



CENTRE DE PHYSIQUE DES PARTICULES DE MARSEILLE

Les 7 unités de mesure, vers une nouvelle aventure ?

Maguelonne Chambon

Septembre 2018



Pourquoi une révision du SI ?
Quelles définitions pour 2018 ?
La métrologie dans notre
quotidien

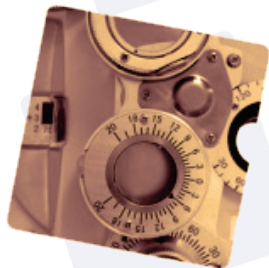
LE LNE - MESURES ET RÉFÉRENCES

Vecteurs de compétitivité et de sécurité



Des **références** pour :

- donner des repères
- fixer des objectifs
- orienter les actions



Des **mesures** pour :

- vérifier et garantir les résultats
- apprécier les risques
- prendre des décisions

- Le LNE créé en 1901, laboratoire d'essais du Cnam
- Le LNE EPIC par la loi du 10 janvier 1978
- Depuis 2005, le LNE a aussi la responsabilité du pilotage du réseau national de la métrologie française (scientifique et industriel)

Quel que soit
le secteur d'activité

bâtiment transport
énergie médical
défense distribution
instrumentation
industrie institutionnels

et partout où
il est question de

sécurité santé
environnement
coût fiabilité
performance

LA MÉTROLOGIE FRANCAISE





Pourquoi une révision du SI ?

Quelles définitions pour 2018 ?

La métrologie dans notre quotidien

QU'EST CE QUE LA MÉTROLOGIE?

« La métrologie est la science de la mesure, couvrant toutes les mesures effectuées, à un niveau d'incertitude établi, dans n'importe quel domaine de l'activité humaine. »

*Brochure du Système international d'unités
Comité international des poids et mesures (CIPM)
www.bipm.org*

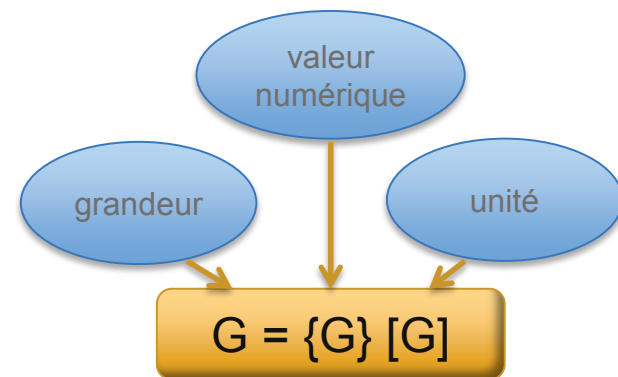
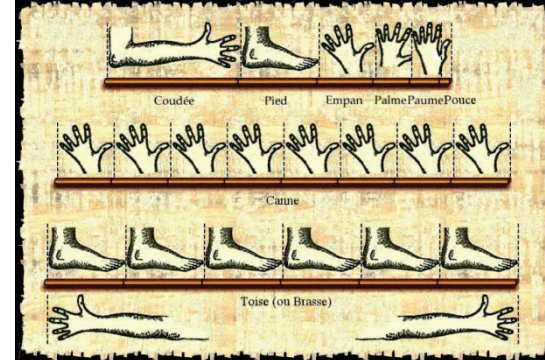
LA MÉTROLOGIE, SCIENCE DE LA MESURE

L'unité de mesure est une représentation particulière de la grandeur mesurée

- Référence
- Choisie par convention (arbitraire)
- Exprime le résultat de mesure, avec une incertitude

Le système de mesure est une construction sociale

- Depuis la « nuit » des temps (~ 6000 avant JC)
- Pour les échanges commerciaux
- Pour les contrôles et les réglementations
- Pour la sûreté, sécurité, santé des personnes
- Pour la recherche et l'innovation
- Permet de modéliser notre environnement
- Il doit être « pratique » pour les utilisateurs et comparable en tous lieux



LE SYSTÈME MÉTRIQUE DÉCIMAL

Proposition de Charles Maurice Talleyrand en 1790

- un nouveau système d'unités
- pour tout le royaume de France
- créé officiellement le 7 avril 1795

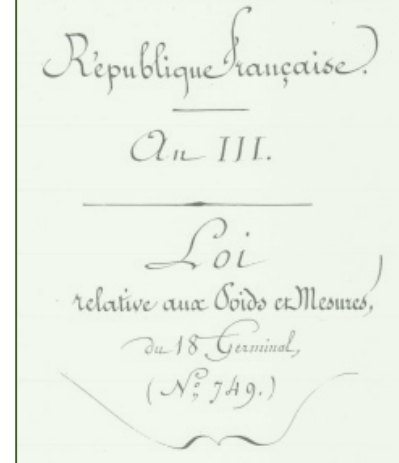
Fondements scientifiques à vocation universelle

- seconde (fraction de $1/86\,400$ jour solaire moyen),
- mètre (10 millionième partie du $\frac{1}{4}$ du méridien terrestre)
- kg à partir du mètre (1 dL d'eau « pure » à température de masse volumique maximale)

Une volonté aussi de pragmatisme

Universalité et dissémination des unités, les maîtres mots

Traité de la convention du mètre en 1875



LE SI EN QUELQUES DATES

1 janvier 1840

- **Loi** : obligation d'utilisation du système métrique en France

1875 Convention du mètre

Du système métrique au SI

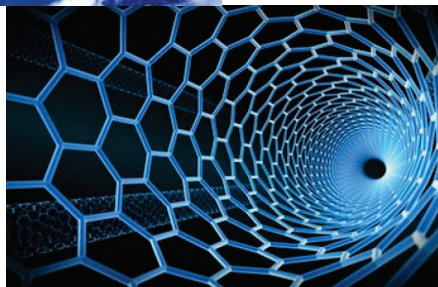
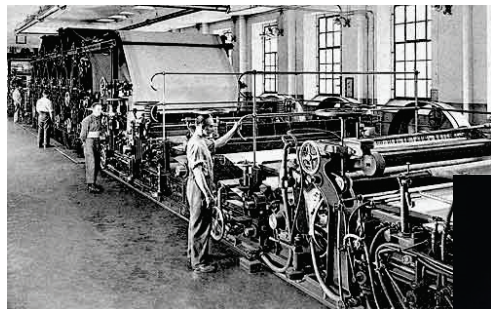
- **1881** : adoption du Système **CGS** (cm, g, s)
- **1889** : 1^{ère} CGPM, reproduction des prototypes des Archives et répartition entre les pays, la France reçoit le kilogramme n° 35 et le mètre n° 8 (étalons nationaux)
- **1935** : adoption du Système **MKSA** (m, kg, s, A)
- **1954** : adoption de 6 unités de base pour fonder un « système pratique d'unités de mesure » : m, kg, s, A, K, cd

1960 : adoption du **Système international d'unités (SI)**, fondé sur les 6 unités adoptées en 1954, par la 11^e CGPM

- **1971** : adoption d'une 7^e unité de base du SI : la mole

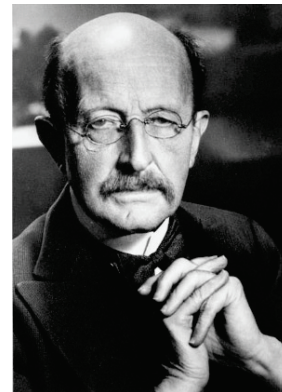


LA RÉVOLUTION INDUSTRIELLE



DES UNITÉS AUX CONSTANTES

Max Planck (1900) « ...with the help of fundamental constants, we have the possibility of establishing units of length, time, mass and temperature, which necessarily retain their significance for all cultures, even unearthly and nonhuman ones »



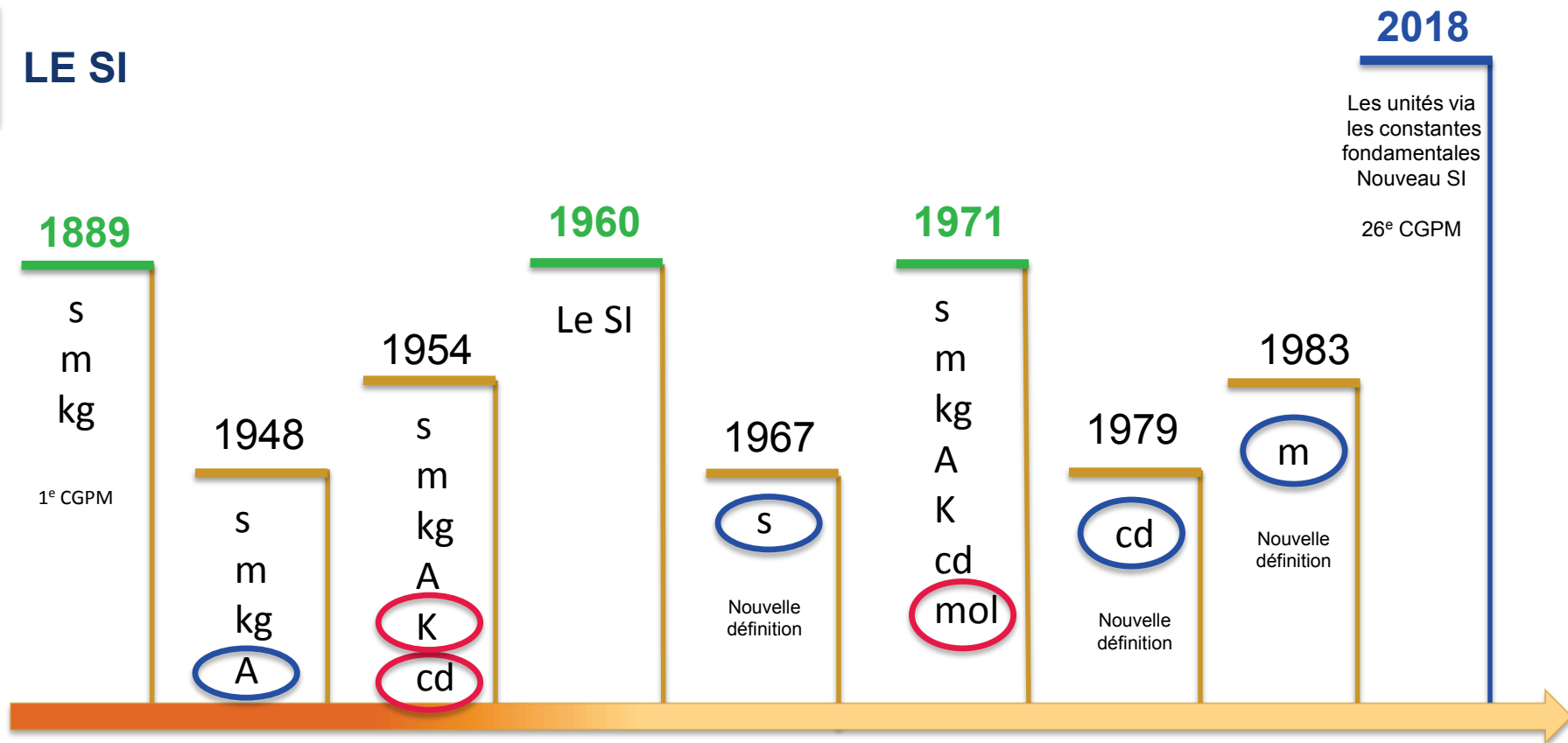
Les constantes fondamentales ont un rôle essentiel en chimie et en physique

- permettent de définir de nouveaux concepts
- sont liées aux principes de la physique et de la chimie
- établissent l'ordre de grandeur de phénomènes
- indépendantes de l'environnement des expériences
- garantissent une certaine pérennité

Une continuité avec les anciennes références doit être garantie pour assurer une « traçabilité »



LE SI



LA SITUATION EN 2018 (avant la 26^e CGPM)

3 définitions basées sur des constantes fondamentales (ou valeurs conventionnelles)

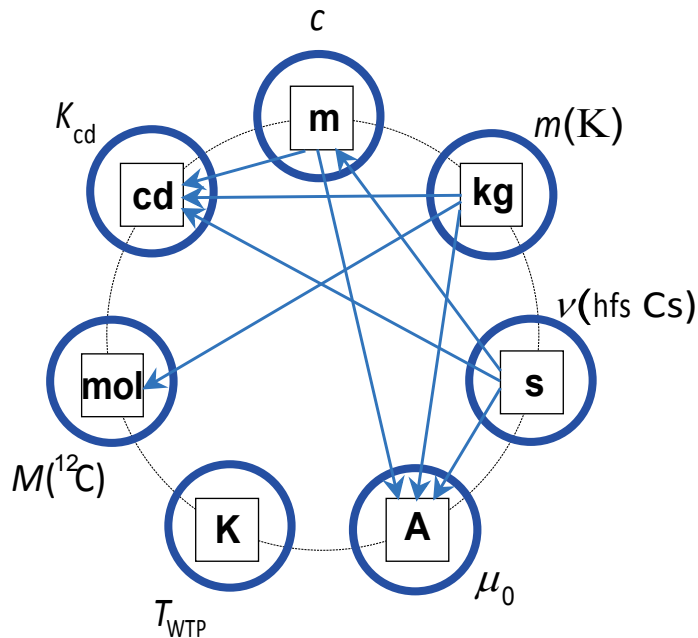
- mètre (c)
- ampère (μ_0)
- candela (K_{cd})

3 définitions basées sur des propriétés des matériaux, de la matière

- seconde (^{133}Cs)
- kelvin (H_2O)
- mole (^{12}C)

1 définition basée sur un artefact

- kilogramme (IPK)



10^e CGPM

LE SI ACTUEL

Table 1. SI base units

Base quantity		SI base unit	
Name	Symbol	Name	Symbol
length	l, x, r , etc.	metre	m
mass	m	kilogram	kg
time, duration	t	second	s
electric current	I, i	ampere	A
thermodynamic temperature	T	kelvin	K
amount of substance	n	mole	mol
luminous intensity	I_v	candela	cd

Table 5. SI prefixes

Factor	Name	Symbol	Factor	Name	Symbol
10^1	deca	da	10^{-1}	deci	d
10^2	hecto	h	10^{-2}	centi	c
10^3	kilo	k	10^{-3}	milli	m
10^6	mega	M	10^{-6}	micro	μ
10^9	giga	G	10^{-9}	nano	n
10^{12}	tera	T	10^{-12}	pico	p
10^{15}	peta	P	10^{-15}	femto	f
10^{18}	exa	E	10^{-18}	atto	a
10^{21}	zetta	Z	10^{-21}	zepto	z
10^{24}	yotta	Y	10^{-24}	yocto	y



8e édition

Table 3. Coherent derived units in the SI with special names and symbols

Derived quantity	Name	Symbol	SI coherent derived unit ^(a)	
			Expressed in terms of other SI units	Expressed in terms of SI base units
plane angle	radian ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
solid angle	steradian ^(b)	sr ^(c)	1 ^(b)	m ² /m ²
frequency	hertz ^(d)	Hz		s ⁻¹
force	newton	N		m kg s ⁻²
pressure, stress	pascal	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²
energy, work, amount of heat	joule	J	N m	m ² kg s ⁻²
power, radiant flux	watt	W	J/s	m ² kg s ⁻³
electric charge, amount of electricity	coulomb	C		s A
electric potential difference, electromotive force	volt	V	W/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻¹
capacitance	farad	F	C/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ⁴ A ²
electric resistance	ohm	Ω	V/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻²
electric conductance	siemens	S	A/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ³ A ²
magnetic flux	weber	Wb	V s	m ² kg s ⁻² A ⁻¹
magnetic flux density	tesla	T	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹
inductance	henry	H	Wb/A	m ² kg s ⁻² A ⁻²
Celsius temperature	degree Celsius ^(e)	°C		K
luminous flux	lumen	lm	cd sr ^(c)	cd
illuminance	lux	lx	lm/m ²	m ⁻² cd
activity referred to a radionuclide ^(f)	becquerel ^(d)	Bq		s ⁻¹
absorbed dose, specific energy (imparted), kerma	gray	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
dose equivalent, ambient dose equivalent, directional dose equivalent, personal dose equivalent	sievert ^(g)	Sv	J/kg	m ² s ⁻²
catalytic activity	katal	kat		s ⁻¹ mol

QUELLES INCERTITUDES A CE JOUR ?

- mètre: propagation de la lumière dans le vide 10^{-11}
 - ⇒ gel de la valeur numérique de la vitesse de la lumière c_0
 - * grandeurs mécaniques
- kilogramme : prototype matériel en PtIr 10^{-9}
 - * grandeurs mécaniques
- seconde : horloge atomique à césium 10^{-16}
- ampère : mise en œuvre de la loi de Laplace 10^{-7} (!)
 - ⇒ gel de la perméabilité magnétique du vide μ_0
 - * grandeurs électriques
 - ⇒ étalons quantiques dits « de conservation » K_J et R_K
- kelvin : point triple de l'eau dite « pure » 10^{-7}
 - * grandeurs thermiques
- mole : dénombrement dans 0,012 kg de ^{12}C 10^{-8}
 - * physicochimie, chimie, biochimie, biologie
- candela : spectres d'action pour la vision humaine 10^{-4}
 - * grandeurs photométriques et radiométriques



Pourquoi une révision du SI ?
Quelles définitions pour 2018 ?
La métrologie dans notre
quotidien

QUELLES DÉFINITIONS EN 2018 ?

4 unités de base qui changeraient radicalement de définitions

— **kg, K, A et mole**

3 unités de base sans changement sur le fond

— **s, m et cd**



La seconde
Le mètre
le kilogramme
L'ampère
Le kelvin
La candela
La mole





La seconde

Le mètre

Le kilogramme

L'ampère

Le kelvin

La candela

La mole



AVANT 1967 : s basée sur les mouvements de la Terre



1889

le jour solaire moyen étant la durée de la rotation de la terre sur elle-même (définition du temps solaire moyen est laissé aux astronomes...).

La seconde est la fraction de $1/86400$ du jour solaire moyen

La seconde est la fraction de $1/31\,556\,925,974\,7$ de l'année tropique 1900

1960

définition basée sur la révolution de la Terre autour du Soleil

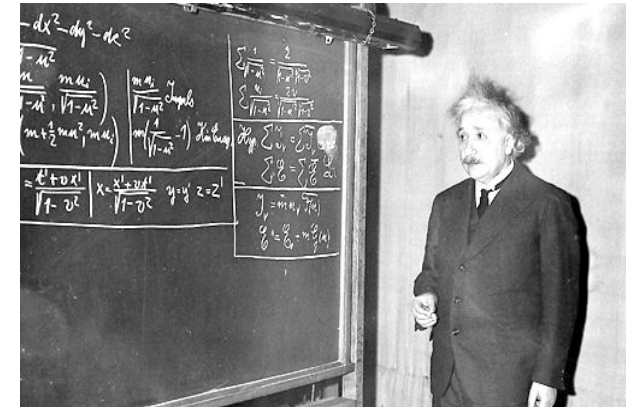
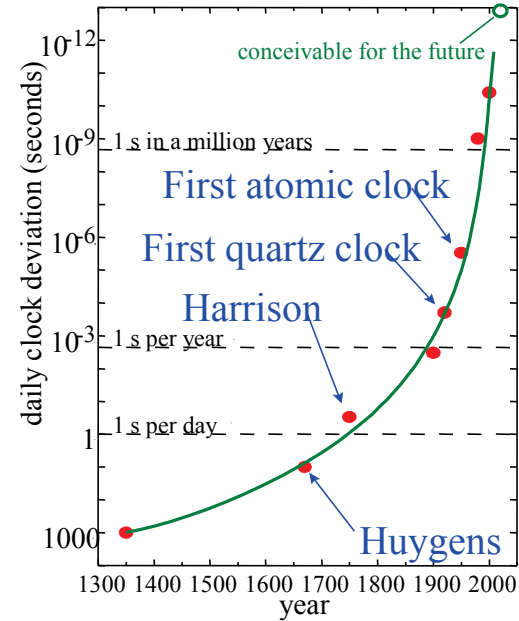


LES ÉVOLUTIONS TECHNOLOGIQUES

Développement des lasers de très hautes performances (émission stimulée)

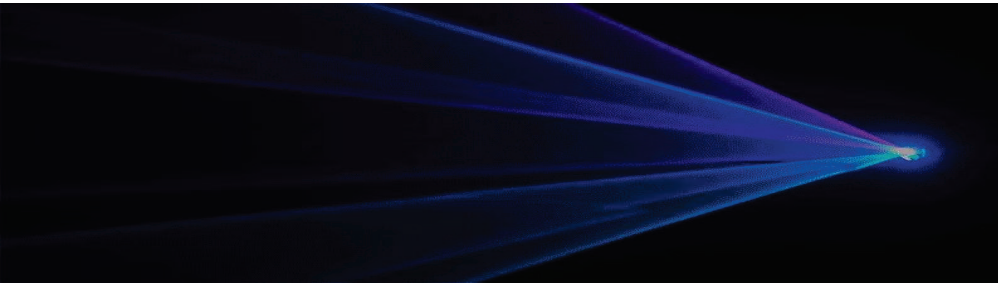
Interférométrie optique

Premières réalisations d'étalons de fréquences à atomes (neutre) à jet (pompage magnétique ou optique) et premières observation de transition dans le Cs en 1952



1950 - 1960

1916



LA SECONDE EN 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.

ν de la transition hyperfine de l'état fondamental de l'atome de Cs (non perturbé)
 $\nu_{\text{hfs Cs}} = 9\,192\,631\,770\text{ Hz}$ exactement

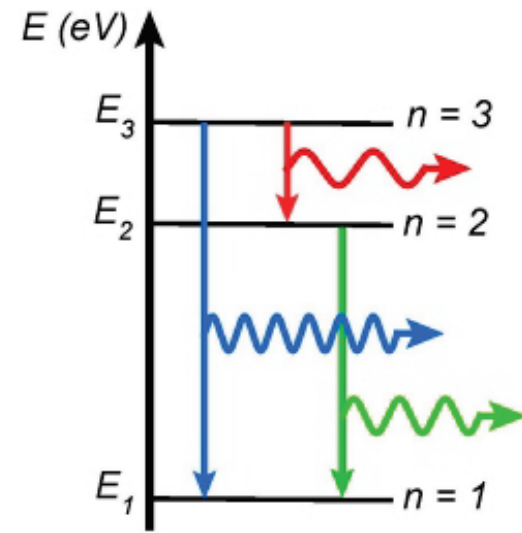
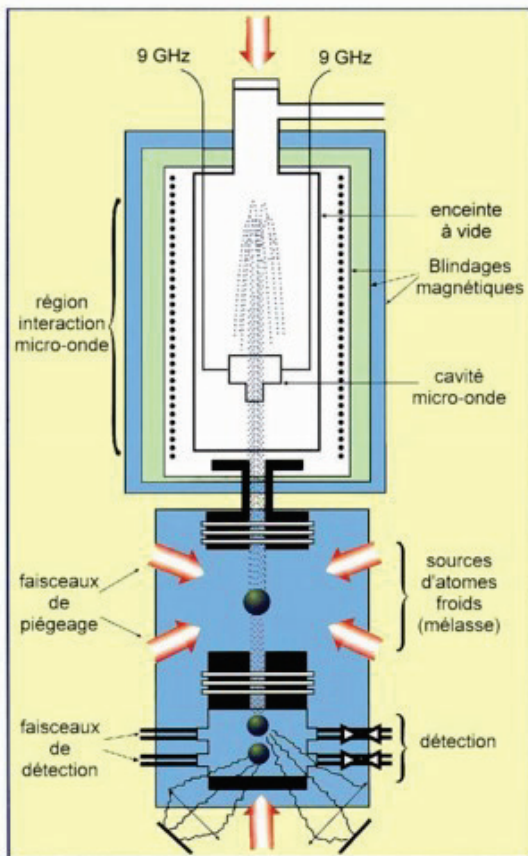
Performances actuelles

- Stabilité de $1.5 \cdot 10^{-14}$ sur 1 s
- Exactitude de $2 \cdot 10^{-16}$

Erreur inférieure à 100 s sur l'âge de l'Univers
(environ 14 milliards d'années)

Sert à piloter les échelles de temps

- UTC
- TAI (UTC+37 secondes)



DISSÉMINATION ET COMPARAISONS



A différents niveaux d'incertitude

Horloge parlante

France Inter à 162 kHz

GPS, Galiléo, Glonass, etc..

Liens fibrés cohérents

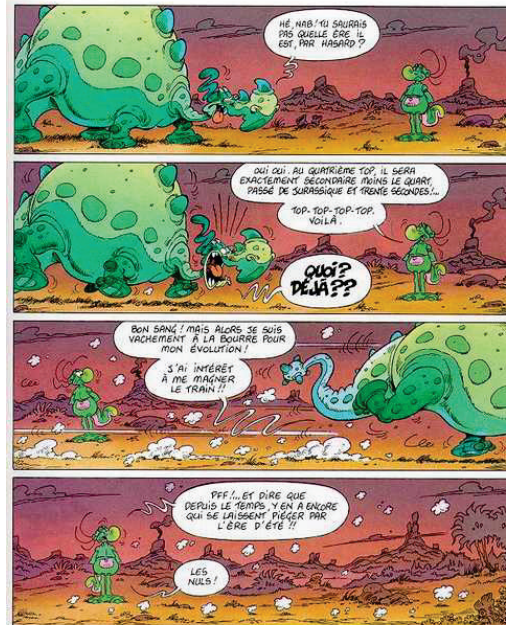
Je dis qu'il faut vivre avec son temps et être à la pointe du progrès !

Hoi, par exemple, j'ai une pendule radio-commandée...

c'est-à-dire que j'écoute la TSF et je remets ma pendule à l'heure quand ils donnent l'horloge parlante !

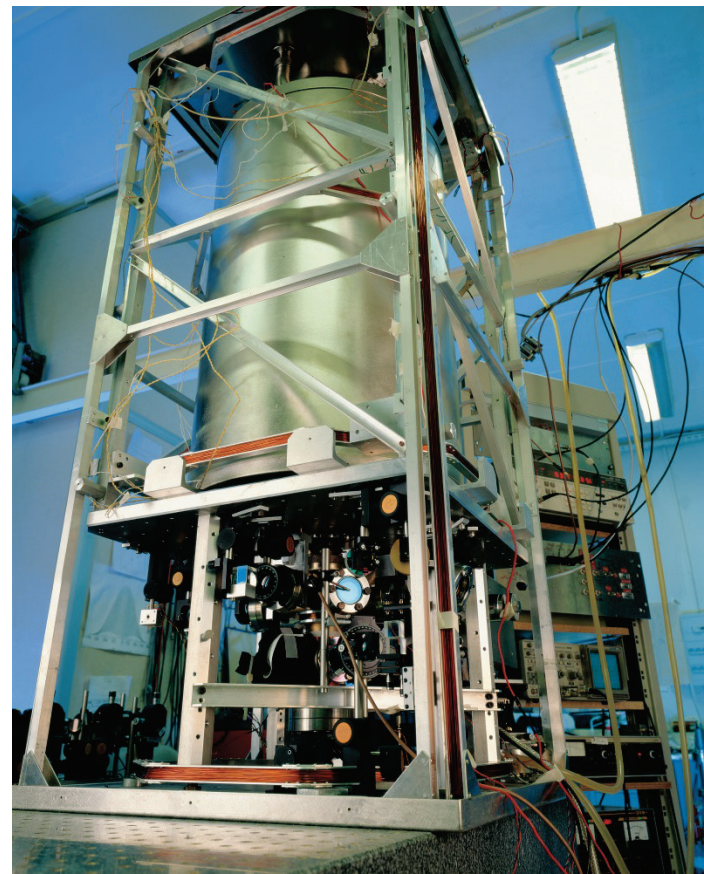
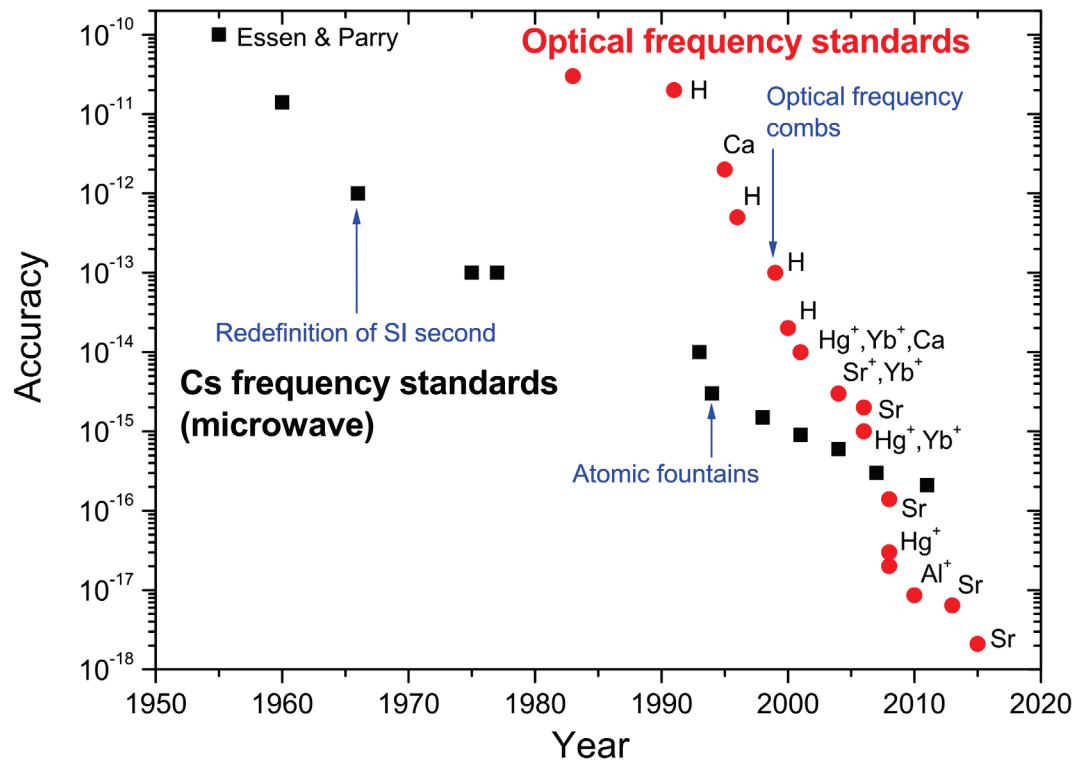
BirdsDessines.fr

L'HORLOGE PARLANTE



FUTUR DE LA SECONDE

*Fontaine atomique à atomes de Cs du
LNE-SYRTE/Observatoire de Paris*





La seconde

Le mètre

Le kilogramme

L'ampère

Le kelvin

La candela

La mole

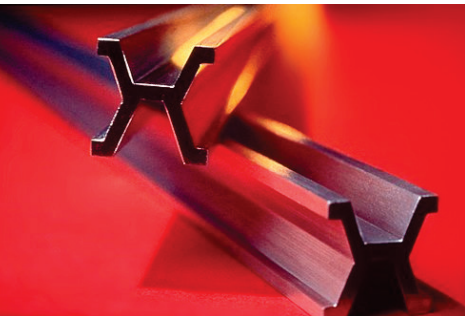


AVANT 1983

1793

1^{re} définition du
mètre, base du
système métrique
décimal

Le mètre, dix-millionième partie
du quart du méridien terrestre



Le mètre est fondée sur le
prototype international en platine
iridié

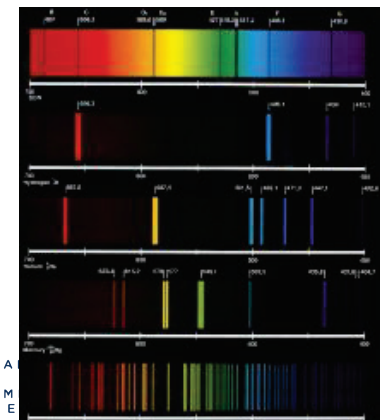
1889

Étalon physique

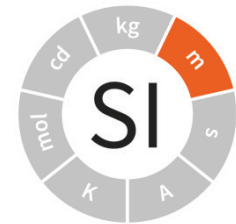
1960

1^{er} mètre « atomique »

Le mètre est fondée sur un multiple de la
longueur d'onde d'une radiation du krypton
(1 650 763,73 longueurs d'onde d'une
radiation orangée émise par l'isotope 86)



LE MÈTRE EN 1983



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

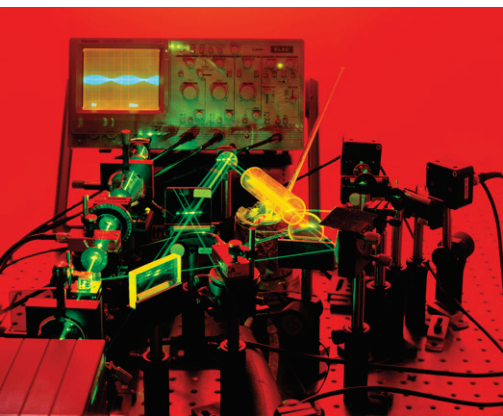
$$\lambda = \frac{c}{\nu}$$

vitesse de la lumière dans le vide,
 $c_0 = 299\,792\,458 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ exactement

Mise en pratique

— **lasers à différentes longueurs d'onde stabilisés**

- 633 nm, 615 nm, 543 nm,etc
- UV jusqu'à IR

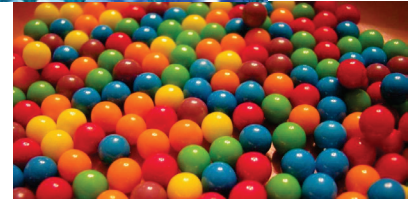
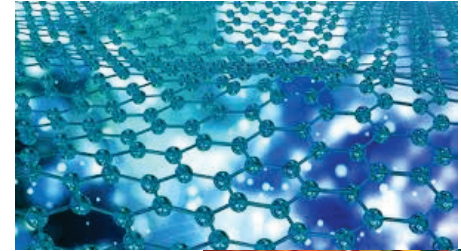


LE MÈTRE AUJOURD'HUI



L'infini grand....

- interféromètre Virgo, pour mesure des ondes gravitationnelles
- télémétrie longue distance (100 μm sur 5,5 km)



....et l'infiniment petit

— mesure dans le monde des nanos

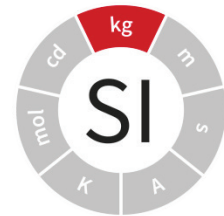
- Nouveaux matériaux
- Nanoparticules dans toute matrice
- Nano-médecine
- Nano-systèmes
-



La seconde
Le mètre
Le kilogramme
L'ampère
Le kelvin
La candela
La mole



LE KILOGRAMME JUSQU'EN 2018

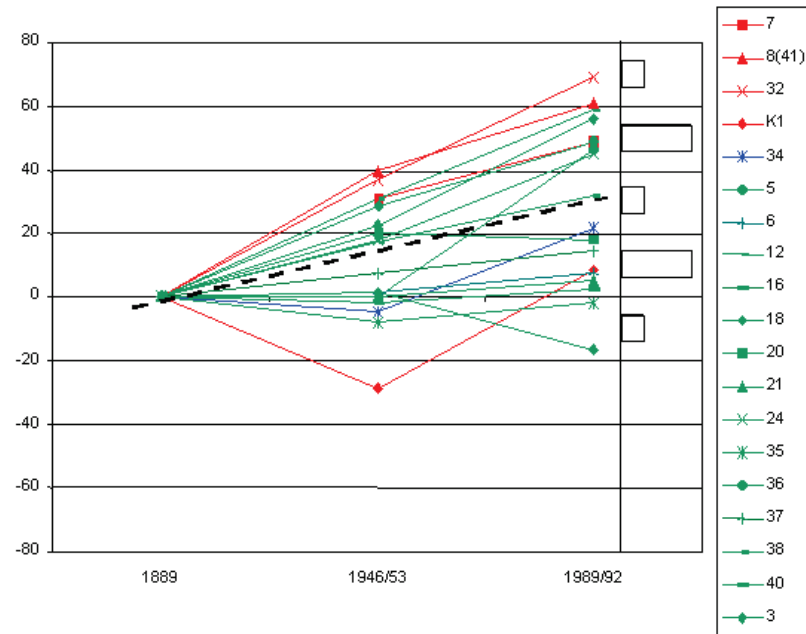


Le kilogramme est l'unité de masse ; il est égal à la masse du prototype international du kilogramme.

1889

Étalon physique

Variation par rapport à la vérification de 1889
en μg



Variation 50 μg
en 100 ans

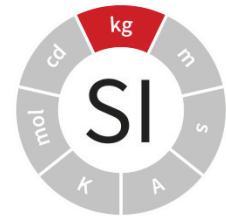
En relatif, correspond à $5 \cdot 10^{-8}$



*Prototype national
du kg n°35*



QUID D'UNE « DÉMATÉRIALISATION » ?



Trouver des expériences pour permettre de suivre l'évolution du kg avec une incertitude relative de qq 10^{-8}

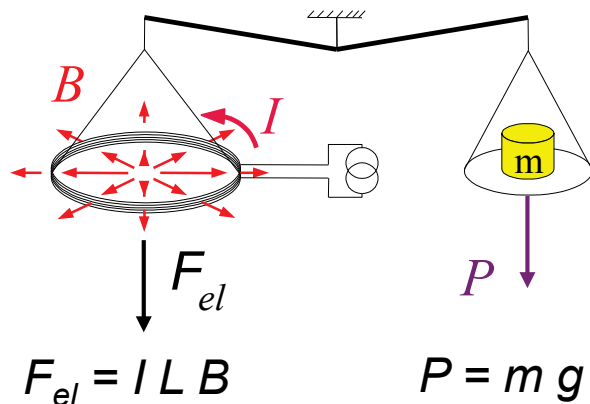
Robustes

Reproductibles

Qui conservent une continuité historique

- expériences de la balance du watt
 - mesure de la constante de Planck, h
- expériences de la sphère de silicium
 - mesure de la constante d'Avogadro, N_A

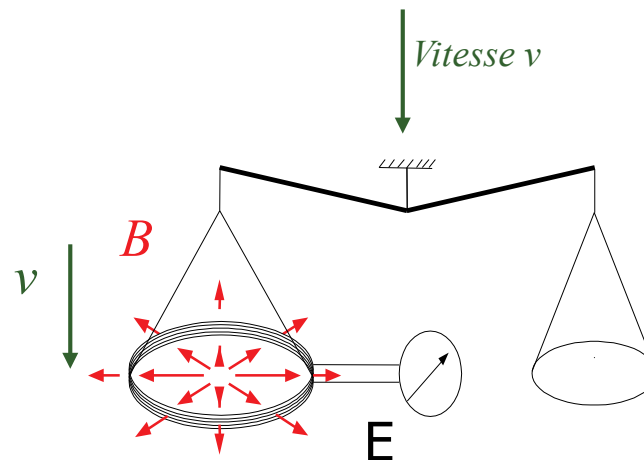
Phase 1: phase statique



Dans un champ magnétique radial

$$F_{el} = P = m g = I L B$$

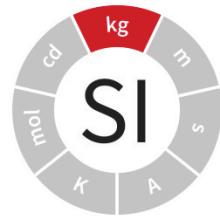
Phase 2: phase dynamique



$$E = B L v$$

bobine qui se déplace à la vitesse v dans le champ magnétique et induit une tension E

BALANCE DU WATT



En effectuant l'équivalence entre puissance mécanique et puissance électrique

$$\Rightarrow EU/R = mgv$$

$$(E I = m g v \quad \cancel{B L})$$

- E et U déterminés par l'effet Josephson $E = n_1 f_1 / K_J$, $U = n_2 f_2 / K_J$

- R déterminé par l'effet Hall quantique : $R = R_K / n_3$

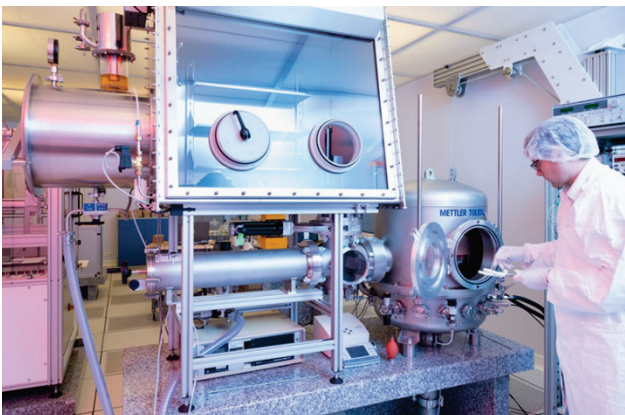
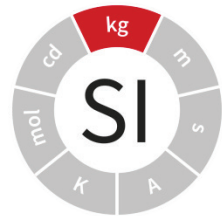
avec $K_J = 2e/h$ and $R_K = h/e^2$

$$\text{si } A = n_1 f_1 n_2 f_2 n_3 \quad \Rightarrow \quad m = A (h/4gv)$$

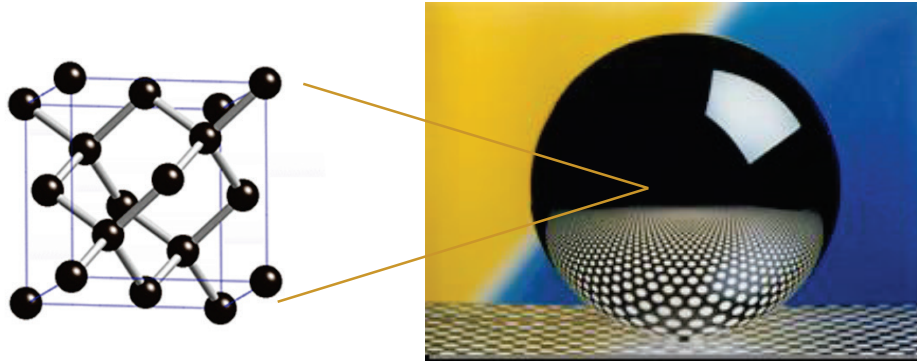
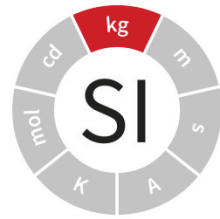
Une nouvelle définition du kg requiert une mesure de h avec
une incertitude de qq 10^{-8}



Expérience de la balance du watt LNE/CNAM/OP



EXPÉRIENCE D'AVOGADRO



La valeur de la constante d'Avogadro, est déterminée à partir de la masse molaire d'un électron:

$$N_A = \frac{A_r(e) \cdot M}{m_e}$$

- $A_r(e)$: masse molaire atomique relative de e
- M : constante de masse molaire
- m_e : masse de l'électron

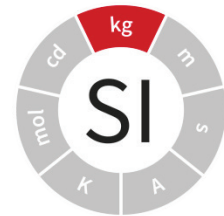
$$N_A = \frac{8 \cdot M \cdot V_{\text{sphere}}}{m_{\text{sphere}} \cdot a^3}$$

Mesurandes

- volume et masse de la sphère
- Valeur de la maille
- Masse molaire "moyenne"
- Imperfections du crystal
- Épaisseur de la surface

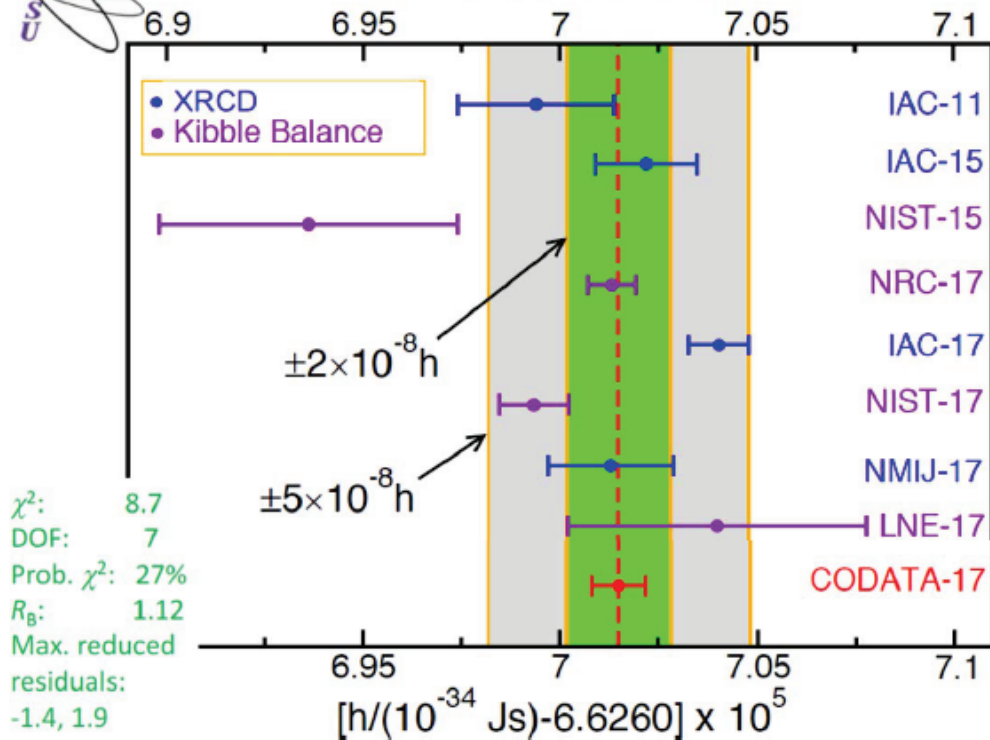
La masse de l'électron peut être exprimé ainsi: $m_e = 2 R_\infty h / c \alpha^2$

$$h = \frac{1}{N_A} \frac{\alpha^2 \cdot c}{2 \cdot R_\infty} \cdot A_r^e \cdot M_u$$



CODATA
SU

2017 Planck constant



CCM conditions for redefinition of the kilogram

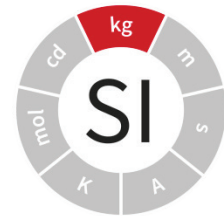
- at least three independent experiments, including work from Kibble balance and XRCD experiments, yield consistent values of the Planck constant with relative standard uncertainties not larger than 5×10^{-8} ,
- at least one of these results should have a relative standard uncertainty not larger than 2×10^{-8}

Slide from
CODATA

CCU Report to NMI Directors and Member Representatives, 18 October 2017

incertitude sur h de qq 10^{-8}

LA FIN DU PROTOTYPE INTERNATIONAL DU KILOGRAMME ?



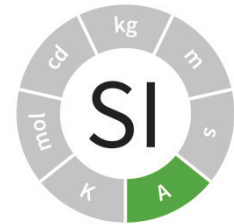
*Davor Zvidic
Croatie*



La seconde
Le mètre
Le kilogramme
L'ampère
Le kelvin
La candela
La mole

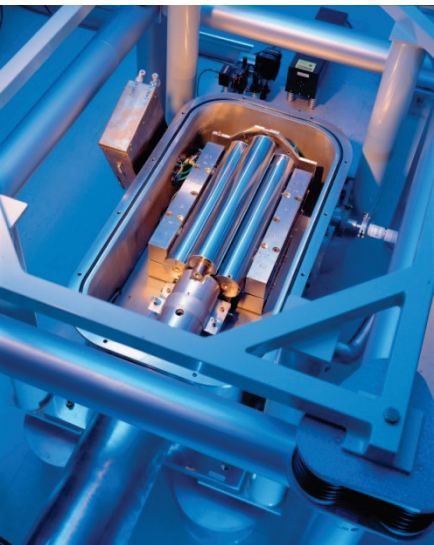


L'AMPÈRE DEPUIS 1948



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.

constante magnétique
(ou perméabilité du vide),
 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$ exactement



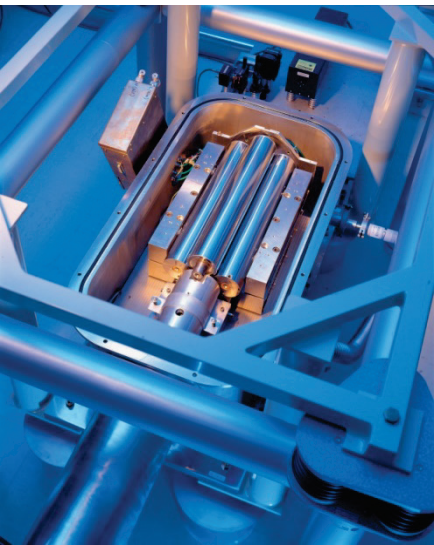
L'AMPÈRE DEPUIS 1948



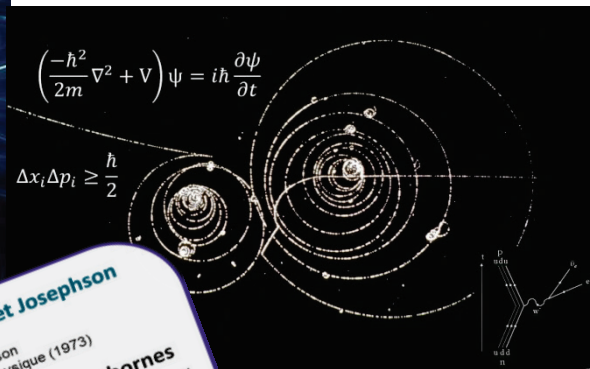
L'ampère est l'intensité d'un courant constant qui, maintenu dans deux conducteurs parallèles, rectilignes, de longueur infinie, de section circulaire négligeable et placés à une distance de 1 mètre l'un de l'autre dans le vide, produirait entre ces conducteurs une force égale à 2×10^{-7} newton par mètre de longueur.

réalisation impossible

réalisation
volt, ohm &
farad



LES ÉVOLUTIONS TECHNOLOGIQUES

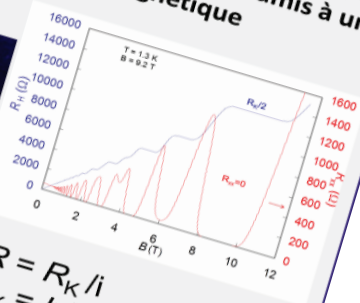


Étalon quantique : Effet Hall quantique



Klaus von Klitzing
Prix Nobel de Physique (1985)

Quantification de la résistance d'un gaz d'électrons bidimensionnel soumis à un champ magnétique



$$R = R_K / i$$

$$R_K = h/e^2$$

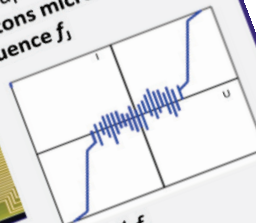
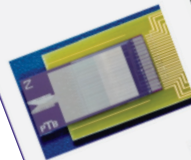
(25 812,807 W)

Étalon quantique : Effet Josephson



Brian D. Josephson
Prix Nobel de Physique (1973)

Quantification de la tension aux bornes d'une jonction Josephson (joint isolant ou métal entre deux supraconducteurs) soumise à des photons micro-ondes de fréquence f_J



$$U = n K_J^{-1} f_J$$

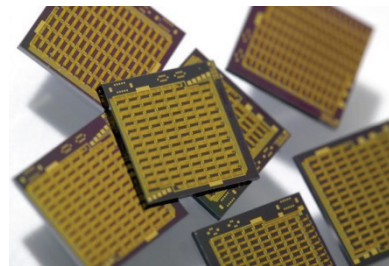
$$K_J = 2e/h$$

(483 597,9 GHz·V⁻¹)

LES EXPÉRIENCES EN MÉTROLOGIE ÉLECTRIQUES



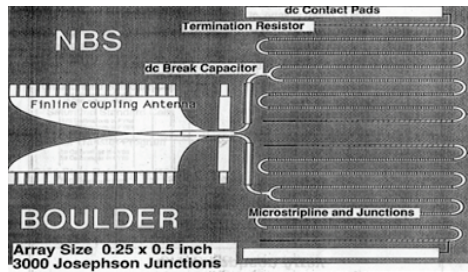
Proposition de fixer la valeur de la charge électrique e



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

$$(R_K K_J^2)^{-1} = \frac{h}{4}$$

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

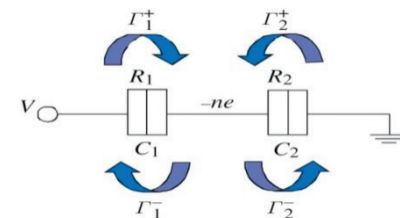


résistance

courant

$$U_R = R \times I_R$$

tension



LABORATOIRE
NATIONAL
DE MÉTROLOGIE
ET D'ESSAIS



LES EXPÉRIENCES EN MÉTROLOGIE ÉLECTRIQUES



$$e = \sqrt{\frac{2h\alpha}{\mu_0 c}}$$

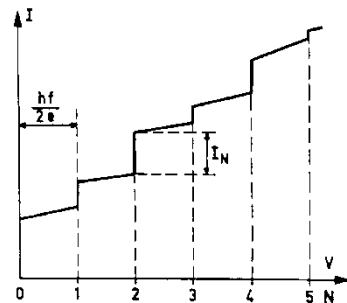
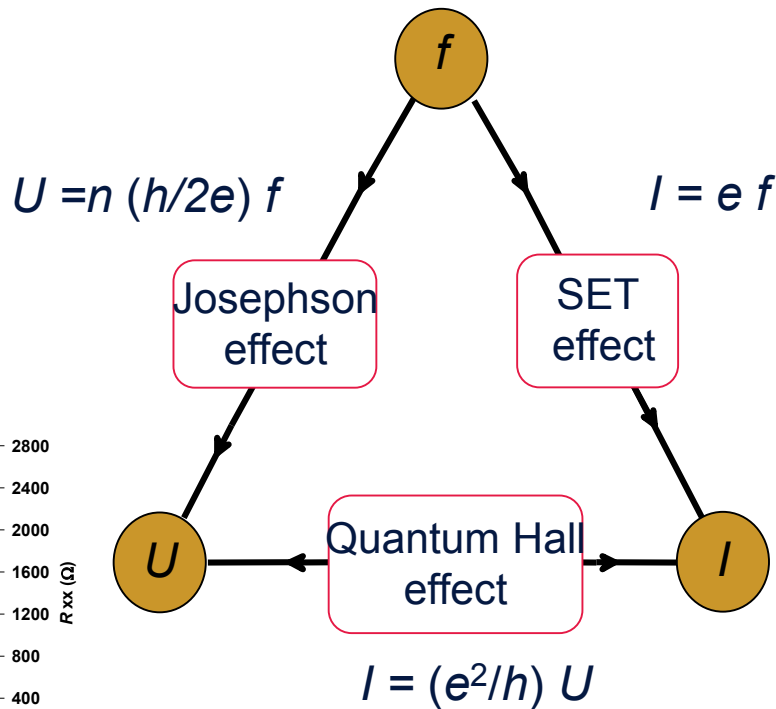
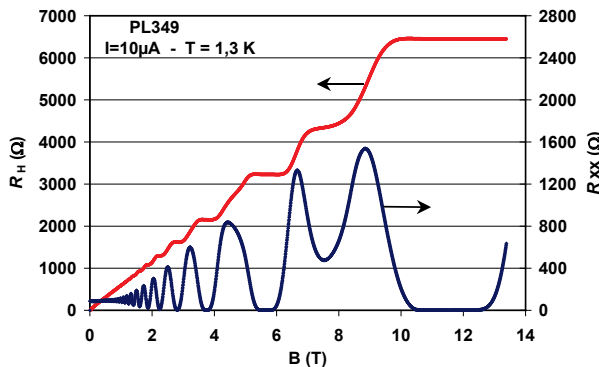


FIG. 1. – Marches de courant à tension constante d'une jonction Josephson irradiée par un rayonnement HF de fréquence f .

μ_0 sera alors affecté d'une incertitude de mesure.....

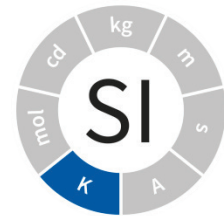




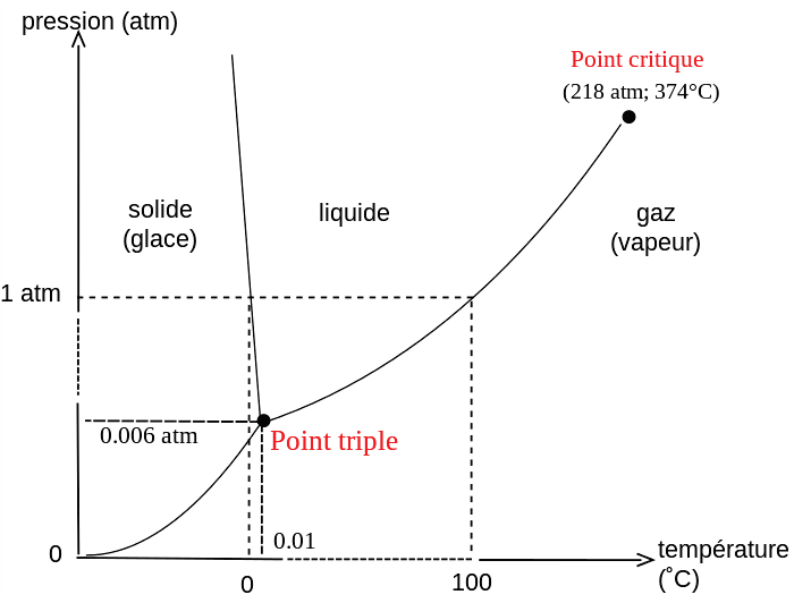
La seconde
Le mètre
Le kilogramme
L'ampère
Le kelvin
La candela
La mole



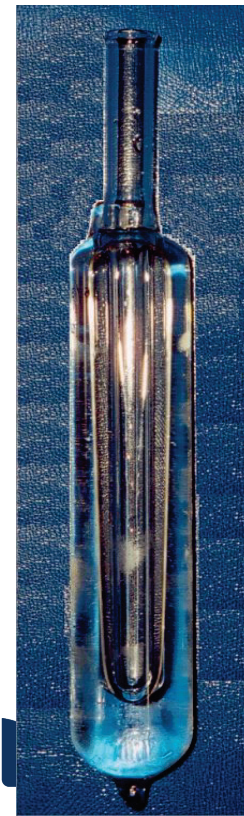
LE KELVIN EN 1954



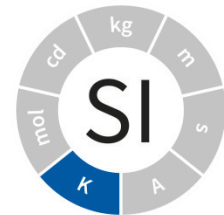
Le kelvin, unité de température thermodynamique, est la fraction $1/273,16$ de la température thermodynamique du point triple de l'eau.



$$T_{\text{tpw}} = 273,16 \text{ K exactement}$$



LES ÉCHELLES DE TEMPÉRATURES



Echelles de température avec points fixes

- Points triples
- Points de congélation
- Points de fusion

EIT 90
EPBT2000

He, e-H₂ (< 5 K)

Ne (24,55 K), **O₂** (54,36 K), **Ar** (83,8 K), **Hg** (134,31 K), **H₂O** (273,16 K)

Ga (29,8 °C)

In (156,59 °C), **Sn** (231,8 °C), **Zn** (419,52 °C), **Al** (660,3 °C), **Ag** (961,8°C),
Au (1 064,2 °C), **Cu** (1 084,6 °C)

LA MESURE DE LA CONSTANCE DE BOLTZMANN

Thermométrie par bruit Jonhson

$$k = \left(\frac{V(T)^2}{V_Q^2} \right) \frac{V_{CalcQVNS}^2}{4RT}$$

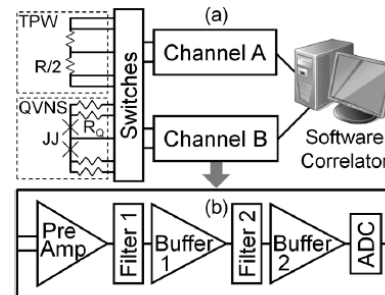
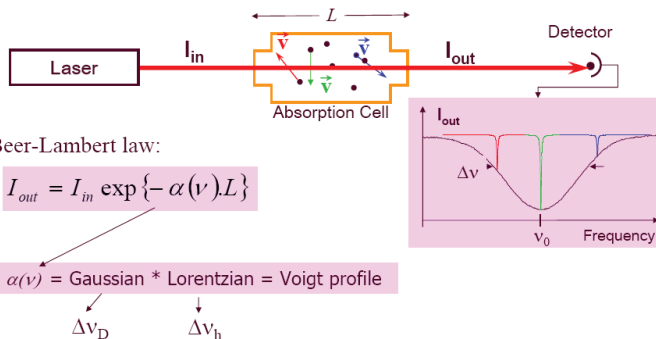


Figure 1. Schematic of the two-channel QVNS-JNT cross-correlation electronics, showing (a) the output wiring of the triple point of water (TPW) and QVNS probes (where the fifth wire is ground), and (b) the specific components of each channel, including the differential input leads to the preamplifier and the optical interface between the analogue-to-digital converter (ADC) and the computer that performs the correlation analysis.

Principle of the Doppler broadening technique

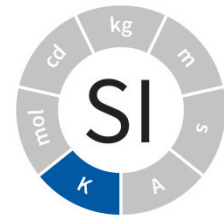
Linear absorption spectroscopy:



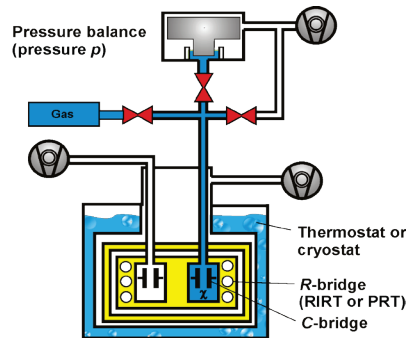
Elargissement Doppler

$$kT = \frac{m}{8 \ln(2)} \left(\frac{\Delta \nu_D}{\nu_0} c \right)^2$$

LA MESURE DE LA CONSTANCE DE BOLTZMANN



Thermométrie des constantes diélectriques de gaz



Thermométrie par mesure acoustique de gaz

$$u_A^2 = \gamma_{pg} \frac{kT}{m} (1 + \beta_a(T)p + \dots)$$

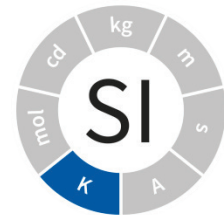
Vitesse
du son

Coeff. du
2^e son

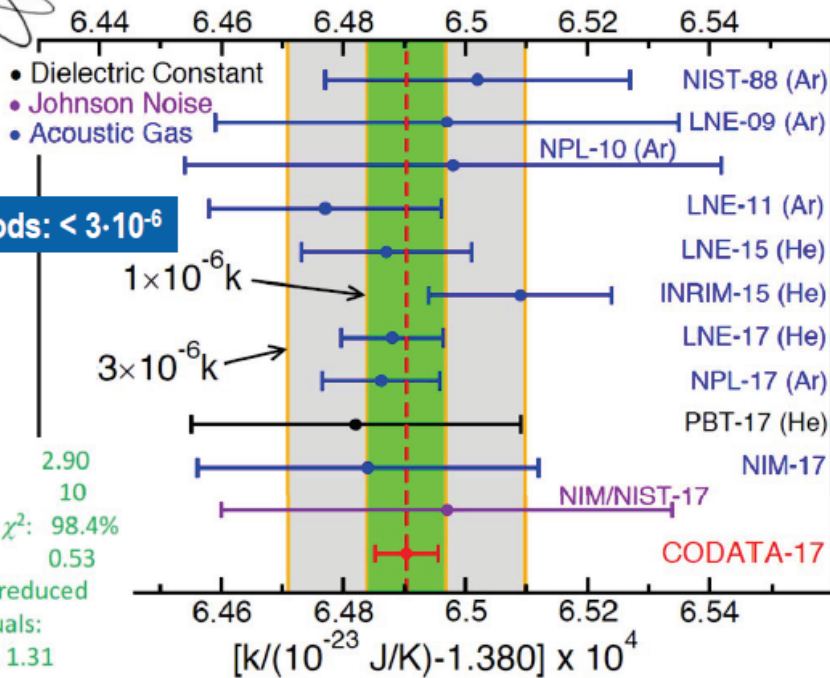
Masse
atomique

Ratio de
capacités
calorifiques





2017 Boltzmann constant



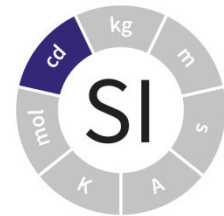
incertitude sur k de qq 10^{-7}



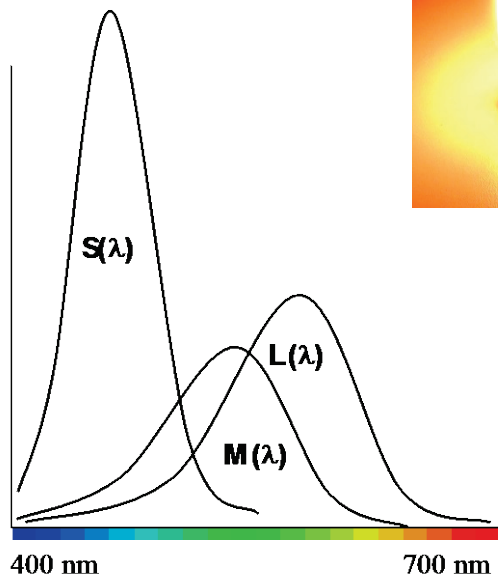
La seconde
Le mètre
Le kilogramme
L'ampère
Le kelvin
La candela
La mole



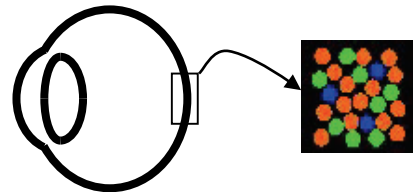
LES UNITÉS ET GRANDEURS EN PHOTOMÉTRIE



Sensibilité fondamentale



Cônes rétiens

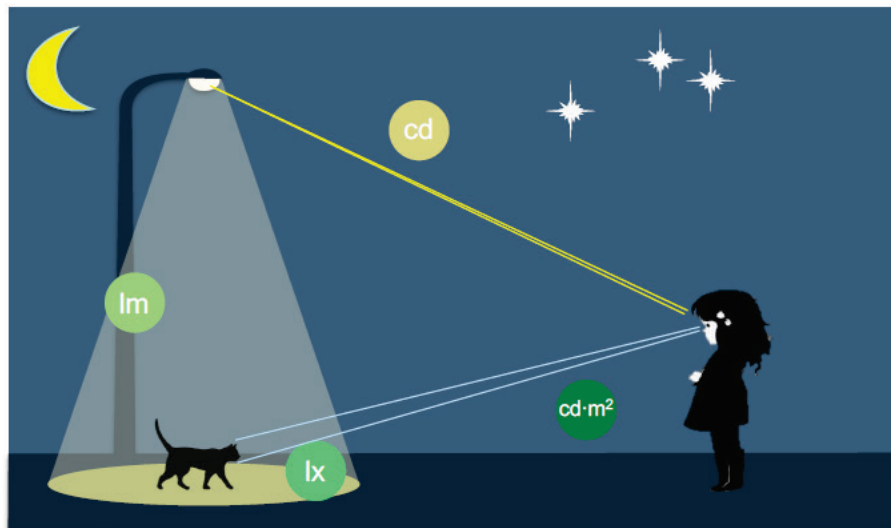
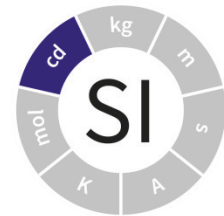


$$S(\lambda) \quad \lambda_{\max} \cong 440 \text{ nm}$$

$$M(\lambda) \quad \lambda_{\max} \cong 540 \text{ nm}$$

$$L(\lambda) \quad \lambda_{\max} \cong 570 \text{ nm}$$

LES UNITÉS ET GRANDEURS EN PHOTOMÉTRIE



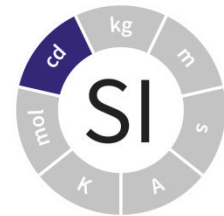
l'intensité lumineuse, en candela [cd]

l'éclairement lumineux , en lux [lx] ou [$\text{lm} \cdot \text{m}^{-2}$]

la luminance, en [$\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$]

le flux lumineux, en lumen [lm] ou [$\text{cd} \cdot \text{sr}^{-1}$]

LES UNITÉS ET GRANDEURS EN PHOTOMÉTRIE



la bougie nouvelle (unité d'intensité lumineuse) est telle que la brillance du radiateur intégral à la température de solidification du platine soit de 60 bougies nouvelles par centimètre carré.

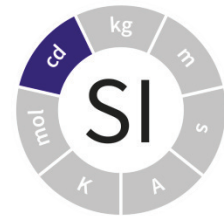
1946
1^e définition

1948

La bougie nouvelle est appelée la candela

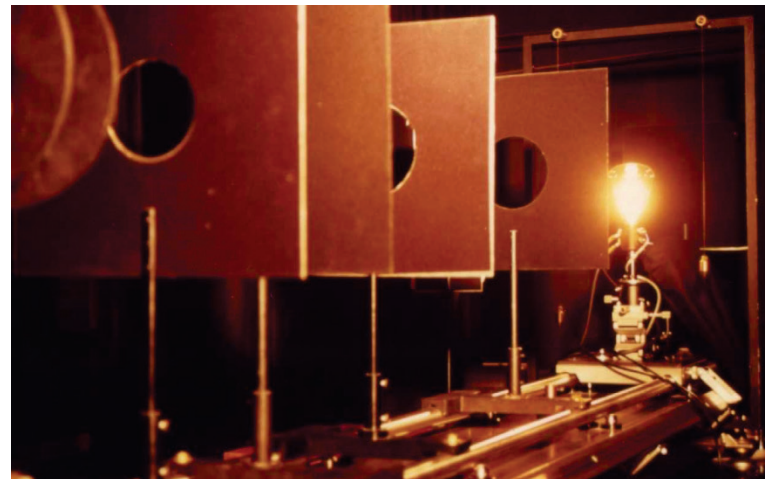
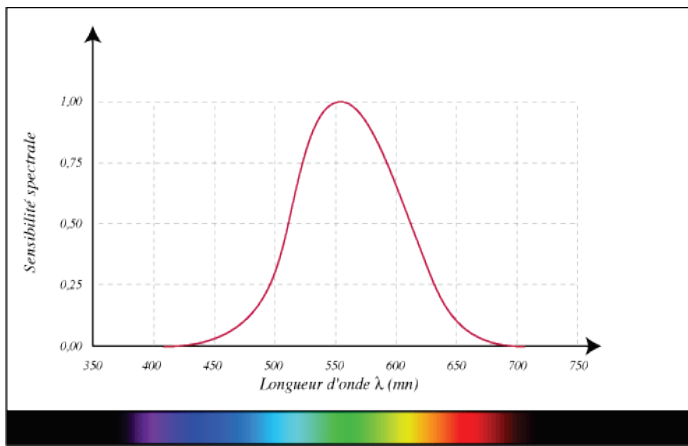


LA CANDELA EN 1979



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.

efficacité lumineuse spectrale (à 540×10^{12} Hz),
 $K = 683 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$ exactement

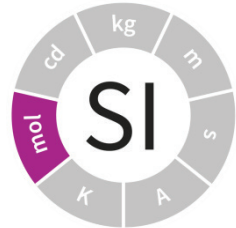




La seconde
Le mètre
Le kilogramme
L'ampère
Le kelvin
La candela
La mole

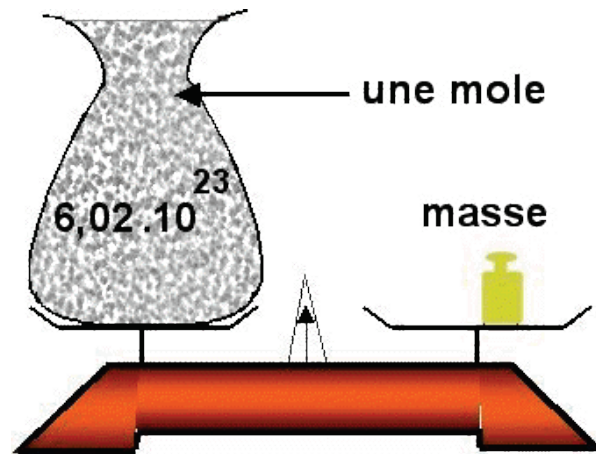


LA PETITE DERNIÈRE, LA MOLE



1. 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 ; son symbole est « mol ».
2. Lorsqu'on emploie la mole, 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.

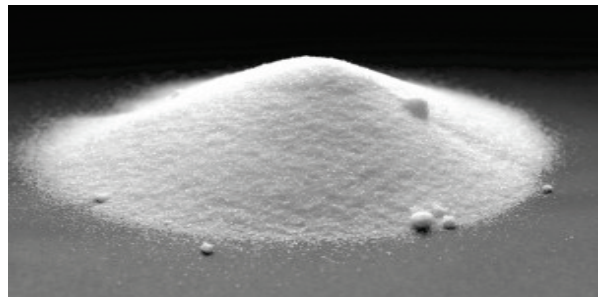
masse molaire du carbone 12,
 $M(^{12}\text{C}) = 12 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$
exactement



1971

1^e définition

REPRÉSENTATION D'UNE MOLE



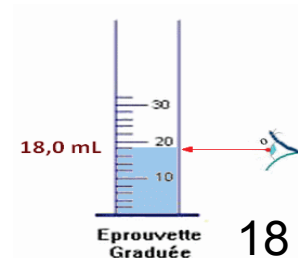
58,44 g de NaCl



55,845 g de Fe



27 g de Al

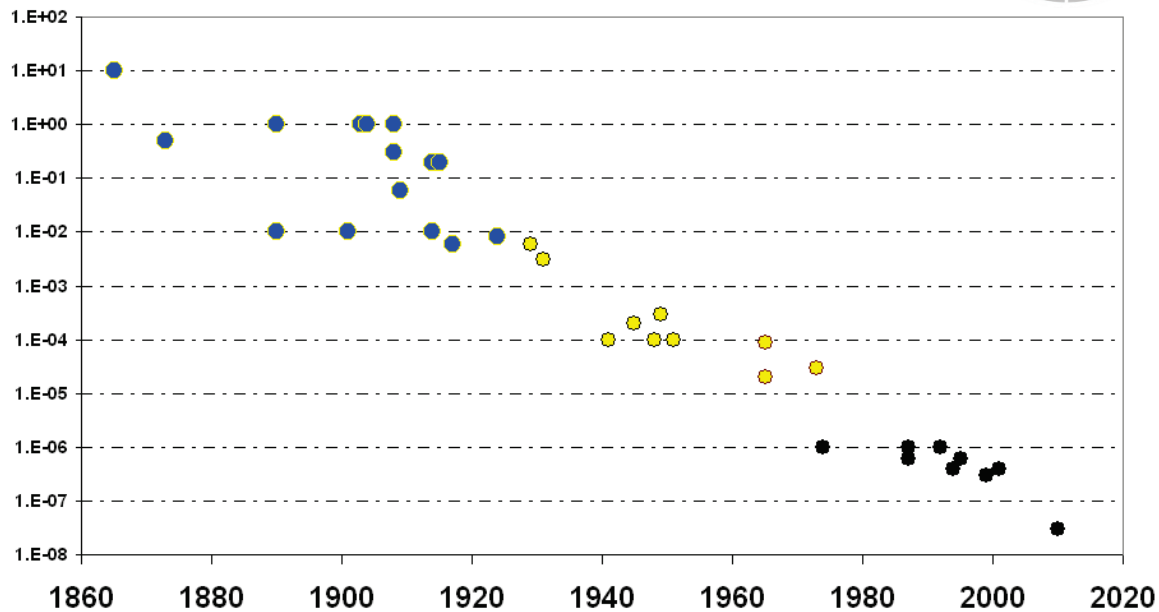
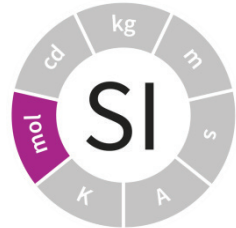


18 g de H₂O



207,2 g de Pb

LES MESURES DE N_A



incertitude sur N_A de qq 10^{-8}

$$N_A = \frac{8 \cdot M \cdot V_{\text{sphere}}}{m_{\text{sphere}} \cdot a^3}$$

LES CHANGEMENTS À LA CGPM* DE 2018

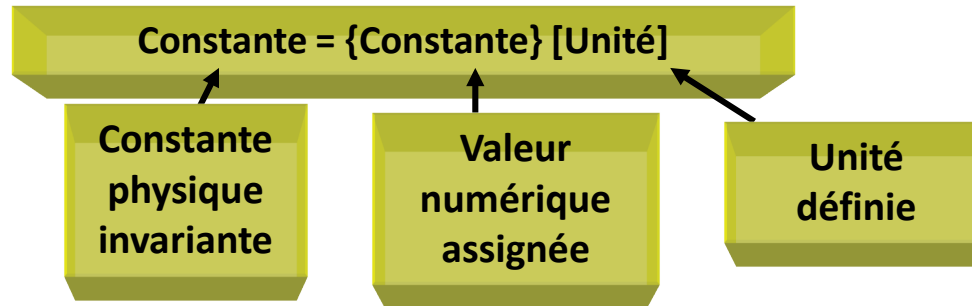


Consistency from present SI to revised SI

- **International prototype of the kilogram:**
 $m(\mathcal{K})/1 \text{ kg} = 1.000\,000\,000(10)$
- **Permeability of vacuum:**
 $\mu_0/4\pi \times 10^{-7} \text{ H m}^{-1} = 1.000\,000\,000\,20(23)$
- **Triple point of water:**
 $T_{\text{TPW}}/273.16 \text{ K} = 1.000\,000\,02(37)$
- **Molar mass of the carbon 12 atom:**
 $M(^{12}\text{C})/0.012 \text{ kg mol}^{-1} = 1.000\,000\,000\,37(45)$

CCU Report to NMI Directors and Member Representatives, 18 October 2017

CHANGEMENT DE PARADIGME



LES NOUVELLES DÉFINITIONS



- 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 $6,022\,140\,76 \times 10^{23}$ mol⁻¹
- l'efficacité lumineuse d'un rayonnement monochromatique de fréquence 540×10^{12} Hz, K_{cd} , est égale à 683 lm/W

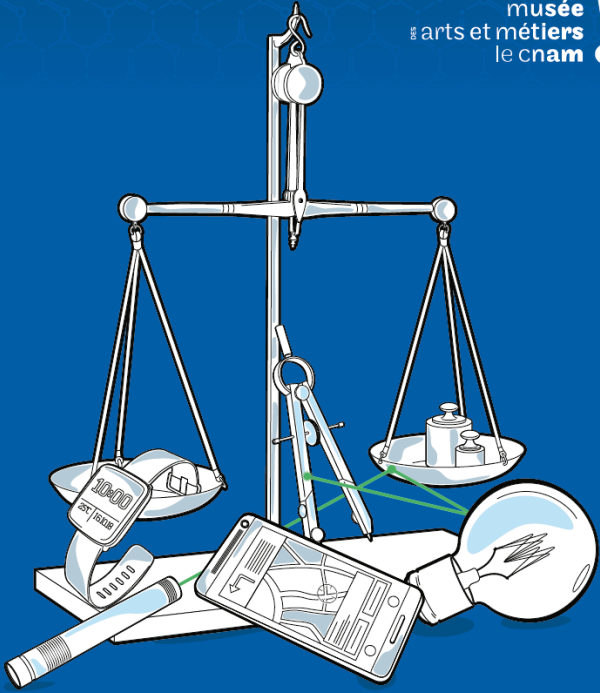


Merci pour votre attention

« C'est un gabarit exceptionnel.
Si la connerie se mesurait,
il serait au Pavillon de Breteuil à Sèvres »

Michel Audiard (*Le cave se rebiffe*)

musée
des arts et métiers
le cnam



16 OCTOBRE 2018
5 MAI 2019

SUR LES 7 UNITÉS DU MONDE

MESURE

EXPOSITION

MUSÉE DES ARTS ET MÉTIERS
60 RUE RÉAUMUR, PARIS 3^E
WWW.ARTS-ET-METIERS.NET

facebook.com/musee.des.arts.et.metiers
twitter.com/museumetiers
#ExpoArtsMetiers

LNE

CIPI

SCIENCE & VIE

Le Parisien



Pourquoi une révision du SI ?
Quelles définitions pour 2018 ?
**La métrologie dans notre
quotidien**

LA METROLOGIE DANS NOTRE QUOTIDIEN

Mesurer c'est

- **comparer deux objets avec une instrumentation**
 - Un objet qui est la référence, l'autre - objet inconnu à mesurer
- **exprimer la grandeur mesurée avec une valeur, une incertitude de mesure et une unité**

Un système unifié de mesures permet

- **la confiance entre partenaires**
- **de prendre des décisions (parfois avec un impact économique important)**
- **de comparer des phénomènes**
- **d'améliorer notre qualité de vie, de protéger les consommateurs**
- **de valider des processus industriels et d'ajuster des paramètres**
- **de prouver la conformité ou non-conformité des produits**
- **de valider des hypothèses de R&D, supporter l'innovation**
- **de définir des conditions de sécurité**

LA METROLOGIE DANS NOTRE QUOTIDIEN

1983, Air Canada vol 143, Montréal - Edmonton

- confusion des unités de masse entre pilote et équipe de ravitaillement (kg et livre). Sous-estimation de la quantité de carburant nécessaire → panne de carburant à 12 000 m – atterrissage d'urgence à Gimli

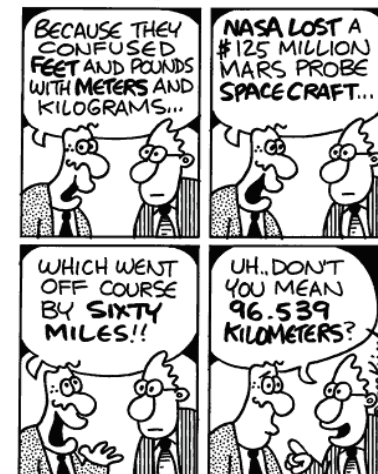
2007, Toulouse, radiothérapie

- surdose sur 145 patients, 6 morts
- erreur d'étalonnage (dosimètre inadaptée au faisceau de radio-chirurgie)



October 4, 1999

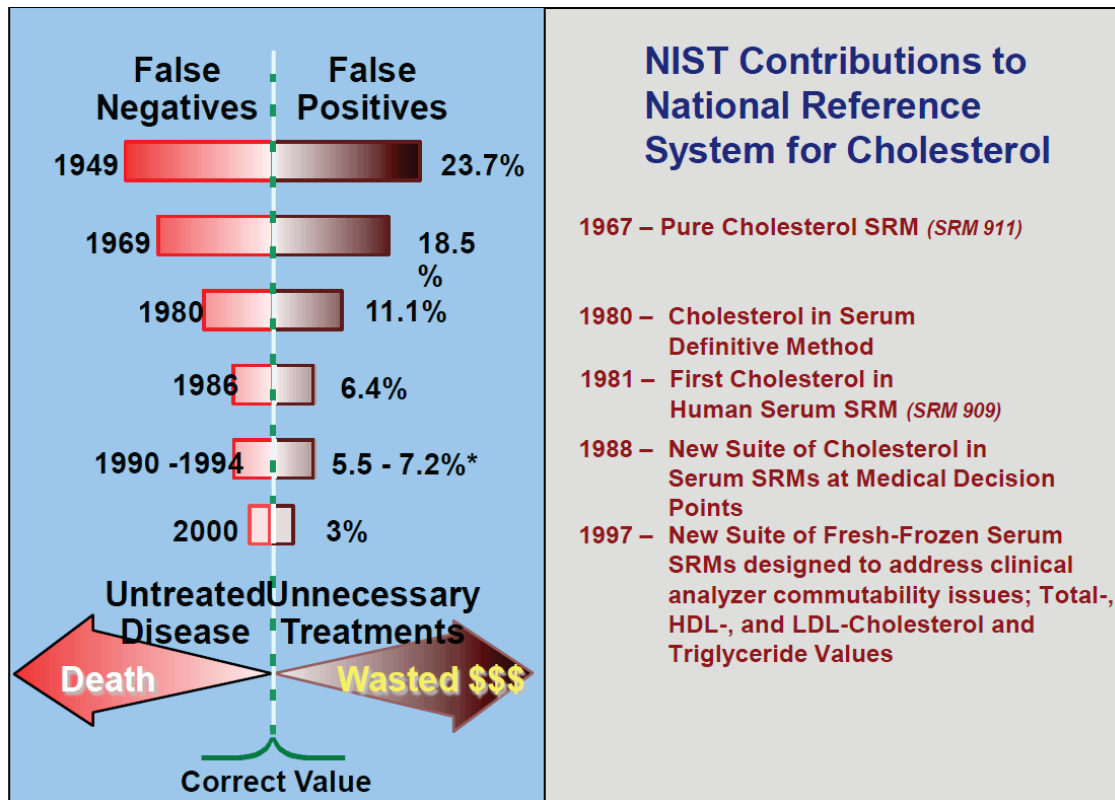
Dry Bones



DryBonesBlog.com



LA METROLOGIE DANS NOTRE QUOTIDIEN



L'amélioration des incertitudes de mesure de 1968 à 2000 a permis de gagner autour de 100 M\$ par an (estimation)

LA MÉTROLOGIE DANS NOTRE QUOTIDIEN

Positionnement et navigation

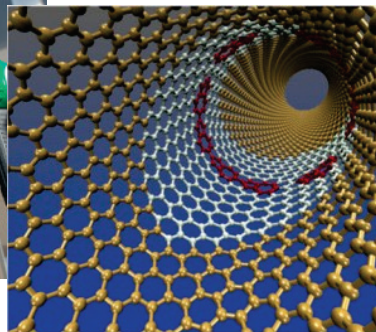
- **développement de nouvelles horloges atomiques**
 - Un facteur 10 tous les 10 ans sur l'exactitude
- **positionnement à mieux que le cm**
- **synchronisation dans les télécommunications et autres systèmes**
 - spatial, transport
 - banque (échanges commerciaux), et taxation
 - Migration des animaux
 - Surveillance de la terre (géodésie)



— **construction et surveillance**

- pilotage au niveau millimétrique pour la fabrication du tablier
- mesures par GPS et interférométrie laser
- mesures des forces que doit supporter le pont (12 MN à 25 MN)
- détection des mouvement du pont au niveau de 0,001 mm
- contrôle des oscillations de la structure et des vibrations

LA METROLOGIE DANS NOTRE QUOTIDIEN



« mesure la profondeur de l'eau avant de t'y plonger »
(proverbe arabe)

LABORATOIRE
NATIONAL
DE MÉTROLOGIE
ET D'ESSAIS



BESOIN DE MESURES INCONTESTABLES

