

Master 1: Qualité et métrologie appliquée à l'Agronomie

Métrologie scientifique

Dr farhi k

Contenu de la matière

1. Etalons fondamentaux et prototypes internationaux
2. Comparaison des étalons nationaux avec les étalons internationaux
3. Organisation des comparaisons internationales au niveau des étalons nationaux
4. Assurance et coordination des techniques de mesures correspondantes
5. Coordination des déterminations relatives aux constantes physiques fondamentales

Un étalon de mesure est une grandeur de référence qui sert à définir ou à matérialiser l'unité de mesure.

Il doit être:

- ❖ précis,
- ❖ exact,
- ❖ Reproductible,
- ❖ universel.

Le Système international d'unités (SI) qui a été adopté par la Conférence générale des poids et mesures en 1960 est l'aboutissement de plusieurs dizaines d'années de recherche fructueuses dans l'établissement d'un système logique d'unités de mesures. Le SI a été conçu afin que, en principe, chaque mesure d'une grandeur physique ou chimique puisse être exprimée par un nombre associé à une unité spécifique. Toute grandeur peut être exprimée par une combinaison de sept unités de base connues comme les unités de base du SI.

Les unités de base de SI (Etalons fondamentaux)

1. La seconde
2. Le mètre
3. Le kilogramme
4. L'ampère
5. Le kelvin
6. La mole
7. La candela



Grandeur de base		Unité de base	
Nom	Symbole caractéristique	Nom	Symbol e
Temps	t	Seconde	s
Longueur	l, x, r, etc.	Mètre	m
Masse	m	kilogramme	kg
courant électrique	I, i	ampère	A
température thermodynamique	T	kelvin	k
quantité de matière	n	mole	mol
intensité lumineuse	Iv	candela	cd

La définition du SI fondée sur les valeurs numériques fixées des sept constantes choisies permet de déduire la définition de chacune des sept unités de base du SI à l'aide d'une ou plusieurs de ces constantes, selon les cas.

Les sept constantes définissant le SI

Constante	Symbole	Valeur numérique	unité
fréquence de la transition hyperfine du césium	$\Delta\nu_{\text{Cs}}$	9 192 631 770	Hz
vitesse de la lumière dans le vide	c	299 792 458	m/s
constante de Planck	h	$6,626\,070\,15 \times 10^{-34}$	J s
charge élémentaire	e	$1,602\,176\,634 \times 10^{-19}$	C
constante de Boltzmann	k	$1,380\,649 \times 10^{-23}$	J/K
constante d'Avogadro	N_A	$6,022\,140\,76 \times 10^{23}$	1/mol
efficacité lumineuse	K _{cd}	683	lm /w

La seconde

La seconde, symbole s, est l'unité de temps du SI. Elle est définie en prenant la valeur numérique fixée de la fréquence du césium, $\Delta\nu_{\text{Cs}}$, la fréquence de la transition hyperfine de l'état fondamental de l'atome de césium 133 non perturbé, égale à 9 192 631 770 lorsqu'elle est exprimée en Hz, unité égale à s⁻¹.

Cette définition implique la relation exacte $\Delta\nu_{\text{Cs}} = 9\,192\,631\,770$ Hz. En inversant cette relation, la seconde est exprimée en fonction de la constante $\Delta\nu_{\text{Cs}}$:

$$1 \text{ Hz} = \frac{\Delta\nu_{\text{Cs}}}{9\,192\,631\,770}$$

$$1 \text{ s} = \frac{9\,192\,631\,770}{\Delta\nu_{\text{Cs}}}$$

Il résulte de cette définition que la seconde est égale à 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 non perturbé.

Le mètre

Le mètre, symbole m, est l'unité de longueur du SI. Il 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} , la seconde étant définie en fonction de $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.

Cette définition implique la relation exacte $c = 299\,792\,458 \text{ m s}^{-1}$. En inversant cette relation, le mètre est exprimé en fonction des constantes c et $\Delta\nu_{\text{Cs}}$:

$$1 \text{ m} = \left(\frac{c}{299\,792\,458} \right) \text{ s} = \frac{9\,192\,631\,770}{299\,792\,458} \frac{c}{\Delta\nu_{\text{Cs}}} \approx 30,663\,319 \frac{c}{\Delta\nu_{\text{Cs}}}.$$

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

Le kilogramme

Le kilogramme, symbole kg, est l'unité de masse du SI. Il est défini en prenant la valeur numérique fixée de la constante de Planck, h , égale à $6,626\ 070\ 15 \times 10^{-34}$ lorsqu'elle est exprimée en J s, unité égale à $\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$, le mètre et la seconde étant définis en fonction de c et $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.

Cette définition implique la relation exacte $h = 6,626\ 070\ 15 \times 10^{-34} \text{ kg m}^2 \text{s}^{-1}$. En inversant cette relation, le kilogramme est exprimé en fonction des trois constantes h , $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ et c :

$$1 \text{ kg} = \left(\frac{h}{6,626\ 070\ 15 \times 10^{-34}} \right) \text{ m}^{-2} \text{ s}$$

$$1 \text{ kg} = \frac{(299\ 792\ 458)^2}{(6,626\ 070\ 15 \times 10^{-34})(9\ 192\ 631\ 770)} \frac{h \Delta\nu_{\text{Cs}}}{c^2} \approx 1,475\ 5214 \times 10^{40} \frac{h \Delta\nu_{\text{Cs}}}{c^2}$$

Cette définition permet de définir l'unité $\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$ (l'unité des grandeurs physiques « action » et « moment cinétique »). Ainsi associée aux définitions de la seconde et du mètre, l'unité de masse est exprimée en fonction de la constante de Planck, h .

L'ampère

L'ampère, symbole A, est l'unité de courant électrique du SI. Il est défini en prenant la valeur numérique fixée de la charge élémentaire, e , égale à $1,602\ 176\ 634 \times 10^{-19}$ lorsqu'elle est exprimée en C, unité égale à A s, la seconde étant définie en fonction de $\Delta\nu_{Cs}$.

Cette définition implique la relation exacte $e = 1,602\ 176\ 634 \times 10^{-19}$ A s. En inversant cette relation, l'ampère est exprimé en fonction des constantes e et $\Delta\nu_{Cs}$:

$$1\ \text{A} = \left(\frac{e}{1,602\ 176\ 634 \times 10^{-19}} \right) \text{s}^{-1}$$

$$1\ \text{A} = \frac{1}{(9\ 192\ 631\ 770)(1,602\ 176\ 634 \times 10^{-19})} \Delta\nu_{Cs} e \approx 6,789\ 687 \times 10^8 \Delta\nu_{Cs} e$$

Il résulte de cette définition qu'un ampère est le courant électrique correspondant au flux de $1/(1,602\ 176\ 634 \times 10^{-19})$ charges élémentaires par seconde.

Le kelvin

Le kelvin, symbole K, est l'unité de température thermodynamique du SI. Il est défini en prenant la valeur numérique fixée de la constante de Boltzmann, k , égale à $1,380\,649 \times 10^{-23}$ lorsqu'elle est exprimée en J K^{-1} , unité égale à $\text{kg m}^2 \text{s}^{-2} \text{K}^{-1}$, le kilogramme, le mètre et la seconde étant définis en fonction de h , c et $\Delta\nu_{\text{Cs}}$

Cette définition implique la relation exacte $k = 1,380\,649 \times 10^{-23} \text{ kg m}^2 \text{s}^{-2} \text{K}^{-1}$. En inversant cette relation, le kelvin est exprimé en fonction des constantes k , h et $\Delta\nu_{\text{Cs}}$:

$$1 \text{ K} = \left(\frac{1,380\,649}{k} \right) \times 10^{-23} \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-2}$$

$$1 \text{ K} = \frac{1,380\,649 \times 10^{-23}}{(6,626\,070\,15 \times 10^{-34})(9\,192\,631\,770)} \frac{\Delta\nu_{\text{Cs}} h}{k} \approx 2,266\,6653 \frac{\Delta\nu_{\text{Cs}} h}{k}$$

Il résulte de cette définition qu'un kelvin est égal au changement de la température thermodynamique résultant d'un changement de l'énergie thermique kT de $1,380\,649 \times 10^{-23} \text{ J}$.

La mole, symbole mol, est l'unité de quantité de matière du SI. Une mole contient exactement $6,022\ 140\ 76 \times 10^{23}$ entités élémentaires. Ce nombre, appelé « nombre d'Avogadro », correspond à la valeur numérique fixée de la constante d'Avogadro, N_A , lorsqu'elle est exprimée en mol^{-1} .

La quantité de matière, symbole n , d'un système est une représentation du nombre d'entités élémentaires spécifiées. Une entité élémentaire peut être un atome, une molécule, un ion, un électron, ou toute autre particule ou groupement spécifié de particules.

Cette définition implique la relation exacte $N_A = 6,022\ 140\ 76 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$. En inversant cette relation, on obtient l'expression exacte de la mole en fonction de la constante N_A :

$$1 \text{ mol} = \left(\frac{6,022\ 140\ 76 \times 10^{23}}{N_A} \right)$$

Il résulte de cette définition que la mole est la quantité de matière d'un système qui contient $6,022\ 140\ 76 \times 10^{23}$ entités élémentaires spécifiées.

La candela

La candela, symbole cd, est l'unité du SI d'intensité lumineuse, dans une direction donnée. Elle est définie en prenant la valeur numérique fixée de l'efficacité lumineuse d'un rayonnement monochromatique de fréquence 540×10^{12} Hz, K_{cd} , égale à 683 lorsqu'elle est exprimée en lm W^{-1} , unité égale à cd sr W^{-1} , ou $\text{cd sr kg}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ s}^3$, le kilogramme, le mètre et la seconde étant définis en fonction de h , c et $\Delta\nu_{Cs}$.

Cette définition implique la relation exacte $K_{cd} = 683 \text{ cd sr kg}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ s}^3$ pour le rayonnement monochromatique de fréquence $\nu = 540 \times 10^{12}$ Hz. En inversant cette relation, la candela est exprimée en fonction des constantes K_{cd} , h et $\Delta\nu_{Cs}$:

$$1 \text{ cd} = \left(\frac{K_{cd}}{683} \right) \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-3} \text{ sr}^{-1}$$

$$1 \text{ cd} = \frac{1}{(6,626\,070\,15 \times 10^{-34}) (9\,192\,631\,770)^2 683} (\Delta\nu_{Cs})^2 h K_{cd}$$
$$\approx 2,614\,830 \times 10^{10} (\Delta\nu_{Cs})^2 h K_{cd}$$

Il résulte de cette définition que la candela est l'intensité lumineuse, dans une direction donnée, d'une source qui émet un rayonnement monochromatique de fréquence 540×10^{12} Hz et dont l'intensité énergétique dans cette direction est $(1/683) \text{ W/sr}$.

Les prototypes internationaux

Les prototypes du mètre et du kilogramme originaux, appelés « Mètre des Archives » et « Kilogramme des Archives » avaient été construits en 1799 comme représentant respectivement la longueur de la dix-millionième partie du quart du méridien terrestre et la masse du décimètre cube d'eau.

Du 1878 jusqu'à 1889, la Construction et mesure de trente mètres prototypes (et de quarante kilogrammes prototypes). Cela exigeait de comparer, avec une précision encore jamais atteinte, les nouveaux étalons, à traits et à section en X, entre eux et avec le Mètre des Archives, qui est un étalon à bouts. Cela impliquait la mise au point d'un appareillage spécial de mesure et d'une échelle de température définie et reproductible.

seul **le kilogramme** est représenté matériellement par un étalon unique. Ce prototype, réalisé en 1889 et conservé au Bureau International des Poids et Mesures à Sèvres, est un cylindre de 39 mm de diamètre et de hauteur en platine iridié à 10% . Des copies de ce prototype dispersées dans différents pays servent d'étalons de masse. Les mesures de masse peuvent être faites avec une précision de 10^{-6} .

le kilogramme est la masse du prototype déposé au Bureau International des Poids et Mesures

La très grande précision 10^{-14} , de l'unité du temps amène à redéfinir en 1983 le mètre à partir de la vitesse c_0 de la lumière dans le vide par cette nouvelle définition :

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

Comparaison des étalons nationaux avec les étalons internationaux

La première mission d'un système national de mesure est l'adoption d'un système national d'unités et la mise en œuvre de la législation pour que seules les unités de ce système soient reconnues par la loi cette mission est assurée par **LNM**. débuta à la fin du 19eme siècle dans les pays les plus développés. Elle s'est poursuivie jusqu'à ce jour et au cours des dernières décennies de nombreux pays en voie de développement ont donné une grande priorité à la mise en place de leurs propres LNM avec un niveau de compétence conforme à leurs besoins

Il est très souhaitable que le SI soit adopté en tant que système national, parce que a) le SI est un système cohérent, pratique et bien compris et que b) beaucoup de progrès ont déjà été faits pour son utilisation universelle.

Même si la nécessité de l'uniformité des mesures a été reconnue bien avant la fondation du BIPM en 1875, ce besoin n'a cessé de croître et ce, plus particulièrement au cours des dernières décennies. Parmi les raisons de cette croissance, on peut citer la forte tendance vers la mondialisation du commerce international, la fabrication de produits en coopération internationale, une plus grande complexité technique de la plupart des produits et des services, et la préoccupation croissante pour ce qui est lié à la santé, à la sécurité et aux problèmes de l'environnement. Cette tendance va vraisemblablement s'accroître à l'avenir, renforçant le désir mutuel des nations d'avoir davantage confiance dans les mesures, les essais pratiqués et les certificats de conformité des autres pays.

L'expérience a montré que la voie la plus efficace vers l'uniformité des mesures passe par la collaboration multilatérale entre les organismes nationaux compétents, à la fois au niveau mondial et régional.

chaque LNM peut choisir plusieurs méthodes pour remplir sa mission d'établissement des étalons nationaux.

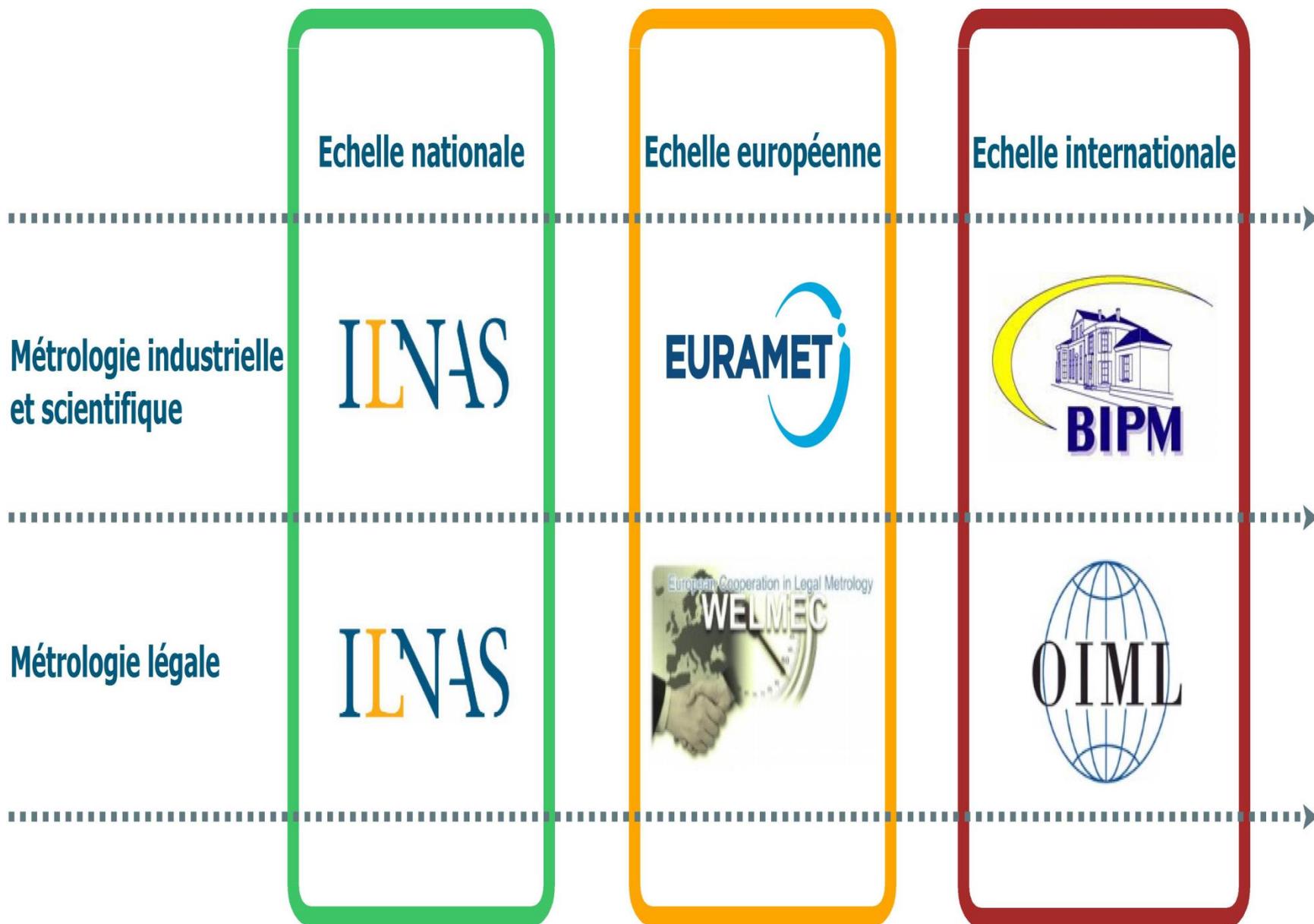
La première de ces méthodes implique que le LNM assure la réalisation physique de l'unité à partir de sa définition, établissant ainsi un étalon primaire qui servira d'étalon national. C'est l'approche la plus fondamentale et elle est d'une grande importance parce que les réalisations physiques fournissent une liaison solide entre la définition de l'unité et sa représentation physique comme étalon. C'est pourtant l'approche qui est en général la plus difficile et la plus coûteuse.

La deuxième méthode ne concerne qu'un nombre limité de grandeurs physiques. Elle implique également qu'un étalon primaire serve d'étalon national mais, dans ce cas, non pas en réalisant l'unité à partir de sa définition, mais en établissant un étalon largement reproductible dont la valeur a été admise grâce au BIPM par convention internationale. On se réfère à cette méthode en parlant de « reproduction » de l'unité plutôt que de « réalisation ».

Citons comme exemple, l'emploi de lasers à fréquence asservie recommandés pour établir un étalon pour le mètre, l'effet Josephson pour le volt, et l'effet Hall quantique pour l'ohm. Grâce à leur grande reproductibilité, ces étalons sont couramment préférés comme étalons nationaux, même par les laboratoires de métrologie qui ont eux-mêmes réalisé les unités concernées et ainsi contribué au choix des valeurs admises

Organisation des comparaisons internationales au niveau des étalons nationaux

Bureau Luxembourgeois de Métrologie (BLM)



[EURAMET](#) : **European Association of National Metrology Institutes**, comprend à ce jour 37 pays (région Europe).

[APMP](#) : **Asia and Pacific Metrology Programme**, comprend 24 économies ; (région Asie - Pacifique).

[SIM](#) : **Sistema Interamericano de Metrologia**, comprend 34 pays (région du continent américain)

[AFRIMETS](#) : **Systeme intra-africain de métrologie** (région d'Afrique), comprend 43 pays

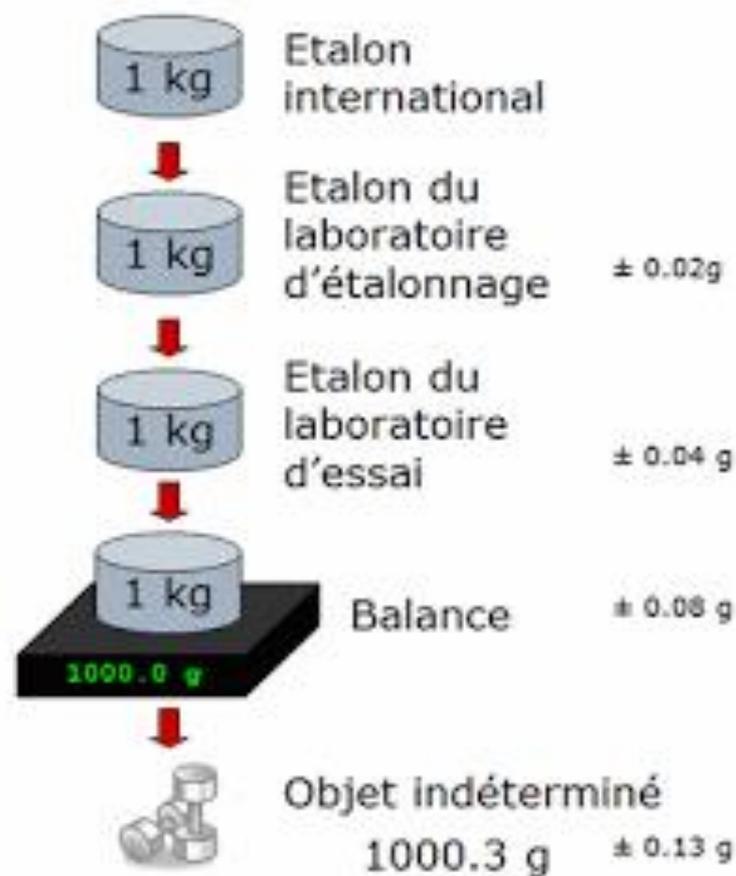
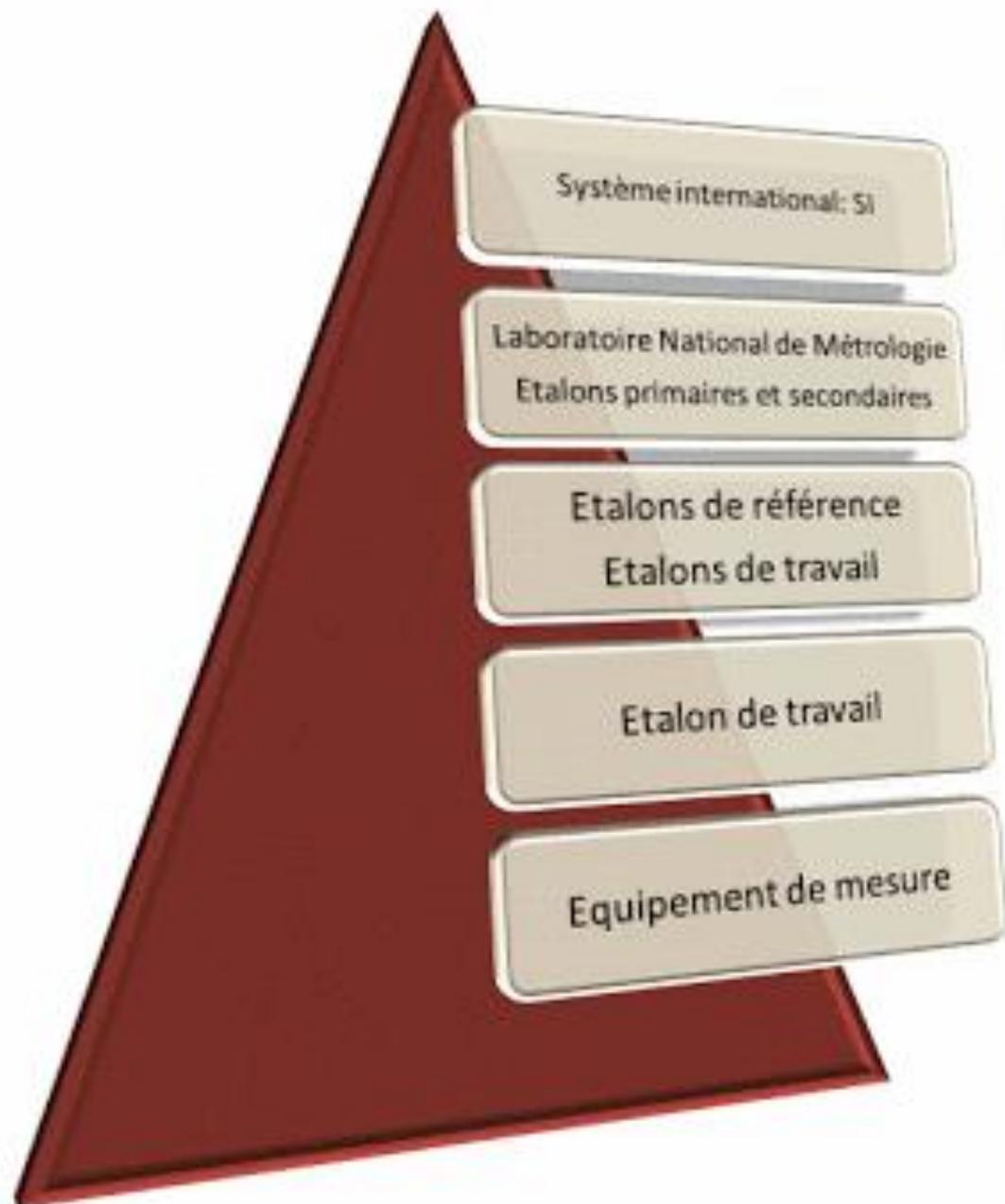
[COOMET](#) : **Euro-Asian Co-operation of National Metrology Institutes**, comprend 12 pays ; (région Europe Est et Cuba).

Assurance et coordination des
techniques de mesures
correspondantes

1*Traçabilité

« Propriété du résultat d'un mesurage ou d'un étalon tel qu'il puisse être relié à des références déterminées, généralement des étalons nationaux ou internationaux, par l'intermédiaire d'une chaîne ininterrompue de comparaisons ayant toutes les incertitudes déterminées ».

Etablie par des raccordements successifs à des étalons de référence, jusqu'aux étalons nationaux, la traçabilité permet d'assurer la cohérence avec les résultats de mesures qui seraient obtenus à d'autres moments, en d'autres lieux et avec d'autres instruments de mesure. Afin d'offrir à l'instrumentation la possibilité de se raccorder à une structure officielle couvrant l'ensemble de la métrologie et des mesures, un Organisme National de Métrologie (ONM) doit être mis en place et qui aura la tâche d'élaborer et de mettre en œuvre les outils permettant d'assurer la cohérence nationale et internationale des mesures.



2*Accréditation

consiste en une attestation délivrée par une tierce partie, ayant rapport à un organisme d'évaluation de la conformité, constituant une reconnaissance formelle de la compétence de ce dernier à réaliser des activités spécifiques d'évaluation de la conformité.

3*Certification

est une procédure par laquelle une tierce partie donne une assurance écrite qu'un produit, un processus ou un service est conforme à des exigences spécifiées.

Exemple d'organismes accréditeurs:

TUNAC en Tunisie,
ALGERAC en Algérie,
SEMAC au Maroc,
...

Quelques organismes d'Accréditation en Afrique



En Tunisie: **TUNAC** (Reconnaissance par l'Organisation Européenne d'Accréditation-EA-et par l'Organisation Internationale des Accréditeurs de Laboratoire-ILAC-).

En Algérie : **ALGERAC** Reconnu EA-ILAC



Au Maroc : **SEMAC**



En Afrique du Sud : **SANAS** - South African National Accreditation System



AFRAC : couvre la région Afrique pour l'accréditation des laboratoires d'étalonnage et des organisateurs de programmes d'essais d'aptitude



AFRAC
AFRICAN ACCREDITATION COOPERATION



SOAC : Système Ouest Africain d'Accréditation



Coordination des déterminations relatives aux constantes physiques fondamentales

L'origine du problème, qui se pose aujourd'hui au système international SI, est la révolution apportée par un ensemble de découvertes récentes et de nouvelles technologies, qui le met en décalage avec la physique moderne tant au niveau du cadre conceptuel que des techniques de mesure. Les sept unités de base sont toutes plus ou moins mises en cause

- le mètre a déjà été redéfini à partir de la seconde et de la vitesse de la lumière ;
- le kilogramme pourrait être redéfini à relativement court terme à partir de la constante de Planck, grâce à la balance du watt, qui utilise l'équivalence entre watt électrique et watt mécanique ;
- les unités électriques ont déjà pris leur indépendance vis-à-vis du SI en retenant pour les constantes de Josephson et de Von Klitzing des valeurs conventionnelles ;
- le kelvin implique l'utilisation du point triple de l'eau alors qu'il serait bien plus satisfaisant de fixer la constante de Boltzmann ;
- la candela n'est qu'une unité dérivée de flux énergétique ;
- la mole est définie par un nombre pur, le nombre d'Avogadro, qui devrait être mieux déterminé pour permettre une alternative à la redéfinition de l'unité de masse, dans laquelle il serait fixé ;
- la seconde pourrait à plus long terme être mieux définie à partir d'une horloge optique, par exemple à hydrogène atomique, ce qui permettrait de la relier à la constante de Rydberg et peut-être un jour, à la masse de l'électron.