



# Une introduction au nouveau Système international d'unités

Christophe DAUSSY



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



13 mars 2019



Région académique  
HAUTS-DE-FRANCE



# Université Paris 13 / Laboratoire de Physique des Lasers



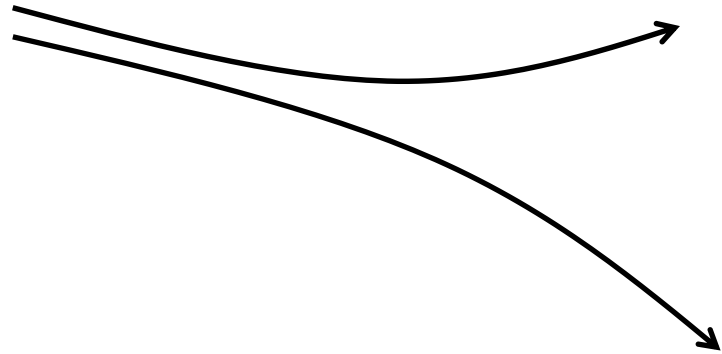
- **L'Université en quelques chiffres :**
  - 4 campus autour de Paris
  - 23 000 étudiants

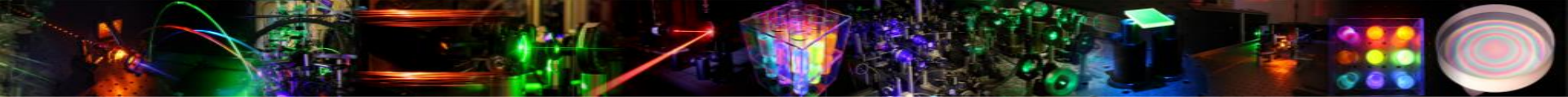


UNIVERSITÉ **PARIS 13**



- **Le CNRS en quelques chiffres :**
  - 10 instituts
  - 950 Unités Mixtes de Recherche
  - 32 000 personnes





# Le Laboratoire de Physique des Lasers

## ○ Le LPL en quelques mots :

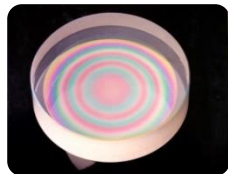
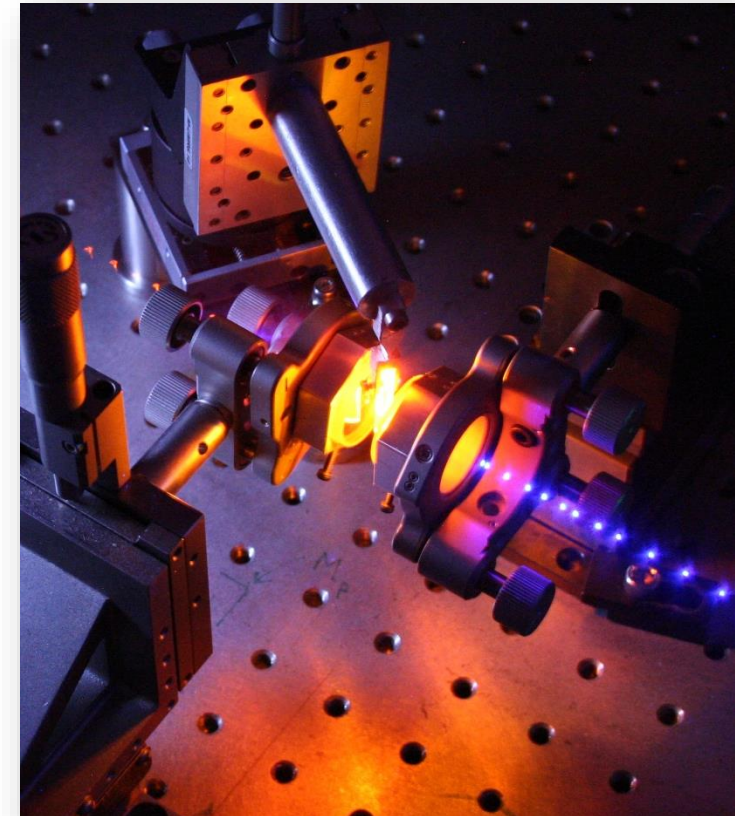
- Recherche expérimentale en physique quantique
- Mesures de ultra-haute précision
- Photonique et nanotechnologies

## ○ Le LPL en quelques chiffres :

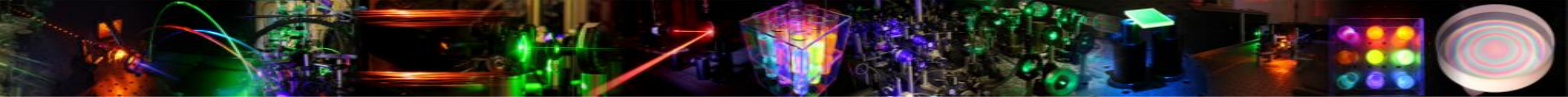
- 80 personnes dont 45 chercheurs permanents
- 40 articles par an dans des revues internationales
- Plus de 16 projets expérimentaux
- 3 ateliers (électronique, mécanique, optique)



[www.lpl.univ-paris13.fr](http://www.lpl.univ-paris13.fr)







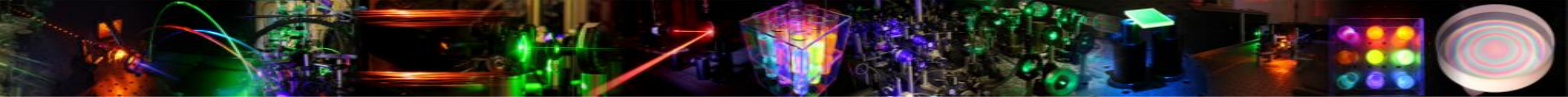
# L'équipe Métrologie, Molécules et Tests Fondamentaux

## ○ Les thématiques de recherche :

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



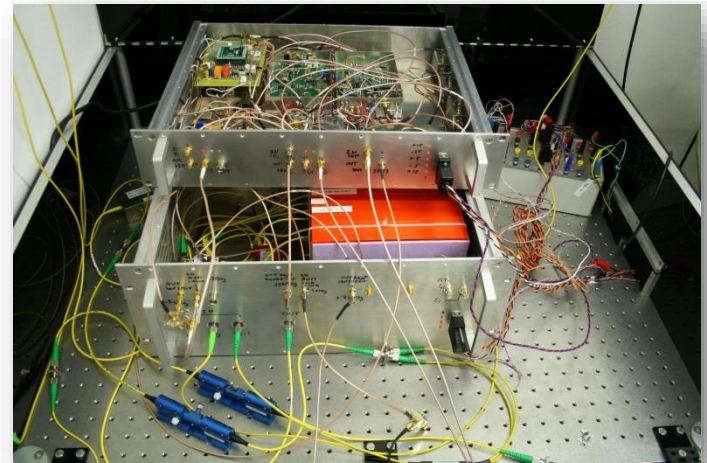
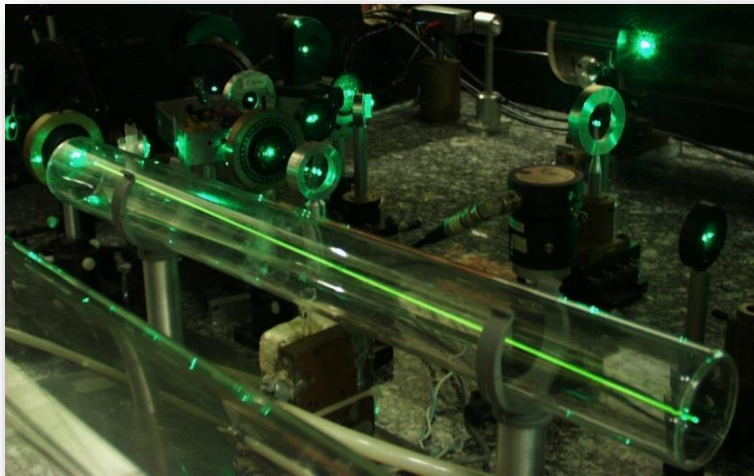




# L'équipe Métrologie, Molécules et Tests Fondamentaux

## ○ Les thématiques de recherche :

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





# Une introduction au nouveau Système international d'unités

## Plan

- Introduction
- L'histoire de notre système de mesure
- Le nouveau Système d'unités
- La mise en pratique des nouvelles unités

## Pourquoi s'intéresser au SI ?

- Actualité scientifique
- Mesure, incertitude, homogénéité
- Histoire de la mesure
- Lien entre théorie et expérience
- Mécanique classique et relativiste
- Mécanique quantique (horloges atomiques, effets Josephson et Hall)
- Thermodynamique
- Constantes fondamentales
- ...







# Une introduction au nouveau Système international d'unités



## Pourquoi s'intéresser au SI ?

- Actualité scientifique
- Mesure, incertitude, homogénéité
- Histoire de la mesure
- Lien entre théorie et expérience
- Mécanique classique et relativiste
- Mécanique quantique (horloges atomiques, effets Josephson et Hall)
- Thermodynamique
- Constantes fondamentales
- ...



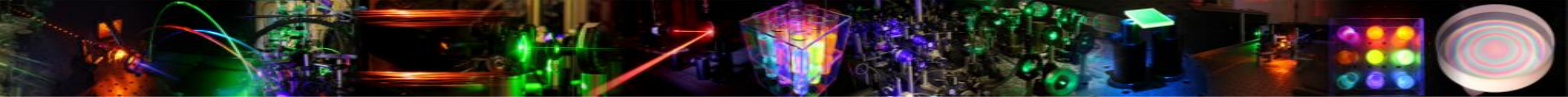
# Une introduction au nouveau Système international d'unités



## Pourquoi s'intéresser au SI ?

- Actualité scientifique
- Mesure, incertitude, homogénéité
- Histoire de la mesure
- Lien entre théorie et expérience
- Mécanique classique et relativiste
- Mécanique quantique (horloges atomiques, effets Josephson et Hall)
- Thermodynamique
- Constantes fondamentales
- ...





# Conférence Générale des Poids et Mesures



## Sur la révision du Système international d'unités (SI)

### Résolution 1

La Conférence générale des poids et mesures (CGPM), à sa 26<sup>e</sup> réunion, considérant

- ♦ qu'il est essentiel de disposer d'un Système international d'unités (SI) uniforme et accessible dans le monde entier, pour le commerce international, l'industrie de haute technologie, la santé humaine et la sécurité, la protection de l'environnement, les études sur l'évolution du climat, ainsi que la science fondamentale qui étaye tous ces domaines,
- ♦ que les unités du SI doivent être stables sur le long terme, auto-cohérentes et réalisables dans la pratique, en étant fondées sur la description théorique actuelle de la nature, au plus haut niveau,
- ♦ qu'une révision du SI visant à satisfaire ces exigences a été proposée dans la Résolution 1 adoptée à l'unanimité par la CGPM à sa 24<sup>e</sup> réunion (2011), qui expose en détail une nouvelle façon de définir le SI à partir d'un ensemble de sept constantes, choisies parmi les constantes fondamentales de la physique et d'autres constantes de la nature, à partir desquelles les définitions des sept unités de base sont déduites,
- ♦ que les conditions requises par la CGPM à sa 24<sup>e</sup> réunion (2011), confirmées à sa 25<sup>e</sup> réunion (2014), pour procéder à l'adoption d'une telle révision du SI sont désormais remplies,

décide qu'à compter du 20 mai 2019, le Système international d'unités, le SI, est 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,  $N_{\text{A}}$ , est égale à  $6,022\,140\,76 \times 10^{23}$  mol<sup>-1</sup>,
- ♦ l'efficacité lumineuse d'un rayonnement monochromatique de fréquence  $540 \times 10^{12}$  Hz,  $K_{\text{cd}}$ , est égale à 683 lm/W,



13 au 16 novembre 2018 à Versailles



# Conférence Générale des Poids et Mesures

décide qu'à compter du 20 mai 2019, le Système international d'unités, le SI, est 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  $6,022\ 140\ 76 \times 10^{23}$  mol<sup>-1</sup>,
- ♦ l'efficacité lumineuse d'un rayonnement monochromatique de fréquence  $540 \times 10^{12}$  Hz,  $K_{\text{cd}}$ , est égale à 683 lm/W,

où 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  $\text{Hz} = \text{s}^{-1}$ ,  $\text{J} = \text{kg m}^2 \text{s}^{-2}$ ,  $\text{C} = \text{A s}$ ,  $\text{lm} = \text{cd m}^2 \text{m}^{-2} = \text{cd sr}$ , et  $\text{W} = \text{kg m}^2 \text{s}^{-3}$ .

- ♦ 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<sup>-1</sup>,
- ♦ l'efficacité lumineuse d'un rayonnement monochromatique de fréquence  $540 \times 10^{12}$  Hz,  $K_{\text{cd}}$ , est égale à 683 lm/W,



13 au 16 novembre 2018 à Versailles

d'unités (SI)

réunion,

d'unités (SI) uniforme international, l'industrie té, la protection de ainsi que la science

e, auto-cohérentes et description théorique

été proposée dans la e réunion (2011), qui tir d'un ensemble de ales de la physique et les définitions des

2011), confirmées à sa le révision du SI sont

l d'unités, le SI, est le

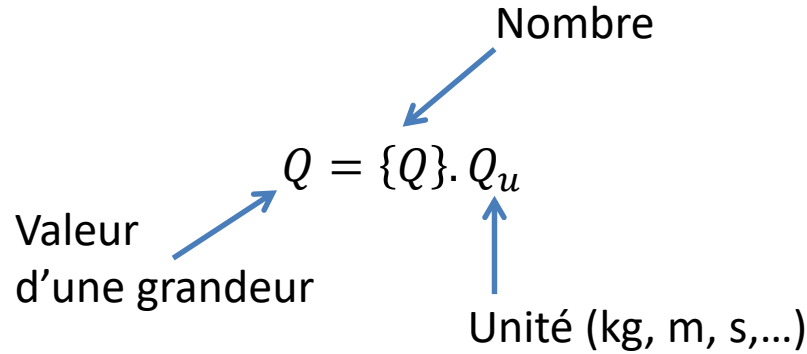
mental de l'atome de z, 158 m/s, s, ,





# 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



$$\propto \sqrt{\frac{l}{g}}$$

Indépendant de  $m$  !

Masse, Longueur, Temps,...

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

$$[\text{période}] = [l]^\alpha \times [m]^\beta \times [g]^\gamma$$

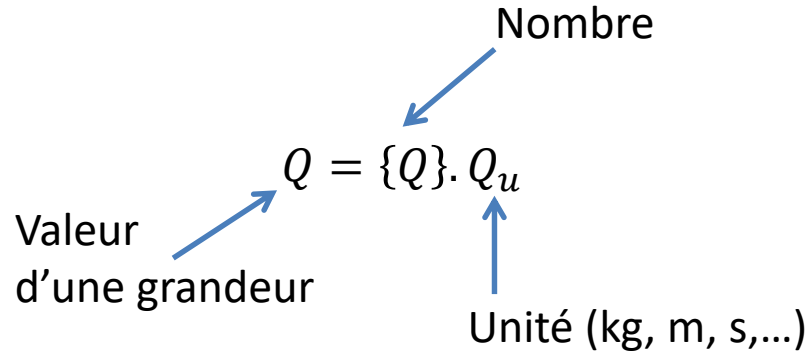
$$T = L^\alpha \times M^\beta \times (L \times T^{-2})^\gamma$$

$$= [l]^{1/2} \times [m]^0 \times [g]^{-1/2}$$



# 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

$$M \times L \times T^{-2} \rightarrow [F] \leftrightarrow \left[ \frac{m_1 m_2}{r^2} \right] \leftarrow M^2 \times L^{-2}$$

(2<sup>ème</sup> loi de Newton)

$$[F] = G \left[ \frac{m_1 m_2}{r^2} \right] \quad M^{-1} \times L^3 \times T^{-2}$$

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)

$$G = 6,67 \dots \times 10^{-11} \text{ kg}^{-1} \text{ m}^3 \text{ s}^{-2}$$

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





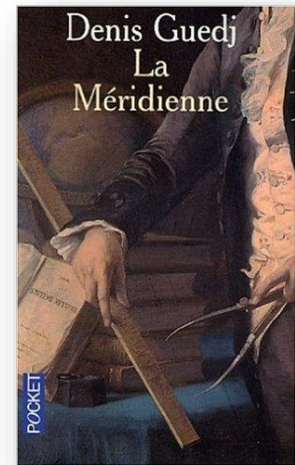
# Histoire du système d'unités

## ○ 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



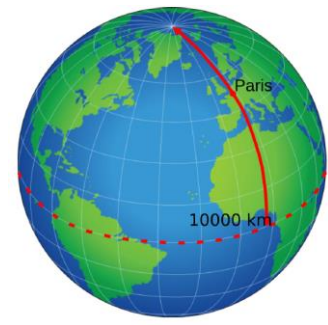
Chercher dans la nature une mesure universelle (**1790**)



# 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** )

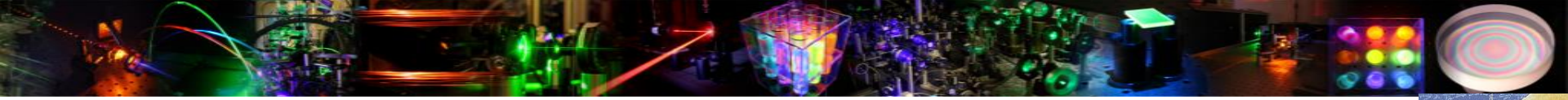


Jean Baptiste Delambre  
(1747-1822)

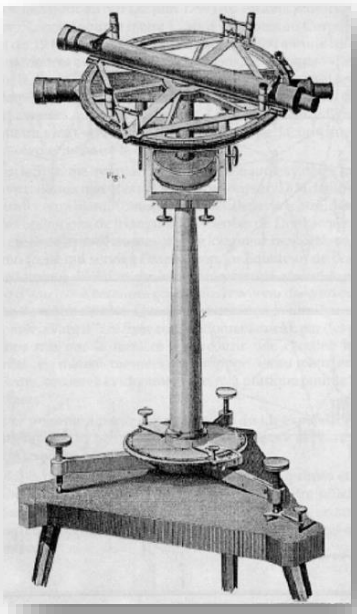


Pierre-François MECHAIN  
(1744-1804)





# Histoire du système d'unités



Cercle répétiteur de Borda



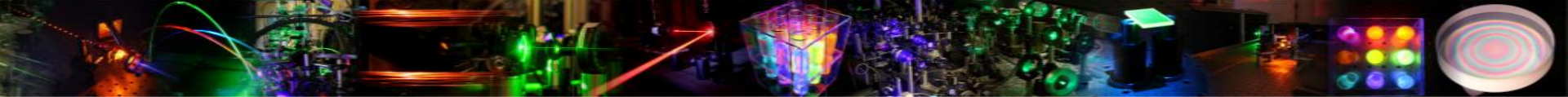
Erreur sur les angles < 0,5 seconde de degré



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<sup>er</sup> vendémiaire, l'an troisième de la république.



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

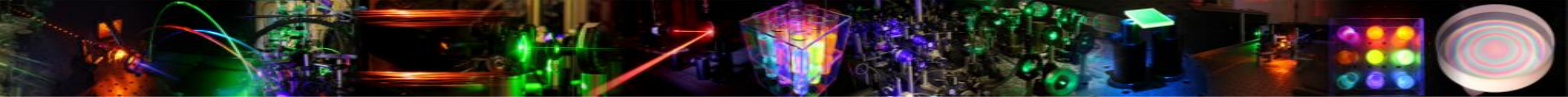
Aboli en 1795 !

## ○ 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<sup>er</sup> 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 :  $1\text{L} = 1\text{ dm}^3$
  - Unité de masse : 1L d'eau pure à  $3,98\text{ }^\circ\text{C}$
- 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.

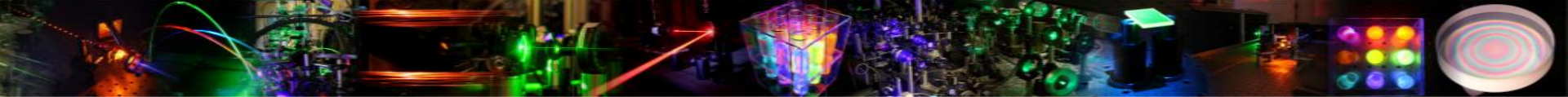
Le Bureau international fonctionnera sous la direction et la surveillance exclusives d'un *Comité international des poids et mesures*, placé lui-même sous l'autorité d'une *Conférence générale des poids et mesures* formée de délégués de tous les Gouvernements contractants.



Le Pavillon de Breteuil (Sèvres)



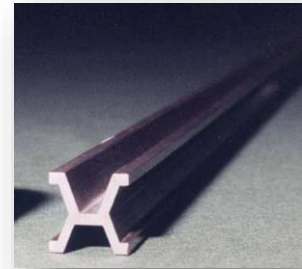
Aujourd'hui le BIPM compte 58 états membres



# 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** ( $\lambda_{Kr}$ ) et adoption **SI** (11<sup>ème</sup> CGPM)
- Réalisation (de facto) du mètre : He-Ne/I<sub>2</sub>
- **1983** : redéfinition du **mètre** en fixant  $c$   
(mise en pratique avec des lasers)

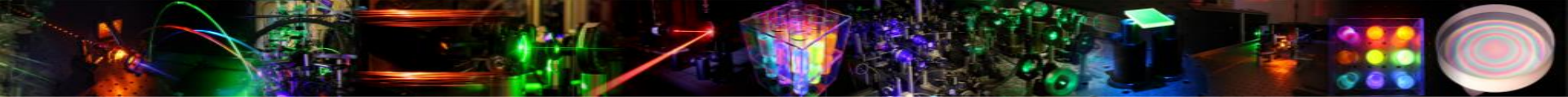
Etalon du mètre  
(platinum iridié)



Lampe à  
Krypton-86



1960 : 1<sup>er</sup> 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)

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

- 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<sup>ère</sup> CGPM)





# Du système métrique au Système International d'Unités

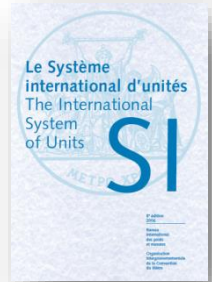
- **1901** : Proposition d'ajouter une nouvelle unité : l'ampère [Giovanni Giorgi (1901)]. Le système MKSA.

Élimination des facteurs  $4\pi$  dans les équations de Maxwell (rationalisation)

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

- **1948** : définition de l'**ampère** (9<sup>ème</sup> CGPM)
- **1954** : définition **kelvin, candela** (10<sup>ème</sup> CGPM)
- **1960** : redéfinition du **mètre** ( $\lambda_{Kr}$ ) et **adoption SI** (11<sup>ème</sup> CGPM)
- **1967** : redéfinition de la **seconde** par une constante :  $\nu_{Cs}$
- **1971** : définition de la **mole**
- **1979** : redéfinition de la **candela** par constante :  $K_{cd}$  (16<sup>ème</sup> CGPM)
- **1983** : redéfinition du **mètre** par une constance :  $c$

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



de la dématérialisation jusqu'aux constantes fondamentales



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

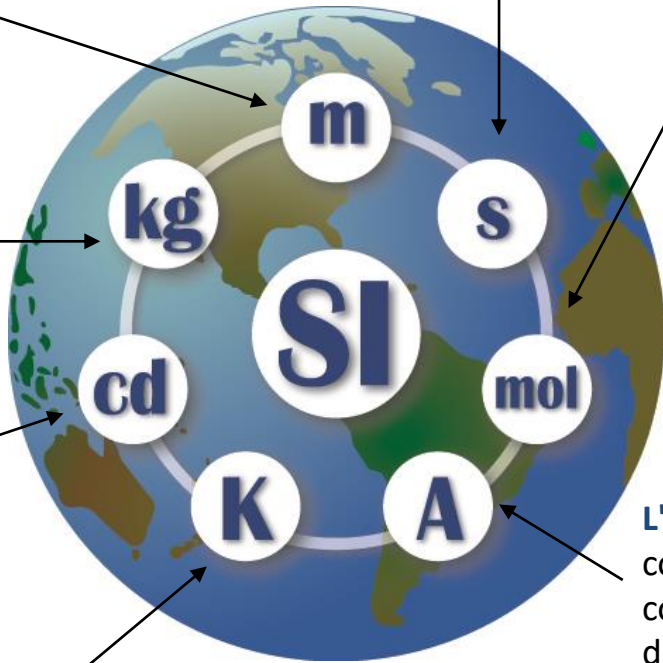


# Du système métrique au Système International d'Unités

**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 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 .

**La candela** est l'intensité lumineuse, dans une direction donnée, d'une source qui émet un rayonnement monochromatique de fréquence  $540 \times 10^{12}$  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

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

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  **$2 \times 10^{-7}$**  newton par mètre de longueur.



# Du système métrique au Système International d'Unités

**$c = 299\,792\,458\text{ m/s}$**   
constante fondamentale  
(1983)

**$\Delta\nu_{Cs} = 9\,192\,631\,770\text{ Hz}$**

système physique particulier  
(1967)

**$\mathcal{K} = 1\text{ kg}$**   
objet matériel particulier  
(1889)

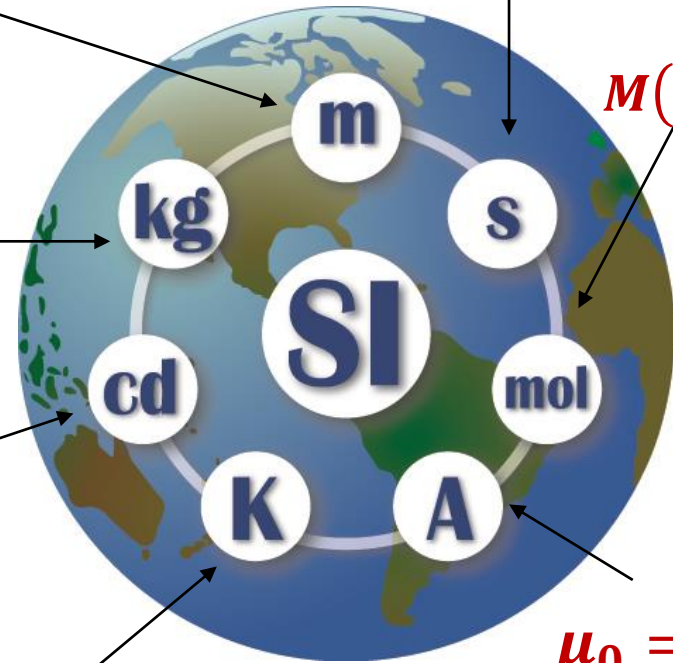
**$M(^{12}C) = 0,012\text{ kg/mol}$**   
système physique particulier  
(1971)

**$K_{cd} = 683\text{ lm/W}$**   
expérience idéale  
(1979)

**$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}\text{ NA}^{-2}$**   
expérience idéale  
(1948, 1954)

système physique particulier  
(1954)

**$T_{TPW} = 273,16\text{ K}$**





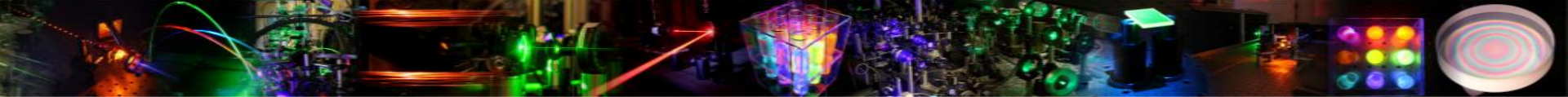


# Le nouveau Système d'Unités

- **2007** : résolution 12 *“On the possible redefinition of certain base units of the International System of Units (SI)”* (23th CGPM)
- **2011** : resolution 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<sup>ème</sup> CIPM). Résolution *“On the revision of the International System of Units (SI)”*.
- **Novembre 2018** : approbation de la révision du SI (26th CGPM à Versailles) redéfinition du kilogramme, de l’ampère, du kelvin et de la mole à partir de 4 constantes fondamentales

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





# 26th Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM)

## Sur la révision du Système international d'unités (SI)

### Résolution 1

La Conférence générale des poids et mesures (CGPM), à sa 26<sup>e</sup> réunion, considérant

- ♦ qu'il est essentiel de disposer d'un Système international d'unités (SI) uniforme et accessible dans le monde entier, pour le commerce international, l'industrie de haute technologie, la santé humaine et la sécurité, la protection de l'environnement, les études sur l'évolution du climat, ainsi que la science fondamentale qui étaye tous ces domaines,
- ♦ que les unités du SI doivent être stables sur le long terme, auto-cohérentes et réalisables dans la pratique, en étant fondées sur la description théorique actuelle de la nature, au plus haut niveau,
- ♦ qu'une révision du SI visant à satisfaire ces exigences a été proposée dans la Résolution 1 adoptée à l'unanimité par la CGPM à sa 24<sup>e</sup> réunion (2011), qui expose en détail une nouvelle façon de définir le SI à partir d'un ensemble de sept constantes, choisies parmi les constantes fondamentales de la physique et d'autres constantes de la nature, à partir desquelles les définitions des sept unités de base sont déduites,
- ♦ que les conditions requises par la CGPM à sa 24<sup>e</sup> réunion (2011), confirmées à sa 25<sup>e</sup> réunion (2014), pour procéder à l'adoption d'une telle révision du SI sont désormais remplies,

décide qu'à compter du 20 mai 2019, le Système international d'unités, le SI, est 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  $6,022\,140\,76 \times 10^{23}$  mol<sup>-1</sup>,
- ♦ l'efficacité lumineuse d'un rayonnement monochromatique de fréquence  $540 \times 10^{12}$  Hz,  $K_{\text{cd}}$ , est égale à 683 lm/W,

- 4 nouvelles constantes fixées ( $h$ ,  $e$ ,  $k$  et  $N_A$ )
- Nouvelle formulation des 7 définitions



13 au 16 novembre 2018 à Versailles



# Pourquoi redéfinir le kilogramme et la mole ?

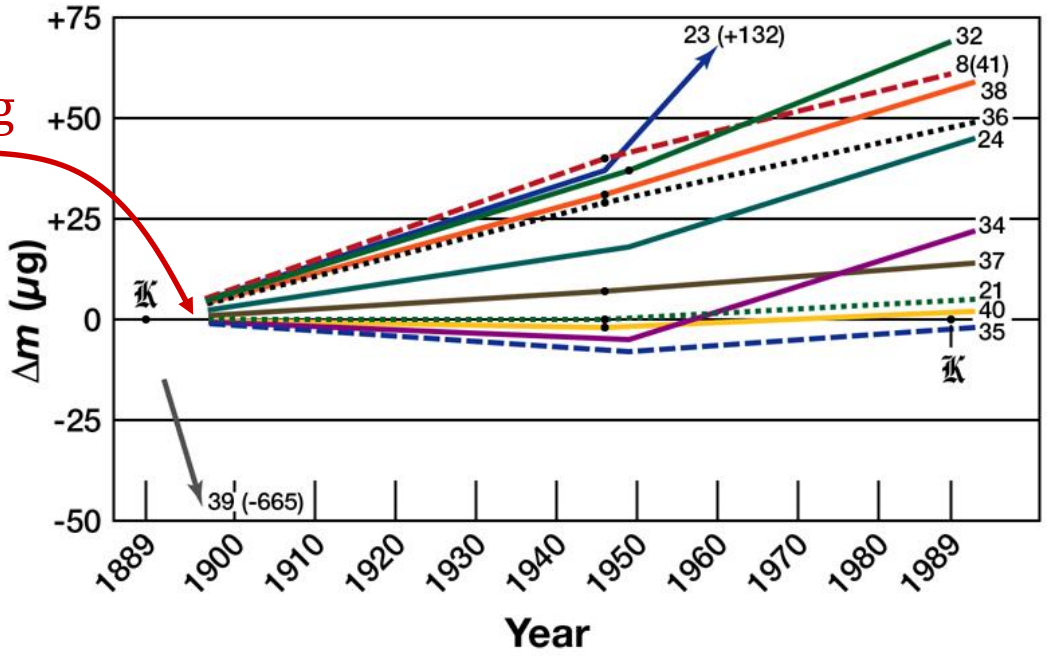
Cylindre de 4 cm de hauteur et 4 cm de diamètre (alliage platine-iridium)



Prototype international du kilogramme (1889)

$\mathcal{K} = 1\text{kg}$

Dérive d'environ 50  $\mu\text{g}$  par rapport au  $\mathcal{K}$



La  est liée au  $\mathcal{K}$

$M(^{12}\text{C}) = 0,012 \text{ kg/mol}$

➔ Dérive potentielle du kilogramme et de la mole au niveau de  $5 \cdot 10^{-8}$





# Pourquoi redéfinir l'ampère ?

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ NA}^{-2}$$



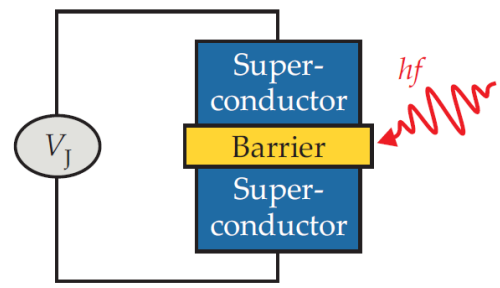
Balance de l'ampère  
(incertitude relative  $\approx 10^{-6}$ )

La définition de l'ampère n'est plus utilisée en pratique depuis plusieurs décennies !



Mise en pratique avec des étalons quantiques (incertitude relative  $\approx 10^{-9}$ )

## ○ L'effet Josephson



Constante de Josephson

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

Fréquence MW  
1, 2, 3...

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

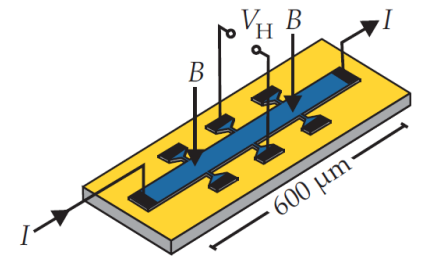
$$K_j = \frac{2e}{h}$$

## ○ L'effet Hall quantique

Constante de Von Klitzing

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

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



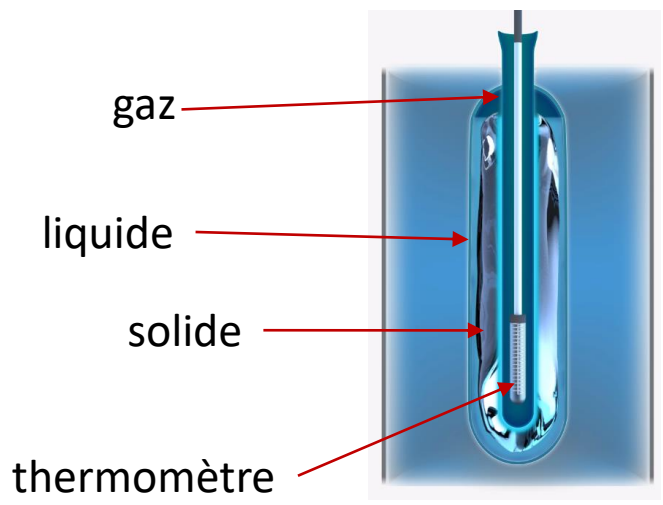
$$\frac{V_H}{I} = R_H = \frac{R_K}{n'}$$

1, 2, 3...



# Pourquoi redéfinir le kelvin ?

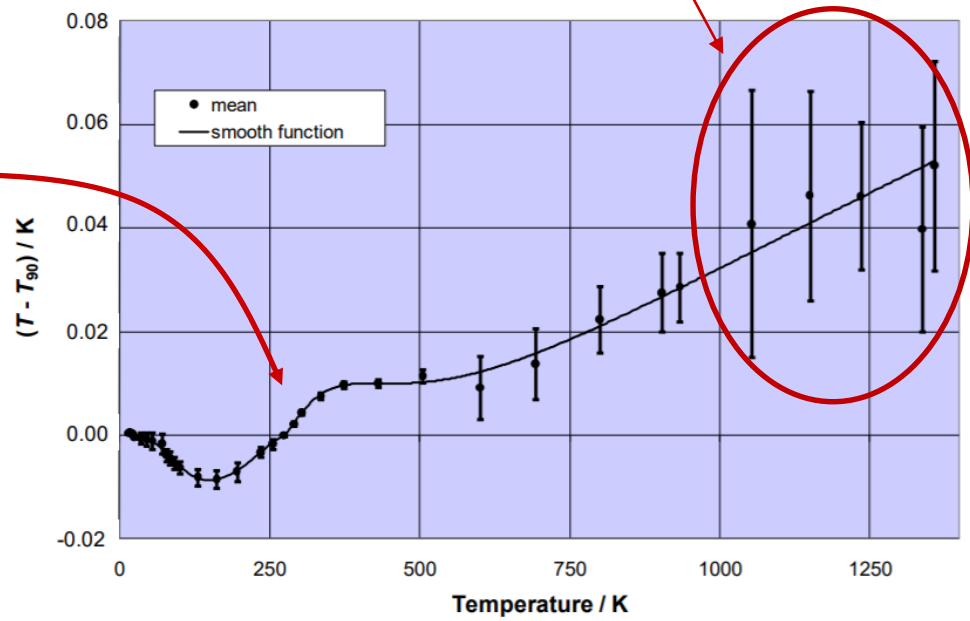
$$T_{TPW} = 273,16 \text{ K}$$



incertitude relative  $\approx 0,2 \times 10^{-6}$

La composition isotopique de l'eau :  
eau océanique moyenne normalisée de Vienne (VSMOW)

Incertainude relative  $\approx 25 \times 10^{-6}$



Point de fusion : Al  $\approx 933 \text{ K}$   
 Ag  $\approx 1235 \text{ K}$   
 Au  $\approx 1337 \text{ K}$



Amélioration des étalonnages et des incertitudes des mesures



# Et la seconde, le mètre et la candela !

$$Q_{const} = \{Q_{const}\} \times [Q_{const}]$$

Donnée par la nature,  
indépendante du  
temps et de l'espace

Fixée à une valeur  
numérique exacte



3 unités déjà définies par des constantes de la nature :

$Q_{const}$	$\{Q_{const}\}$	$[Q_{const}]$
$\Delta\nu_{Cs}$	9 192 631 770	Hz
$c$	299 792 458	m/s
$K_{cd}$	683	lm/W

- seconde
- mètre
- candela = lumen/stéradian





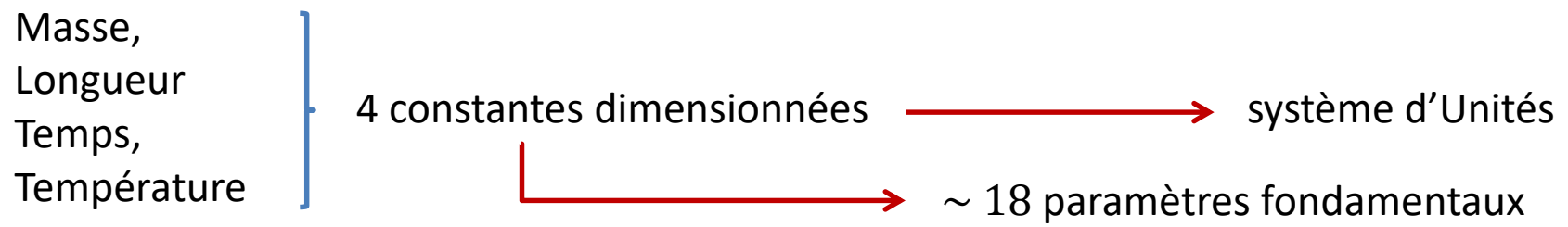
# Un nouveau système d'unités : comment ?

## ○ Constantes et paramètres fondamentaux

~22 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: 0-1-2-3-4 ?



Infiniment grand

- $G$**  Mécanique Newtonienne
- $c$**  Relativité restreinte
- $h$**  Mécanique quantique
- $k_B$**  Thermodynamique

- Relativité générale
  - Electrodynamique quantique
  - Thermodynamique statistique
- Théorie du tout

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: 0-1-2-3-4 ?



## ○ Le système de Planck (1906)

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

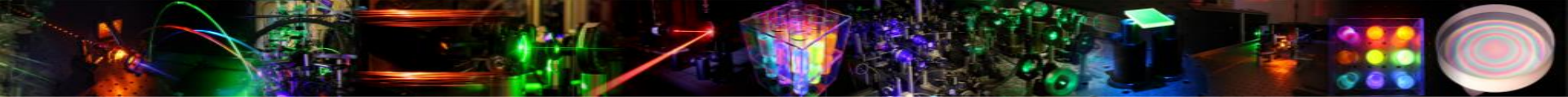
$$t_p = \left(\frac{Gh}{c^5}\right)^{1/2} = 1,35 \times 10^{-43}s$$

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

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



Planck (1918)



# Un nouveau système d'unités : comment ?

## ○ Le choix des constantes

- 1874 : Système de Stoney ( $c, G, e$ )
- 1906 : Système de Planck ( $c, G, h, k$ )
- 1948 : L'ampère est défini en fixant la valeur de la perméabilité du vide  $\mu_0$  (9e CGPM)
- 1983 : Le mètre est redéfini en fixant la vitesse de la lumière dans la vide  $c$  (17e CGPM)

} Propositions théoriques

## ○ Pourquoi $h, e, k$ et $N_A$ ?

- S'expriment en fonction des unités que l'on cherche à définir
- Invariants de la nature (indépendants  $(x, y, z, t)$  à mieux que  $10^{-16}$ ) à caractère universel
- Mesurées avec une très faible incertitude dans l'ancien SI
- Permettent une mise en pratique des unités

Ex :  $h$

J.s ( $\text{Kgm}^2\text{s}^{-1}$ )

constante de la mécanique quantique

mesurée à mieux que 0,1 ppm

liée au  $\mathcal{K}$  par l'expérience de la balance de Watt





# La mesure des constantes

- Mesure de  $h$  ( $m^2.kg.s^{-1}$ ) : le projet de la balance de Watt

$$h = \left( \frac{Cte}{4} \right) \frac{f_1 f_2}{g v} m$$

- Mesure de  $N_A$  ( $mol^{-1}$ ) : le projet Avogadro

$$N_A = \frac{8V M_{Si}}{a_0^3 m}$$

- Mesure de  $e$  (A.s) :

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

- Mesure de  $k$  ( $m^2.kg.s^{-2} .K^{-1}$ ) :

le projet Boltzmann

$$kT \left\{ \begin{array}{l} \langle V^2 \rangle \\ \Delta v_D \\ V_{son}^2 \\ \epsilon_r \end{array} \right.$$

Moment magnétique anormal de l'électron (Piège de Penning)

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

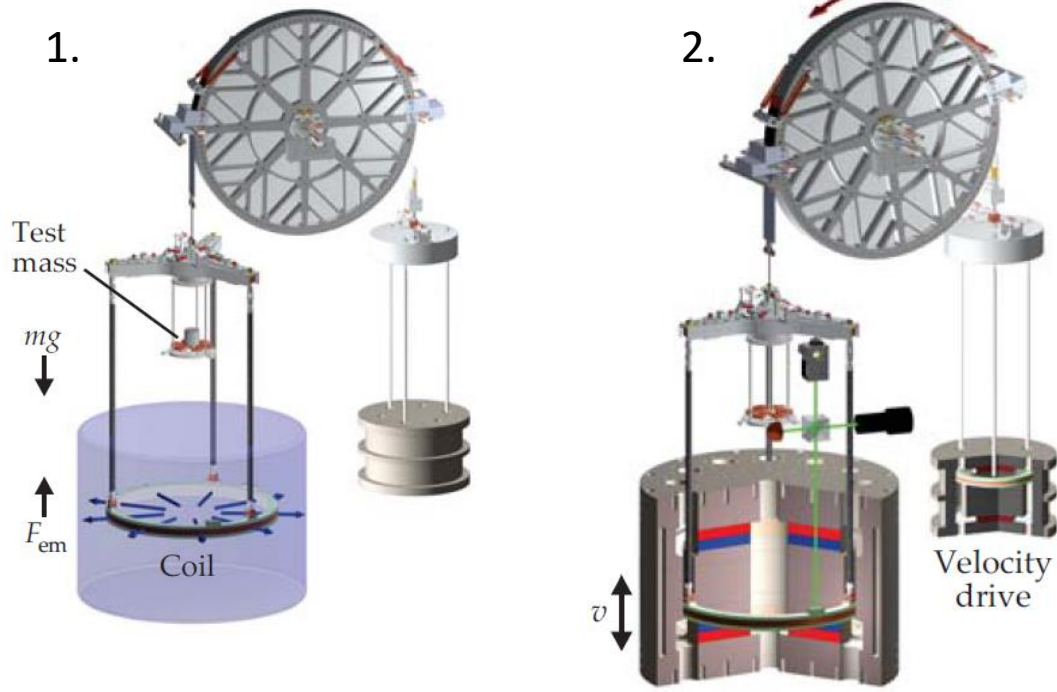
Spectroscopie H et D

Symbole	Nom	Incertitude relative (CODATA 2014)
$\alpha$	constante de structure fine (sans unité)	$2,3 \times 10^{-10}$
$R_\infty$	constante de Rydberg	$5,9 \times 10^{-12}$
$A_r(e)$	masse atomique relative de l'électron	$2,9 \times 10^{-11}$
$M_u$	constante de masse molaire	exacte
$c$	Vitesse lumière	exacte
$\mu_0$	Perméabilité magnétique du vide	exacte



# Le projet de la balance de Watt

## ○ La balance du Watt



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

$$V_2 = vBl$$

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

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

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

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



Effet Hall quantique + effet Josephson



# Le projet Avogadro

## ○ La sphère de silicium $^{28}\text{Si}$

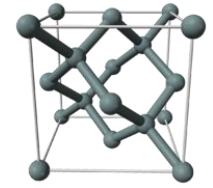
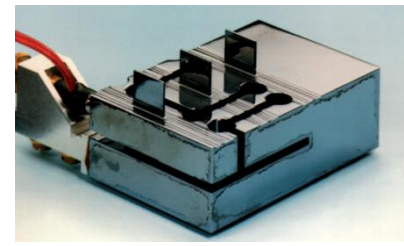
Mesure abondance isotopique +  
lien masse  $^{12}\text{C}$  (piège de Penning)

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

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

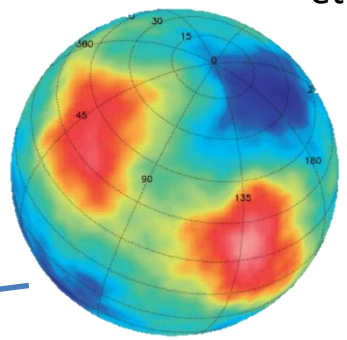
$$\frac{m_s}{V_s} = \rho_0$$

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



Monocristal enrichi  $^{28}\text{Si}$

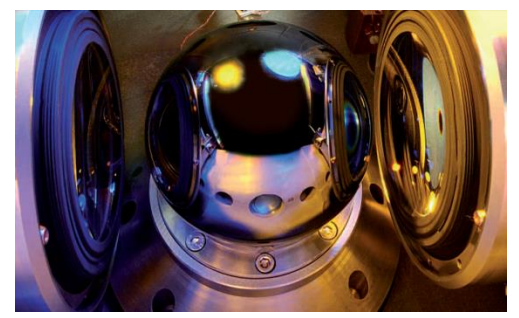
Interférométrie X et optique



400 000 diamètres mesurés (+/- 40 nm)



Pesée de la sphère  
~ 5 kg



Interférométrie optique





# Le projet Boltzmann

## ○ Mesure acoustique



NPL (UK)

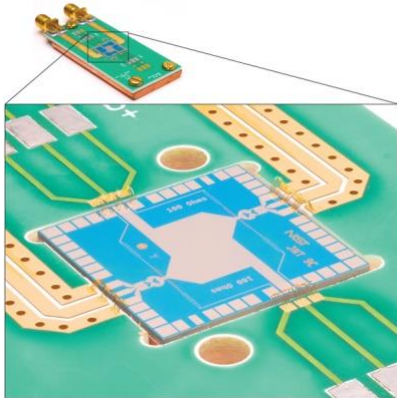
Fréquence de résonance

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

Coefficients du viriel

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

## ○ Mesure du bruit Johnson



NIST (USA)

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

formule de Nyquist

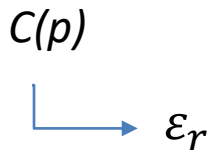


# Le projet Boltzmann

## ○ Mesure de la variation de la capacité d'un condensateur



PTB Berlin (Allemagne)



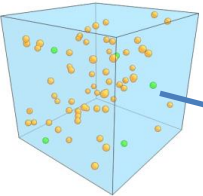
Polarisabilité molaire

Polarisabilité statique (calcul *ab initio* dans He)

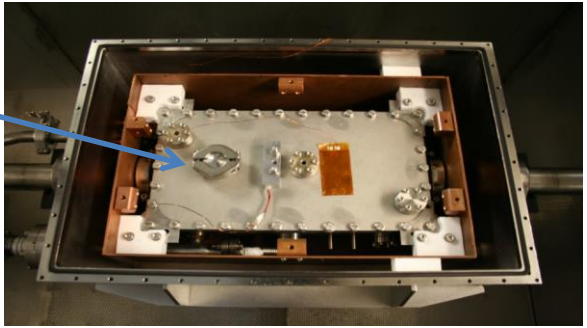
$$\frac{A_\epsilon}{R} = \frac{\alpha_0}{3\epsilon_0 k}$$

Exacte

## ○ Mesure de l'élargissement Doppler



Crédit: Sean Kelley/NIST



LPL (France)

Largeur Doppler

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

Exacte

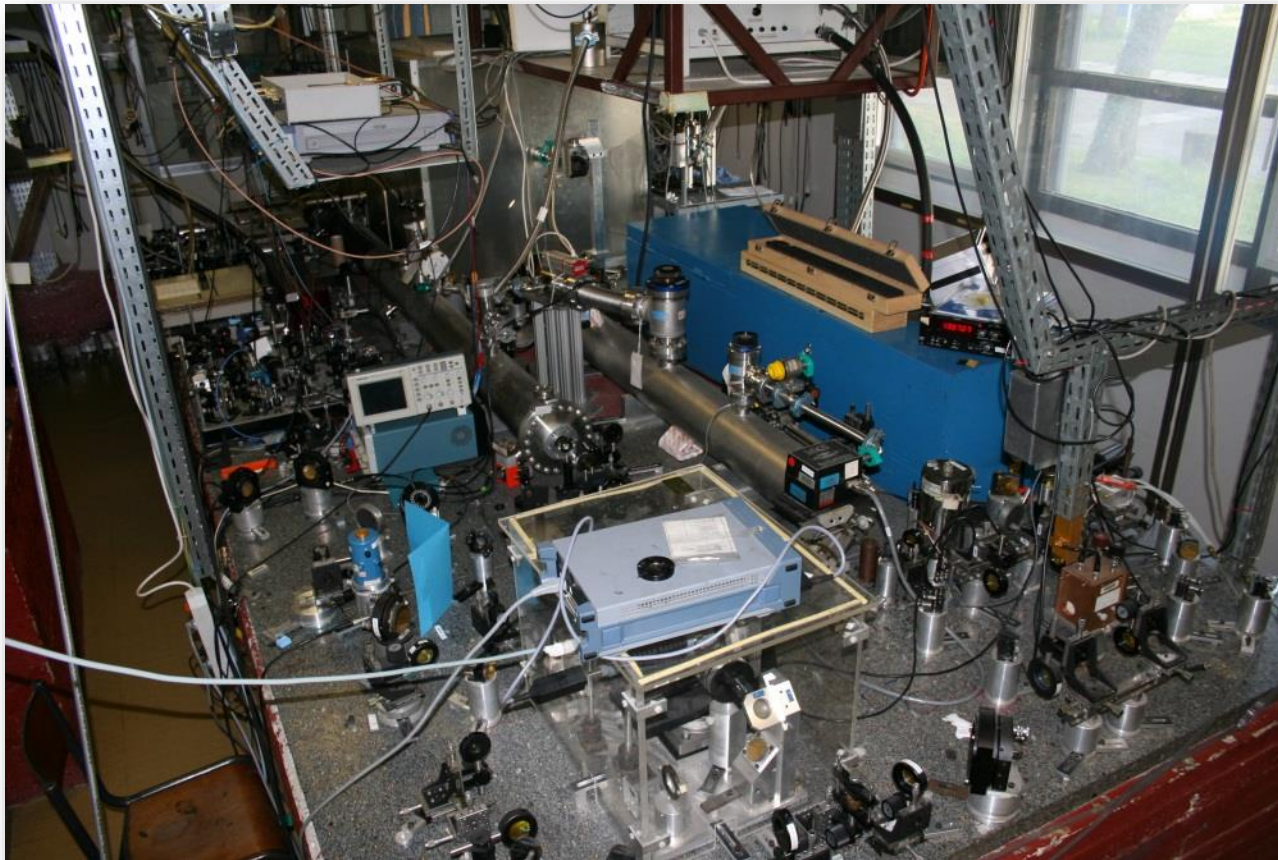
Fréquence De résonance



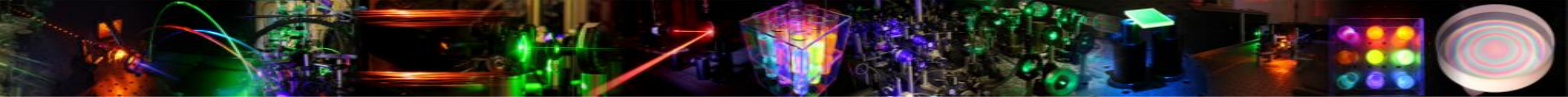


# Mesure de l'élargissement Doppler

L'expérience du Laboratoire de Physique des Lasers







# Mesure de l'élargissement Doppler

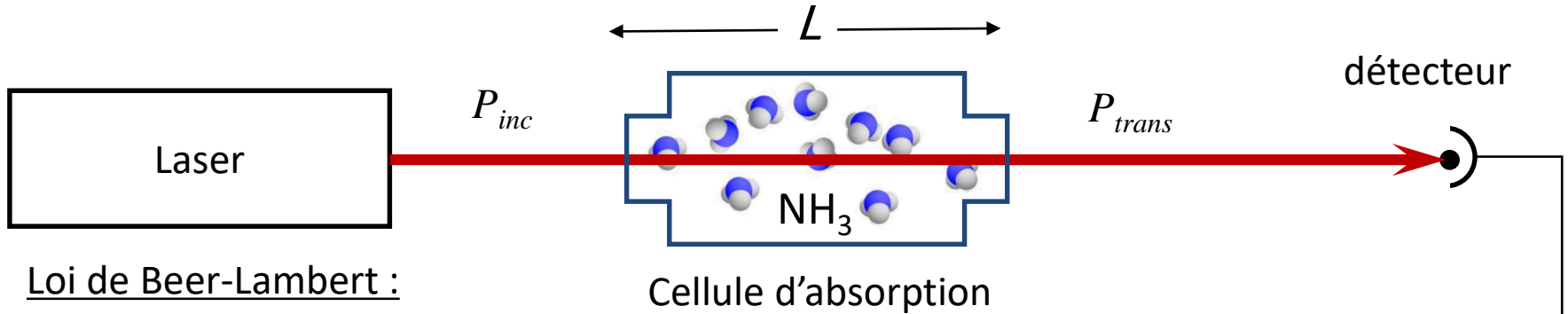
L'expérience du Laboratoire de Physique des Lasers





# Mesure de l'élargissement Doppler

## ○ Principe de la mesure par spectroscopie laser

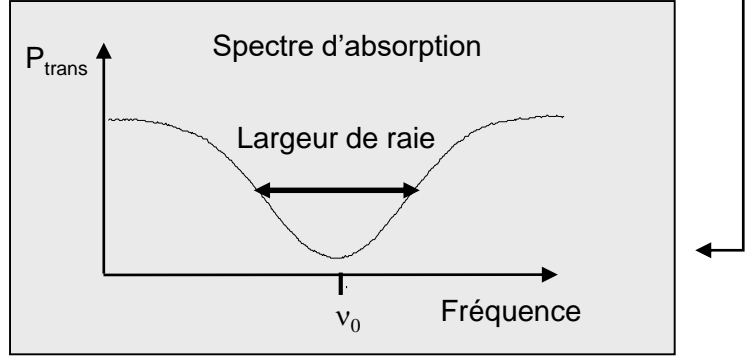


Loi de Beer-Lambert :

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

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

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





# Les constantes dans l'ancien 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*

**OPEN ACCESS**  
 IOP Publishing | Bureau International des Poids et Mesures  
 Metrologia 55 (2018) 125–146  
<https://doi.org/10.1088/1681-7575/aa99bc>

### Data and analysis for the CODATA 2017 special fundamental constants adjustment\*

Peter J Mohr, David B Newell, Barry N Taylor and Eite Tiesinga  
 National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD 20899-8420, United States of America  
 E-mail: [mohr@nist.gov](mailto:mohr@nist.gov), [dnewell@nist.gov](mailto:dnewell@nist.gov), [barry.taylor@nist.gov](mailto:barry.taylor@nist.gov) and [eite.tiesinga@nist.gov](mailto:eite.tiesinga@nist.gov)

Received 2 August 2017, revised 8 November 2017  
 Accepted for publication 10 November 2017  
 Published 24 January 2018

CrossMark

**Abstract**  
 The special least-squares adjustment of the values of the fundamental constants, carried out by the Committee on Data for Science and Technology (CODATA) in the summer of 2017, is described in detail. It is based on all relevant data available by 1 July 2017. The purpose of this adjustment is to determine the numerical values of the Planck constant  $h$ , elementary charge  $e$ , Boltzmann constant  $k$ , and Avogadro constant  $N_A$  for the revised SI expected to be established by the 26th General Conference on Weights and Measures when it convenes on 13–16 November 2018.



The NIST Reference on Constants, Units, and Uncertainty

### Fundamental Physical Constants

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	$5.7 \times 10^{-7}$
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://www.codata.org/>

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





# Les constantes dans l'ancien SI

## ○ Committee on Data for Science and Technology

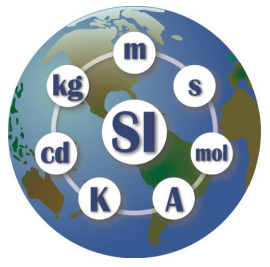


**OPEN ACCESS**  
 IOP Publishing | Bureau International des Poids et Mesures  
 Metrologia 55 (2018) 125–146  
<https://doi.org/10.1088/1681-7575/aa99bc>

**Data and analysis for the CODATA 2017 special fundamental constants adjustment\***

Peter J Mohr, David B Newell, Barry N Taylor and Eite Tiesinga

Quantity	Value	Rel. stand. uncert $u_r$
$h$	$6.626\,070\,150(69) \times 10^{-34} \text{ J s}$	$1.0 \times 10^{-8}$
$e$	$1.602\,176\,6341(83) \times 10^{-19} \text{ C}$	$5.2 \times 10^{-9}$
$k$	$1.380\,649\,03(51) \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$	$3.7 \times 10^{-7}$
$N_A$	$6.022\,140\,758(62) \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$	$1.0 \times 10^{-8}$



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



# Les constantes du nouveau SI

## ○ Committee on Data for Science and Technology



**OPEN ACCESS**  
 IOP Publishing | Bureau International des Poids et Mesures  
 Metrologia 55 (2018) L13–L16  
 https://doi.org/10.1088/1681-7575/aa950a

Short Communication

**The CODATA 2017 values of  $h$ ,  $e$ ,  $k$ , and  $N_A$  for the revision of the SI**

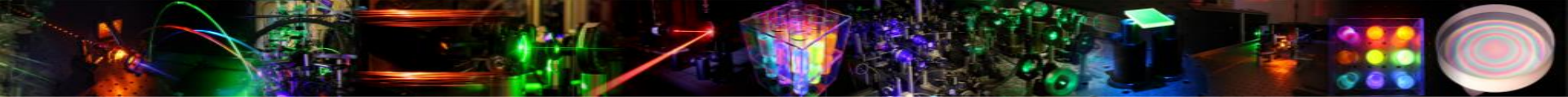
D B Newell<sup>1</sup>, F Cabiati, J Fischer, K Fujii, S G Karshenboim, H S Margolis<sup>2</sup>, E de Mirandés, P J Mohr, F Nez, K Pachucki, T J Quinn, B N Taylor, M Wang, B M Wood and Z Zhang

Quantity	Value
$h$	$6.626\,070\,15 \times 10^{-34} \text{ J s}$
$e$	$1.602\,176\,634 \times 10^{-19} \text{ C}$
$k$	$1.380\,649 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$
$N_A$	$6.022\,140\,76 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$

exactes



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



# Conférence Générale des Poids et Mesures



## Sur la révision du Système international d'unités (SI)

### Résolution 1

La Conférence générale des poids et mesures (CGPM), à sa 26<sup>e</sup> réunion, considérant

- ♦ qu'il est essentiel de disposer d'un Système international d'unités (SI) uniforme et accessible dans le monde entier, pour le commerce international, l'industrie de haute technologie, la santé humaine et la sécurité, la protection de l'environnement, les études sur l'évolution du climat, ainsi que la science fondamentale qui étaye tous ces domaines,
- ♦ que les unités du SI doivent être stables sur le long terme, auto-cohérentes et réalisables dans la pratique, en étant fondées sur la description théorique actuelle de la nature, au plus haut niveau,
- ♦ qu'une révision du SI visant à satisfaire ces exigences a été proposée dans la Résolution 1 adoptée à l'unanimité par la CGPM à sa 24<sup>e</sup> réunion (2011), qui expose en détail une nouvelle façon de définir le SI à partir d'un ensemble de sept constantes, choisies parmi les constantes fondamentales de la physique et d'autres constantes de la nature, à partir desquelles les définitions des sept unités de base sont déduites,
- ♦ que les conditions requises par la CGPM à sa 24<sup>e</sup> réunion (2011), confirmées à sa 25<sup>e</sup> réunion (2014), pour procéder à l'adoption d'une telle révision du SI sont désormais remplies,

décide qu'à compter du 20 mai 2019, le Système international d'unités, le SI, est 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,  $N_{\text{A}}$ , est égale à  $6,022\,140\,76 \times 10^{23}$  mol<sup>-1</sup>,
- ♦ l'efficacité lumineuse d'un rayonnement monochromatique de fréquence  $540 \times 10^{12}$  Hz,  $K_{\text{cd}}$ , est égale à 683 lm/W,





# Conférence Générale des Poids et Mesures

décide qu'à compter du 20 mai 2019, le Système international d'unités, le SI, est 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  $6,022\,140\,76 \times 10^{23}$  mol<sup>-1</sup>,
- ♦ l'efficacité lumineuse d'un rayonnement monochromatique de fréquence  $540 \times 10^{12}$  Hz,  $K_{\text{cd}}$ , est égale à 683 lm/W,

où 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  $\text{Hz} = \text{s}^{-1}$ ,  $\text{J} = \text{kg m}^2 \text{s}^{-2}$ ,  $\text{C} = \text{A s}$ ,  $\text{lm} = \text{cd m}^2 \text{m}^{-2} = \text{cd sr}$ , et  $\text{W} = \text{kg m}^2 \text{s}^{-3}$ .

- ♦ 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<sup>-1</sup>,
- ♦ l'efficacité lumineuse d'un rayonnement monochromatique de fréquence  $540 \times 10^{12}$  Hz,  $K_{\text{cd}}$ , est égale à 683 lm/W,

d'unités (SI)

réunion,

d'unités (SI) uniforme  
ernational, l'industrie  
té, la protection de  
ainsi que la science

e, auto-cohérentes et  
escription théorique

été proposée dans la  
e réunion (2011), qui  
tir d'un ensemble de  
ales de la physique et  
les définitions des

2011), confirmées à sa  
le révision du SI sont

l d'unités, le SI, est le

amental de l'atome de  
z,  
158 m/s,  
s,  
,



# Une interprétation des unités du nouveau SI

Unité	Constantes	Définition
seconde (s)	$\left[ \frac{1}{\Delta\nu_{Cs}} \right]$	$1 \text{ s} = \{\Delta\nu_{Cs}\} \frac{1}{\Delta\nu_{Cs}} = 9\,192\,631\,770 \Delta t_{Cs}$
mètre (m)	$\left[ \frac{c}{\Delta\nu_{Cs}} \right]$	$1 \text{ m} = \left( \frac{\{\Delta\nu_{Cs}\}}{\{c\}} \right) \frac{c}{\Delta\nu_{Cs}} \approx 30,66 \Delta t_{Cs} \text{ lumière}$
kilogramme (kg)	$\left[ \frac{\Delta\nu_{Cs} h}{c^2} \right]$	$1 \text{ kg} = \left( \frac{\{c\}^2}{\{h\}\{\Delta\nu_{Cs}\}} \right) \frac{\Delta\nu_{Cs} h}{c^2} \approx 1,47 \times 10^{40} \Delta m_{Cs}$
ampère (A)	$[\Delta\nu_{Cs} e]$	$1 \text{ A} = \left( \frac{1}{\{\Delta\nu_{Cs}\}\{e\}} \right) \Delta\nu_{Cs} e \approx 6,79 \times 10^8 \frac{e}{\Delta t_{Cs}}$
kelvin (K)	$\left[ \frac{\Delta\nu_{Cs} h}{k} \right]$	$1 \text{ K} = \left( \frac{\{k\}}{\{h\}\{\Delta\nu_{Cs}\}} \right) \frac{\Delta\nu_{Cs} h}{k} \approx 2,27 \Delta T_{Cs}$
mole (mol)	$\left[ \frac{1}{N_A} \right]$	$1 \text{ mol} = \{N_A\} \frac{1}{N_A} \approx 6,02 \times 10^{23} \text{ entités}$
candela (cd)	$[(\Delta\nu_{Cs})^2 h K_{cd}]$	$1 \text{ cd} = \left( \frac{1}{\{K_{cd}\}\{h\}\{\Delta\nu_{Cs}\}^2} \right) (\Delta\nu_{Cs})^2 h K_{cd} \approx 2,61 \times 10^{10} \frac{\Delta E_{Cs}}{\Delta t_{Cs}} \text{ sr}^{-1}$





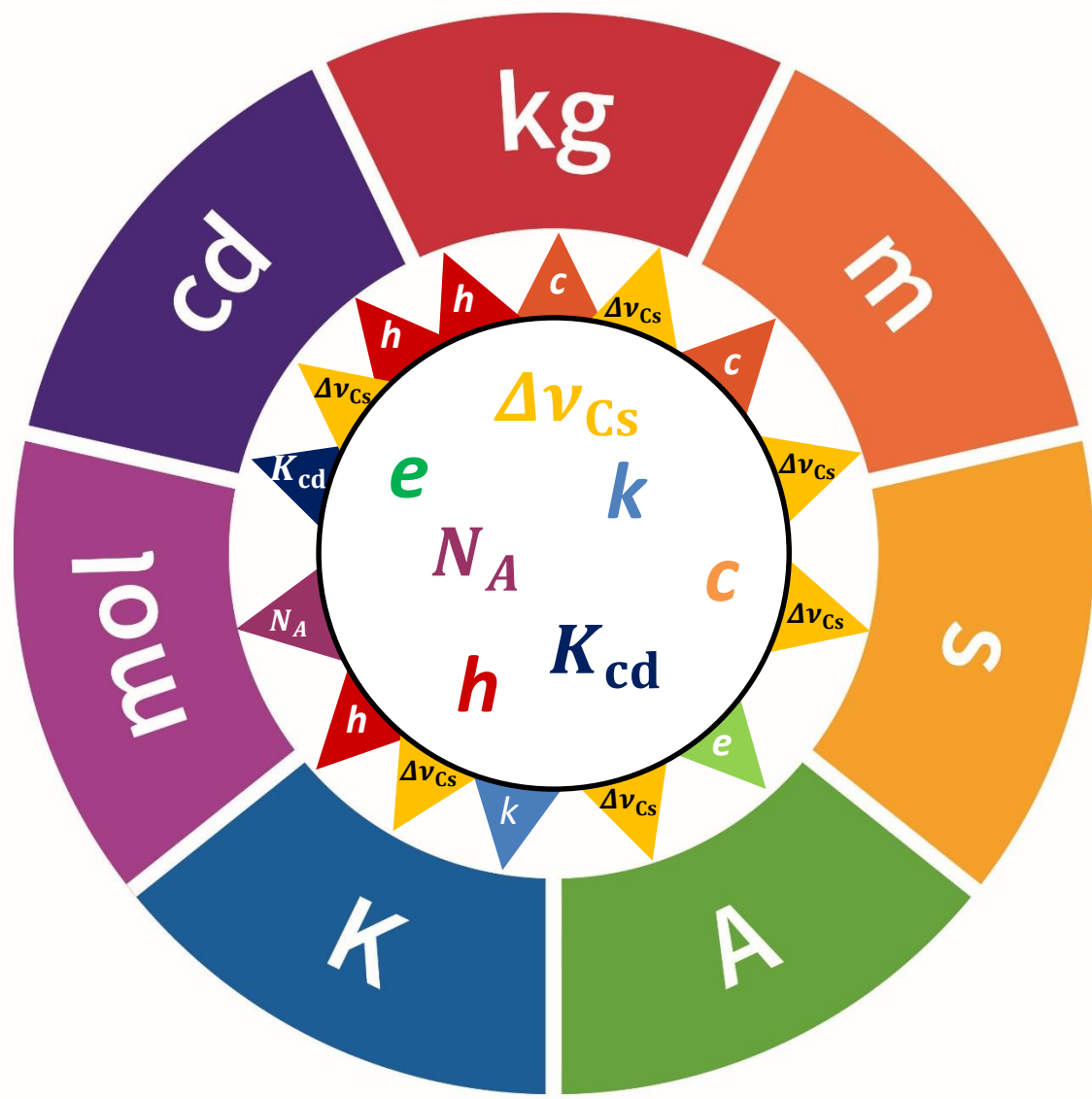
# Une interprétation des unités du nouveau SI







# Une interprétation des unités du nouveau SI





# La mise en pratique du nouveau SI

Source lumineuse ou détecteur ( $\Delta\nu_{Cs}$ ,  $h$ ,  $c$ ,  $K_{cd}$ ) :

$$Q_{photo} = K_{cd} \times Q_{radio}$$

Balance du Watt ( $\Delta\nu_{Cs}$ ,  $c$ ,  $h$ ) :  $m = h \left( \frac{n'n_1n_2}{4} \right) \frac{f_1f_2}{gv}$

Interféromètre de Michelson ( $\Delta\nu_{Cs}$ ,  $c$ ) :

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

Balance ( $\Delta\nu_{Cs}$ ,  $c$ ,  $h$ ,  $N_A$ ) :

$$n = \frac{1}{N_A} \frac{m}{m_{at}}$$

$$p = m_{at}v = \frac{h}{\lambda}$$

Horloge à Cs ( $\Delta\nu_{Cs}$ ) :  $t = \frac{1}{\Delta\nu_{Cs}}$

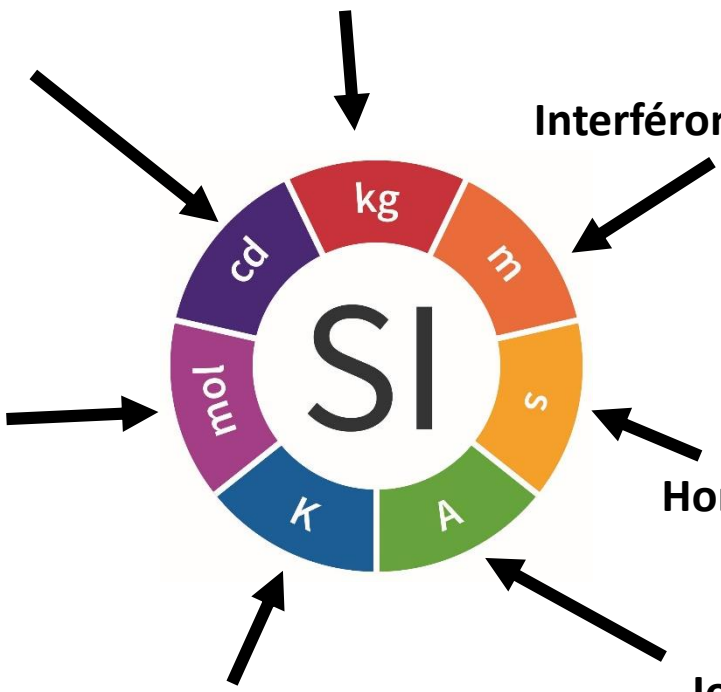
Jonction Josephson + résistance Hall ( $\Delta\nu_{Cs}$ ,  $e$ ) :

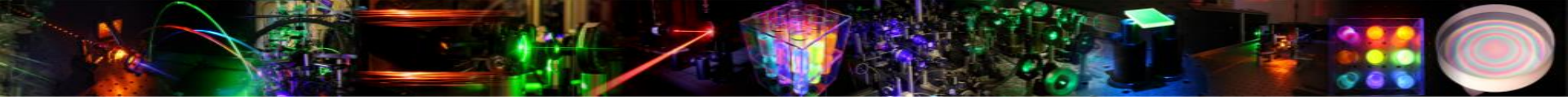
$$I_j = nn' \frac{e}{2} f$$

Thermomètre acoustique/Doppler...

( $k$ ,  $h$ ,  $\Delta\nu_{Cs}$ ,  $c$ ) :

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





# La mise en pratique du nouveau SI

Lampe étalon d'intensité lumineuse au LNE (France)



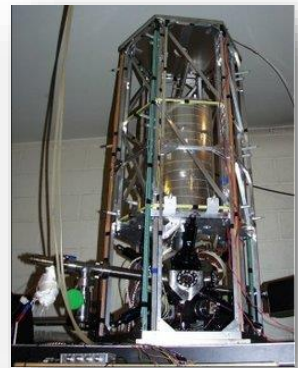
Balance du Watt NIST (USA)



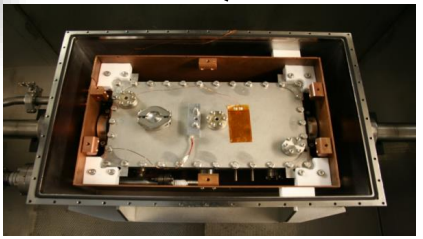
Laser femtoseconde du LNE utilisé pour la mise en pratique du mètre



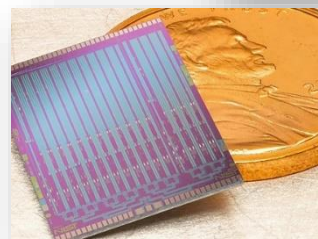
(CSIRO)



Fontaine à césium du LNE-Syrte (France)



Thermomètre Doppler du LPL (France)



Circuit Josephson NIST

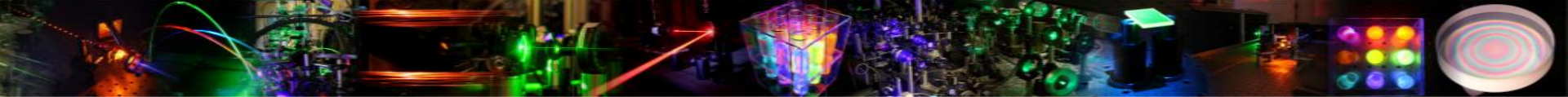






# La mise en pratique du nouveau SI





# Pour conclure

## ○ Ce que n'est pas le nouveau SI

- Un système reposant sur 7 constantes fondamentales de la physique
- Un système dans lequel chaque unité est définie par une unique constante
- Le système d'unités ultime et définitif
- Un système composé de 7 unités de base permettant de définir les unités dérivées
- Un système très simple donc facile à diffuser auprès du grand public

## ○ *Le nouveau SI est plutôt*

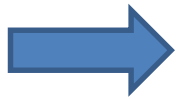
- Le meilleur (ou moins mauvais) compromis entre physique fondamentale (physique quantique et relativiste) et métrologie appliquée
- Une étape majeure dans l'histoire du SI
- Un système qui sera encore amené à évoluer dans les prochaines années pour redéfinir la seconde
- Une réelle avancée pour l'amélioration des futures mesures





# Mise en pratique du SI en classe

- Fabriquons un instrument de mesure

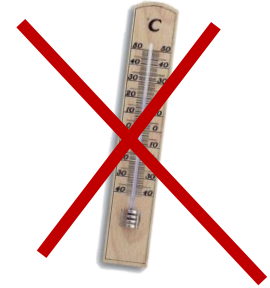
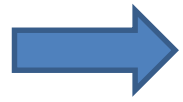






# Mise en pratique du SI en classe

## ○ Fabriquons un instrument de mesure





# Mise en pratique du SI en classe

## ○ Thermométrie laser

Loi de Beer-Lambert :

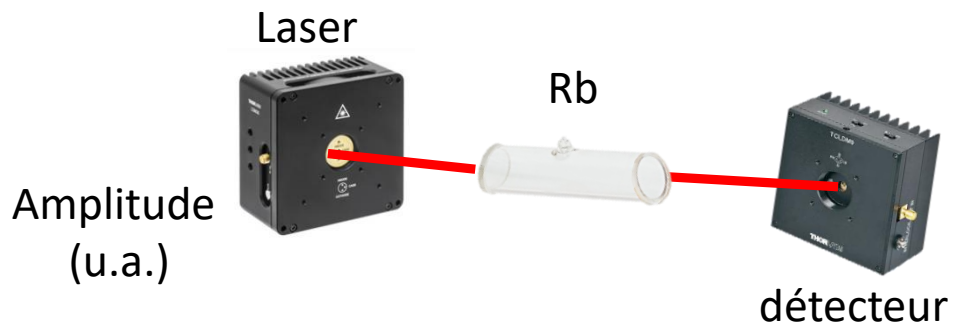
- élargissement Doppler
- élargissement collisionnel

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

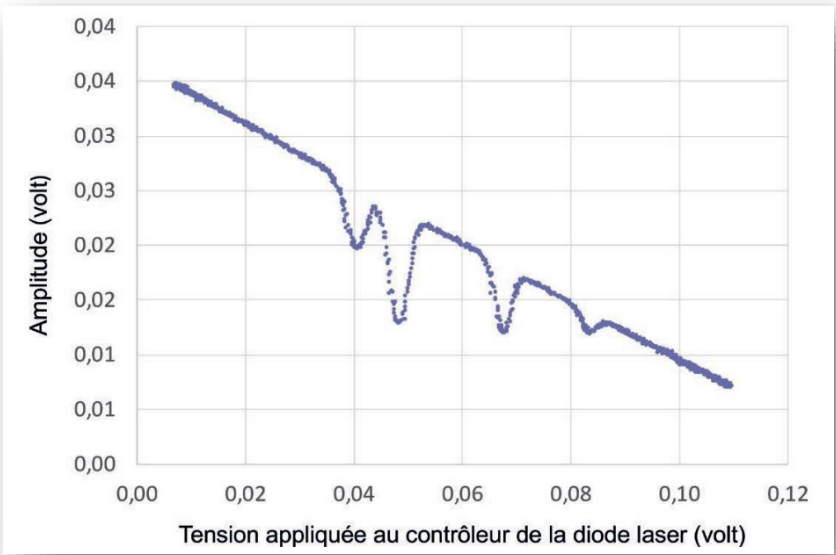


$$T = \frac{mc^2}{2k} \left( \frac{\Delta\nu_D}{\nu_0} \right)$$

Mesure à mieux que 5%



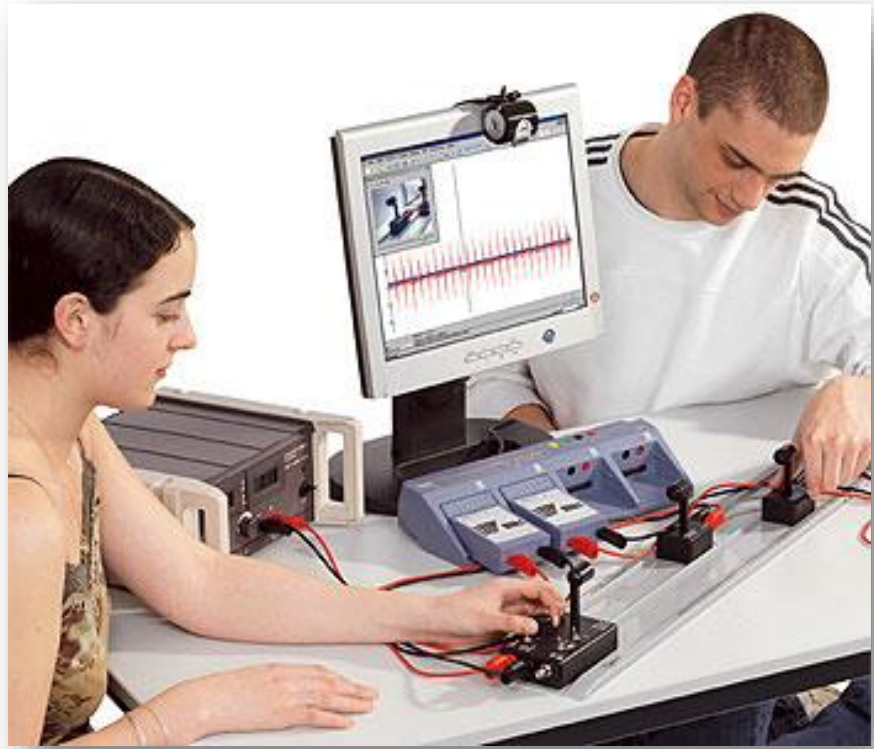
Spectre d'absorption des raies D<sub>2</sub> des deux isotopes du rubidium





# Mise en pratique du SI en classe

## ○ Thermométrie acoustique



$$T = \frac{mv^2}{\gamma k} \approx \frac{5mv(\lambda f)^2}{7k}$$

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} \approx \frac{7}{5}$$

*M* : masse moléculaire  
*T* : température  
*v* : vitesse du son

mesure de la vitesse du son

Mesure à mieux que 5%

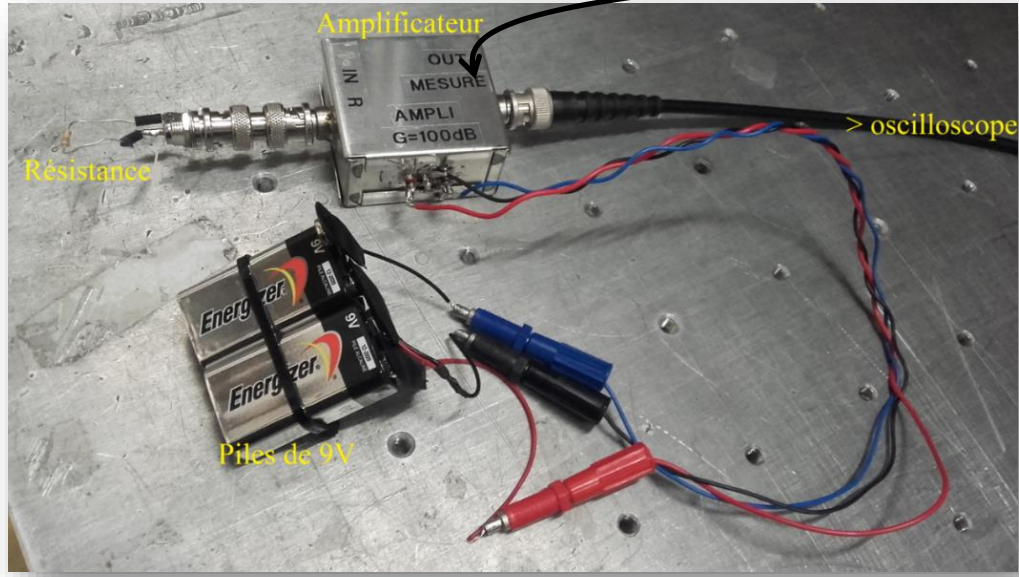
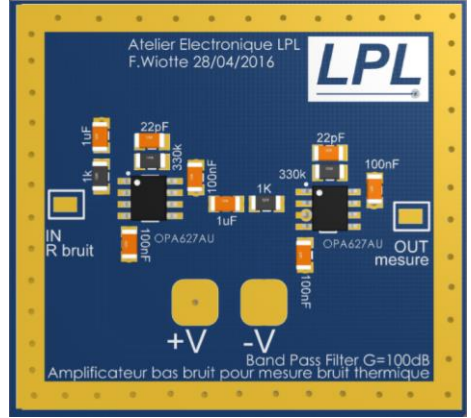
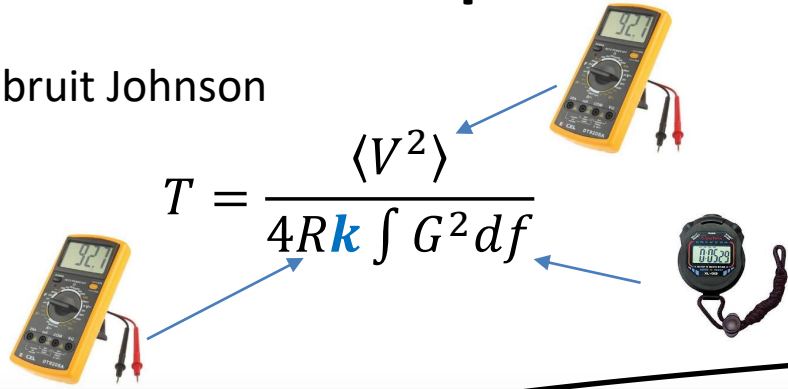




# Mise en pratique du SI en classe

## ○ Thermométrie électrique

Mesure du bruit Johnson



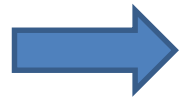
Amplificateur gain 100 dB, bande passante 5 KHz, centré à 1 KHz

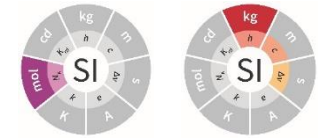
Mesure à mieux que 5%



# Mise en pratique du SI en classe

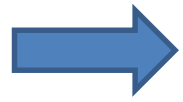
○ Fabriquons un instrument de mesure



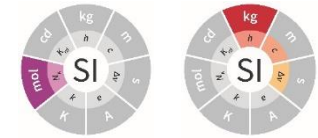


# Mise en pratique du SI en classe

## ○ Fabriquons un instrument de mesure





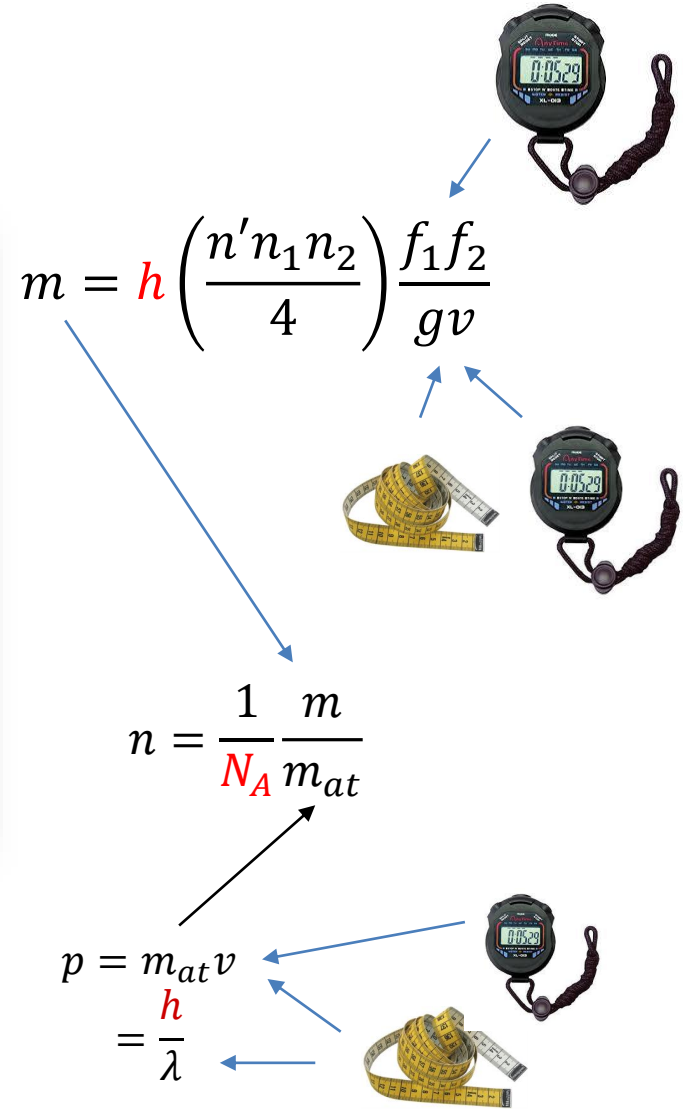


# Mise en pratique du SI en classe

## ○ Balance



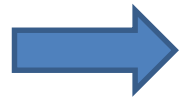
[https://www.youtube.com/watch?v=oST\\_krdqLPQ](https://www.youtube.com/watch?v=oST_krdqLPQ)





# Mise en pratique du SI en classe

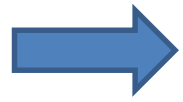
○ Fabriquons un instrument de mesure





# Mise en pratique du SI en classe

## ○ Fabriquons un instrument de mesure

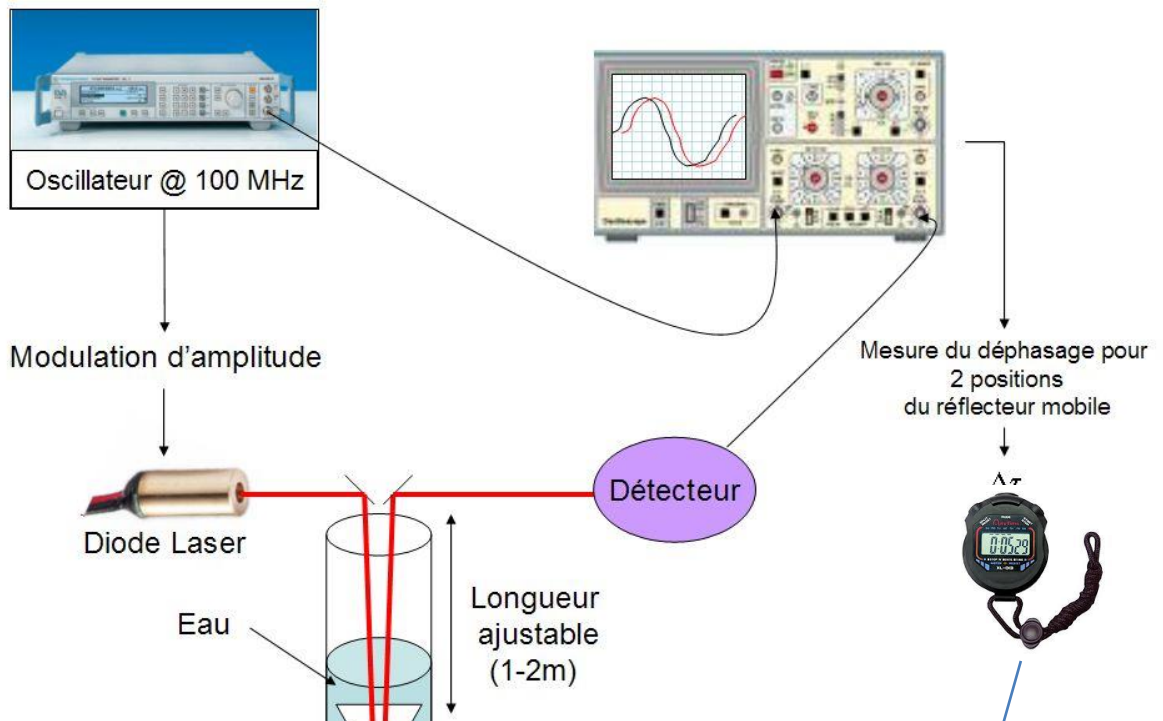






# Mise en pratique du SI en classe

## ○ Télémétrie laser



$$d = \frac{c}{n} \times t$$



Mesure à mieux que 5%



# Mise en pratique du SI en classe

## ○ Interférométrie laser



Réalisation du mètre

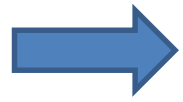
$$\lambda = c \times t$$





# Mise en pratique du SI en classe

## ○ Fabriquons un instrument de mesure







# Mise en pratique du SI en classe

## ○ Interférométrie laser



Réalisation de la seconde

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





# La mise en pratique du nouveau SI

## UNITÉS : MODE D'EMPLOI

SEPT MODES D'EMPLOI POUR COMPRENDRE LA NOUVELLE FAÇON DE DÉFINIR LES UNITÉS EN PHYSIQUE.

SECONDE  
MÈTRE  
KILOGRAMME  
MOLE  
KELVIN  
AMPÈRE  
CANDELA

En 2018, les physiciens ont décidé de définir les unités de base du Système International (SI) de manière plus précise et universelle. Plus bas, vous trouverez sept modes d'emploi pour comprendre la nouvelle façon de définir les unités en physique.

Retrouvez posters, cartes postales et images en libre accès sur [www.vulgarisation.fr](http://www.vulgarisation.fr)

UN PROJET RÉALISÉ PAR EPS, CENS ET UNIVERSITÉ. DESIGN GRAPHIQUE : M. J. BOBROFF

### LES NOUVELLES DÉFINITIONS DES UNITÉS EN PHYSIQUE : MODE D'EMPLOI

## LA SECONDE (s)

**1 JETER** LES MOYENS MÉTHODES

**2 FABRIQUER** À PARTIR DE ZÉRO

**3 PARTAGER**

### LES NOUVELLES DÉFINITIONS DES UNITÉS EN PHYSIQUE : MODE D'EMPLOI

## LE MÈTRE (m)

**1 JETER** LES MOYENS MÉTHODES

**2 FABRIQUER** À PARTIR DE ZÉRO

**3 PARTAGER**

### LES NOUVELLES DÉFINITIONS DES UNITÉS EN PHYSIQUE : MODE D'EMPLOI

## L'AMPÈRE (A)

**1 JETER** LES MOYENS MÉTHODES

**2 FABRIQUER** À PARTIR DE ZÉRO

**3 PARTAGER**

### LES NOUVELLES DÉFINITIONS DES UNITÉS EN PHYSIQUE : MODE D'EMPLOI

## LE KILOGRAMME (Kg)

**1 JETER** LES MOYENS MÉTHODES

**2 FABRIQUER** À PARTIR DE ZÉRO

**3 PARTAGER**

### LES NOUVELLES DÉFINITIONS DES UNITÉS EN PHYSIQUE : MODE D'EMPLOI

## LA MOLE (N)

**1 JETER** LES MOYENS MÉTHODES

**2 FABRIQUER** À PARTIR DE ZÉRO

**3 PARTAGER**

### LES NOUVELLES DÉFINITIONS DES UNITÉS EN PHYSIQUE : MODE D'EMPLOI

## LE KELVIN (K)

**1 JETER** LES MOYENS MÉTHODES

**2 FABRIQUER** À PARTIR DE ZÉRO

**3 PARTAGER**

### LES NOUVELLES DÉFINITIONS DES UNITÉS EN PHYSIQUE : MODE D'EMPLOI

## LA CANDELA (cd)

**1 JETER** LES MOYENS MÉTHODES

**2 FABRIQUER** À PARTIR DE ZÉRO

**3 PARTAGER**

J. Bobroff (LPS-Paris sud)

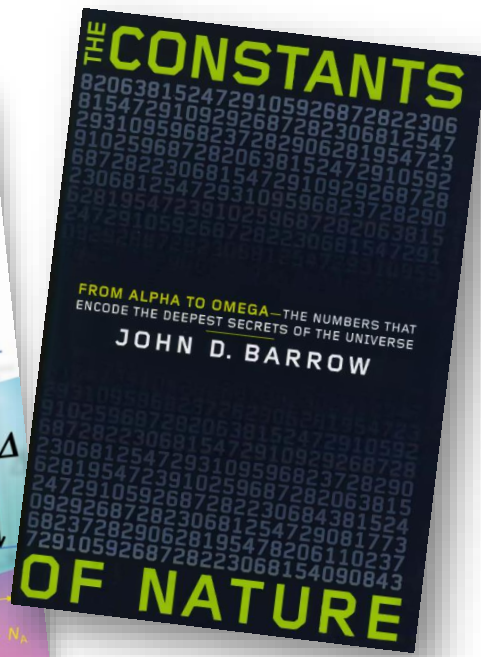
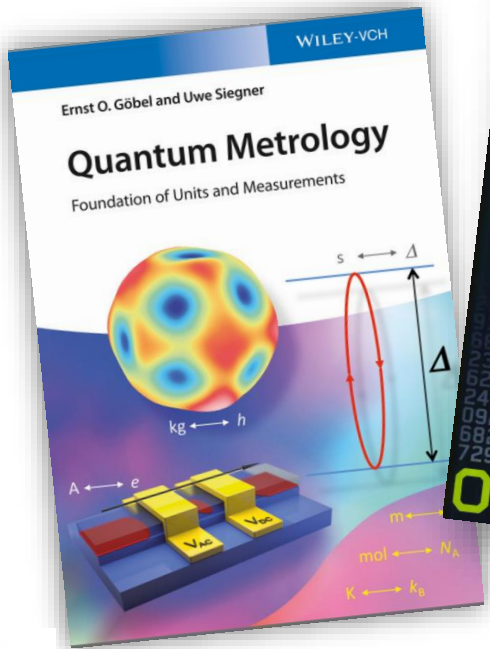






# Pour en savoir plus...

## ○ A lire



## ○ A voir

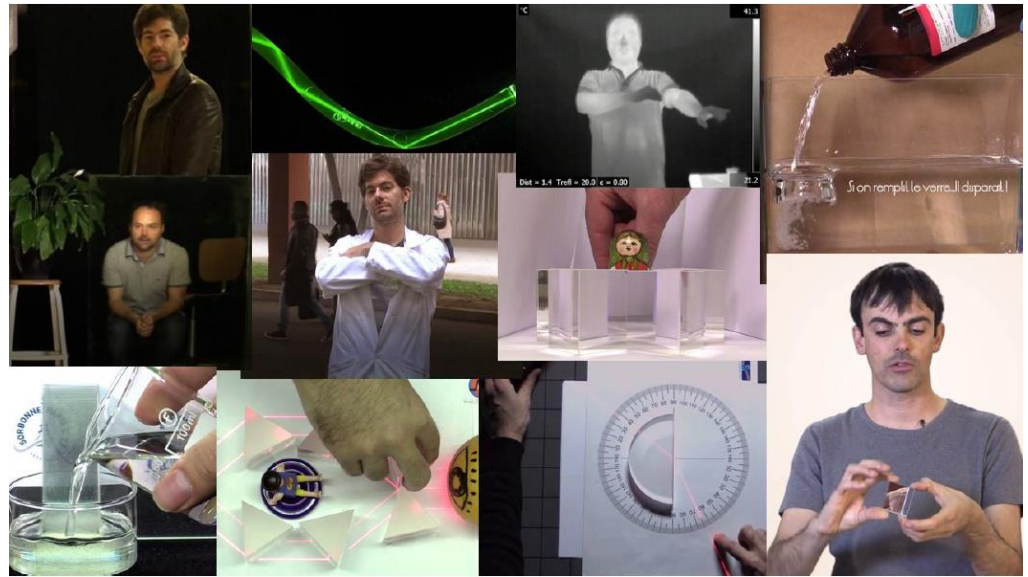






# Et pour finir...

## ○ Un MOOC pour vos élèves...



## MOOC

UNIVERSITÉ PARIS 13

### La Physique, vive[z] l'expérience !



**Un MOOC, c'est quoi ?**  
Un cours en ligne gratuit et ouvert à tous (Massive Open Online Course).

**De quoi parle ce MOOC ?**  
5 défis scientifiques permettant d'aborder de façon expérimentale et ludique l'optique, la mécanique, le magnétisme, l'électricité et la thermodynamique.

  
**L'invisibilité**

  
**La vision 3D**

  
**La lévitation**

  
**Le moteur écologique**

  
**La communication à vitesse lumière**

**Pour qui ?**

- Lycéens, étudiants, enseignants... Et toute personne intéressée par la science.

**Pour quoi ?**

- Découvrir ou redécouvrir les richesses de la Physique et pourquoi pas réaliser vous-mêmes vos expériences et les partager avec la communauté du MOOC.
- Rencontrer des chercheurs qui vous présenteront les applications présentes et futures de la lévitation, de la réalité virtuelle, ou encore de la cape d'invisibilité.

**Quand ?**

- Inscription à partir du 29 octobre 2018 sur la plateforme France Université Numérique (FUN) : [www.fun-mooc.fr](http://www.fun-mooc.fr).
- Ouverture du cours à partir du 11 mars 2019.
- Durée du cours : 7 semaines.

**Les liens :** [f](https://www.facebook.com/moocvivezlexperience) [y](https://www.youtube.com/channel/UC...) [mooc-vivezlexperience@univ-paris13.fr](mailto:mooc-vivezlexperience@univ-paris13.fr)

L'équipe enseignante : Sébastien Chénais, Christophe Daussey et Sébastien Forget

Projet financé par



La partie expérimentale repose sur des expériences du Laboratoire de Physique des Lasers et de l'association Atouts Sciences.











# Merci pour votre attention

