



La révision du système international d'unités

Estefanía de Mirandés

BIPM

École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 1 Septembre 2018



Le système international d'unités (SI) aujourd'hui

« Le SI est fondé sur un choix de **7 unités de base** bien définies et considérées par convention comme indépendantes du point de vue dimensionnel »

Grandeur	Unité	Symbole
longueur	mètre	m
masse	kilogramme	kg
temps	seconde	s
courant électrique	ampère	A
température	kelvin	K
quantité de matière	mole	mol
intensité lumineuse	candela	cd

Quantités fixées

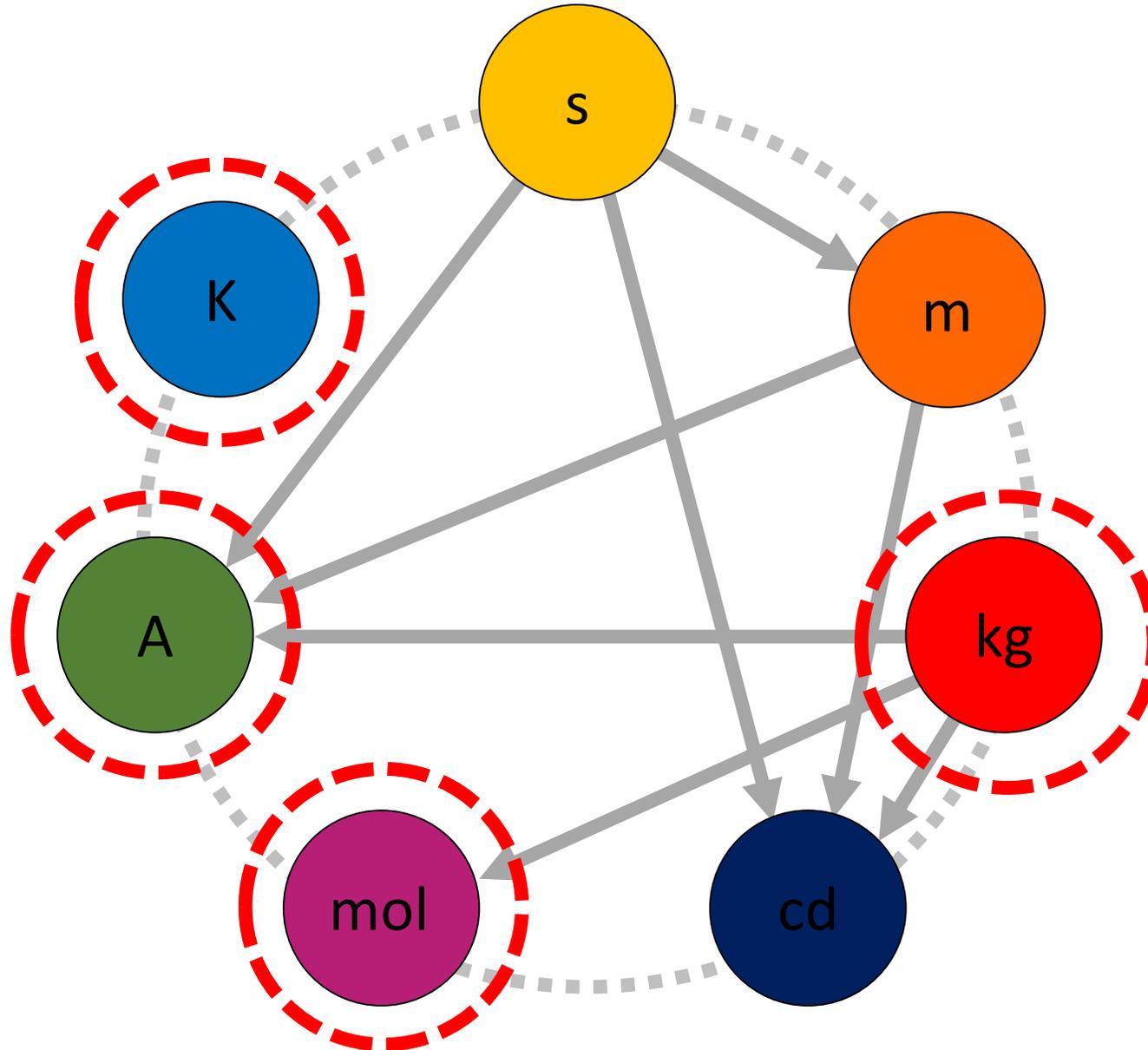
$$\begin{array}{l}
 c \\
 m_{\text{IPK}} \longrightarrow h \\
 \Delta\nu_{\text{Cs}} \\
 \mu_0 \longrightarrow e \\
 T_{\text{TPW}} \longrightarrow k \\
 m_{^{12}\text{C}} \longrightarrow N_{\text{A}} \\
 K_{\text{cd}}
 \end{array}$$

Elles permettent de définir toutes les unités de mesure du SI. Les autres grandeurs ont des unités dérivées et peuvent être exprimées comme proportionnelles à $s^\alpha m^\beta \text{kg}^\gamma \text{A}^\delta \text{K}^\epsilon \text{mol}^\zeta \text{cd}^\eta$.

Par exemple, pour la grandeur résistance électrique, l'unité est l'ohm (Ω) = $\text{kg m}^2 \text{s}^{-3} \text{A}^{-2}$
le SI à été adopté en 1960 (11^{ème} CGPM) avec 6 unités de base, la mole a été ajoutée au SI en 1971 (14^{ème} CGPM).



Le système international d'unités





Réussites du système international actuel

- Il est utilisé par tous.
 - *C'est le langage universel de la mesure.*
- C'est un système cohérent.
 - *Sans facteur de conversions internes au SI.*
- Il a su évoluer dans le temps: introduction de définitions en fonction de paramètres universels et de constantes fondamentales.
 - *En ouvrant le chemin pour d'autres unités.*



“Problèmes” du système international actuel

- Le **kilogramme** reste défini depuis 1889 en fonction d'un étalon matériel.
- L' **ampère** : réalisations pratiques en dehors du SI.
- Le **kelvin** : défini en fonction d'une constante particulière.
- La **mole** : définie en fonction du kilogramme.

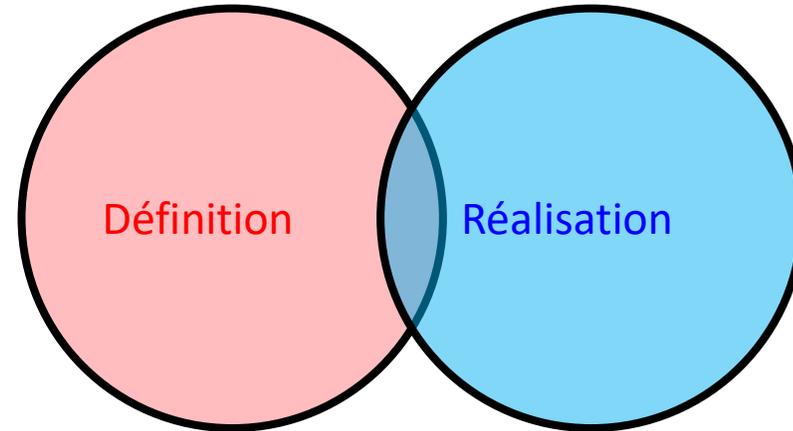


Les définitions sont liées à des réalisations concrètes.



Définitions et Réalisations : en général

Traditionnellement les définitions des unités et les réalisations ont été liées.



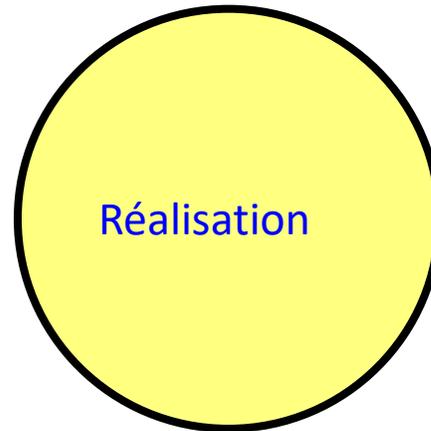
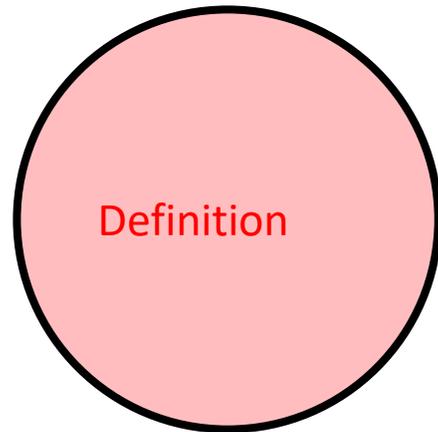
Si nous séparons la définition de la réalisation ...

...nous permettons aux réalisations d'évoluer pendant des décades de façon que nous ne pouvons pas anticiper.



Définitions et Réalisations : le kilogramme

$$\frac{h}{m}$$



La définition

Ce que nous entendons par “un kilogramme”.

Réalisation

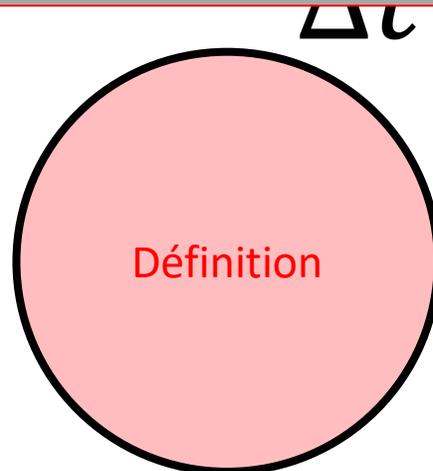
Comment nous traduisons cette signification en termes pratiques.



Définitions et Réalisations : l'ampère

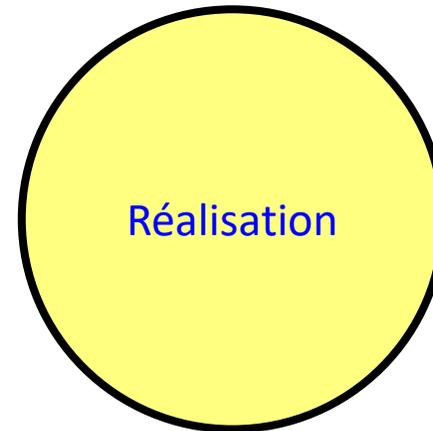
L'ampère est l'intensité d'un courant constant qui, maintenu dans deux conducteurs parallèles, rectilignes, de longueur infinie, de section circulaire négligeable et placés à une distance de 1 mètre l'un de l'autre dans le vide, produirait entre ces conducteurs une force égale à 2×10^{-7} newton par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

Combinaison de l'Effet Hall Quantique, de l'effet Josephson et des matrices d'union Josephson.



La définition

Ce que nous entendons par "un ampère".



Réalisation

Comment nous traduisons cette signification en termes pratiques.

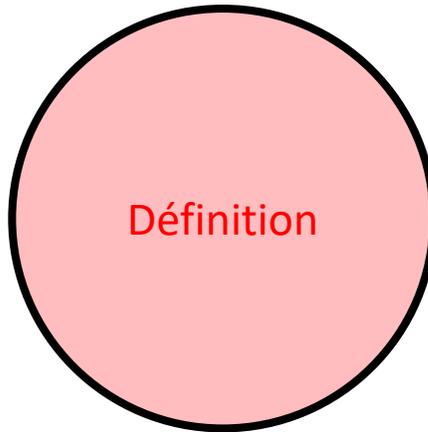
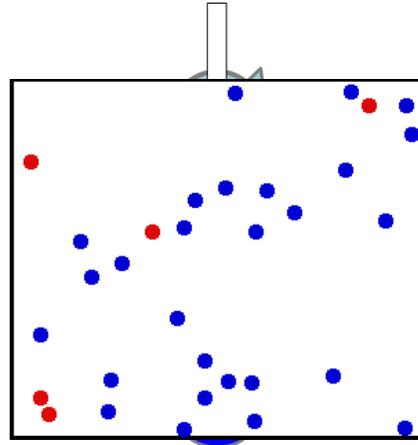
$$K_J = 2e/h$$

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



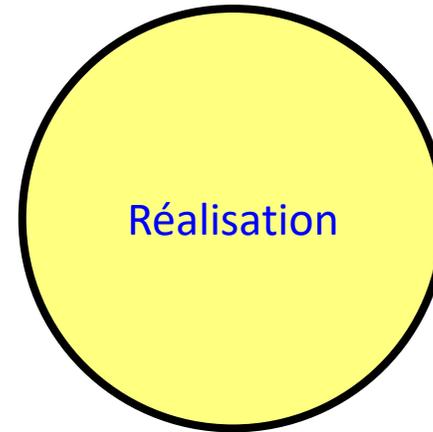
Définitions et Réalisations : le kelvin

Combien d'énergie possèdent les molécules à une température concrète? **K**



La définition

Ce que nous entendons par "un kelvin".



Réalisation

Comment nous traduisons cette signification en termes pratiques.

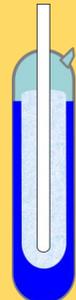
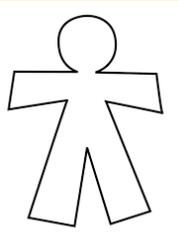


Évolution du SI

Définitions d'unités en termes de

Définitions d'unités

- kilogramme
- mètre
- kelvin



mesurent



Constantes fondamentales de la nature

- *constante de Planck, h*
- *constante de Boltzmann, k*
- *charge de l'électron, e*



Évolution du SI

Définitions d'unités en termes de

Constantes fondamentales de la nature

- constante de Planck, h
- constante de Boltzmann, k
- charge de l'électron, e

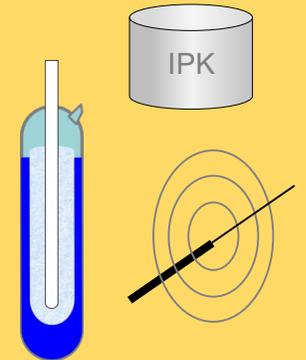
réalisent



Définitions d'unités



-kilogramme
-mètre
-kelvin





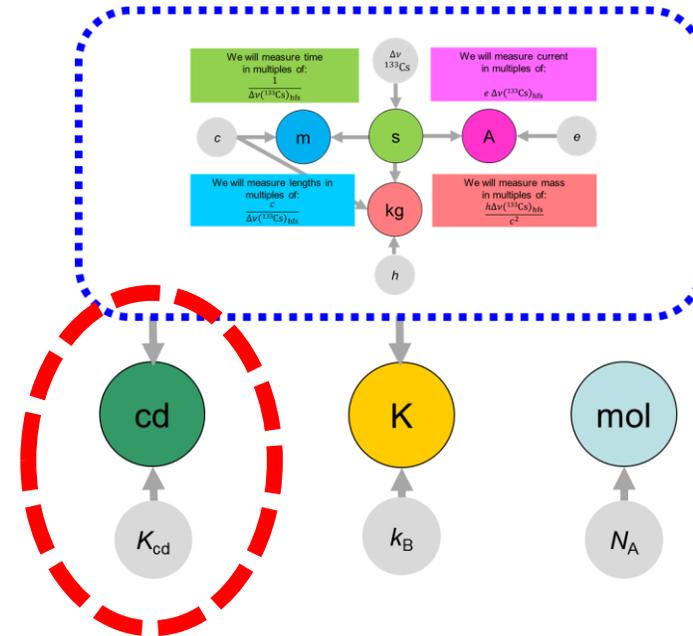
La 'nouvelle' candela...

Le concept de base est maintenu

K_{cd} est maintenant définie comme constante "explicite".

L'efficacité lumineuse, K_{cd} , pour une radiation monochromatique de fréquence 540×10^{12} Hz est exactement 683 quand elle est exprimée en unités du SI $cd \cdot sr/W = lm/W$.

La caractéristique de la candela est qu'elle est liée à la perception humaine, qui est susceptible de varier d'une personne à l'autre.





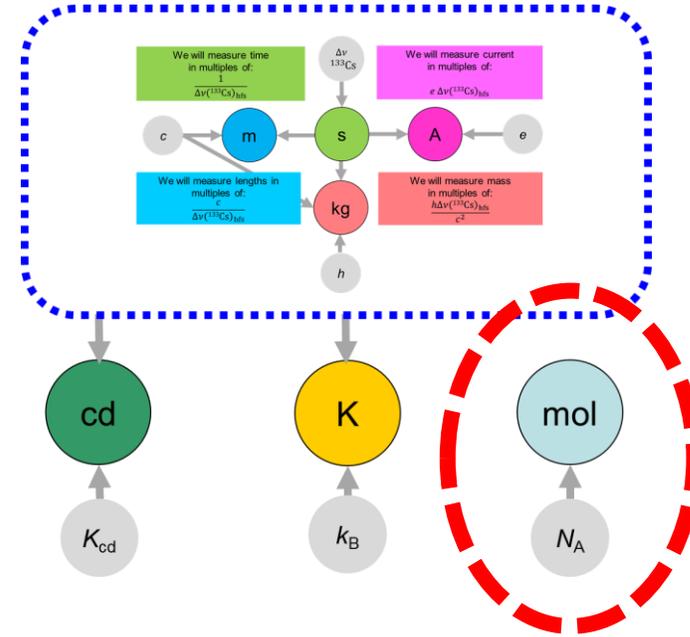
La 'nouvelle' mol...

Avant:

- Le nombre d'atomes contenus dans 12 g de ^{12}C .

Nouvelle définition:

- N_A particules élémentaires avec $N_A = 6.022\ 141\ 29 \times 10^{23}$ exactement.
- Reconnaît que la chimie est stoechiométrie, non une mesure de masse.
- Ce qui avant était la définition de la mole - une mesure de masse- sera maintenant une technique pour réaliser la mole.
- La mole deviendra indépendante du kilogramme





Le “nouveau” kelvin

La redéfinition lie le kelvin avec le concept d'énergie moléculaire

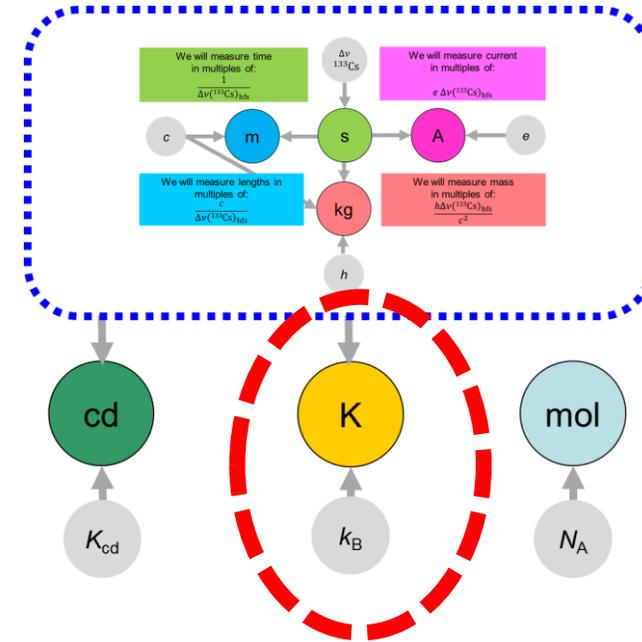
Avant:

- $T_{TPW} = 273.16 \text{ K}$ exactement.

Nouvelle définition :

- $k_B = 1.380\,648\,52 \times 10^{-23}$ joules par kelvin exactement.
- $N_A \times k_B = R = 8.314\,459\,86$ joules par kelvin par mole exactement.

- Reconnait la nature statistique de la température.
- Les mesures de température ne sont plus liées à T_{TPW} .





Aspects Institutionnels



Bureau
International des
Poids et
Mesures



Convention du Mètre 1875

Traité diplomatique

Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM)
Tous les 4 ans
Avec des délégués des états membres

États associés et économies

Gouvernements d'états membres

Comité international des Poids et Mesures (CIPM)
Tous les ans
17 personnes choisies par la CGPM

Organisations internationales

Comités consultatifs (CCs)

CIPM MRA

Instituts nationaux de métrologie

Bureau International des Poids et Mesures (BIPM)

Bureau International des Poids et Mesures



Demande de la CGPM au CODATA pour l'ajustement des constantes fondamentales en vue de la redéfinition du SI

- **Résolution 1 de la 24^a CGPM (2011) :**

The General Conference on Weights and Measures

invites

- CODATA to continue to provide adjusted values of the fundamental physical constants based on all relevant information available and to make the results known to the International Committee through its Consultative Committee for Units [since these CODATA values and uncertainties will be those used for the revised SI,](#)
- **Décision CIPM/104-9 (2015):** The CIPM revised its Decision CIPM/103-30 and decided that experimental results to be used by the CODATA Task Group on Fundamental Constants in the evaluation of the fundamental constants leading to the fixed values for the defining constants of the new SI should be accepted for publication by **1 July 2017**



CODATA

1966- ICSU établit le “Committee on Data for Science and Technology (CODATA)”

- Renforcer la science internationale pour le bénéfice de la société grâce à la promotion des avancements scientifiques et techniques dans le traitement de données.

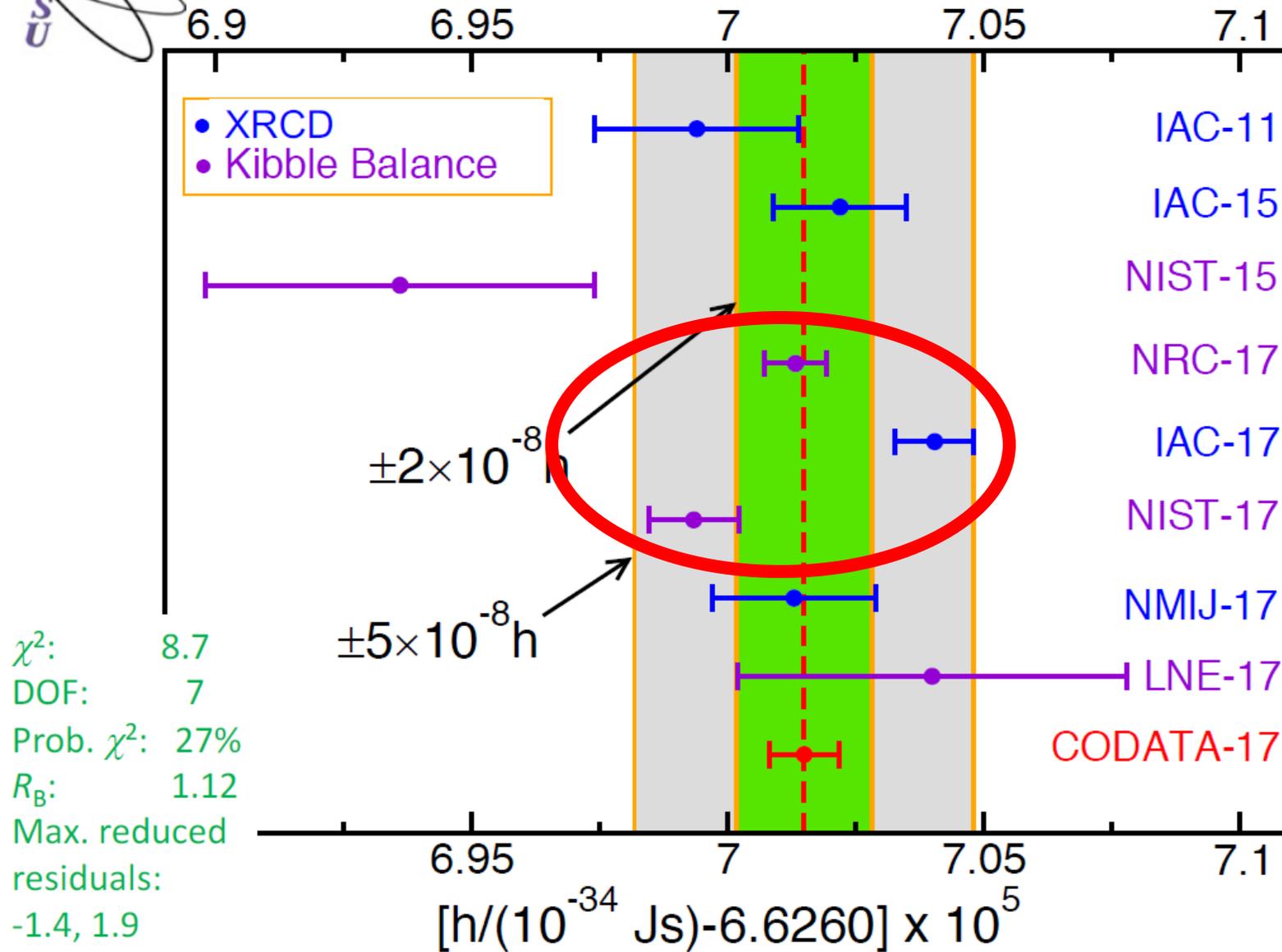
1969 CODATA établit le “Task Group on Fundamental Constants (CODATA TGFC)”

- Périodiquement : recommandation d’un ensemble auto-consistant des valeurs des constantes fondamentales et des facteurs de conversions de la physique et de la chimie basé sur les résultats disponibles à ce moment.





2017 Planck constant





RECOMMENDATION OF THE CONSULTATIVE COMMITTEE FOR MASS AND RELATED QUANTITIES SUBMITTED TO THE INTERNATIONAL COMMITTEE FOR WEIGHTS AND MEASURES

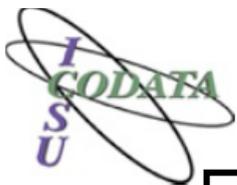
RECOMMENDATION G 1 (2017)

For a new definition of the kilogram in 2018 [\(publicly available at the CCM webpage\)](#)

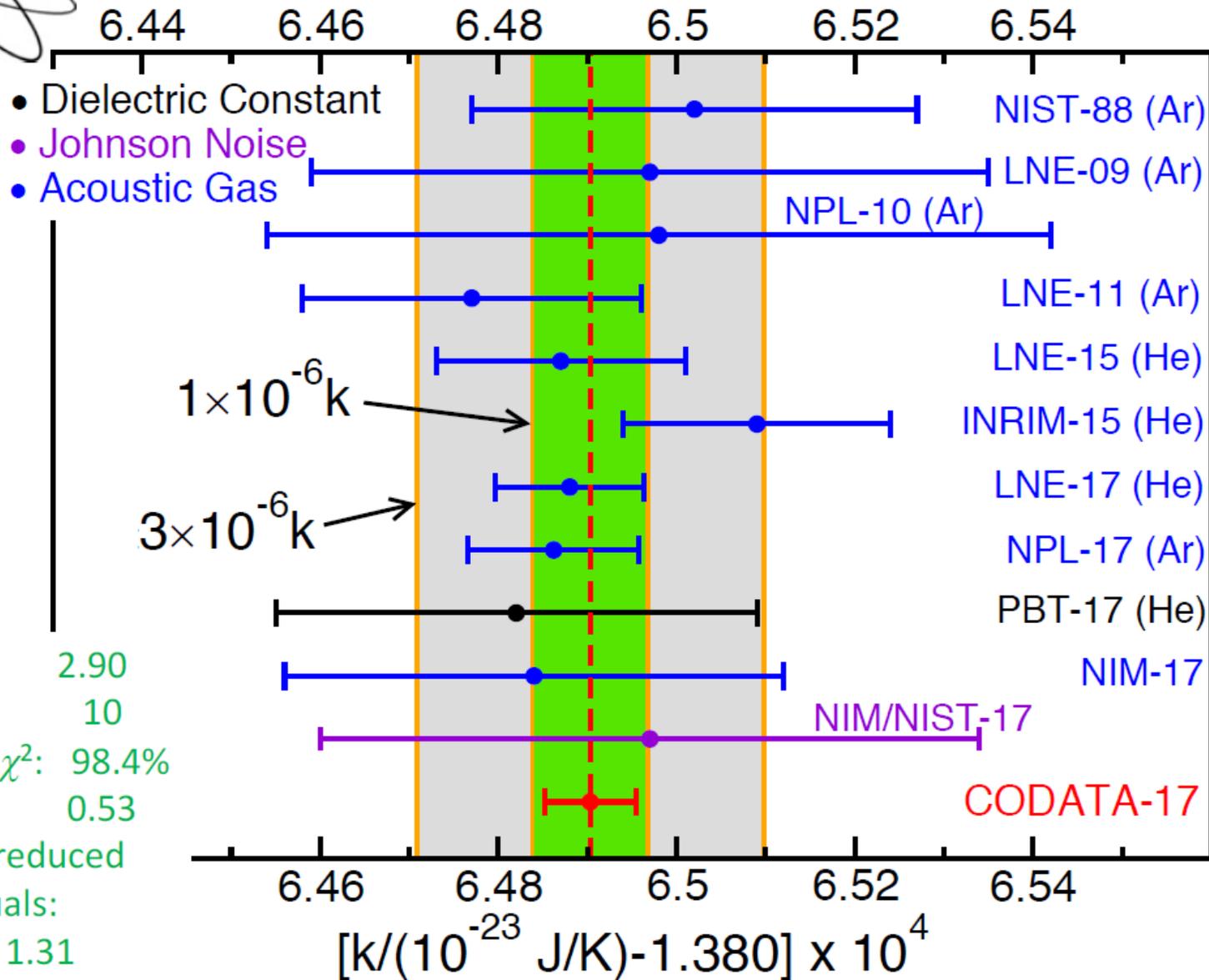
noting that the CCM will conduct an on-going key comparison of primary realizations of the kilogram that will capture and maintain a table of the experimental degrees of equivalence, which can be used to create a formal procedure for applying corrections relative to the consensus value,

requests those National Metrology Institutes having a realization of the kilogram to avail themselves of the consensus value (as determined from the ongoing comparison) when disseminating the unit of mass according to the new definition, until the dispersion in values becomes compatible with the individual realization uncertainties, thus preserving the international equivalence of calibration certificates and in accordance with the principles and agreed protocols of the CIPM Mutual Recognition Arrangement,

recommends that the CIPM undertakes the necessary steps to proceed with the ^{Bureau} planned redefinition of the SI at the next meeting of the CGPM, acknowledging the measures to be taken by the CCM to ensure integrity and continuity in the dissemination of the kilogram.



2017 Boltzmann constant

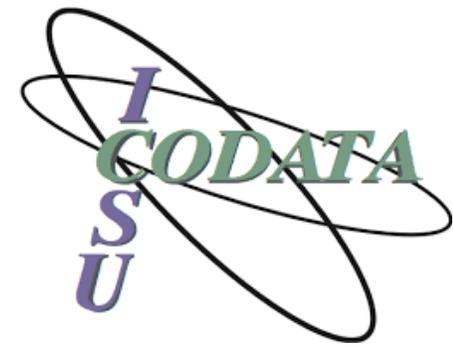


Slide from CODATA

Bureau International des Poids et Mesures



Valeurs de h , e , k y N_A ajustées par CODATA en 2017



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



Le 20 Mai 2019

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

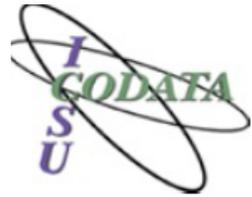


Détermination par CODATA des valeurs exactes de h , e , k y N_A

- Résolution 1 de la 24^a CGPM (2011)
 - The values of $m(\mathcal{K})$, μ_0 , T_{TPW} , and $M(^{12}\text{C})$ remain consistent with their exact values in present SI.
- Décision CIPM/105-15 of the 105th CIPM (2016)
 - The exact values of h , e , and N_A are chosen such that $m(\mathcal{K})$, μ_0 , and $M(^{12}\text{C})$ remain consistent within their relative standard uncertainties.
 - The exact value of k is chosen such that T_{TPW} remains consistent at the level it can be presently realized.



Continuité entre le SI révisé et l'actuel



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:**

$$M(^{12}\text{C})/0.012 \text{ kg mol}^{-1} = 1.000\,000\,000\,37(45)$$



26^{ème} séance de la CGPM

13-16 Novembre 2018, Versailles



<https://www.bipm.org/en/cgpm-2018/>



Version préliminaire de la Résolution A qui sera votée à la 26^{ème} CGPM sur l'adoption de la redéfinition du SI

Draft Resolution A to be presented to the 26th CGPM 2018

The International System of Units (SI)

The 26th General Conference,

considering

- the essential requirement for an International System of Units (SI) that is uniform and accessible world-wide for international trade, high-technology manufacturing, human health and safety, protection of the environment, global climate studies and the basic science that underpins all these,
- that the SI units must be stable in the long term, internally self-consistent and practically realizable being based on the present theoretical description of nature at the highest level,
- that a revision of the SI to meet these requirements was described in Resolution 1 of the 24th General Conference in 2011, adopted unanimously, that laid out in detail a new way of defining the SI based on a set of seven defining constants, drawn from the fundamental constants of physics and other constants of nature, from which the definitions of the seven base units are deduced,
- that the conditions set by the 24th General Conference, confirmed by the 25th General Conference, before such a revised SI could be adopted have now been met,



decides

that, effective from 20 May 2019, the International System of Units, the SI, is the system of units in which

- the unperturbed ground state hyperfine transition frequency of the caesium 133 atom $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ is 9 192 631 770 Hz,
- the speed of light in vacuum c is 299 792 458 m/s,
- the Planck constant h is $6.626\,070\,15 \times 10^{-34}$ J s,
- the elementary charge e is $1.602\,176\,634 \times 10^{-19}$ C,
- the Boltzmann constant k is $1.380\,649 \times 10^{-23}$ J/K,
- the Avogadro constant N_{A} is $6.022\,140\,76 \times 10^{23}$ mol⁻¹,
- the luminous efficacy of monochromatic radiation of frequency 540×10^{12} Hz, K_{cd} , is 683 lm/W,

where the hertz, joule, coulomb, lumen, and watt, with unit symbols Hz, J, C, lm, and W, respectively, are related to the units second, metre, kilogram, ampere, kelvin, mole, and candela, with unit symbols s, m, kg, A, K, mol, and cd, respectively, according to $\text{Hz} = \text{s}^{-1}$, $\text{J} = \text{m}^2 \text{kg} \text{s}^{-2}$, $\text{C} = \text{A} \text{s}$, $\text{lm} = \text{cd} \text{m}^2 \text{m}^{-2} = \text{cd} \text{sr}$, and $\text{W} = \text{m}^2 \text{kg} \text{s}^{-3}$,



Appendix 1. Abrogation of former definitions of the base units:

It follows from the new definition of the SI adopted above that

- the definition of the second in force since 1967/68 (13th meeting of the CGPM, Resolution 1) is abrogated,
- the definition of the metre in force since 1983 (17th meeting of the CGPM, Resolution 1), is abrogated,
- the definition of the kilogram in force since 1889 (1st meeting of the CGPM, 1889, 3rd meeting of the CGPM, 1901) based upon the mass of the international prototype of the kilogram is abrogated,
- the definition of the ampere in force since 1948 (9th meeting of the CGPM) based upon the definition proposed by the International Committee (CIPM, 1946, Resolution 2) is abrogated,
- the definition of the kelvin in force since 1967/68 (13th meeting of the CGPM, Resolution 4) is abrogated,
- the definition of the mole in force since 1971 (14th meeting of the CGPM, Resolution 3) is abrogated,
- the definition of the candela in force since 1979 (16th meeting of the CGPM, Resolution 3) is abrogated,
- the decision to adopt the conventional values of the Josephson constant K_J-90 and of the von Klitzing constant R_K-90 taken by the International Committee (CIPM, 1988, Recommendations 1 and 2) at the request of the General Conference (18th meeting of the CGPM, 1987, Resolution 6) for the establishment of representations of the volt and the ohm using the Josephson and quantum Hall effects, respectively, is abrogated.



Appendix 2. Status of constants previously used in the former definitions:

It follows from the new definition of the SI adopted above, and from the recommended values of the 2017 special CODATA adjustment on which the values of the defining constants are based, that at the time this Resolution was adopted

- the mass of the international prototype of the kilogram $m(K)$ is equal to 1 kg within a relative standard uncertainty equal to that of the recommended value of h at the time this Resolution was adopted, namely 1.0×10^{-8} and that in the future its value will be determined experimentally,
- the vacuum magnetic permeability μ_0 is equal to $4\pi \times 10^{-7}$ H m⁻¹ within a relative standard uncertainty equal to that of the recommended value of the fine-structure constant α at the time this Resolution was adopted, namely 2.3×10^{-10} and that in the future its value will be determined experimentally,
- the thermodynamic temperature of the triple point of water T_{TPW} is equal to 273.16 K within a relative standard uncertainty closely equal to that of the recommended value of k at the time this Resolution was adopted, namely 3.7×10^{-7} , and that in the future its value will be determined experimentally,
- the molar mass of carbon 12, $M(^{12}\text{C})$, is equal to 0.012 kg mol⁻¹ within a relative standard uncertainty equal to that of the recommended value of $N_A h$ at the time this Resolution was adopted, namely 4.5×10^{-10} , and that in the future its value will be determined experimentally.



Appendix 3. The base units of the SI

Starting from the definition of the SI adopted above in terms of fixed numerical values of the defining constants, definitions of each of the seven base units are deduced by taking, as appropriate, one or more of these defining constants to give the following set of definitions:

- The second, symbol s, is the SI unit of time. It is defined by taking the fixed numerical value of the caesium frequency $\Delta\nu_{\text{Cs}}$, the unperturbed ground-state hyperfine transition frequency of the caesium 133 atom, to be 9 192 631 770 when expressed in the unit Hz, which is equal to s^{-1} .
- The metre, symbol m, is the SI unit of length. It is defined by taking the fixed numerical value of the speed of light in vacuum c to be 299 792 458 when expressed in the unit m/s, where the second is defined in terms of the caesium frequency $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.
- The kilogram, symbol kg, is the SI unit of mass. It is defined by taking the fixed numerical value of the Planck constant h to be $6.626\,070\,15 \times 10^{-34}$ when expressed in the unit J s, which is equal to $\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$, where the metre and the second are defined in terms of c and $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.
- The ampere, symbol A, is the SI unit of electric current. It is defined by taking the fixed numerical value of the elementary charge e to be $1.602\,176\,634 \times 10^{-19}$ when expressed in the unit C, which is equal to A s, where the second is defined in terms of $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.
- The kelvin, symbol K, is the SI unit of thermodynamic temperature. It is defined by taking the fixed numerical value of the Boltzmann constant k to be $1.380\,649 \times 10^{-23}$ when expressed in the unit J K^{-1} , which is equal to $\text{kg m}^2 \text{s}^{-2} \text{K}^{-1}$, where the kilogram, metre and second are defined in terms of h , c and $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.
- The mole, symbol mol, is the SI unit of amount of substance. One mole contains exactly $6.022\,140\,76 \times 10^{23}$ elementary entities. This number is the fixed numerical value of the Avogadro constant, N_{A} , when expressed in the unit mol^{-1} and is called the Avogadro number.

The amount of substance, symbol n , of a system is a measure of the number of specified elementary entities. An elementary entity may be an atom, a molecule, an ion, an electron, any other particle or specified group of particles.

- The candela, symbol cd, is the SI unit of luminous intensity in a given direction. It is defined by taking the fixed numerical value of the luminous efficacy of monochromatic radiation of frequency 540×10^{12} Hz, K_{cd} , to be 683 when expressed in the unit lm W^{-1} , which is equal to cd sr W^{-1} , or $\text{cd sr kg}^{-1} \text{m}^{-2} \text{s}^3$, where the kilogram, metre and second are defined in terms of h , c and $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.



Brochure du SI

9ème édition expliquant la redéfinition, publiée le 20 Mai 2019

Version préliminaire disponible :
<https://www.bipm.org/utils/en/pdf/si-revised-brochure/Draft-SI-Brochure-2018.pdf>





Après la redéfinition du SI

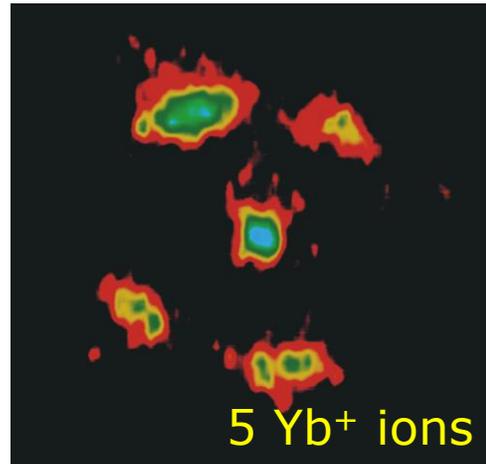
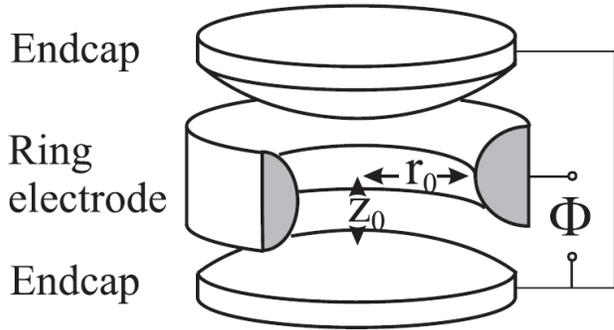


Redéfinition de la seconde

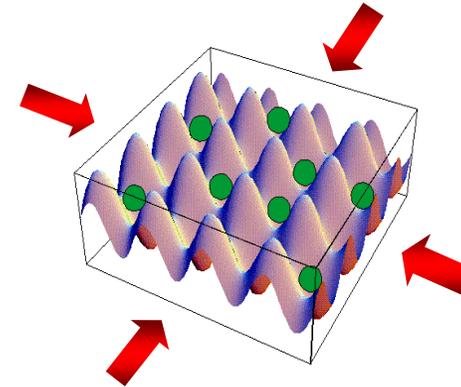
- Les horloges **optiques** sont en train de dépasser les étalons de césium et **microondes** en précision et stabilité.
- La question de la redéfinition de la seconde SI à partir d'une transition optique est actuellement débattue.

Ions isolés dans un piège ionique

Single ion clock



Atomes neutres en réseaux optiques 3D

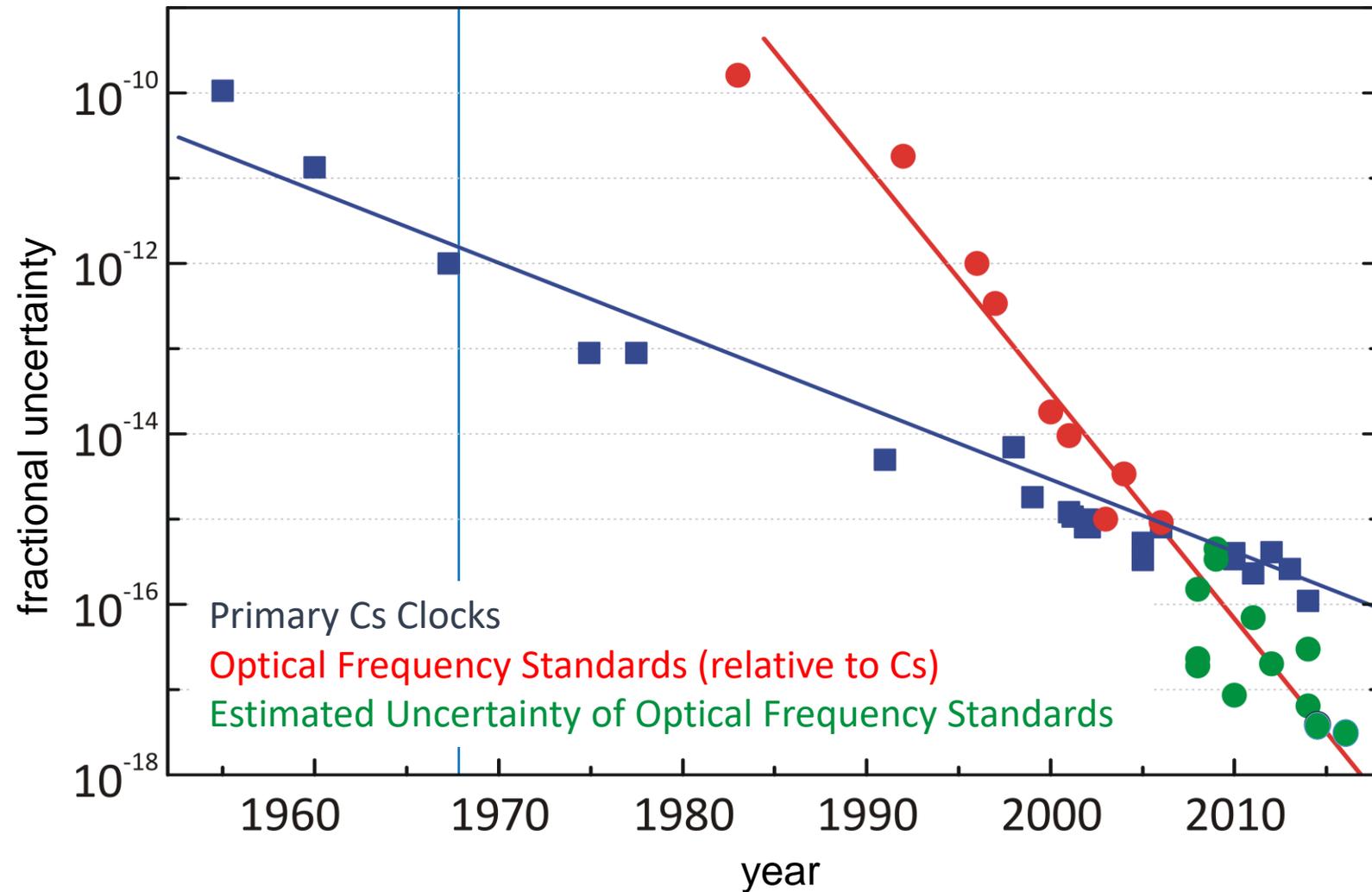


- $10^4 - 10^6$ atomes interrogés

Candidats considérés: Al^+ , Hg^{+2} , Hg , Sr , Sr^{+2} , In^{+3} , Mg , Ca , Ca^+ , $\text{Yb}^{+2/+3}$, Yb and Th^{+3}



Horloges de Cesium versus horloges atomiques





Feuille de route pour la redéfinition de la seconde

> 3 different clocks
 $\Delta v_i/v_i \sim 10^{-18}$

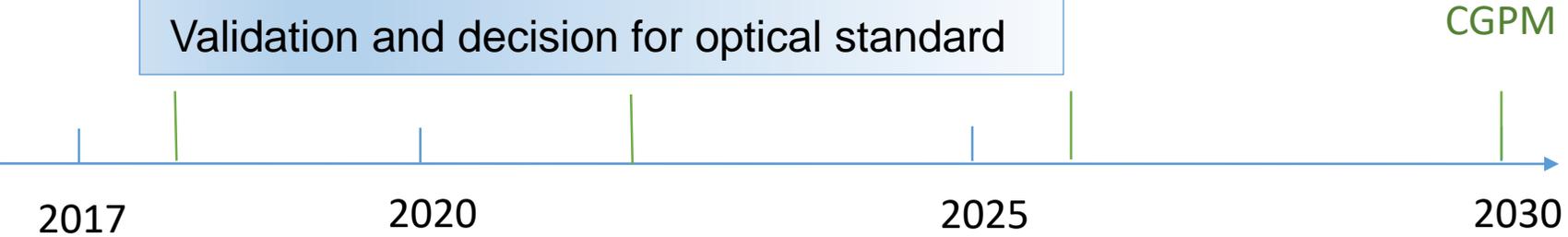
> 3 comparisons
 $\Delta(v_i/v_j) < 5 \times 10^{-18}$

> 3 comp. vs Cs
 $\Delta v/v < 3 \times 10^{-16}$

Regular contribut. to TAI

2 comp. between 5 clocks
 $\Delta(v_i/v_k) / (v_i/v_k) < 5 \times 10^{-18}$

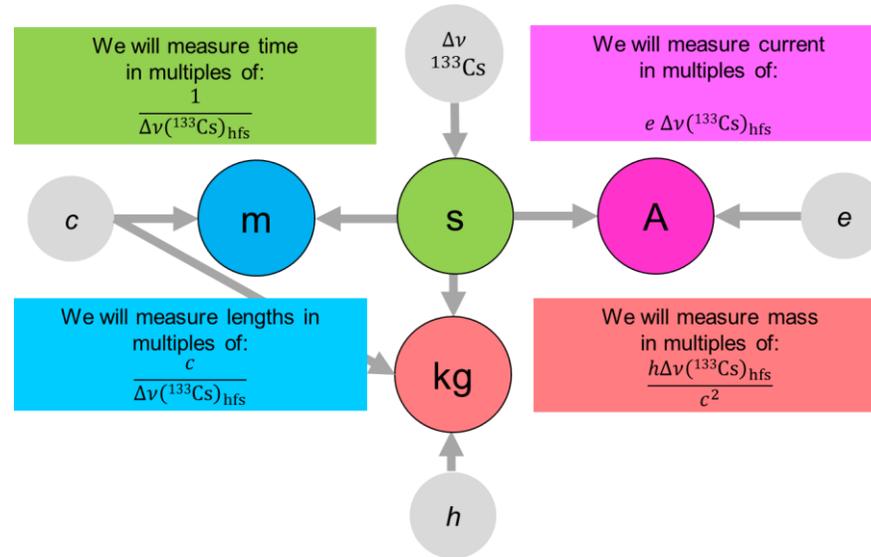
Validation and decision for optical standard



Scheme from
Fritz Riehle,
CCTF



Conclusion et perspectives



Les définitions des unités dans le SI révisé

- Explicite la valeur des constantes naturelles.
- Son abstraction ouvre la possibilité d'améliorer la technologie des réalisations des unités sans affecter la définition.
- Le "problème" de l'ampère est résolu.
- Le "problème" du kilogramme est résolu.



Las constantes fundamentales, “pour tous les temps, pour tous les hommes”



Merci pour votre attention