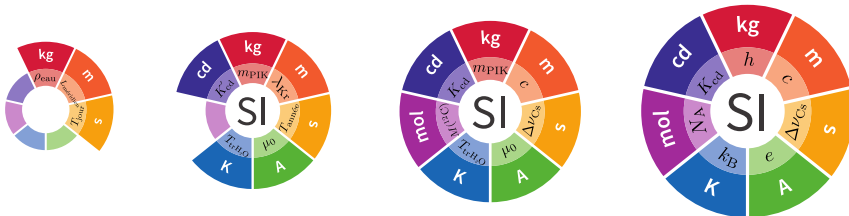


Le SI : définir et redéfinir les unités

Mickaël Melzani

Enseignant en CPGE, lycée Raoul Follereau, Belfort

Congrès de l'UDPPC, 29 octobre 2025



Outline

1. La métrologie et le SI

2. Comment définir une unité ?

- 2.1 Le principe d'une définition
- 2.2 Exemples de formulations "concrètes"
- 2.3 Les définitions de 2018/19

3. Pourquoi et comment redéfinir une unité ?

- 3.1 Le kg d'avant 2019
- 3.2 Le kg d'après 2019
- 3.3 Les caractéristiques d'une redéfinition

Outline

1. La métrologie et le SI

2. Comment définir une unité ?

- 2.1 Le principe d'une définition
- 2.2 Exemples de formulations "concrètes"
- 2.3 Les définitions de 2018/19

3. Pourquoi et comment redéfinir une unité ?

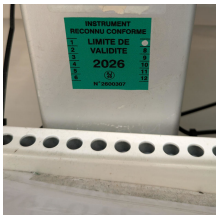
- 3.1 Le kg d'avant 2019
- 3.2 Le kg d'après 2019
- 3.3 Les caractéristiques d'une redéfinition



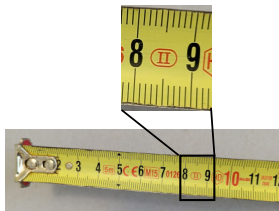
La mesure est partout

Métrologie = science de la mesure.

1/ Métrologie légale : contraintes et contrôles imposés par les états (balances, pompes à essence, radars, compteurs, polluants, matériel médical, analyses biologiques...).



balance dans un commerce



metre de classe II

- Permet à la société de fonctionner : confiance dans les échanges, commerce, lois...

2/ Métrologie industrielle : dimensions, matériaux, normes...



La mesure est partout

3/ Métrologie scientifique : recherche fondamentale, appliquée.

- Mesures, exactitude et maîtrise des incertitudes nécessaire en recherche.
- Définitions des unités du SI et leur réalisation.

Question : quelle est la mesure la plus précise actuellement ?



La mesure est partout

3/ Métrologie scientifique : recherche fondamentale, appliquée.

- Mesures, exactitude et maîtrise des incertitudes nécessaire en recherche.
- Définitions des unités du SI et leur réalisation.

Question : quelle est la mesure la plus précise actuellement ?

- **Les fréquences atomiques.**

Exemple : une des transitions de $^{27}\text{Al}^+$,

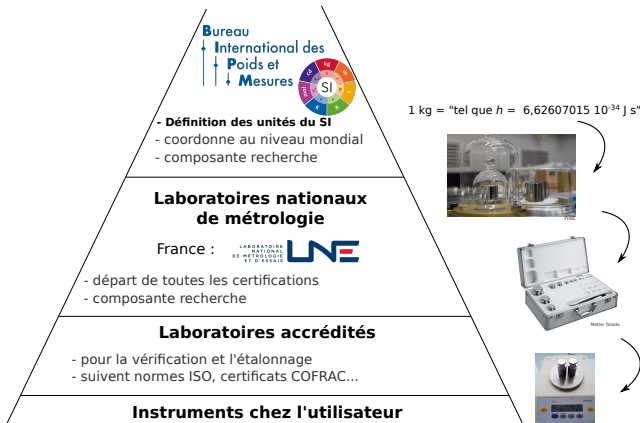
$$f = 1\,121\,015\,393\,207\,859,2 \text{ Hz}$$

$$u(f) = \quad \quad \quad 0,2 \text{ Hz} \quad \quad u(f)/f = 2 \times 10^{-16}$$



Une organisation internationale

Une hiérarchie et des normes :

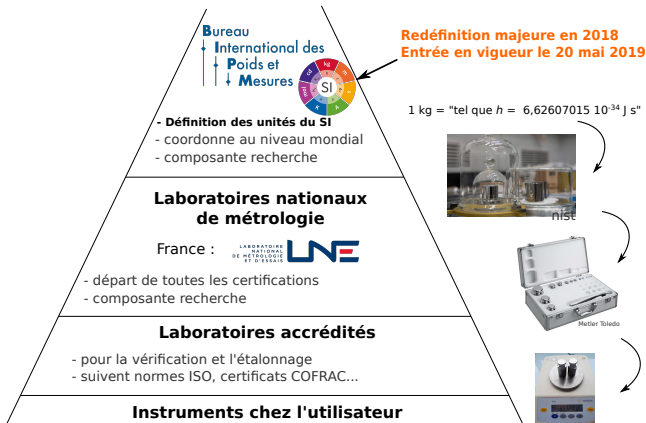


Importance du SI : toutes ces mesures, légales, industrielles, scientifiques, s'intègrent dans une grande chaîne qui les lie aux unités de base du **SI**.



Une organisation internationale

Une hiérarchie et des normes :



Importance du SI : toutes ces mesures, légales, industrielles, scientifiques, s'intègrent dans une grande chaîne qui les lie aux unités de base du **SI**.



Le principe d'une définition

Mesurer par rapport à une unité, c'est dire combien de fois la grandeur mesurée contient l'unité.

C'est dire combien de fois il faut répéter l'unité pour obtenir la grandeur.

- **Exemple :**

$L = 5,2 \text{ m} \rightarrow$ la longueur L s'obtient en répétant 5,2 fois la longueur unité "1 m".

Les unités sont des grandeurs physiques particulières, choisies **par convention** pour **servir de référence**.

\Rightarrow il faut se mettre d'accord, internationalement, sur leur définition et leur réalisation.



Le principe d'une définition

Définition actuelle du mètre (9^e brochure du SI, www.bipm.org/fr/publications/si-brochure) :

“Le mètre [...] est défini en prenant la valeur numérique fixée de la vitesse de la lumière dans le vide, c , égale à 299 792 458 lorsqu'elle est exprimée en m s^{-1} .”

→ Formulation qui consiste à fixer la valeur numérique $\{c\} = 299\,792\,458$.



Le principe d'une définition

Définition actuelle du mètre (9^e brochure du SI, www.bipm.org/fr/publications/si-brochure) :

“Le mètre [...] est défini en prenant la valeur numérique fixée de la vitesse de la lumière dans le vide, c , égale à 299 792 458 lorsqu'elle est exprimée en m s^{-1} .”

→ Formulation qui consiste à fixer la valeur numérique $\{c\} = 299\,792\,458$.

Définitions des 7 unités de base du SI :

| Unité de base | Définition de l'unité de base |
|-------------------|---|
| seconde | $\{\Delta\nu_{\text{Cs}}\} = 9\,192\,631\,770$ lorsqu'exprimée en s^{-1} |
| mètre | $\{c\} = 299\,792\,458$ lorsqu'exprimée en $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ |
| kilogramme (2019) | $\{h\} = 6,626\,070\,15 \times 10^{-34}$ lorsqu'exprimée en $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 🤔 |
| ampère (2019) | $\{e\} = 1,602\,176\,634 \times 10^{-19}$ lorsqu'exprimée en $\text{A} \cdot \text{s}$ |
| kelvin (2019) | $\{k_{\text{B}}\} = 1,380\,649 \times 10^{-23}$ lorsqu'exprimée en $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ 🤔 |
| mole (2019) | $\{N_{\text{A}}\} = 6,022\,140\,76 \times 10^{23}$ lorsqu'exprimée en mol^{-1} |
| candela | $\{K_{\text{cd}}\} = 683$ lorsqu'exprimée en $\text{cd} \cdot \text{sr} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^3$ |



Le principe d'une définition

Définir une unité



Fixer la valeur numérique d'une grandeur physique choisie



Le principe d'une définition

| | | |
|-------------------|---|---|
| Définir une unité | ⇔ | Fixer la valeur numérique d'une grandeur physique choisie |
|-------------------|---|---|

Parfois difficile à comprendre : $\{c\}$ fixée à 299 792 458 signifie ?

→ Si on veut être plus **concret**, on se ramène à une grandeur de **même nature** que l'unité définie.

Exemple : « le mètre est la distance parcourue par la lumière pendant la durée (exacte, par convention) $1/299\,792\,458$ seconde. »



| | | |
|-------------------|-------------------|---|
| Définir une unité | \Leftrightarrow | Fixer la valeur numérique d'une grandeur physique choisie |
|-------------------|-------------------|---|

→ Si on veut être plus **concret**, on se ramène à une grandeur de **même nature** que l'unité définie.

Exemple : « le mètre est la distance parcourue par la lumière pendant la durée (exacte, par convention) $1/299\,792\,458$ seconde. »

On a donc **définition “valeur numérique”** \Leftrightarrow **définition “concrète”**
traduction

↑ ↑
pour les scientifiques pour les élèves ?

Dans la suite : quelques exemples de “traductions”.

Outline

1. La métrologie et le SI

2. Comment définir une unité ?

- 2.1 Le principe d'une définition
- 2.2 Exemples de formulations "concrètes"
- 2.3 Les définitions de 2018/19

3. Pourquoi et comment redéfinir une unité ?

- 3.1 Le kg d'avant 2019
- 3.2 Le kg d'après 2019
- 3.3 Les caractéristiques d'une redéfinition



Exemples de formulations “concrètes”

Le mètre (de 1791) :

Formulation concrète : 1 m, c’est la longueur d’un quart du méridien divisée par 10^6 .

Formulation val. num. : $\{L_{1/4 \text{ méridien}}\}_{\text{déf}} = 10^6$ lorsqu’exprimée en m.



livre sur cette épopée : *Mesurer le monde*, K. Alder



Exemples de formulations “concrètes”

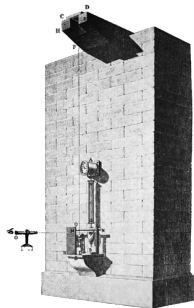
Un exemple moins évident :

Initialement (≈ 1789), la proposition de définition du mètre était :

Formulation concrète : un mètre est la longueur d'un pendule dont la demi-période est d'une seconde, sous une pesanteur g à Paris.

Note : pour le pendule simple, $T^2 = 4\pi^2 \frac{L}{g}$.

Formulation val. num. : quelle grandeur physique voit ainsi sa valeur numérique fixée ?



Borda et Cassini, détermination du pendule qui bat la seconde, 1792.

Et plus tôt, cf aussi arxiv.org/pdf/physics/0412078
source image : wikipedia commons



Exemples de formulations “concrètes”

Un exemple moins évident :

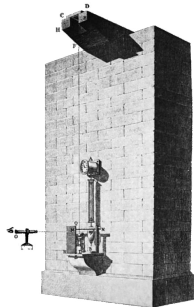
Initialement (≈ 1789), la proposition de définition du mètre était :

Formulation concrète : un mètre est la longueur d'un pendule dont la demi-période est d'une seconde, sous une pesanteur g à Paris.

Note : pour le pendule simple, $T^2 = 4\pi^2 \frac{L}{g}$.

Formulation val. num. : quelle grandeur physique voit ainsi sa valeur numérique fixée ?

- $\{T\}^2 = 4\pi^2 \frac{\{L\}}{\{g\}}$ avec $\{T\} = 2$ et $\{L\} = 1$ donne $\{g\} = \pi^2$.
- Et en effet, $\{g\} \approx 9,81$ et $\pi^2 \approx 9,87$ proches à 0,6 % près !
- Définition pas retenue, mais presque...



Borda et Cassini, détermination du pendule qui bat la seconde, 1792.

Et plus tôt, cf aussi arxiv.org/pdf/physics/0412078
source image : wikipedia commons



Exemples de formulations “concrètes”

Un exemple moins évident :

Initialement (≈ 1789), la proposition de définition du mètre était :

Formulation concrète : un mètre est la longueur d'un pendule dont la demi-période est d'une seconde, sous une pesanteur g à Paris.

Note : pour le pendule simple, $T^2 = 4\pi^2 \frac{L}{g}$.

Formulation val. num. : quelle grandeur physique voit ainsi sa valeur numérique fixée ?

Et fixer $\{g\}$ permet bien des mesures de L , via :

$$L = \frac{\text{fixé} \rightarrow g \times T^2 \leftarrow \text{mesuré}}{4\pi^2}.$$

- $\{T\}^2 = 4\pi^2 \frac{\{L\}}{\{g\}}$ avec $\{T\} = 2$ et $\{L\} = 1$ donne $\boxed{\{g\} = \pi^2}$.
- Et en effet, $\{g\} \approx 9,81$ et $\pi^2 \approx 9,87$ proches à 0,6 % près !
- Définition pas retenue, mais presque...



Exemples de formulations “concrètes”

Avant de passer au kg, retour sur la définition et remarque :

| | | |
|-------------------|---|--|
| Définir une unité | ↔ | Fixer la valeur numérique d'une grandeur physique choisie |
|-------------------|---|--|

→ ce n'est pas la **valeur** qu'on fixe, mais la **valeur numérique** (lorsqu'exprimée dans les unités qu'on cherche à définir).

$$\underbrace{L_{1/4 \text{ méridien}}}_{\text{fixé par la nature}} = \underbrace{10^6}_{\text{fixé par convention}} \underbrace{\text{m}}_{\text{défini par cette égalité}}$$

$$\underbrace{c}_{\text{fixé par la nature}} = \underbrace{299\,792\,458}_{\text{fixé par convention}} \underbrace{\text{m}}_{\text{défini par cette égalité}} \underbrace{\text{s}^{-1}}_{\text{défini par ailleurs (césium)}}$$



Exemples de formulations “concrètes”

Le kilogramme (de 1889) :

Le PIK (1889 – 2019)

Formulation concrète : un kg est la masse de ce cylindre de platine iridié, appelé PIK.

Formulation val. num. : la masse m_{PIK} du PIK a pour valeur numérique

$$\{m_{\text{PIK}}\} = 1$$

(exprimée en kg).



Outline

1. La métrologie et le SI

2. Comment définir une unité ?

- 2.1 Le principe d'une définition
- 2.2 Exemples de formulations "concrètes"
- 2.3 Les définitions de 2018/19

3. Pourquoi et comment redéfinir une unité ?

- 3.1 Le kg d'avant 2019
- 3.2 Le kg d'après 2019
- 3.3 Les caractéristiques d'une redéfinition



Les définitions de 2018/19

Le kilogramme (d'après 2019) (entrée en vigueur le 20 mai 2019) :

Basé sur la constante de Planck h .

avant 2019



1 kg, c'est exactement la masse de ce cylindre de platine 😎

après 2019

un kilogramme est tel que

$$h = 6,626\,070\,15 \times 10^{-34} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

1 kg, c'est... quoi au juste ? 🤔



Les définitions de 2018/19

Le kilogramme (d'après 2019) :

Formulation concrète : ?

Formulation val. num. : un kg est tel que $\{h\} = 6,626\,070\,15 \times 10^{-34}$ lorsqu'exprimée en $\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$.

$$\underbrace{h}_{\text{fixé par la nature}} = \underbrace{6,626\,070\,15 \times 10^{-34}}_{\text{fixé par convention}} \underbrace{\text{kg}}_{\text{défini par cette égalité}} \underbrace{\text{m}^2 \text{s}^{-1}}_{\text{défini par ailleurs (c et césium)}}$$



Les définitions de 2018/19

Le kilogramme (d'après 2019)

Formulation concrète : ? cherchons une expérience.



Les définitions de 2018/19

Le kilogramme (d'après 2019)

Formulation concrète : ? cherchons une expérience.

Atome immobile qui absorbe un photon de longueur d'onde λ .





Les définitions de 2018/19

Le kilogramme (d'après 2019)

Formulation concrète : ? cherchons une expérience.

Atome immobile qui absorbe un photon de longueur d'onde λ .



⇒ Conservation de la quantité de mouvement : $\frac{h}{\lambda} = mv_r$

Si $\lambda = 662,6\,070\,15\text{ nm}$ et $v_r = 10^{-27}\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, alors $m = \frac{h}{\lambda v_r} = 1\text{ kg}$.



Les définitions de 2018/19

Le kilogramme (d'après 2019)

Formulation concrète : ? cherchons une expérience.

Atome immobile qui absorbe un photon de longueur d'onde λ .



⇒ Conservation de la quantité de mouvement : $\frac{h}{\lambda} = mv_r$

Si $\lambda = 662,6\,070\,15\text{ nm}$ et $v_r = 10^{-27}\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, alors $m = \frac{h}{\lambda v_r} = 1\text{ kg}$.

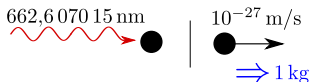
⇒ $m = 1\text{ kg}$ est la masse d'un objet qui, absorbant un photon de $\lambda = 662,6\,070\,15\text{ nm}$, acquiert une vitesse de recul $v_r = 10^{-27}\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.



Les définitions de 2018/19

Le kilogramme (d'après 2019)

Formulation concrète : « $m = 1 \text{ kg}$ est défini comme la masse d'un objet qui, absorbant un photon de $\lambda = 662,6\,070\,15 \text{ nm}$, acquiert une vitesse de recul $v_r = 10^{-27} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. »



- Toutes ces val. num. sont exactes, elles définissent ce qu'est 1 kg.
- Définition équivalente à $\{h\} = 6,626\,070\,15 \times 10^{-34}$.

Explications accessibles pour des terminales ?



Les définitions de 2018/19

Le kilogramme (d'après 2019)

Autre façon d'expliquer : dire que fixer $\{h\}$ permet bien de mesurer des masses :

$$m = \frac{h \leftarrow \text{fixée}}{\lambda \nu_r \leftarrow \text{mesurés}}$$

- Utilisé pour les atomes,
incertitude :
 $u(m)/m = 10^{-10}$!

**Mesurer une masse
grâce à l'impulsion d'un photon**

Pierre Cladé (pierre.clade@khg.ignres.fr) et Saïda Guellati-Khelifa (saida.guellati@khg.ignres.fr)
Laboratoire Kastler Brossel (Sorbonne Université, CNRS, ENS-Université PSL, Collège de France), 4 place Jussieu, 75005 Paris

Utilisé aussi avant 2019, mais h devait être mesurée par ailleurs (dans une exp. qui mobilise une masse de référence).



Les définitions de 2018/19

Le kilogramme (d'après 2019)

Autre façon d'expliquer : dire que fixer $\{h\}$ permet bien de mesurer des masses :

$$m = \frac{h \leftarrow \text{fixée}}{\lambda \nu_r \leftarrow \text{mesurés}}$$

- Utilisé pour les atomes, incertitude :
 $u(m)/m = 10^{-10}$!

Mesurer une masse grâce à l'impulsion d'un photon

Pierre Cladé (pierre.clade@khm.univ-paris.fr) et Saidia Guellati-Khelifa (saidia.guellati@khm.univ-paris.fr)
Laboratoire Kastler Brossard (Sorbonne Université, CNRS, ENS-Université PSL, Collège de France), 4 place Jussieu, 75005 Paris

Utilisé aussi avant 2019, mais h devait être mesurée par ailleurs (dans une exp. qui mobilise une masse de référence).

- Pour passer à des masses macroscopiques : compter les atomes dans une sphère de silicium monocristalline.



Projet Avogadro.
Nb d'atomes dans la
sphère AVO28-S5c :

$$N = 2,151\,885\,70(4) \times 10^{25}$$

$$u(N)/N = 2 \times 10^{-8},$$

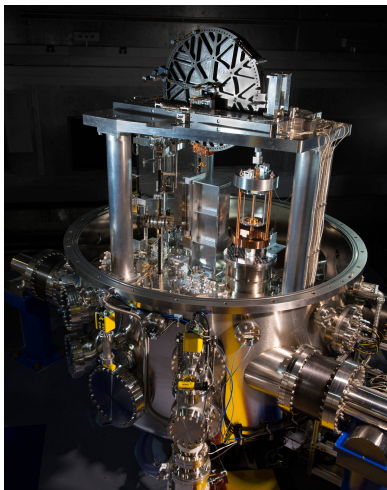
arxiv.org/pdf/1512.05642



Les définitions de 2018/19

Le kilogramme (d'après 2019) et la balance de Kibble

C'est l'expérience "canonique" pour la pesée via la nouvelle définition.



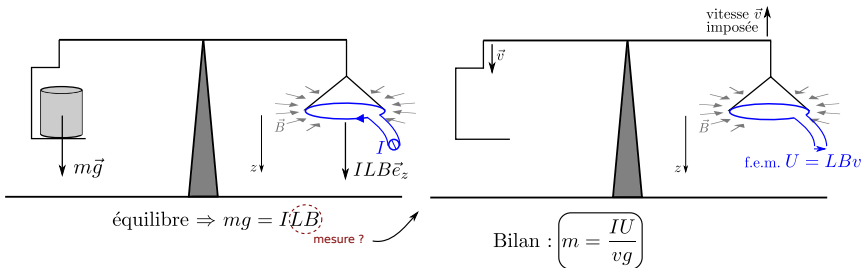
Balance du NIST



Les définitions de 2018/19

Le kilogramme (d'après 2019) et la balance de Kibble

C'est l'expérience "canonique" pour la pesée via la nouvelle définition.



→ U et I mesurés en utilisant des effets quantiques :

- U via effet Josephson, $U = nK_J^{-1} \times f$, $n \in \mathbb{Z}$ et $K_J = 2e/h$.
- R via effet Hall : $R = R_K/n$, $n \in \mathbb{N}^*$, $R_K = h/e^2$.

Compiqué pour des lycéens.



Les définitions de 2018/19

La mole (d'après 2019) :

La constante d'Avogadro N_A .



Les définitions de 2018/19

La mole (d'après 2019) :

La constante d'Avogadro N_A .

Formulation concrète : une mole contient par définition $6,022\,140\,76 \times 10^{23}$ entités.

Formulation val. num. : une mole est telle que

$$\{N_A\} = 6,022\,140\,76 \times 10^{23}$$

lorsqu'exprimée en mol^{-1} .



Les définitions de 2018/19

La mole (d'après 2019) :

La constante d'Avogadro N_A .

Formulation concrète : une mole contient par définition $6,022\,140\,76 \times 10^{23}$ entités.

Formulation val. num. : une mole est telle que

$$\{N_A\} = 6,022\,140\,76 \times 10^{23}$$

lorsqu'exprimée en **mol**⁻¹.

Remarque sur l'ancienne définition (1960 - 2018) :

- une mole était le nombre d'atomes présents dans 12 g de ¹²C ;
- équivalent à fixer la val. num. $\{M_{12C}\} = 12$ (masse molaire du ¹²C en g/mol).

Ce n'est plus le cas. En 2022, $M_{12C} = 12,000\,000\,0126(37)$ g/mol.



Les définitions de 2018/19

Le kelvin (d'après 2019) :

La constante de Boltzmann k_B .

Formulation val. num. :

$\{k_B\} = 1,380\,649 \times 10^{-23}$ lorsqu'exprimée en
 $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$

Formulation concrète : ?



Thermomètre acoustique à gaz,
NIST



Les définitions de 2018/19

Le kelvin (d'après 2019) :

La constante de Boltzmann k_B .

Formulation val. num. :

$\{k_B\} = 1,380\,649 \times 10^{-23}$ lorsqu'exprimée en $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$

Formulation concrète : ?

Remarque :

Constante des gaz parfait $R = N_A k_B$.

$\{N_A\}$ et $\{k_B\}$ fixées $\Rightarrow \{R\}$ est fixée.

Définition équivalente du kelvin :

$\{R\} = 8,314\,462\,618\,153\,24$ lorsqu'exprimée en $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.



Thermomètre acoustique à gaz,
NIST



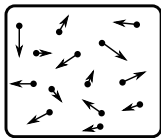
Les définitions de 2018/19

Le kelvin (d'après 2019) :

Formulation val. num. : $\{R\} = 8,314\,462\,618\,153\,24$ lorsqu'exprimée en $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

Formulation concrète : utilisons $pV = nRT$ pour trouver une situation concrète.

Formulation concrète : “ $T = 1\text{ K}$ est définie comme la température de $n = 1\text{ mol}$ de gaz modélisé parfait, contenu dans un volume $V = 1\text{ m}^3$, lorsqu'il exerce une pression $p = 8,314\,462\,618\,153\,24\text{ Pa}$ sur les parois.”



$\Rightarrow 1\text{ K}$

1 m^3 1 mol
 $8,31446261815324\text{ Pa}$



Les définitions de 2018/19

Le kelvin (d'après 2019) :

Autre façon d'expliquer : dire que fixer $\{R\}$ (ou $\{k_B\}$ et $\{N_A\}$) permet bien des mesures de T , via

$$T = \frac{pV/n \leftarrow \text{mesurés}}{R \leftarrow \text{fixé}}$$

- C'est le fonctionnement des thermomètres à gaz.
- Utilisé bien avant 2019, mais R devait être mesurée par ailleurs, dans une expérience identique où la température est connue ($T_{\text{triple}, \text{H}_2\text{O}}$ par exemple) \rightarrow n'était pas une mesure "primaire".



Les définitions de 2018/19

Le kelvin (d'après 2019) :

Autre façon d'expliquer : dire que fixer $\{R\}$ (ou $\{k_B\}$ et $\{N_A\}$) permet bien des mesures de T , via

$$T = \frac{pV/n \leftarrow \text{mesurés}}{R \leftarrow \text{fixé}}$$

- C'est le fonctionnement des thermomètres à gaz.
- Utilisé bien avant 2019, mais R devait être mesurée par ailleurs, dans une expérience identique où la température est connue ($T_{\text{triple}, \text{H}_2\text{O}}$ par exemple) \rightarrow n'était pas une mesure "primaire".

Remarque sur l'ancienne définition (1954 - 2019) :

- Kelvin défini en fixant la val. num. du point triple de l'eau, à $\{T_{\text{triple}, \text{H}_2\text{O}}\} = 273,16$.
- Ce n'est plus le cas. En 2019, $T_{\text{triple}, \text{H}_2\text{O}} = 273,160\,00(10) \text{ K}$.



Les définitions de 2018/19

L'ampère :

La charge élémentaire e



Les définitions de 2018/19

L'ampère :

La charge élémentaire e

Formulation val. num. : $\{e\} = 1,602\,176\,634 \times 10^{-19}$ exprimée en **A** · s.

Formulation concrète : ?

$$\text{Rq : } N = \frac{1}{1,602\,176\,634 \times 10^{-19}} = 6,24150907446... \times 10^{18} \text{ exact.}$$



Les définitions de 2018/19

L'ampère :

La charge élémentaire e

Formulation val. num. : $\{e\} = 1,602\,176\,634 \times 10^{-19}$ exprimée en **A** · s.

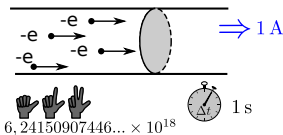
Formulation concrète : ?

$$\text{Rq : } N = \frac{1}{1,602\,176\,634 \times 10^{-19}} = 6,24150907446... \times 10^{18} \text{ exact.}$$

Formulation concrète : 1 A est défini comme le courant réalisé par le passage de

$N = 6,24150907446... \times 10^{18}$ électrons par seconde.

En effet, $I = \frac{N \times e}{1\text{ s}} = 1\text{ A.}$





Les définitions de 2018/19

L'ampère :

Autre façon d'expliquer : dire que fixer $\{e\}$ permet bien des mesures de I , via

$$I = \frac{\text{nb d'électrons (mesuré)} \times e \leftarrow \text{fixé}}{\Delta t \leftarrow \text{mesuré}}.$$

Rq : expériences de comptage d'électrons en cours de conception.

Actuellement ce n'est pas la méthode utilisée (on mesure U et R via Josephson et Hall).



Étalon réglable 0-10 V à partir de l'effet Josephson (NIST).



Les définitions de 2018/19

Bilan : des définitions “valeurs numériques”...

| | |
|-------------------|---|
| seconde | $\{\Delta\nu_{\text{Cs}}\} = 9\,192\,631\,770$ lorsqu'exprimée en s^{-1} |
| mètre | $\{c\} = 299\,792\,458$ lorsqu'exprimée en $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ |
| kilogramme (2019) | $\{h\} = 6,626\,070\,15 \times 10^{-34}$ lorsqu'exprimée en $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ |
| ampère (2019) | $\{e\} = 1,602\,176\,634 \times 10^{-19}$ lorsqu'exprimée en $\text{A} \cdot \text{s}$ |
| kelvin (2019) | $\{k_{\text{B}}\} = 1,380\,649 \times 10^{-23}$ lorsqu'exprimée en $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ |
| mole (2019) | $\{N_{\text{A}}\} = 6,022\,140\,76 \times 10^{23}$ lorsqu'exprimée en mol^{-1} |

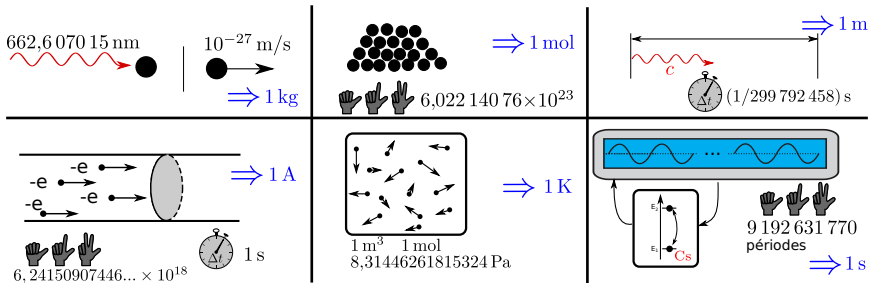


Les définitions de 2018/19

Bilan : des définitions “valeurs numériques”...

| | |
|-------------------|---|
| seconde | $\{\Delta\nu_{\text{Cs}}\} = 9\,192\,631\,770$ lorsqu'exprimée en s^{-1} |
| mètre | $\{c\} = 299\,792\,458$ lorsqu'exprimée en $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ |
| kilogramme (2019) | $\{h\} = 6,626\,070\,15 \times 10^{-34}$ lorsqu'exprimée en $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ |
| ampère (2019) | $\{e\} = 1,602\,176\,634 \times 10^{-19}$ lorsqu'exprimée en $\text{A} \cdot \text{s}$ |
| kelvin (2019) | $\{k_{\text{B}}\} = 1,380\,649 \times 10^{-23}$ lorsqu'exprimée en $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ |
| mole (2019) | $\{N_{\text{A}}\} = 6,022\,140\,76 \times 10^{23}$ lorsqu'exprimée en mol^{-1} |

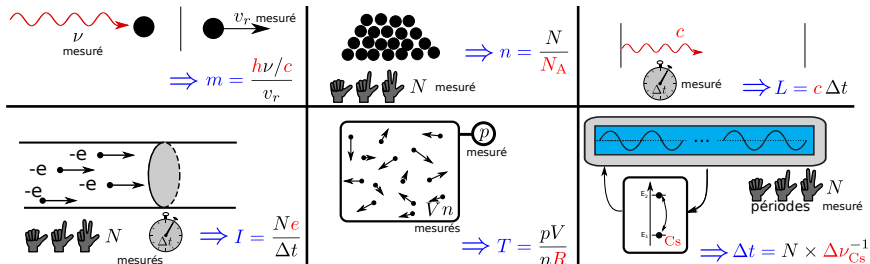
...aux définitions concrètes :





Les définitions de 2018/19

Ces définitions permettent de mesurer :



Outline

1. La métrologie et le SI

2. Comment définir une unité ?

- 2.1 Le principe d'une définition
- 2.2 Exemples de formulations "concrètes"
- 2.3 Les définitions de 2018/19

3. Pourquoi et comment redéfinir une unité ?

- 3.1 Le kg d'avant 2019
- 3.2 Le kg d'après 2019
- 3.3 Les caractéristiques d'une redéfinition

Outline

1. La métrologie et le SI

2. Comment définir une unité ?

- 2.1 Le principe d'une définition
- 2.2 Exemples de formulations "concrètes"
- 2.3 Les définitions de 2018/19

3. Pourquoi et comment redéfinir une unité ?

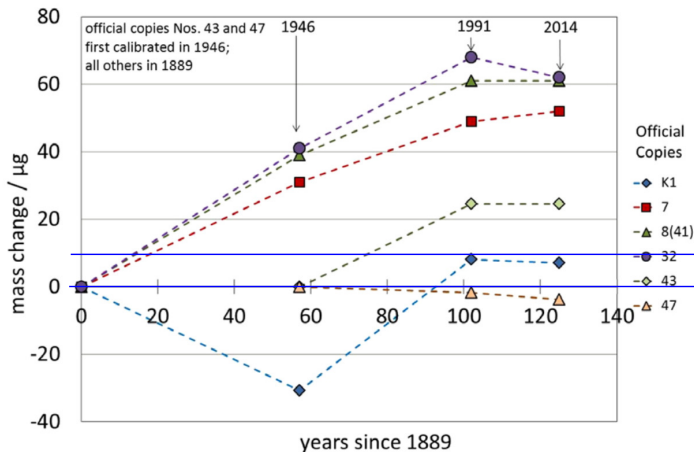
- 3.1 Le kg d'avant 2019
- 3.2 Le kg d'après 2019
- 3.3 Les caractéristiques d'une redéfinition



Le kg d'avant 2019

La situation avant 2019 :

La masse du PIK / des copies varie (adsorption de matière ? mal compris)



© BIPM

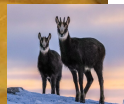
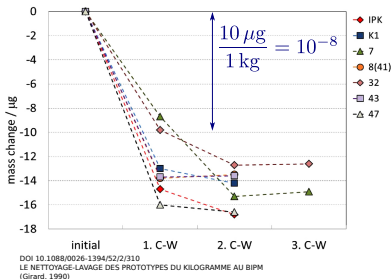
$$\frac{10 \mu\text{g}}{1 \text{ kg}} = 10^{-8}$$



Le kg d'avant 2019

La situation avant 2019 :

- Procédure de nettoyage pour retirer les poussières de surface :



- Usure inattendue des étalons de travail (déplacements) : entre 1992 et 2014, le BIPM étalonne les masses avec une erreur de 35 μg (!)...
- ...qui n'est découverte qu'en 2014 quand on ressort le PKI de son coffre.

<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0026-1394/53/5/1204>



Le kg d'avant 2019

La situation avant 2019 :

Les meilleurs comparateurs de masse sont à $\frac{u(m)}{m} \approx 10^{-9}$.

Mettler Toledo M One
 $u < 1 \mu\text{g}$ (@ 1 kg)



Mais tout ce qui précède montre que $\frac{u(m)}{m}$ plafonne à 10^{-8} .

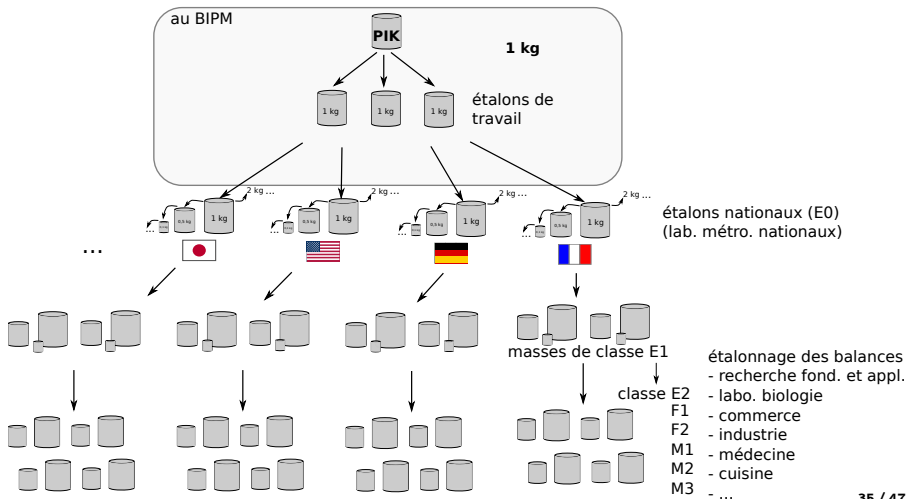
Guère de progrès envisageables.



Le kg d'avant 2019

La situation avant 2019 :

Autre point faible : tout part du PIK à 1 kg.

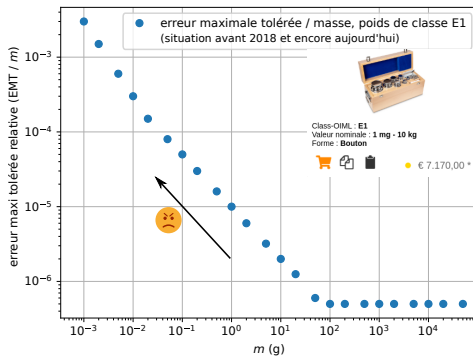




Le kg d'avant 2019

La situation avant 2019 :

⇒ descendre dans l'échelle des masses fait perdre en précision.



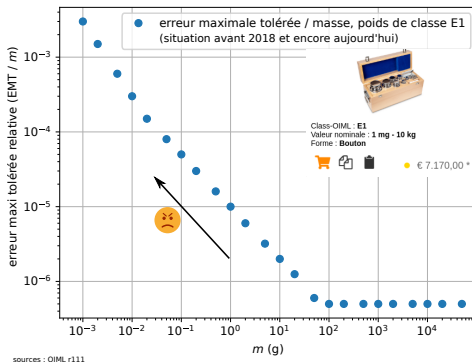
sources : OIML r111



Le kg d'avant 2019

La situation avant 2019 :

⇒ descendre dans l'échelle des masses fait perdre en précision.



Incertitudes sur les masses se répercutent sur :

- La mole (il faut peser **12 g** de ^{12}C).
- L'ampère et autres unités électriques

→

$$\|\vec{F}\| = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2I^2}{d} \underset{\text{déf}}{=} 2 \times 10^{-7} \text{ N/m}$$

Outline

1. La métrologie et le SI

2. Comment définir une unité ?

- 2.1 Le principe d'une définition
- 2.2 Exemples de formulations "concrètes"
- 2.3 Les définitions de 2018/19

3. Pourquoi et comment redéfinir une unité ?

- 3.1 Le kg d'avant 2019
- 3.2 Le kg d'après 2019
- 3.3 Les caractéristiques d'une redéfinition



Le kg d'après 2019

⇒ Nécessité de redéfinir le kg.

⇒ Choix de $\{h\}$. (Et de $\{e\}$ pour l'ampère.)

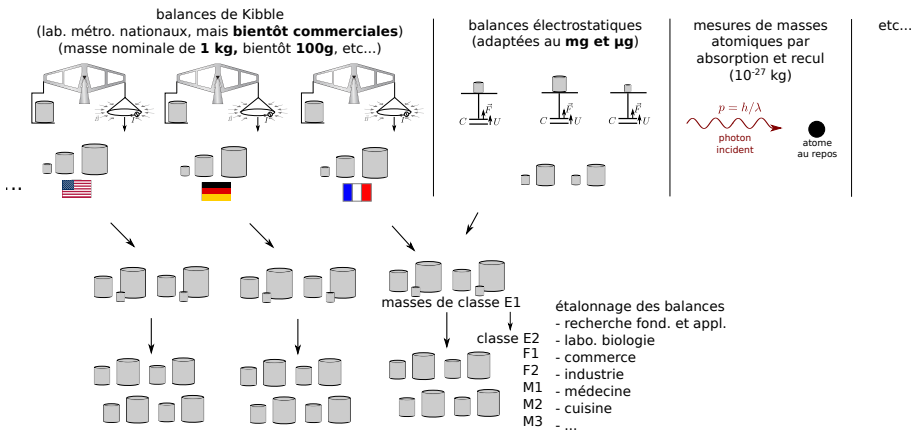
Quels gains ?

- Métrologie électrique 😊. (car $R_K = h/e^2$ et $K_J = 2e/h$)
- Balances primaires (sans utiliser de masses de références) de Kibble.
- Plus d'artefacts matériel.



Le kg d'après 2019

La situation après 2019 : quels gains ?

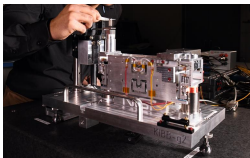




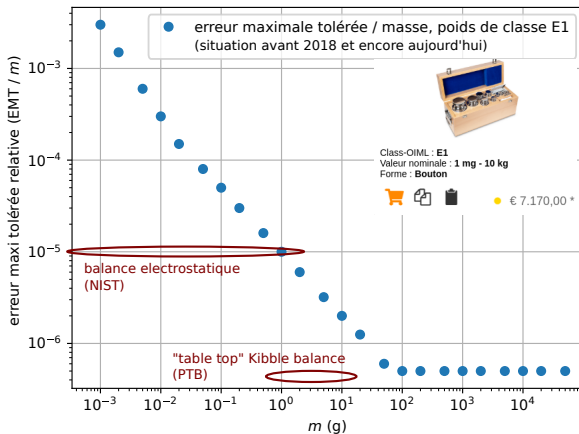
Le kg d'après 2019

La situation après 2019 : quels gains ?

Electrostatic balance (INRIM)
doi: 10.1109/TIM.2018.2890747



"table top" Kibble balance at NIST
<https://www.nist.gov/hoac/technology/mass-force-and-acceleration/tabletop-kibble-balance-gram-level-mass-realization>



sources : OIML r111,
BIPM "Progress in the realization of the new definition of the kilogram", 2021

Outline

1. La métrologie et le SI

2. Comment définir une unité ?

- 2.1 Le principe d'une définition
- 2.2 Exemples de formulations "concrètes"
- 2.3 Les définitions de 2018/19

3. Pourquoi et comment redéfinir une unité ?

- 3.1 Le kg d'avant 2019
- 3.2 Le kg d'après 2019
- 3.3 Les caractéristiques d'une redéfinition



Les caractéristiques d'une redéfinition

Le transfert d'incertitude : $m_{\text{PIK}} \leftrightarrow h$

Relation de la balance de Kibble : $m = \frac{\alpha f_1 f_2}{vg} h.$

- Avant la redéf. : sert à mesurer $h = \frac{vg}{\alpha f_1 f_2} \underbrace{m_{\text{PIK}}}_{\text{exact}}.$

- Après la redéf. : sert à mesurer $m_{\text{PIK}} = \frac{\alpha f_1 f_2}{vg} \underbrace{h}_{\text{exact}}.$

Avant ou après, on mesure v , g , f_1 , f_2 , α de la même façon. Donc :

$$\left(\frac{u(h)}{h} \right)_{\text{avant redéf.}} = \left(\frac{u(m_{\text{PIK}})}{m_{\text{PIK}}} \right)_{\text{après redéf.}}$$



Les caractéristiques d'une redéfinition

Le transfert d'incertitude

Même incertitude relative pour l'ancienne grandeur et pour la nouvelle.

| SI juste avant 2019 | SI juste après 2019 |
|--|---|
| $m_{\text{PIK}} \underset{\text{déf}}{=} 1 \text{ kg}$ $h = 6,626\,070\,150(69) \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ | $m_{\text{PIK}} = 1,000\,000\,00(1) \text{ kg}$ $h \underset{\text{déf}}{=} 6,626\,070\,15 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ |
| $M_{12\text{C}} \underset{\text{déf}}{=} 12 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ $N_{\text{A}} = 6,022\,140\,758(62) \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ | $M_{12\text{C}} = 12,000\,000\,0000(54) \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ $N_{\text{A}} \underset{\text{déf}}{=} 6,022\,140\,76 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ |
| $\mu_0/(4\pi) \underset{\text{déf}}{=} 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$ $e = 1,602\,176\,634\,1(83) \times 10^{-19} \text{ C}$ | $\mu_0/(4\pi) =$ $1,000\,000\,000\,00(23) \times 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$ $e \underset{\text{déf}}{=} 1,602\,176\,634 \times 10^{-19} \text{ C}$ |
| $T_{\text{triple}, \text{H}_2\text{O}} \underset{\text{déf}}{=} 273,16 \text{ K}$ $k_{\text{B}} = 1,380\,649\,03(51) \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$ | $T_{\text{triple}, \text{H}_2\text{O}} = 273,160\,00(10) \text{ K}$ $k_{\text{B}} \underset{\text{déf}}{=} 1,380\,649 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$ |



Les caractéristiques d'une redéfinition

Conséquences du transfert d'incertitude

Ceci se généralise à toute pesée avec une balance de Kibble :

$$\left(\frac{u(m)}{m} \right)_{\text{après redéf.}} = \left(\frac{u(h)}{h} \right)_{\text{avant redéf.}}$$

⇒ La technologie qui permet la mesure de h **est aussi** celle qui permet les pesées dans le nouveau système.



Les caractéristiques d'une redéfinition

Conséquences du transfert d'incertitude

Ceci se généralise à toute pesée avec une balance de Kibble :

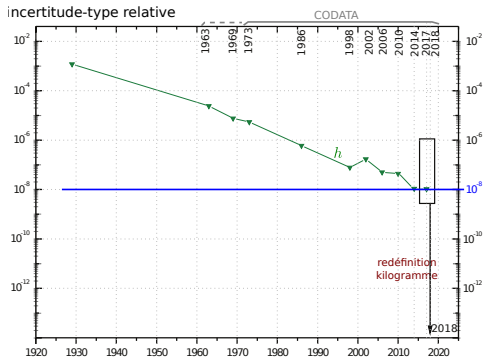
$$\left(\frac{u(m)}{m} \right)_{\text{après redéf.}} = \left(\frac{u(h)}{h} \right)_{\text{avant redéf.}}$$

⇒ La technologie qui permet la mesure de h **est aussi** celle qui permet les pesées dans le nouveau système.

⇒ Il faut une mesure de la constante h aussi précise que ce que permet l'ancien système pour les masses.

⇒ Il faut

$$\left(\frac{u(h)}{h} \right)_{\text{avant redéf.}} \approx 10^{-8}.$$





Les caractéristiques d'une redéfinition

Mai 2019 : on redéfinit

- Accord sur une valeur de h :
$$h = 6,626\,070\,150(69) \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} \quad \rightarrow \quad h = 6,626\,070\,150 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$
- Les balances de Kibble servent alors, non plus à mesurer h , mais à peser sans utiliser de masse de référence.



Les caractéristiques d'une redéfinition

Mai 2019 : on redéfinit

- Accord sur une valeur de h :

$$h = 6,626\,070\,150(69) \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} \quad \rightarrow \quad h = 6,626\,070\,150 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$
- Les balances de Kibble servent alors, non plus à mesurer h , mais à peser sans utiliser de masse de référence.

Avoir attendu que $u(h)/h = 10^{-8}$ garantit :

- pas de changement perceptible, $(1 \text{ kg})_{\text{avant}} = (1 \text{ kg})_{\text{après}}$ à $10 \mu\text{g}$ près (10^{-8}) ;
- il existe une mise en pratique pour peser (Kibble) aussi précise que ce qui se faisait de mieux avant.



Les caractéristiques d'une redéfinition

Bilan

Redéfinir :

- Pourquoi : quand la nouvelle définition permet plus de précision.
- Comment : en mobilisant une même expérience, avant pour mesurer la future constante de définition, après pour mesurer dans la nouvelle unité.
(Puis d'autres expériences permettront, ensuite, d'autres mesures.)

Pour en savoir plus :

Physique et mesure, Ellipses, 2022.



Question pour conclure : quelle sera la prochaine unité redéfinie ? Quand ?