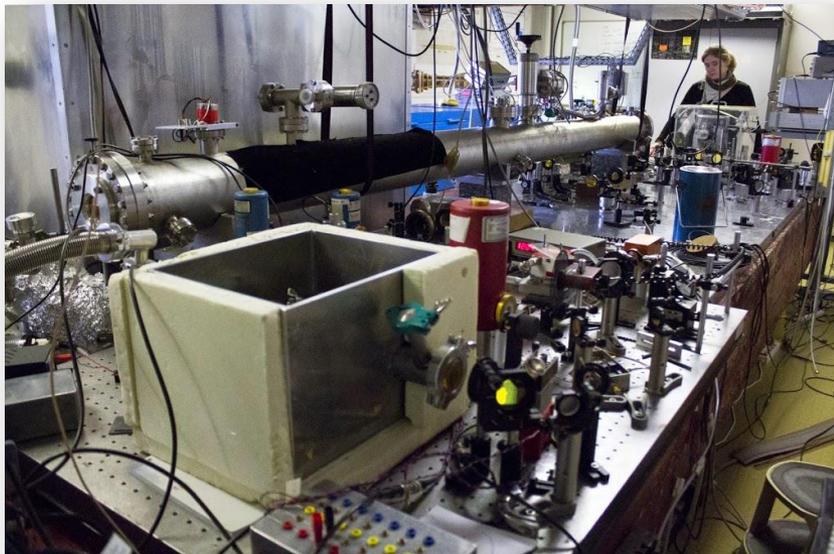
Vincent Roncin

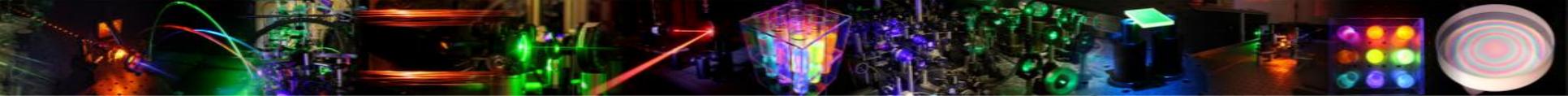


L'équipe Métrologie, Molécules et tests fondamentaux

○ Les thématiques de recherche :

- Non-conservation de la parité dans les molécules
- Détermination optique de la constante de Boltzmann
- Transfert de fréquences par lien optique et mesures de fréquences
- Développements théoriques en interférométrie atomique et moléculaire
- Lasers visibles faible bruit

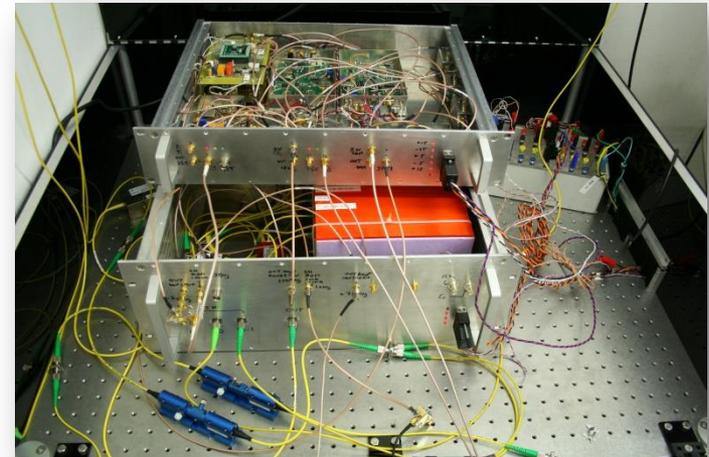
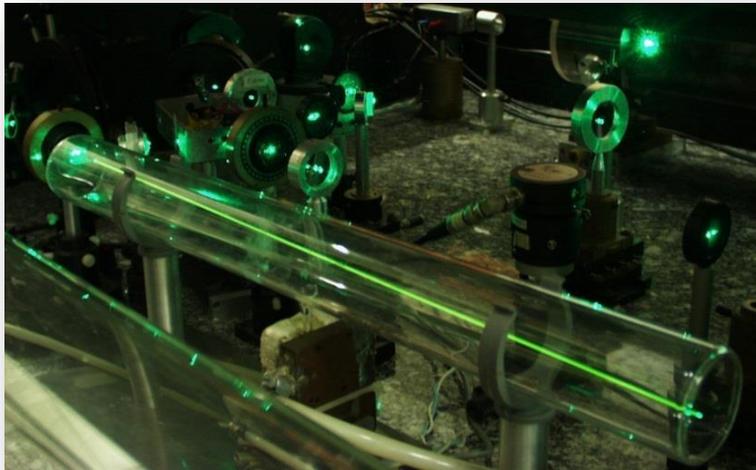




L'équipe Métrologie, Molécules et tests fondamentaux

○ Les thématiques de recherche :

- Non-conservation de la parité dans les molécules
- Détermination optique de la constante de Boltzmann
- Transfert de fréquences par lien optique et mesures de fréquences
- Développements théoriques en interférométrie atomique et moléculaire
- Lasers visibles faible bruit





Vers un nouveau Système d'unités

Il est attendu qu'en novembre 2018, la CGPM à sa 26^e réunion adopte une révision du Système international d'unités, le SI, qui sera alors le système d'unités selon lequel :

- la fréquence de la transition hyperfine de l'état fondamental de l'atome de césium 133 non perturbé, $\Delta\nu_{\text{Cs}}$, est égale à 9 192 631 770 Hz,
- la vitesse de la lumière dans le vide, c , est égale à 299 792 458 m/s,
- la constante de Planck, h , est égale à $6,626\ 070\ 15 \times 10^{-34}$ J s,
- la charge élémentaire, e , est égale à $1,602\ 176\ 634 \times 10^{-19}$ C,
- la constante de Boltzmann, k , est égale à $1,380\ 649 \times 10^{-23}$ J/K,
- la constante d'Avogadro, N_A , est égale à $6,022\ 140\ 76 \times 10^{23}$ par mol⁻¹,
- l'efficacité lumineuse d'un rayonnement monochromatique de fréquence 540×10^{12} Hz, K_{Cd} , est égale à 683 lm/W,



où

- i. les unités hertz, joule, coulomb, lumen et watt, qui ont respectivement pour symbole Hz, J, C, lm, et W, sont reliées aux unités seconde, mètre, kilogramme, ampère, kelvin, mole et candela, qui ont respectivement pour symbole s, m, kg, A, K, mol, et cd, selon les relations $\text{Hz} = \text{s}^{-1}$, $\text{J} = \text{m}^2 \text{kg s}^{-2}$, $\text{C} = \text{s A}$, $\text{lm} = \text{cd m}^2 \text{m}^{-2} = \text{cd sr}$, et $\text{W} = \text{m}^2 \text{kg s}^{-3}$,
- ii. les valeurs numériques de h , e , k , and N_A sont fondées sur **l'ajustement le plus récent fourni par CODATA.**

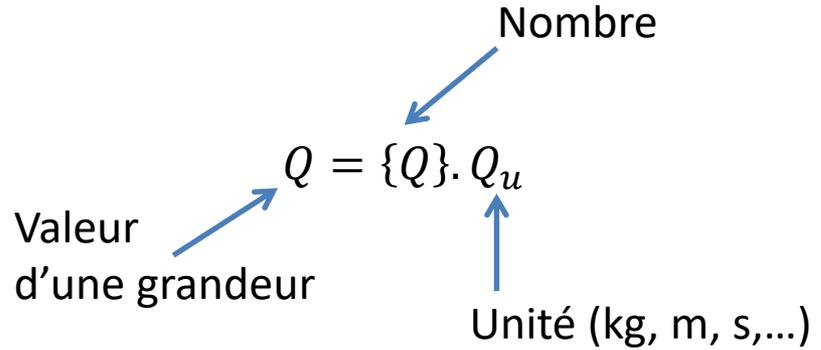


<http://www.bipm.org/fr/measurement-units/new-si/>



Dimensions et unités

Les unités



Exemple :

mesure d'une masse (en kg)

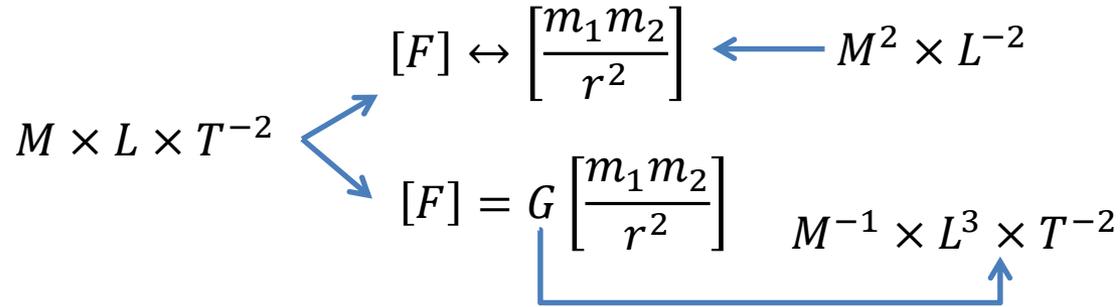
$$Q = \{Q\} \times 1 \text{ kg étalon}$$

Dépend du choix arbitraire du système d'unités



L'analyse dimensionnelle

Loi attraction gravitationnelle de Newton



Masse, Longueur, Temps,...

$$\dim Q = [Q] = M^\alpha L^\beta T^\gamma I^\delta \Theta^\varepsilon N^\zeta J^\eta$$

Constante fondamentale

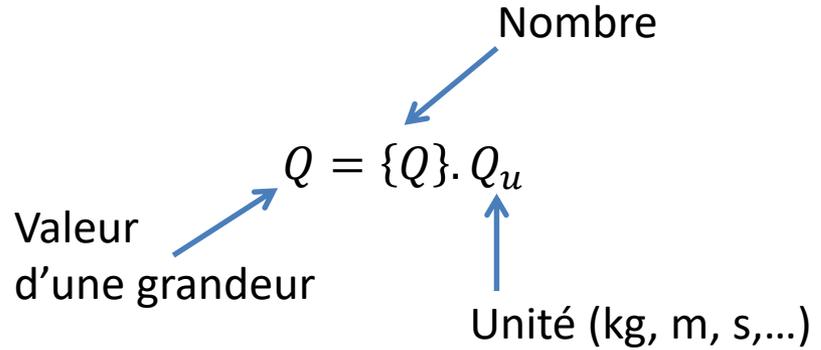
(dépendante du système d'unités)
 $G = 6,67 \dots \times 10^{-11} \text{ kg}^{-1} \text{ m}^3 \text{ s}^{-2}$)

→ $G, c, h, k_B, \mu_0, \varepsilon_0, \dots$



Dimensions et unités

Les unités



Exemple :

mesure d'une masse (en kg)

$$Q = \{Q\} \times 1 \text{ kg } \acute{e}\text{talon}$$

Dépend du choix arbitraire du système d'unités



L'analyse dimensionnelle

$$\mu = \frac{m_e}{m_p} = 5.446\ 170\ 213\ 52(52) \times 10^{-4}$$

$$\alpha = \frac{e^2}{2\epsilon_0 hc} \approx \frac{1}{137}$$

α_G, \dots

Indépendant du système d'unités
(Paramètres fondamentaux)

Masse, Longueur, Temps,...

$$\dim Q = [Q] = M^\alpha L^\beta T^\gamma I^\delta \Theta^\epsilon N^\zeta J^\eta$$

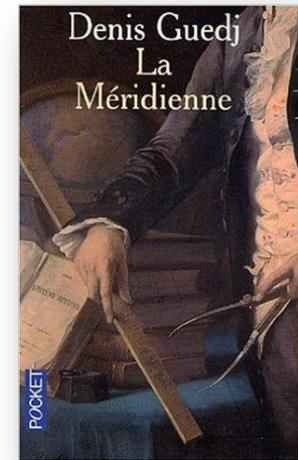
$$\dim Q = [Q] = 0$$



Histoire du système d'unités

○ De l'ancien Régime à la révolution

« Le bois se vendait à la *corde* ; le charbon de bois à la *tonne* ; le charbon de terre à la *bacherelle* ; l'ocre au *tonneau*, et le bois de charpente à la *marque* ou à la *solive*. On vendait les fruits à cidre à la *poiçonnée* ; le sel au *muid*, au *sétier*, à la *mine*, au *minot*, au *boisseau* et à la *mesurette* ; la chaux se vendait au *poinçon*, et le minerai à la *razière*. On achetait l'avoine au *picotin* et le plâtre au *sac* ; on se procurait le vin à la *pinte*, à la *chopine*, à la *camuse*, à la *roquille*, au *petit pot* et à la *demoiselle*... Les longueurs étaient mesurées en *toise* et en *pied du Pérou*, lequel équivalait à un *pouce*, une *logne* et huit *points* du *pied du roi* - pied du roi qui se trouvait être celui du roi Philictère, celui de Macédoine et celui de Pologne... À Marseille, la *canne* pour les draps était plus longue que celle pour la *sopie* d'environ un quatorzième. Quelle confusion ! 7 à 800 noms... »



 Denis Guedj, *La Méridienne*, 1792-1799, 1987, p 9-10

- Politique pour l'industrie et le commerce (internationalisation des échanges)
- Scientifiques des Lumières



Assurer l'**invariabilité des mesures** en les rapportant à des étalons empruntés à des **phénomènes naturels** (étalons universels).



Histoire du système d'unités

○ De l'ancien Régime à la révolution



Assemblée Nationale - Abandon de tous les privilèges
(Séance de la nuit du 4 au 5 Aout **1789** à Versailles)



Abolition du privilège royal
d'étalonnage des mesures



Talleyrand (1754-1838)
à l'origine des États généraux et grande
figure de la Révolution Française



Chercher dans la nature une
mesure universelle (**1790**)



Histoire du système d'unités

○ Une mesure universelle : le mètre

- Le 16 février **1791** : commission pour le choix de la définition du mètre (Borda, Condorcet, Laplace, Lagrange et Monge) :
 - Longueur pendule
 - $\frac{1}{4}$ longueur équateur terrestre
 - $\frac{1}{4}$ longueur méridien terrestre
- Le 26 mars **1791** : le mètre est égale à la dix millionième partie du quart du méridien terrestre.
- Mesure la longueur de la portion d'arc de méridien entre Dunkerque et Barcelone (juin **1792** à novembre **1798**)



Jean Baptiste Delambre
(1747-1822)

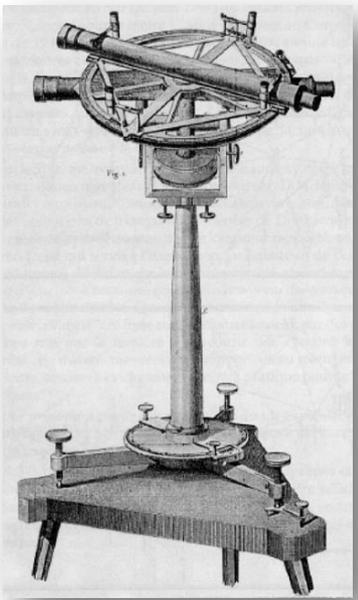


Pierre-François MECHAIN
(1744-1804)





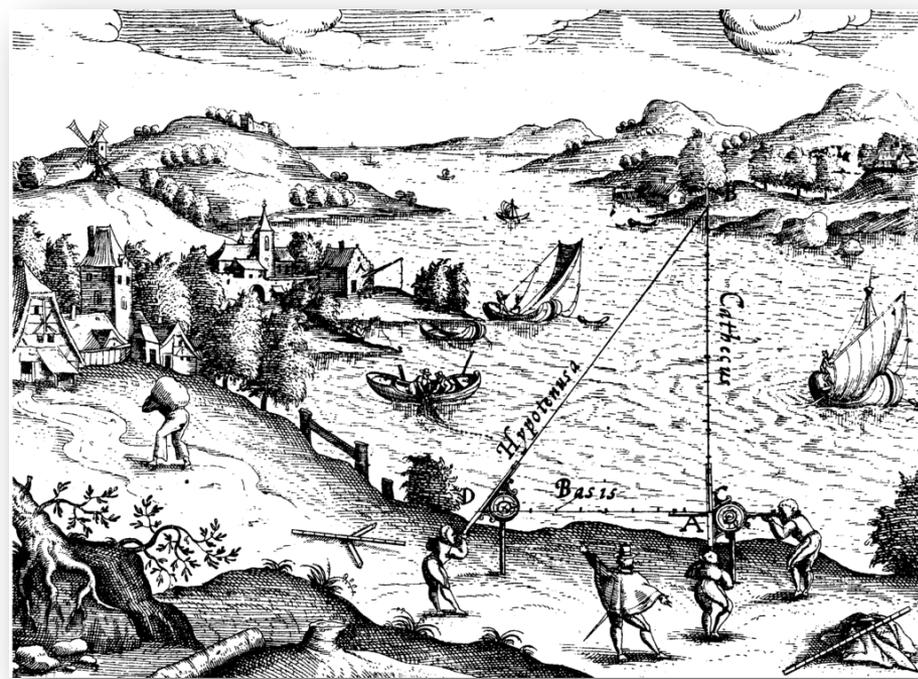
Histoire du système d'unités



Cercle répéteur de Borda



Erreur sur les angles < 0,5 seconde de degré



Mesure de distance par triangulation pratiquée au xvie siècle (Levinus Hulsius)



Mesures de Dunkerque à Barcelone (plus de 7 ans)



Histoire du système d'unités

○ Le système décimal (24 novembre 1793)

11. Le jour, de minuit à minuit, est divisé en dix parties ou heures, chaque partie en dix autres, ainsi de suite jusqu'à la plus petite portion commensurable de la durée. La centième partie de l'heure est appelée minute décimale; la centième partie de la minute est appelée seconde décimale. Cet article ne sera de rigueur pour les actes publics, qu'à compter du 1^{er} vendémiaire, l'an troisième de la république.



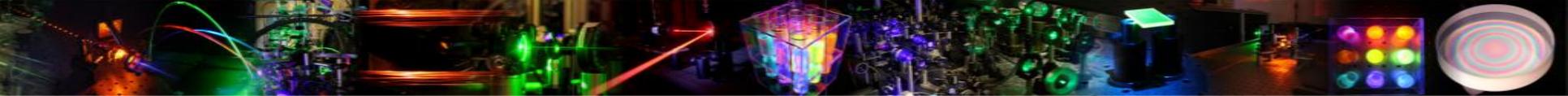
Décret du 4 Frimaire An 2 (Première Constituante de la Première République)

Aboli en 1795 !

○ Un nouveau calendrier (6 octobre 1793)

- Calendrier **Julien** (-46 à 1582) *Jules César*
- Calendrier **Grégorien** (1582 à 1793) *pape Grégoire XIII*
- Calendrier **révolutionnaire** (1793-1806)
 - Débute le jour de proclamation de la République (1^{er} vendémiaire an I, 22 septembre 1792)
 - Compte 12 mois de 30 jours+ 5 jours en fin d'année !





Histoire du système d'unités

○ Le système métrique décimal

- Loi « relative aux poids et mesures » (1795) :
 - Unité de volume : $1\text{L} = 0,001\text{ m}^3$
 - Unité de masse : 1L d'eau distillée à 4 °C
- Dépôt aux Archives de la République (1799, Paris) :



Etalon prototype du mètre en platine
(fabriqué par Lenoir en 1799)



Etalon prototype du kilogramme en platine
(fabriqué par Fortin 1799)





Le Bureau International des Poids et Mesures

○ La convention du mètre (1875)

17 états fondent le BIPM

ARTICLE PREMIER.

Les Hautes Parties contractantes s'engagent à fonder et entretenir, à frais communs, un *Bureau international des poids et mesures*, scientifique et permanent, dont le siège est à Paris.

ART. 2.

Le Gouvernement français prendra les dispositions nécessaires pour faciliter l'acquisition ou, s'il y a lieu, la construction d'un bâtiment spécialement affecté à cette destination, dans les conditions déterminées par le Règlement annexé à la présente Convention.

ART. 3.

Le Bureau international fonctionnera sous la direction et la surveillance exclusives d'un *Comité international des poids et mesures*, placé lui-même sous l'autorité d'une *Conférence générale des poids et mesures* formée de délégués de tous les Gouvernements contractants.



Le Pavillon de Breteuil (Sèvres)



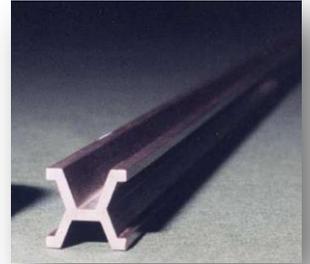
Aujourd'hui le BIPM compte 58 états membres



Evolution du système métrique

- **1875** : convention du mètre
- **1878-1889** : dissémination de 30 étalons nationaux
- **1887** : Michelson propose de mesurer les longueurs par interférométrie optique
- **1892-1893** : mesure par interférométrie (Michelson et Benoît) de l'étalon primaire du BIPM (source : lampe à cadmium)
- **1906** : mesures en utilisant l'interféromètre de Fabry-Perot (Benoît, Fabry et Perot)
- **1921-1936** : première intercomparaison (prototypes nationaux et étalon primaire). Mesure précise de l'effet de la température sur l'étalon du mètre.
- **1960** : redéfinition du **mètre** (λ_{Kr}) et adoption **SI** (11^{ème} CGPM)
- Réalisation (de facto) du mètre : He-Ne/I₂
- **1983** : redéfinition du **mètre** en fixant c (mise en pratique avec des lasers)

Etalon du mètre
(platinum iridié)



Lampe à
Krypton-86



1960 : 1^{er} laser
(Théodore Maiman)





Du système métrique au Système International d'Unités

- **1874** : Adoption du système CGS par la British Association for the Advancement of Science (BAAS)

Loi de Coulomb	Loi de Biot-Savart-Laplace	}	$\frac{C_1}{C_2} = c^2$
$\vec{F} = C_1 Q Q' \frac{\overrightarrow{MM'}}{ MM' ^3}$	$d^2\vec{F} = C_2 I' d\vec{l}' \left[I d\vec{l} \wedge \frac{\overrightarrow{MM'}}{ MM' ^3} \right]$		

- Système CGS électrostatique : $C_1 = 1$
 - Système CGS électromagnétique : $C_2 = 1$
 - Système CGS de Gauss : $C_1 = 1$ et $C_2 = 1$ avec $I = \frac{1}{c} \frac{dQ}{dt}$
- **1875** : redéfinition du **kilogramme** étalon (platinum iridié)
 - **1889** : définition de la **seconde** (1/86 400 du jour solaire terrestre moyen) et du système **MKS** (1^{ère} CGPM)



Du système métrique au Système International d'Unités

- **1901** : Proposition d'ajouter une nouvelle unité : l'ampère [Giovanni Giorgi (1901)]. Le système MKSA.

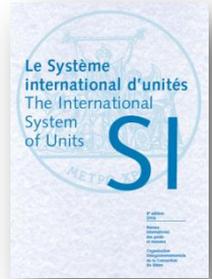
Élimination des facteurs 4π dans les équations de Maxwell (rationalisation)

$$\begin{cases} C_1 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} A^{-2} s^{-4} m^3 kg \\ C_2 = \frac{\mu_0}{4\pi} kg^{-1} m^{-1} A^2 s^2 \end{cases}$$

$$\epsilon_0 \mu_0 c^2 = 1$$

- **1954** : définition **ampère, kelvin, candela** (10^{ème} CGPM)
- **1960** : redéfinition du **mètre** (λ_{Kr}) et **adoption SI** (11^{ème} CGPM)
- **1967** : redéfinition de la **seconde** (ν_{Cs})
- **1971** : définition de la **mole**
- **1979** : redéfinition de la **candela** (16^{ème} CGPM)
- **1983** : redéfinition du **mètre** (c)
- **2018** : redéfinition des **7 unités de base SI**...

De l'anthropomorphisme vers l'universel (Terre, atome,...)



de la dématérialisation jusqu'aux constantes fondamentales



<http://www.bipm.org/fr/publications/si-brochure/>



Du système métrique au Système International d'Unités

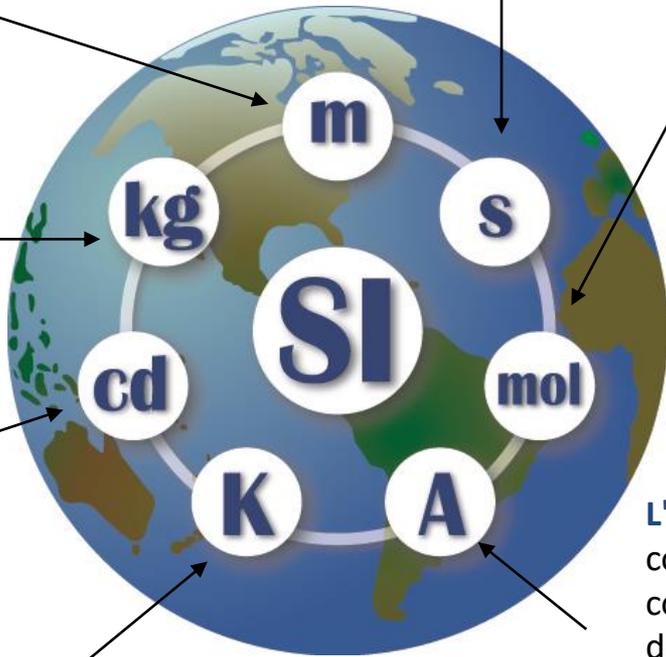
Le mètre est la longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière pendant une durée de $1/299\,792\,458$ de seconde.

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.

Le kilogramme est l'unité de masse ; il est égal à la masse du prototype international du kilogramme.

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

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



La mole 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 .

L'ampère est l'intensité d'un courant 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 égale à 2×10^{-7} newton par mètre de longueur.



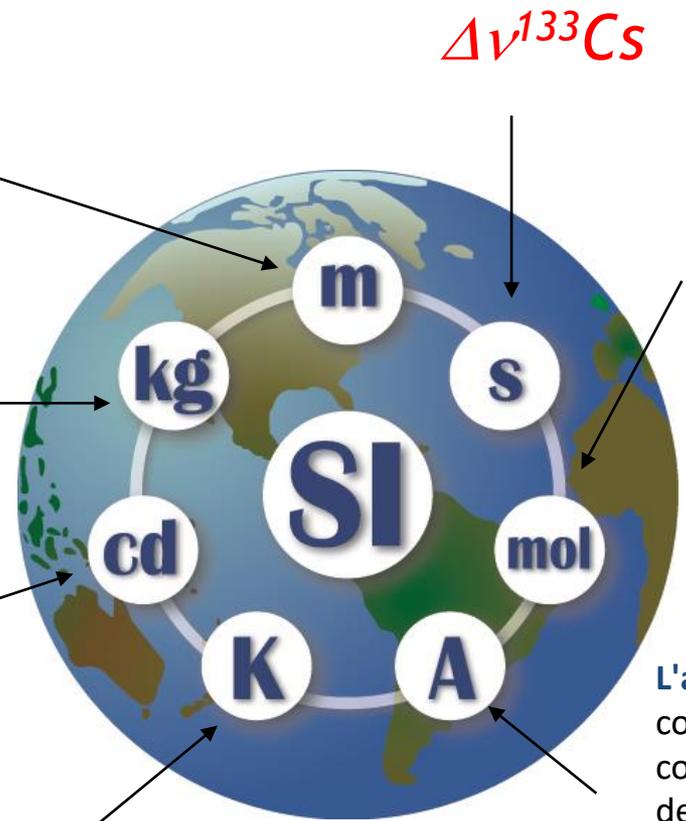
Du système métrique au Système International d'Unités

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

Le kilogramme est l'unité de masse ; il est égal à la masse du prototype international du kilogramme.

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

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



La mole 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 .

L'ampère est l'intensité d'un courant 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 égale à 2×10^{-7} newton par mètre de longueur.



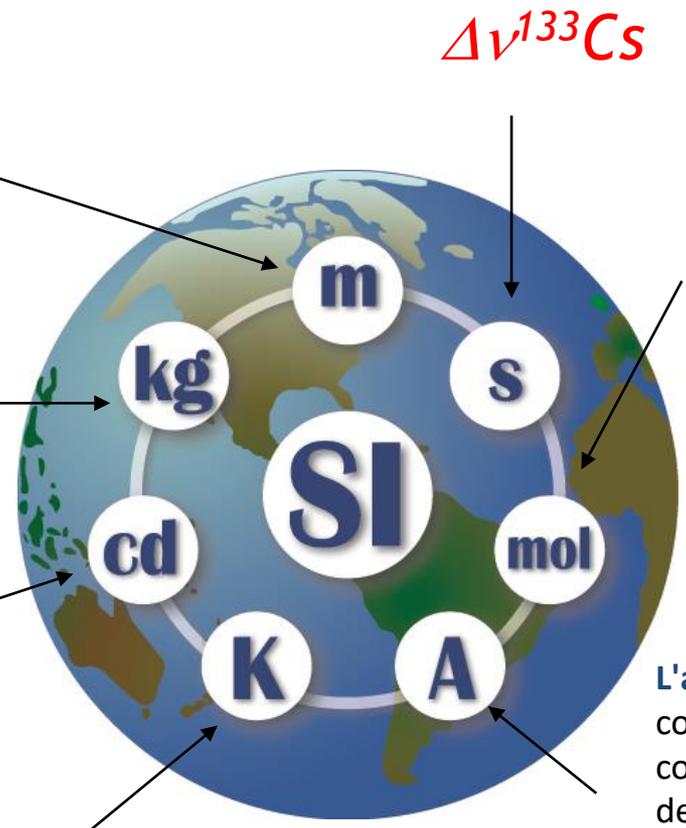
Du système métrique au Système International d'Unités

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

Le kilogramme est l'unité de masse ; il est égal à la masse du prototype international du kilogramme.

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

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



$\Delta\nu^{133}\text{Cs}$

$M(^{12}\text{C})$

L'ampère est l'intensité d'un courant 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 égale à 2×10^{-7} newton par mètre de longueur.



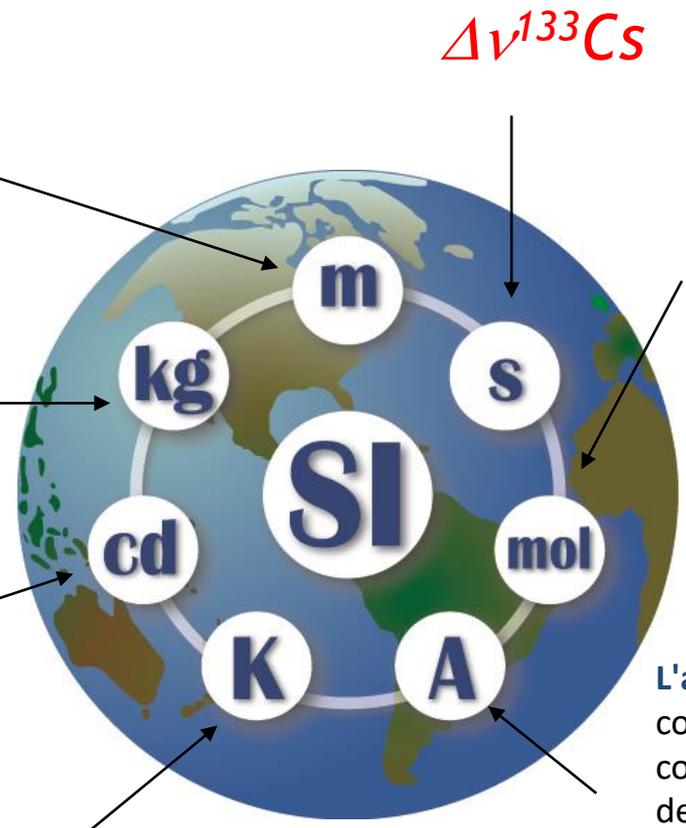
Du système métrique au Système International d'Unités

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

Le kilogramme est l'unité de masse ; il est égal à la masse du prototype international du kilogramme.

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

Point triple H₂O



$\Delta\nu^{133}\text{Cs}$

$M(^{12}\text{C})$

L'ampère est l'intensité d'un courant 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 égale à 2×10^{-7} newton par mètre de longueur.

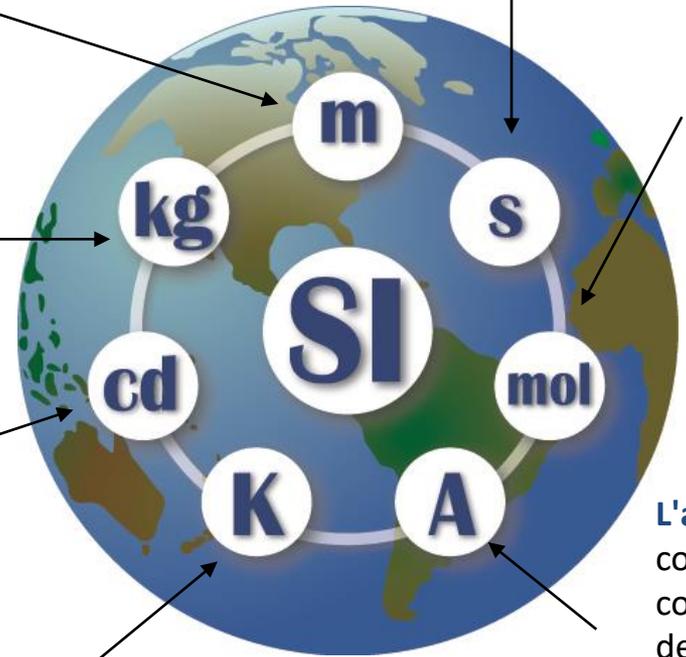


Du système métrique au Système International d'Unités

c

$\Delta\nu^{133}\text{Cs}$

$M(^{12}\text{C})$



Le kilogramme est l'unité de masse ; il est égal à la masse du prototype international du kilogramme.

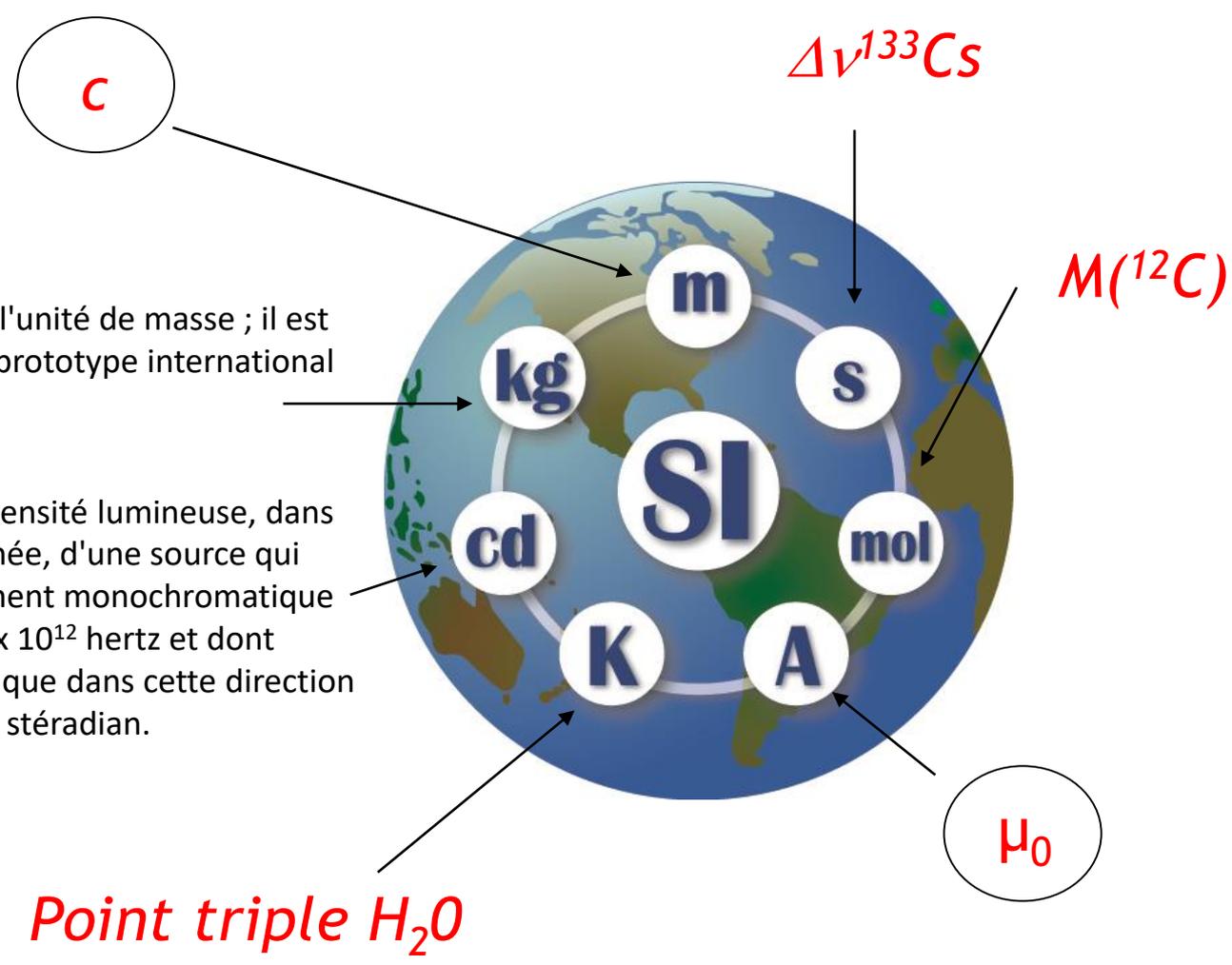
La candela est l'intensité lumineuse, dans une direction donnée, d'une source qui émet un rayonnement monochromatique de fréquence 540×10^{12} hertz et dont l'intensité énergétique dans cette direction est 1/683 watt par stéradian.

L'ampère est l'intensité d'un courant 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 égale à 2×10^{-7} newton par mètre de longueur.

Point triple H_2O



Du système métrique au Système International d'Unités

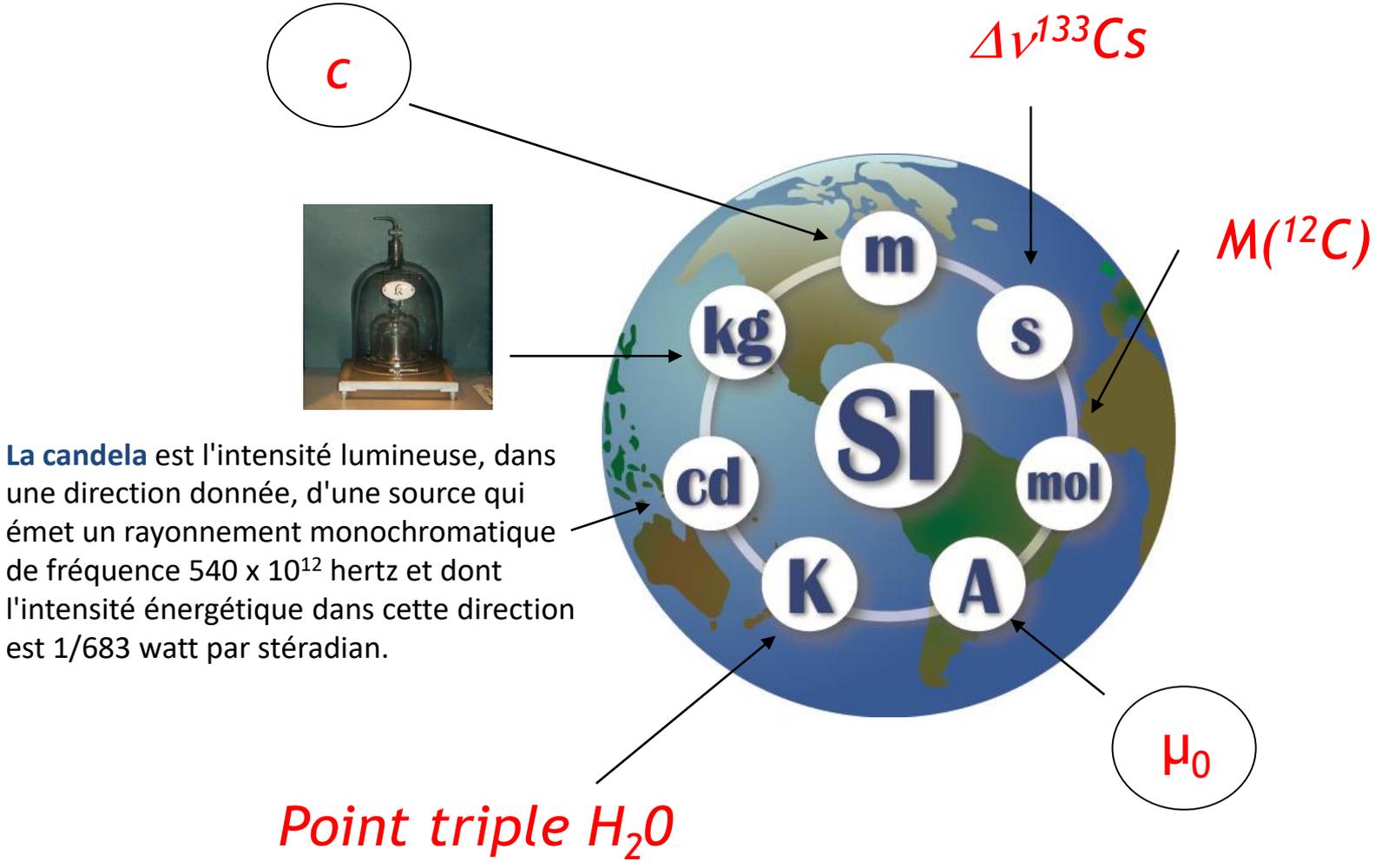


Le kilogramme est l'unité de masse ; il est égal à la masse du prototype international du kilogramme.

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

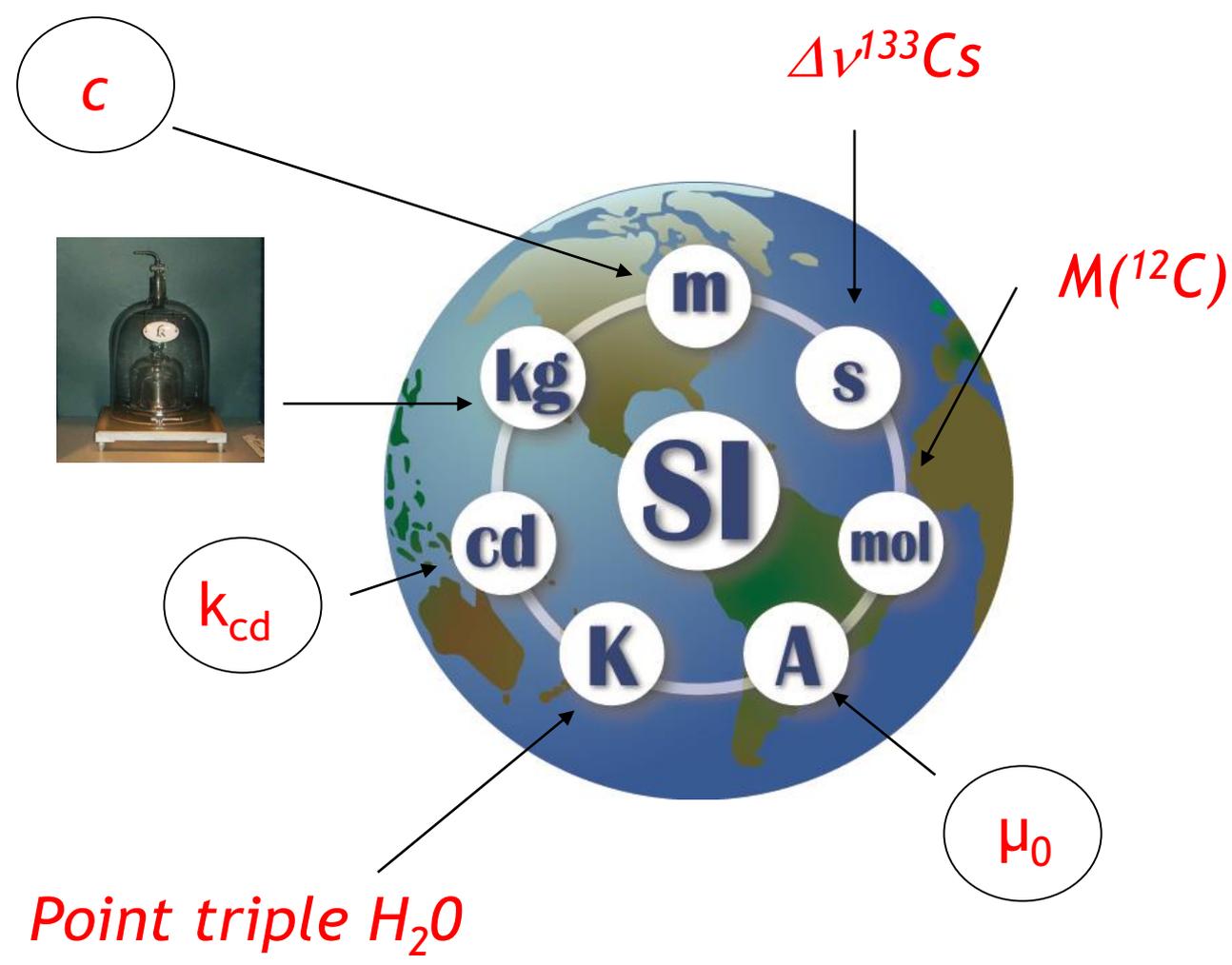


Du système métrique au Système International d'Unités





Du système métrique au Système International d'Unités



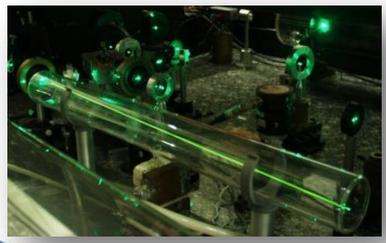


Mise en pratique actuelle du Système International d'Unités

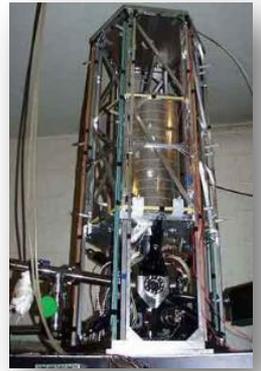
Kilogramme étalon
BIPM (France)



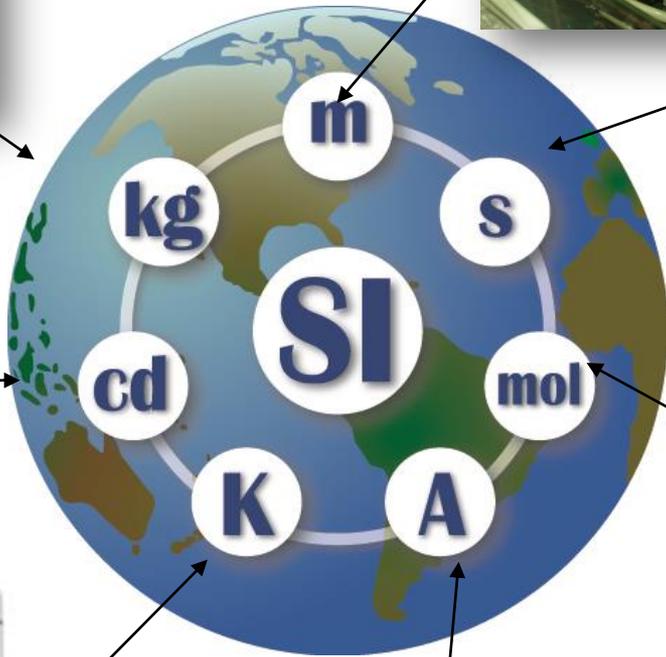
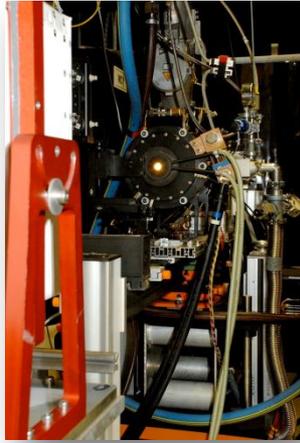
Laser stabilisé sur
iode LPL (France)



Fontaine à Cs
SYRTE (France)



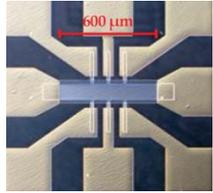
Le corps noir du
PTB (Allemagne)



Sphère Silicium
CSIRO (Australie)



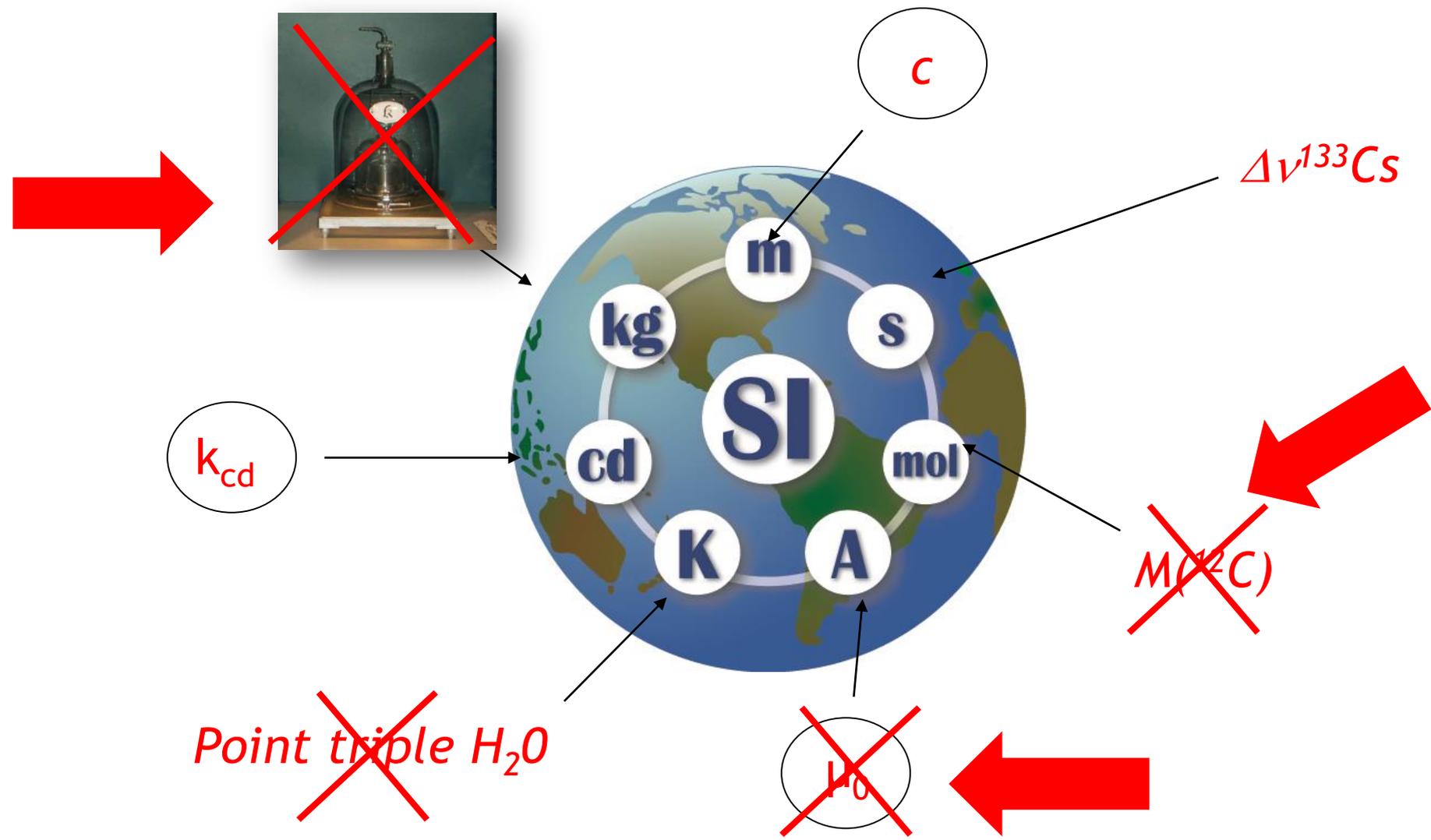
Cellule point triple de l'eau
LNE (France)



Résistance à effet Hall quantique
NIST (USA)



Un nouveau système d'unités : pourquoi ?





Un nouveau système d'unités : comment ?

○ Constantes et paramètres fondamentaux

~30 paramètres non déterminés (dans le cadre du modèle standard) :

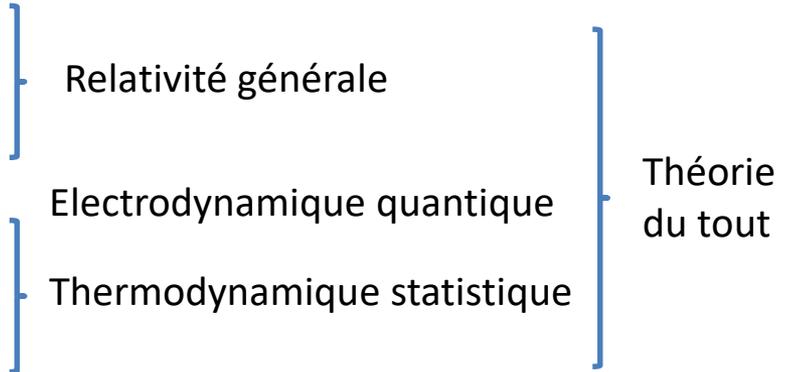
$$e, G, c, h, k_B, m_e, m_p, \mu_0, \epsilon_0, N_A, \dots$$

Nombre minimum de dimensions pour le système d'unités: 3-4

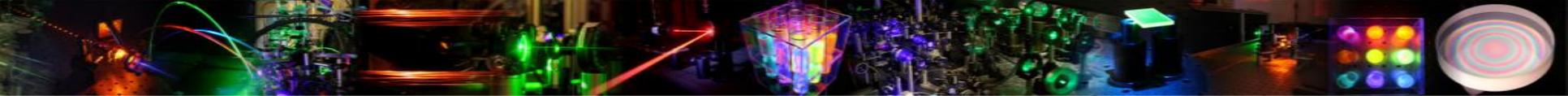


Infiniment grand

G	Mécanique Newtonienne
c	Relativité restreinte
h	Mécanique quantique
k_B	Thermodynamique



Infiniment petit



Un nouveau système d'unités : comment ?

○ Constantes et paramètres fondamentaux

~30 paramètres non déterminés (dans le cadre du modèle standard) :

$$e, G, c, h, k_B, m_e, m_p, \mu_0, \epsilon_0, N_A, \dots$$

Nombre minimum de dimensions pour le système d'unités: 3-4

Masse,
Longueur
Temps,
Température

4 constantes dimensionnées

→ système d'Unités

→ ~ 26 paramètres fondamentaux

○ Le système de Planck (1906)

$$L_p = \left(\frac{Gh}{c^3}\right) = 4,04 \times 10^{-35} m$$

$$t_p = \left(\frac{Gh}{c^5}\right)^{1/2} = 1,35 \times 10^{-43} s$$

$$M_p = \left(\frac{hc}{G}\right)^{1/2} = 5,45 \times 10^{-8} kg$$

$$T_p = \frac{1}{k_B} \left(\frac{hc^5}{G}\right)^{1/2} = 3,5 \times 10^{32} C$$

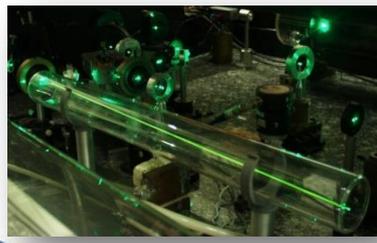


Mise en pratique actuelle du Système International d'Unités

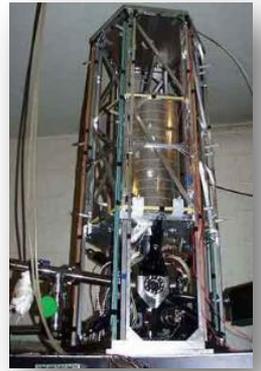
Kilogramme étalon
BIPM (France)



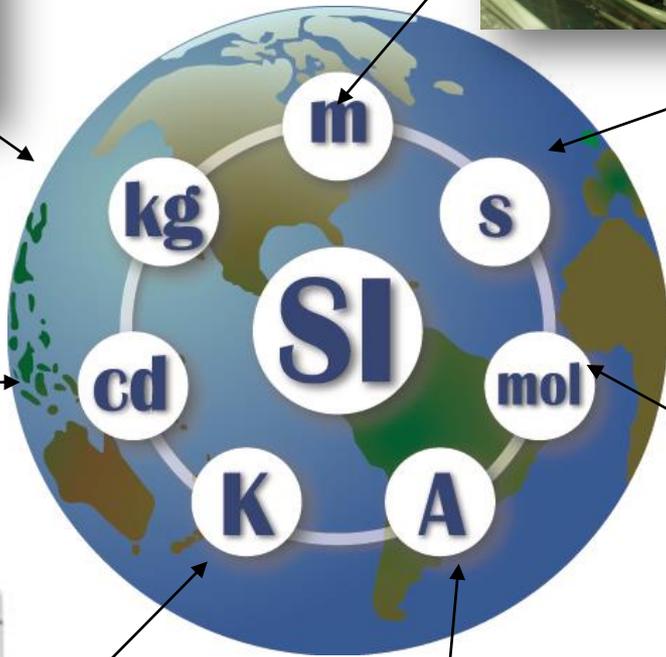
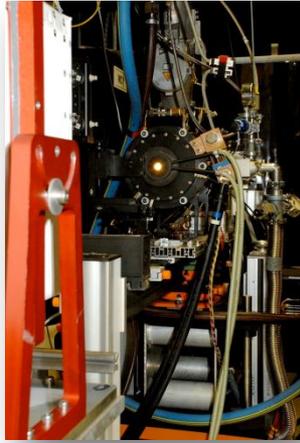
Laser stabilisé sur
iode LPL (France)



Fontaine à Cs
SYRTE (France)



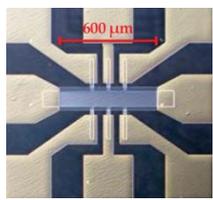
Le corps noir du
PTB (Allemagne)



Sphère Silicium
CSIRO (Australie)



Cellule point triple de l'eau
LNE (France)



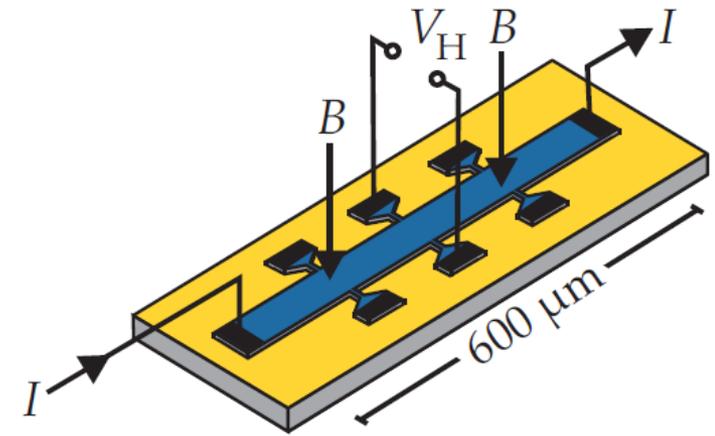
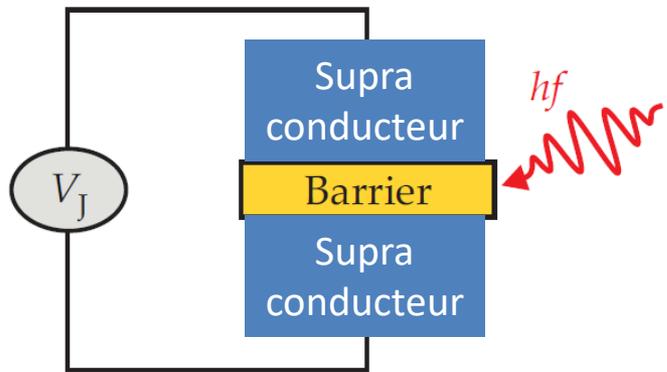
**Résistance à effet Hall quantique
NIST (USA)**



Mise en pratique de l'Ampère

○ L'effet Josephson

○ L'effet Hall quantique



Fréquence MW

$$V_j = n \frac{f}{K_j}$$

avec n et $n' = 1, 2, 3...$

$$\frac{V_H}{I} = R_H = \frac{R_K}{n'}$$

$$K_j = \frac{2e}{h}$$

et

$$R_K = \frac{h}{e^2}$$

Constante de Josephson

$$K_{j-90} = 483\,597,9 \text{ GHzV}^{-1} \text{ (exacte)}$$

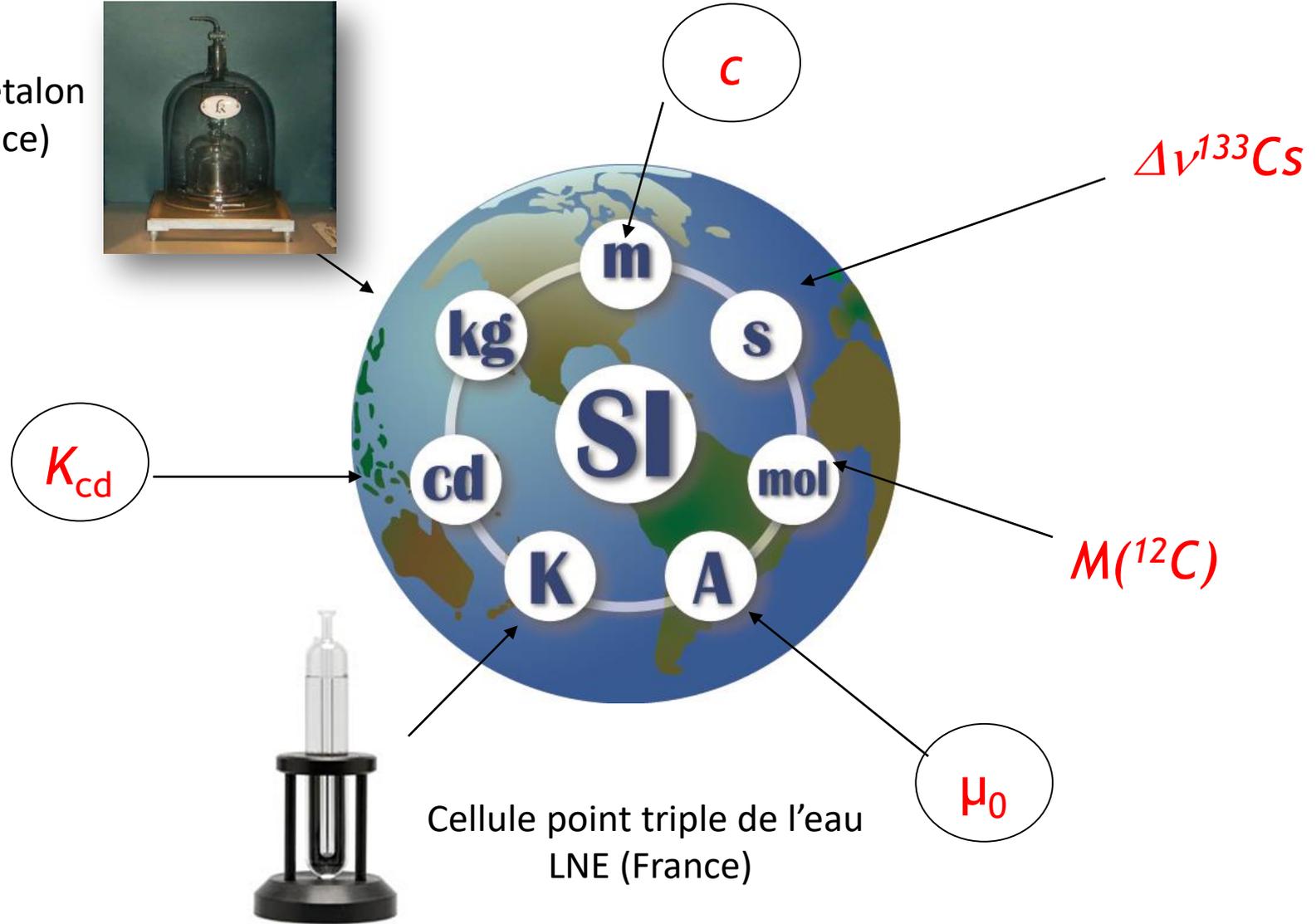
Constante de Von Klitzing

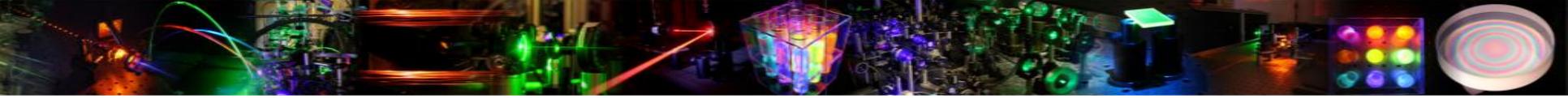
$$R_{K-90} = 25\,812,807 \, \Omega \text{ (exacte)}$$



Vers un nouveau Système d'Unités (Résolutions 24 CGPM 2011)

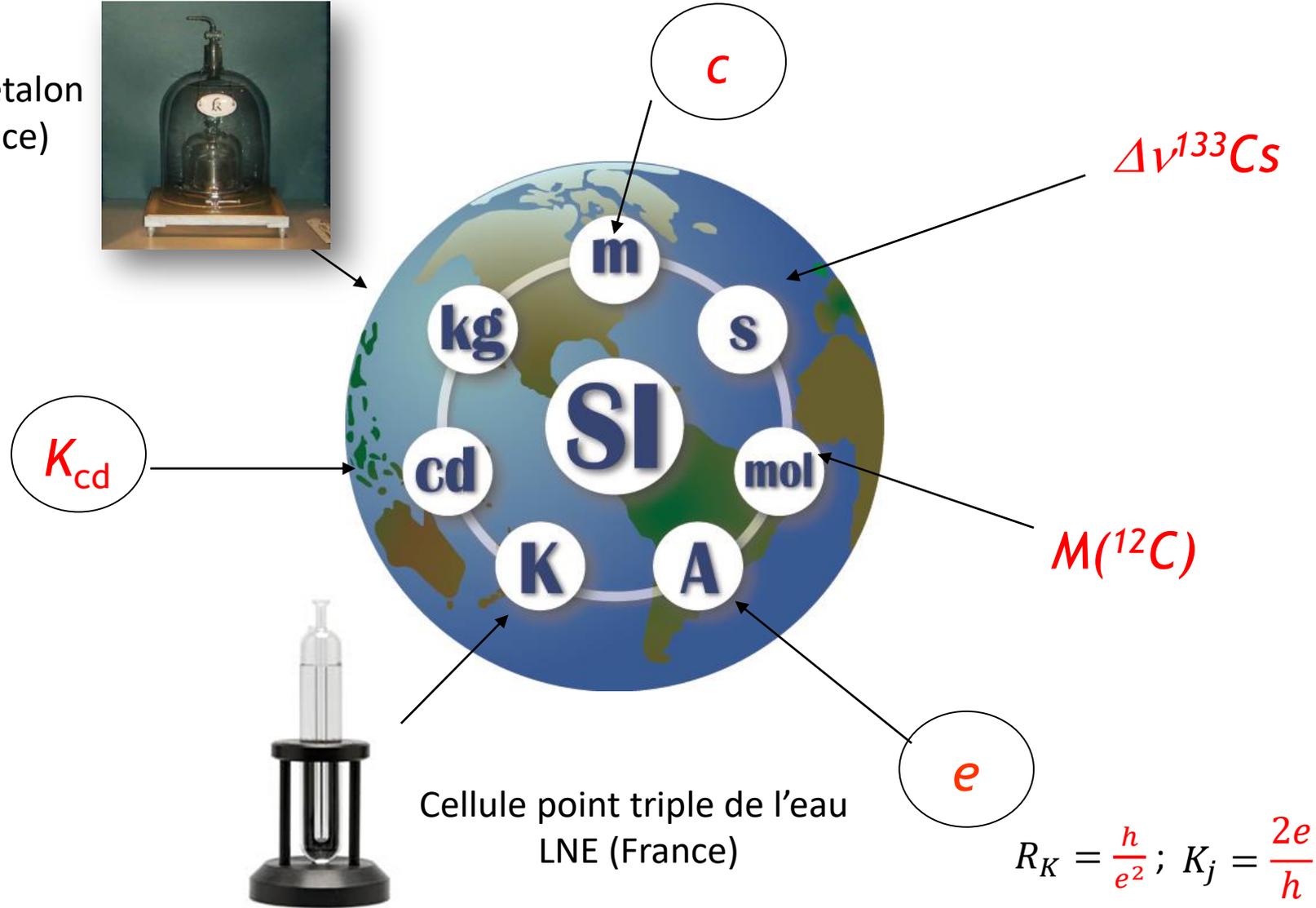
Kilogramme étalon
BIPM (France)





Vers un nouveau Système d'Unités (Résolutions 24 CGPM 2011)

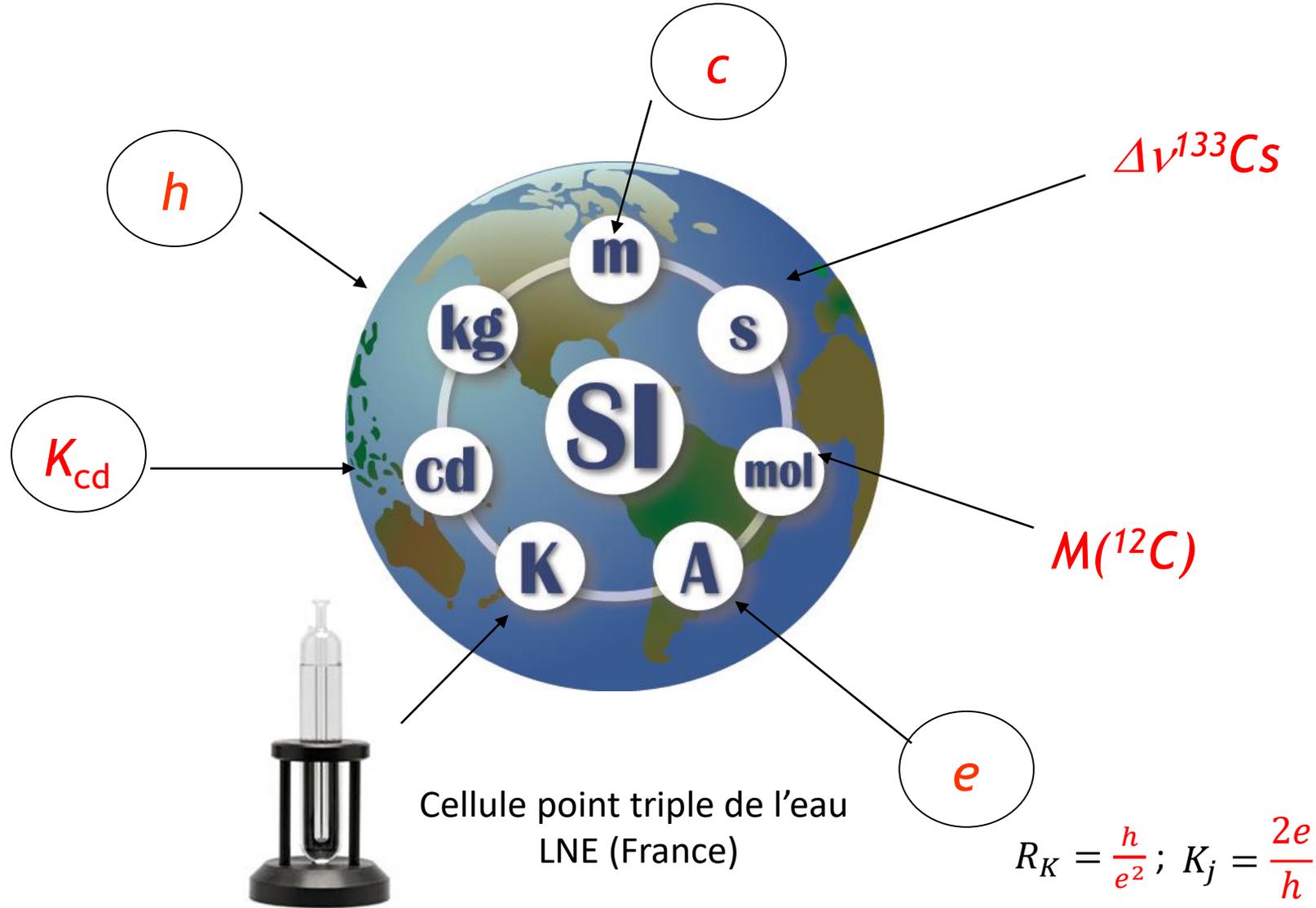
Kilogramme étalon
BIPM (France)



$$R_K = \frac{h}{e^2}; K_j = \frac{2e}{h}$$



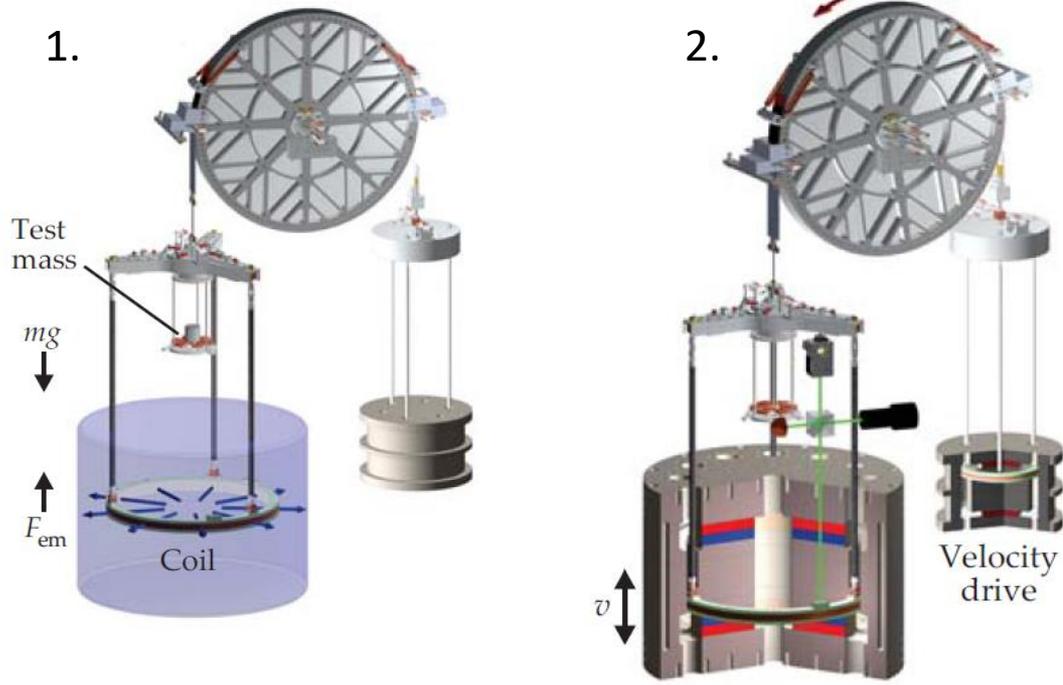
Vers un nouveau Système d'Unités (Résolutions 24 CGPM 2011)





Définition du kilogramme par h

○ La balance du Watt



$$mg = IBl = \frac{V_1}{R} Bl$$

$$V_2 = vBl$$

$$\frac{V_1}{R} = \frac{\left(\frac{n_1 h f_1}{2e}\right)}{\left(\frac{h}{n' e^2}\right)}$$

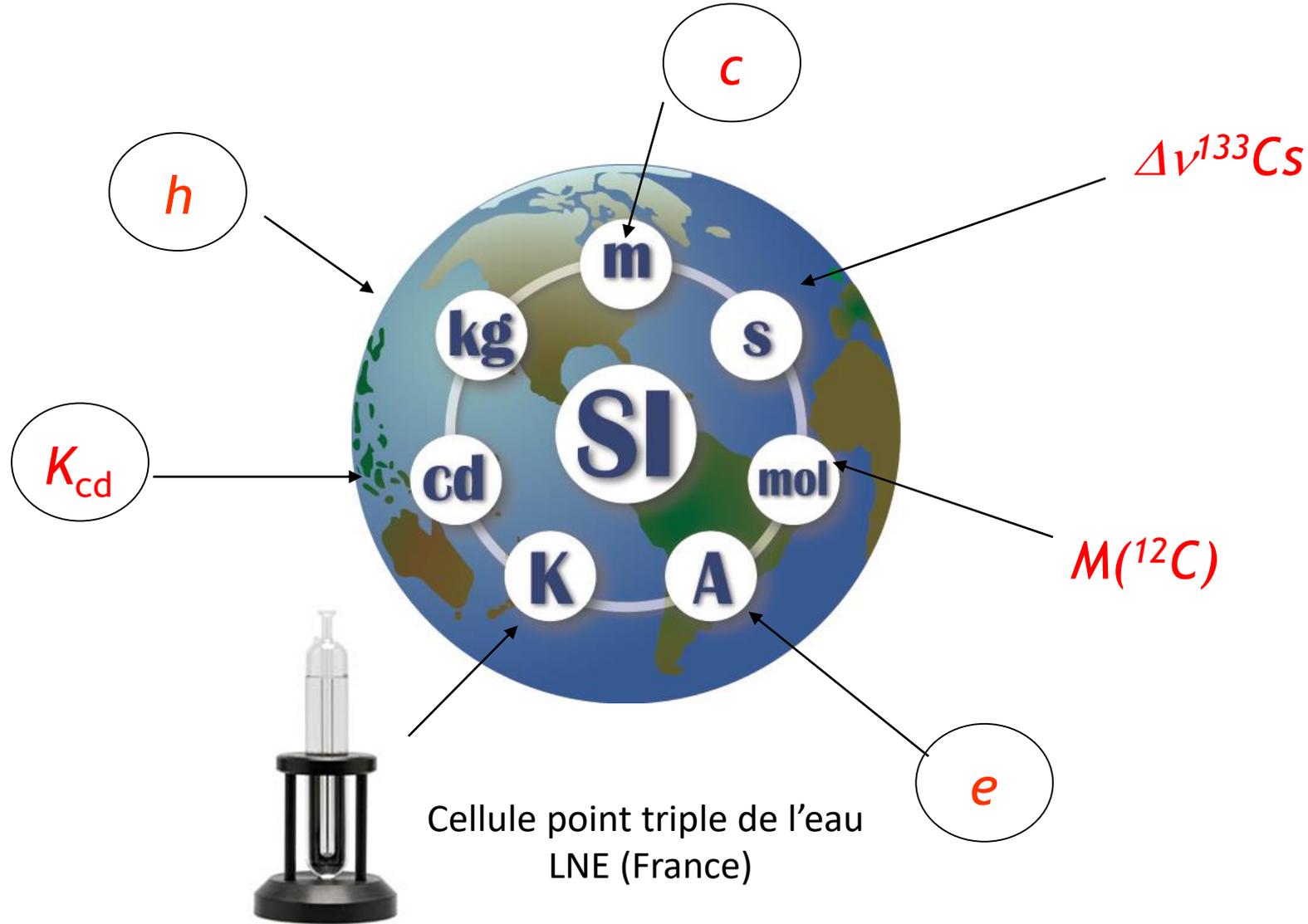
$$V_2 = \frac{n_2 h f_2}{2e}$$

$$mg = \frac{V_1}{R} \times \frac{V_2}{v}$$

$$m = h \left(\frac{n' n_1 n_2}{4} \right) \frac{f_1 f_2}{g v}$$

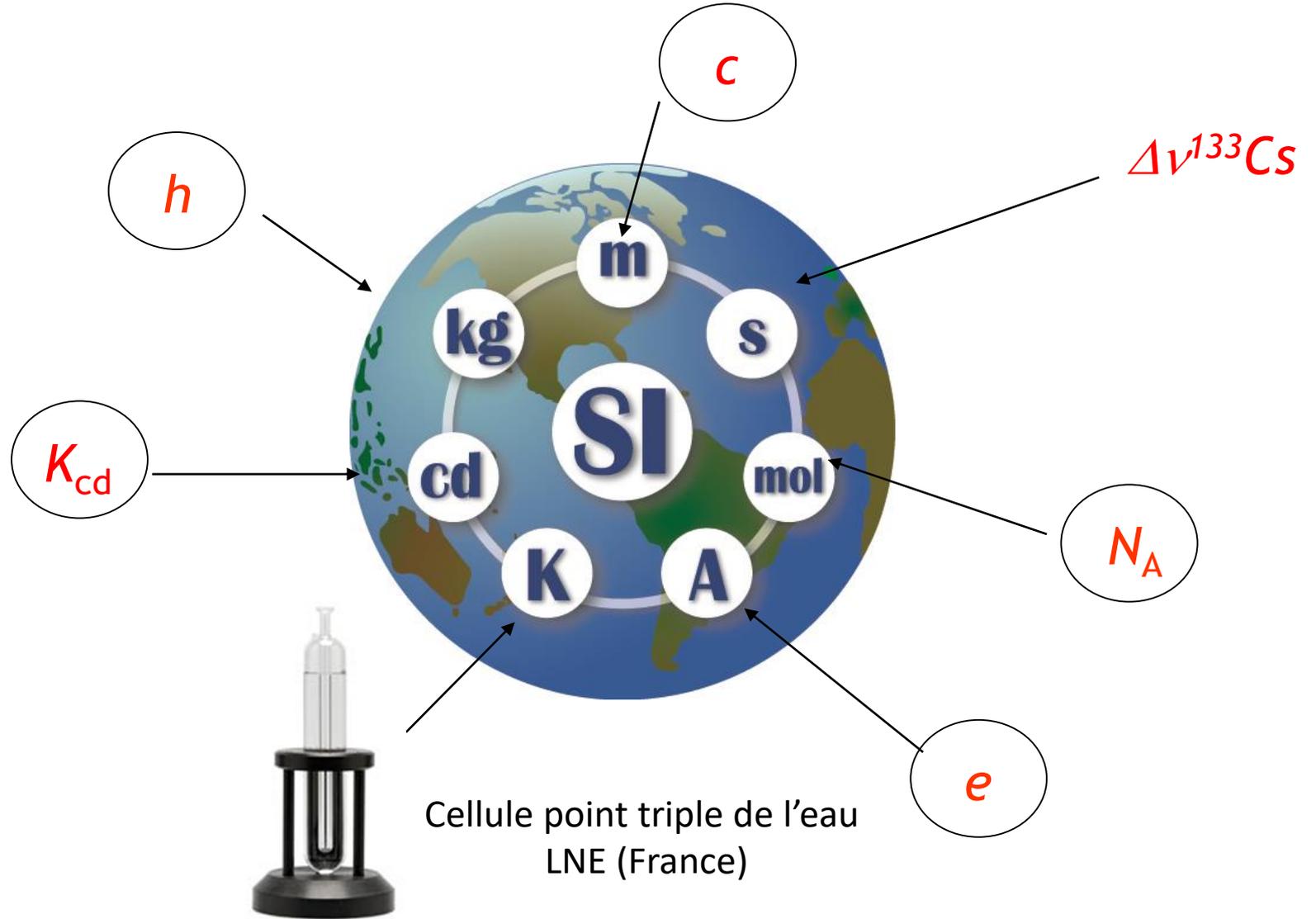


Vers un nouveau Système d'Unités (Résolutions 24 CGPM 2011)





Vers un nouveau Système d'Unités (Résolutions 24 CGPM 2011)





Définition de la mole par N_A

○ La sphère de silicium ^{28}Si

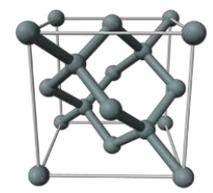
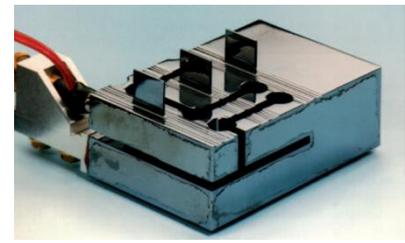
Mesure abondance isotopique +
lien masse ^{12}C (piège de Penning)

$$\frac{cA_r(e)M_u\alpha^2}{2R_\infty h}$$

$$N_A = \frac{M_{mol}}{m_{Si}} = \frac{M_{mol}}{(\rho_0 a^3/8)}$$

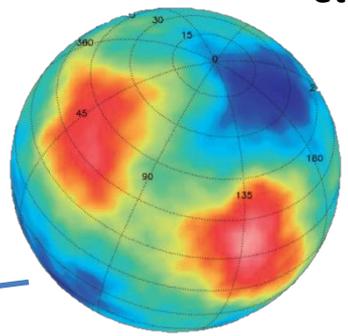
$$\frac{m_s}{V_s} = \rho_0$$

$$V_s = \left(\frac{\pi d_s^3}{6}\right)$$



Monocristal enrichi ^{28}Si

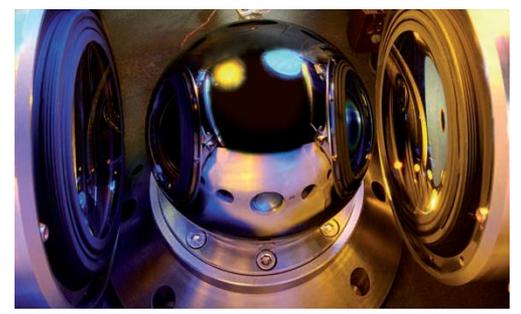
Interférométrie X et optique



400 000 diamètres mesurés (+/- 40 nm)



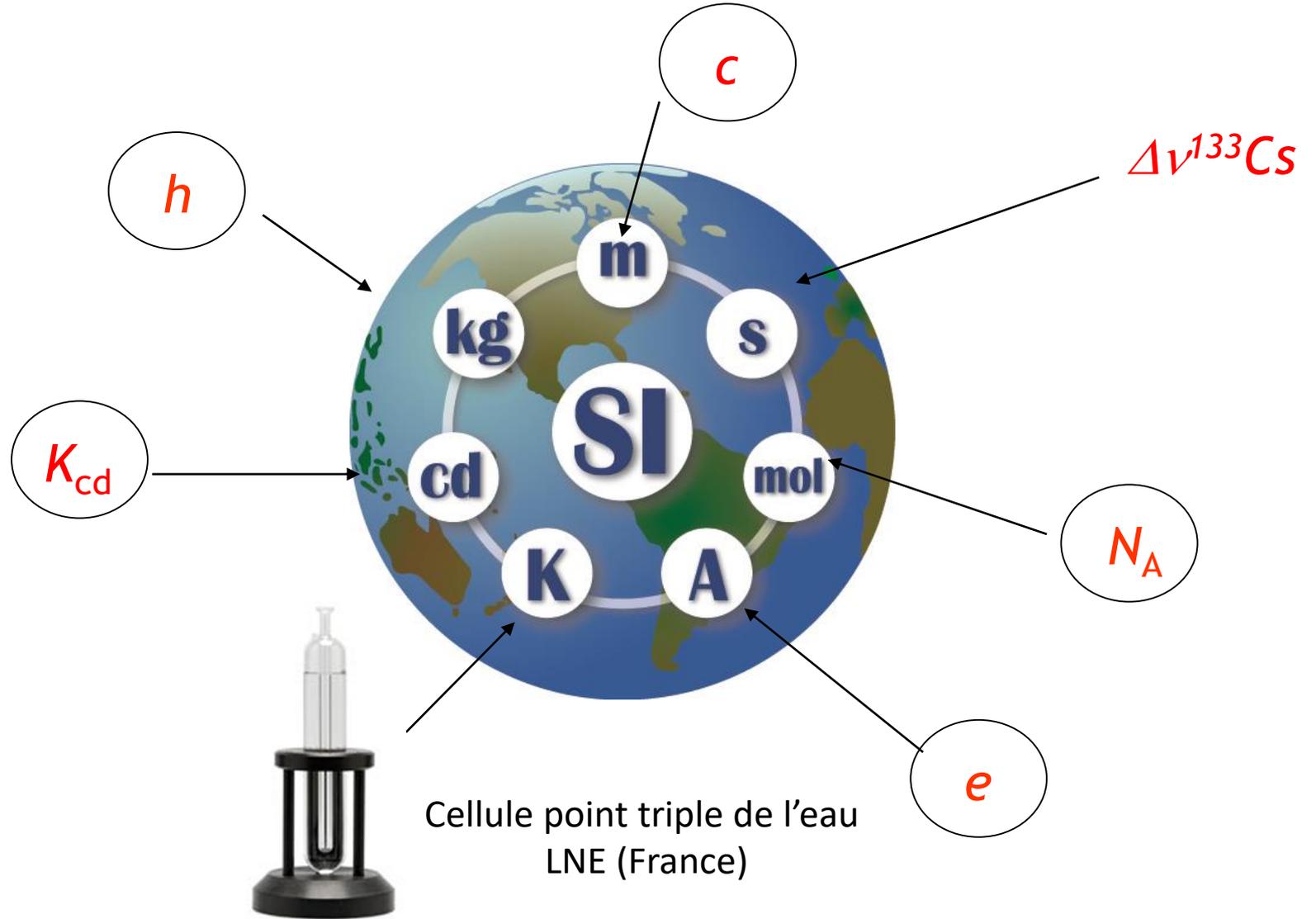
Pesée de la sphère
~ 5 kg



Interférométrie optique

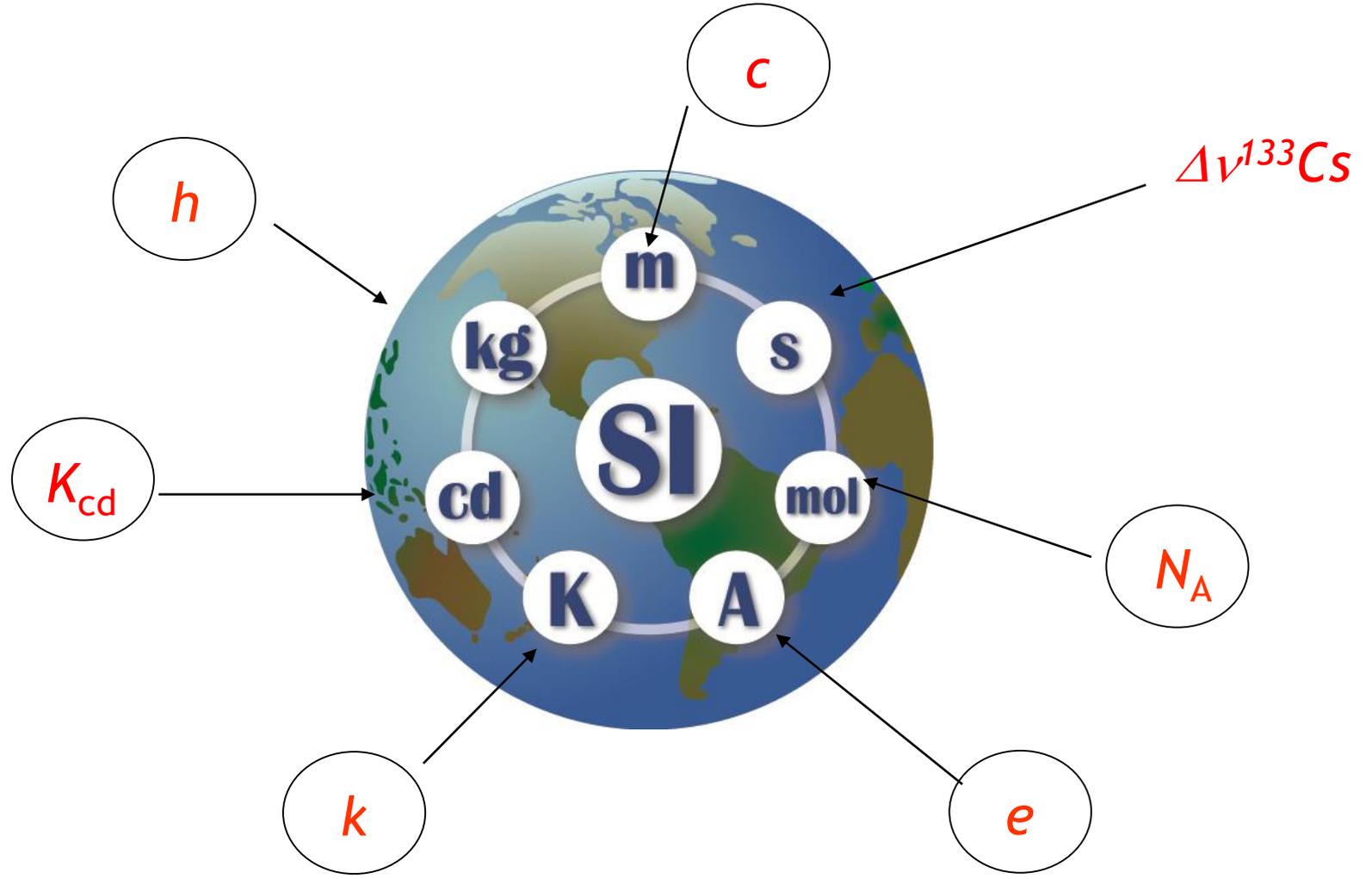


Vers un nouveau Système d'Unités (Résolutions 24 CGPM 2011)





Vers un nouveau Système d'Unités (Résolutions 24 CGPM 2011)





La mesure de la constante de Boltzmann

○ Les différentes approches



Mesure acoustique

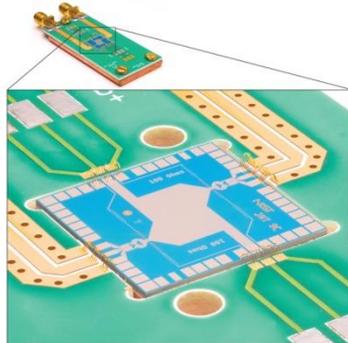
NPL (UK)

Fréquence de résonance

Coefficients du viriel

$$c^2 = \gamma \frac{N_A k T}{M} (1 + \beta_2(T)p + \beta_2(T)p^2 + \dots)$$

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v}$$



Mesure du bruit Johnson

NIST (USA)

$$\langle V^2 \rangle = 4kTR\Delta f$$

formule de Nyquist



La mesure de la constante de Boltzmann

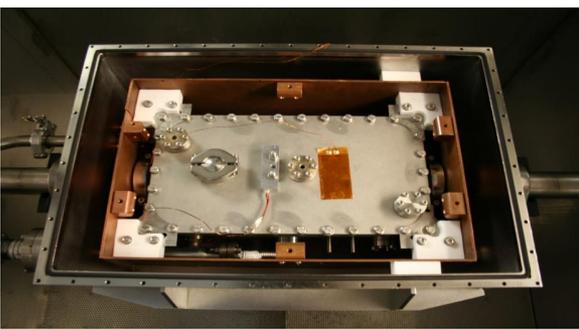
○ Les différentes approches



PTB Berlin (Allemagne)

Mesure de la variation de la capacité d'un condensateur $C(p)$

↳ ϵ_r



LPL (France)

Mesure de l'élargissement Doppler

Polarisabilité molaire

Polarisabilité statique (calcul *ab initio* dans He)

$$\frac{A_\epsilon}{R} = \frac{\alpha_0}{3\epsilon_0 k}$$

Exacte

Largeur Doppler

$$\frac{\Delta\nu_D}{\nu_0} = \sqrt{\frac{2kT}{mc^2}}$$

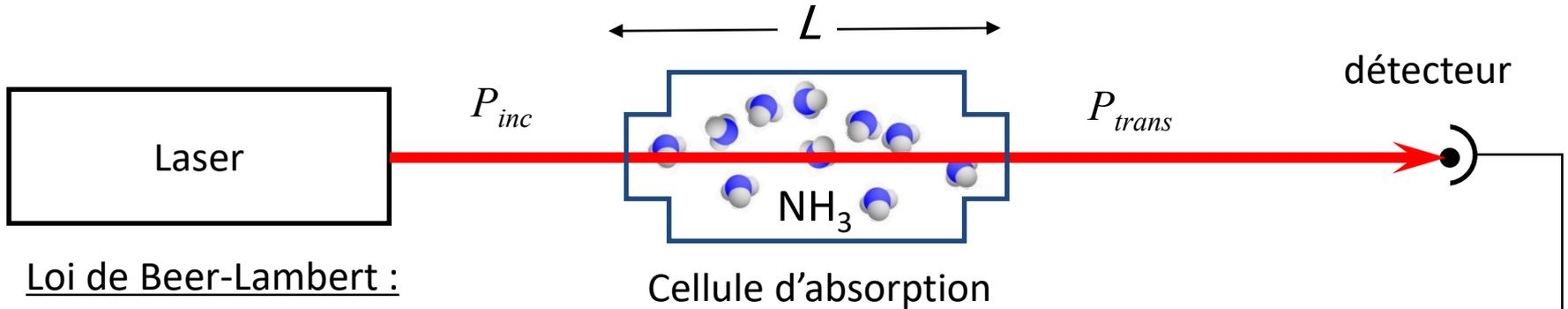
Exacte

Fréquence De résonance



Mesure de la constante de Boltzmann

○ Principe de la mesure par spectroscopie laser

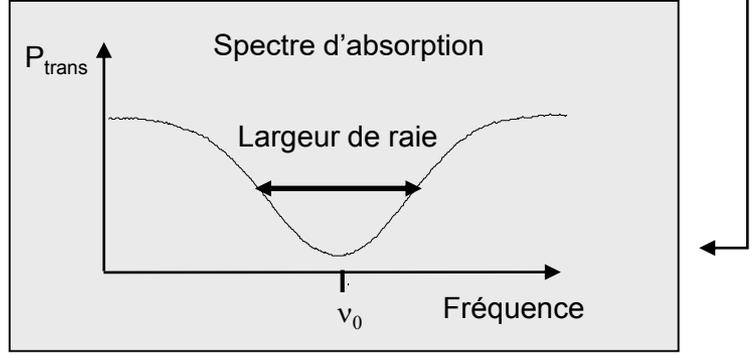


Loi de Beer-Lambert :

$$P_{trans} = P_{inc} e^{[-\alpha(\nu)L]}$$

- $\alpha(\nu)$ {
- élargissement Doppler
 - élargissement collisionnel
 - rétrécissement Dicke
 - structure hyperfine
 - ...

➔
$$\frac{\Delta\nu_D}{\nu_0} = \sqrt{\frac{2kT}{mc^2}}$$





Vers un nouveau Système d'Unités (Résolutions 24 CGPM 2011)

$$m = h \left(\frac{n' n_1 n_2}{4} \right) \frac{f_1 f_2}{g v}$$

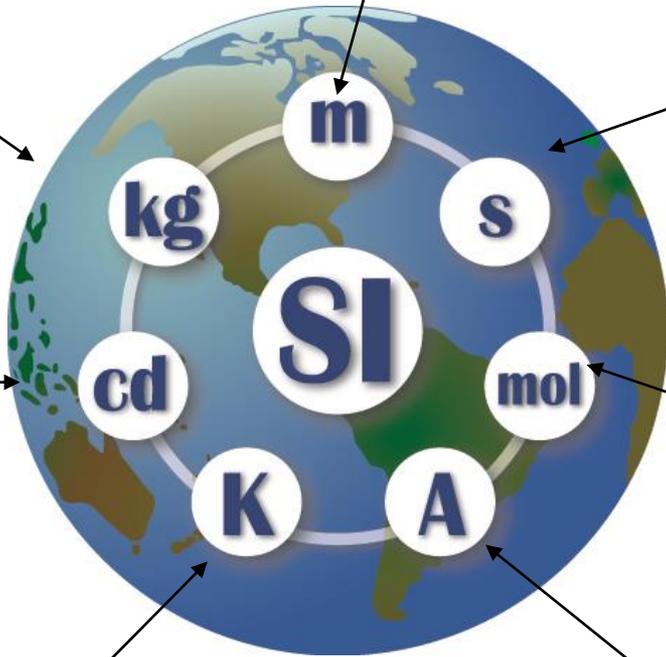
h

c

$$\lambda = \frac{c}{\nu}$$

$$\Delta \nu^{133}\text{Cs}$$

$$T = \frac{1}{\nu}$$



K_{cd}

$$M_{mol} = N_A \times m_{Si}$$

N_A

$$T = \frac{m c^2}{2k} \left(\frac{\Delta \nu_D}{\nu_0} \right)^2$$

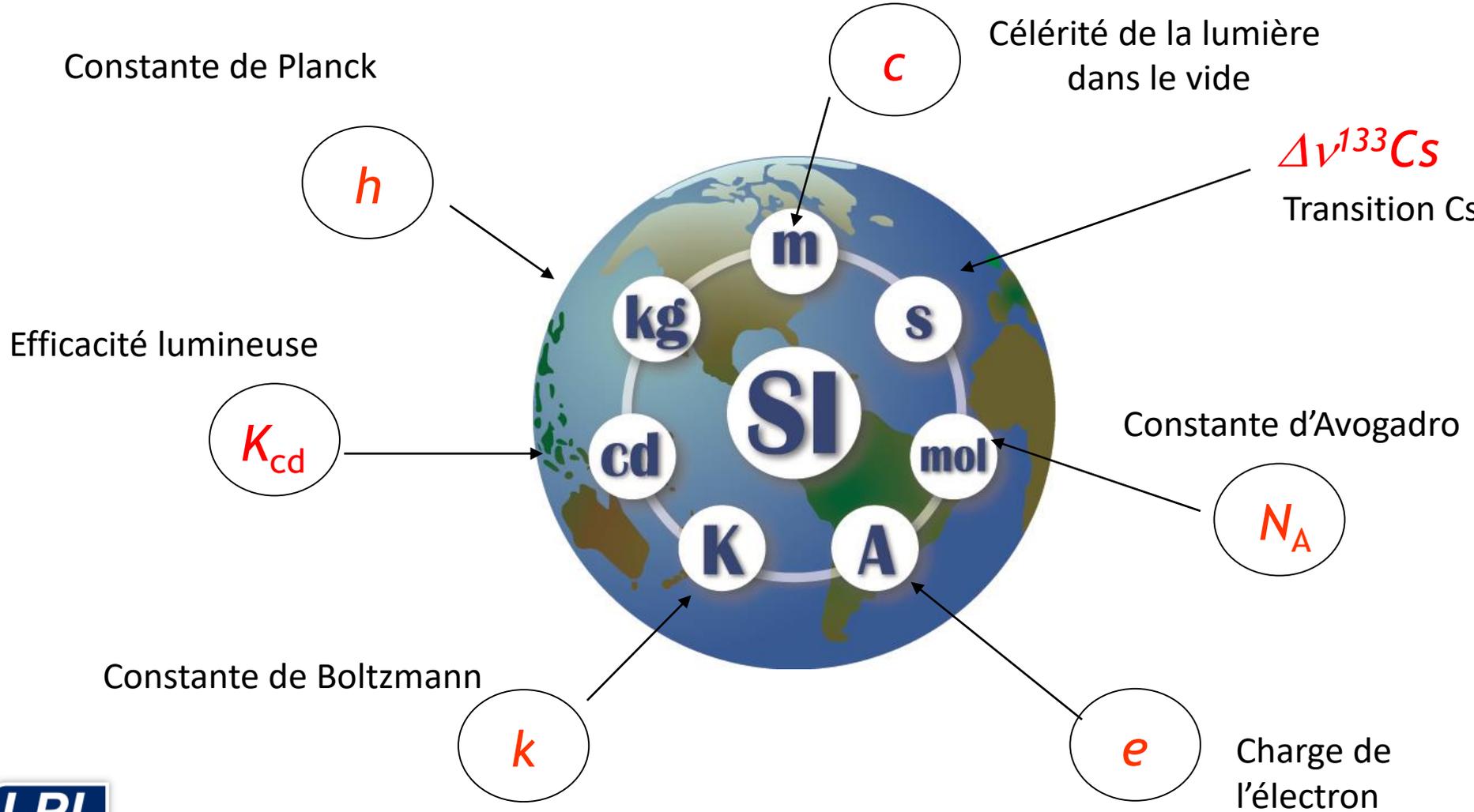
k

e

$$\begin{cases} V_j = \frac{nhf}{2e} \\ R_H = \frac{h}{n'e^2} \end{cases}$$



Vers un nouveau Système d'Unités (Résolutions 24 CGPM 2011)





Les constantes du nouveau SI

○ Committee on Data for Science and Technology

- *Création en 1966*
- *Missions : compilation et diffusion des données numériques d'importance pour la science et la technologie*

REVIEWS OF MODERN PHYSICS, VOLUME 88, JULY–SEPTEMBER 2016

CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 2014*

Peter J. Mohr,[†] David B. Newell,[‡] and Barry N. Taylor[§]
National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland 20899-8420, USA
 (published 26 September 2016)

This paper gives the 2014 self-consistent set of values of the constants and conversion factors of physics and chemistry recommended by the Committee on Data for Science and Technology (CODATA). These values are based on a least-squares adjustment that takes into account all data available up to 31 December 2014. Details of the data selection and methodology of the adjustment are described. The recommended values may also be found at physics.nist.gov/constants.

TABLE XXXII. An abbreviated list of the CODATA recommended values of the fundamental constants of physics and chemistry based on the 2014 adjustment.

Quantity	Symbol	Numerical value	Unit	Relative std. uncert. u_r
Speed of light in vacuum	c, c_0	299 792 458	m s ⁻¹	Exact
Magnetic constant	μ_0	$4\pi \times 10^{-7}$	N A ⁻²	Exact
Electric constant $1/\mu_0 c^2$	ϵ_0	$= 12.566370614... \times 10^{-7}$	N A ⁻²	Exact
Newtonian constant of gravitation	G	$8.854 187 817... \times 10^{-12}$	F m ⁻¹	Exact
Planck constant	h	$6.626 070 040(81) \times 10^{-34}$	J s	1.2×10^{-8}
$h/2\pi$	\hbar	$1.054 571 800(13) \times 10^{-34}$	J s	1.2×10^{-8}
Elementary charge	e	$1.602 176 620 8(98) \times 10^{-19}$	C	6.1×10^{-9}
Magnetic flux quantum $h/2e$	Φ_0	$2.067 833 831(13) \times 10^{-15}$	Wb	6.1×10^{-9}
Conductance quantum $2e^2/h$	G_0	$7.748 091 731 0(18) \times 10^{-5}$	S	2.3×10^{-10}
Electron mass	m_e	$9.109 383 56(11) \times 10^{-31}$	kg	1.2×10^{-8}
Proton mass	m_p	$1.672 621 898(21) \times 10^{-27}$	kg	1.2×10^{-8}
Proton-electron mass ratio	m_p/m_e	1836.152 673 89(17)		9.5×10^{-11}
Fine-structure constant $e^2/4\pi\epsilon_0\hbar c$	α	$7.297 352 5664(17) \times 10^{-3}$		2.3×10^{-10}
inverse fine-structure constant	α^{-1}	137.035 999 139(31)		2.3×10^{-10}
Rydberg constant $\alpha^2 m_e c/2\hbar$	R_∞	10 973 731.568 508(65)	m ⁻¹	5.9×10^{-12}
Avogadro constant	N_A, L	$6.022 140 857(74) \times 10^{23}$	mol ⁻¹	1.2×10^{-8}
Faraday constant $N_A e$	F	96 485.332 89(59)	C mol ⁻¹	6.2×10^{-9}
Molar gas constant	R	8.314 4598(48)	J mol ⁻¹ K ⁻¹	5.7×10^{-7}
Boltzmann constant R/N_A	k	$1.380 648 52(79) \times 10^{-23}$	J K ⁻¹	5.7×10^{-7}
Stefan-Boltzmann constant $(\pi^2/60)k^4/h^3c^2$	σ	$5.670 367(13) \times 10^{-8}$	W m ⁻² K ⁻⁴	2.3×10^{-6}
Non-SI units accepted for use with the SI				
Electron volt (e/C) J	eV	$1.602 176 620 8(98) \times 10^{-19}$	J	6.1×10^{-9}
(Unified) atomic mass unit $1/12 m(^{12}\text{C})$	u	$1.660 539 040(20) \times 10^{-27}$	kg	1.2×10^{-8}



<http://www.codata.org/>



Les constantes du nouveau SI

The NIST Reference on Constants, Units, and Uncertainty

Fundamental Physical Constants

- Constants Topics:**
- [Values](#)
- [Energy Equivalents](#)
- [Searchable Bibliography](#)
- [Background](#)

[Constants Bibliography](#)

[Constants Units & Uncertainty home page](#)

Boltzmann constant

k

Value	$1.380\ 648\ 52 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$
Standard uncertainty	$0.000\ 000\ 79 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$
Relative standard uncertainty	5.7×10^{-7}
Concise form	$1.380\ 648\ 52(79) \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$

Click [here](#) for **correlation coefficient** of this constant with other constants

[Source: 2014 CODATA recommended values](#)

[Definition of uncertainty](#)

[Correlation coefficient with any other constant](#)



<http://physics.nist.gov/cuu/Constants/index.html>

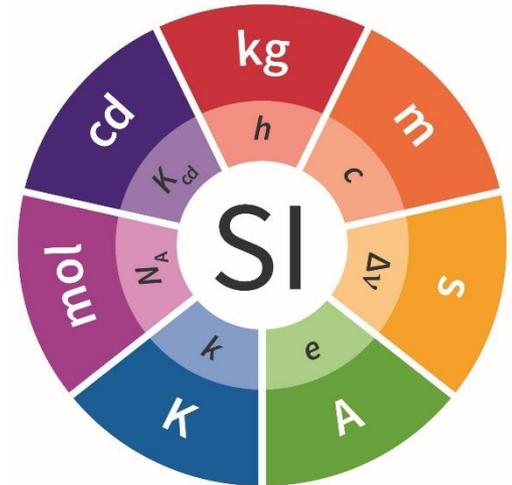




Vers un nouveau Système d'unités

- **2007** : résolution 12 *"On the possible redefinition of certain base units of the International System of Units (SI)"* (23^{ème} CGPM)
- **2011** : résolution 1 *"On the possible future revision of the International System of Units, the SI"* (24th CGPM)
- **2014** : résolution 1 *"On the future revision of the International System of Units, the SI"* (25th CGPM)
- **Juillet 2017** : CODATA 2017
- **Octobre 2017** : conditions réunies pour une révision du SI (106^{ème} CIPM).
Résolution *"On the revision of the International System of Units (SI)"*.
- **Novembre 2018** : approbation de la révision du SI (26^{ème} CGPM à Versailles)

→ **20 mai 2019** : entrée en vigueur du nouveau SI
(Journée mondiale de la métrologie)





Vers un nouveau Système d'unités

Il est attendu qu'en novembre 2018, la CGPM à sa 26^e réunion adopte une révision du Système international d'unités, le SI, qui sera alors le système d'unités selon lequel :

- la fréquence de la transition hyperfine de l'état fondamental de l'atome de césium 133 non perturbé, $\Delta\nu_{\text{Cs}}$, est égale à 9 192 631 770 Hz,
- la vitesse de la lumière dans le vide, c , est égale à 299 792 458 m/s,
- la constante de Planck, h , est égale à $6,626\ 070\ 15 \times 10^{-34}$ J s,
- la charge élémentaire, e , est égale à $1,602\ 176\ 634 \times 10^{-19}$ C,
- la constante de Boltzmann, k , est égale à $1,380\ 649 \times 10^{-23}$ J/K,
- la constante d'Avogadro, N_A , est égale à $6,022\ 140\ 76 \times 10^{23}$ par mol⁻¹,
- l'efficacité lumineuse d'un rayonnement monochromatique de fréquence 540×10^{12} Hz, K_{Cd} , est égale à 683 lm/W,



où

- i. les unités hertz, joule, coulomb, lumen et watt, qui ont respectivement pour symbole Hz, J, C, lm, et W, sont reliées aux unités seconde, mètre, kilogramme, ampère, kelvin, mole et candela, qui ont respectivement pour symbole s, m, kg, A, K, mol, et cd, selon les relations $\text{Hz} = \text{s}^{-1}$, $\text{J} = \text{m}^2 \text{kg s}^{-2}$, $\text{C} = \text{s A}$, $\text{lm} = \text{cd m}^2 \text{m}^{-2} = \text{cd sr}$, et $\text{W} = \text{m}^2 \text{kg s}^{-3}$,
- ii. les valeurs numériques de h , e , k , and N_A sont fondées sur **l'ajustement le plus récent fourni par CODATA.**



<http://www.bipm.org/fr/measurement-units/new-si/>