

Introduction à la métrologie

Deux exigences se combinent dans la démarche métrologique

1. Mesurer **juste** pour assurer en général la qualité de son propre travail ...
1. Mesurer **juste** pour avoir une référence envers les autres ...
... et comprendre les références des autres ...

Cours de Métrologie : Introduction

- **La mesure des choses :**
 - Un problème historique et commercial
 - L'invention du système métrique
- **Le rôle de la métrologie**
 - Dans le monde
 - Dans l'entreprise
- **Les bases de la métrologie**
 - Les organismes internationaux
- **La métrologie est une composante de la qualité**

Le poids de l'histoire...

- **"L'homme est la mesure de toutes choses."**

Protagoras (sophiste grec, 485-411 avJC)

- **la France de l'ancien régime comptait parmi les pays les plus inventifs et les plus chaotiques dans ce domaine.**
- **En 1795, il existait en France plus de sept cents unités de mesure différentes.**

Ce à quoi vous avez échappé

- **Sous l'ancien régime, dans le royaume de France :**
 - **Des bases saines :**
 - » Le pied de roi* (0,32483 m) se subdivise en 12 pouces,
 - » le pouce (2,706cm) se subdivise en 12 lignes,
 - » la ligne (0,226 cm) se subdivise en 12 points
 - » le point (0,188mm).
- **L'anarchie, d'une région ou d'un service à l'autre :**
 - **L'aune : elle était utilisée surtout pour mesurer les étoffes.**
 - » L'aune de Paris : 1 m 1884 (soit 3 pieds 8 pouces)
 - » L'aune de Bordeaux : 1 m 4561
 - » L'aune de Troyes : 0 m 812...

http://www.histoire-genealogie.com/themes_detude/institutions/mesures.htm

Cette anarchie est clairement dénoncée dans les cahiers de doléances

- *"Il serait avantageux pour la nation que chaque province fût gouvernée par une même coutume, qu'il n'y eût qu'une même mesure pour tout ce qui se vend à l'aune ; qu'un même poids, même mesure pour les grains. Il résulte de ces différences des inconvénients que l'on ne peut pévoir, ce qui donne lieu à de fréquentes contestations, qui conduisent souvent à des procès, surtout relativement aux coutumes..."*

Flée (S. Château-du-Loir)

... soit dit en passant

- Le monde n'a pas si changé:
les même types de questions se retrouvent, par exemple, dans toute la problématique de la reconnaissance des normes européennes par la Suisse ...
- Une grande partie du travail produit par la bureaucratie de l'Union Européenne consiste en l'établissement de normes et critères de mesure.
- On peut donc dire que l'Europe est *construite* en bonne partie par des *métrologistes* ...

La révolution Française jette les bases d'une unification des mesures

- Parmi les revendications du peuple soulevé, il y avait la disparition des différences de mesures d'une région à l'autre, différences qui favorisaient la spéculation et produisait des conflits sans fin.
- Simultanément quelques membres de l'Académie Royale des Sciences, ralliés à la révolution proposent l'établissement d'une unité de longueur universelle sur des base géodésiques.

Ils s'assurent ainsi plusieurs années de salaire...

Une démarche idéaliste

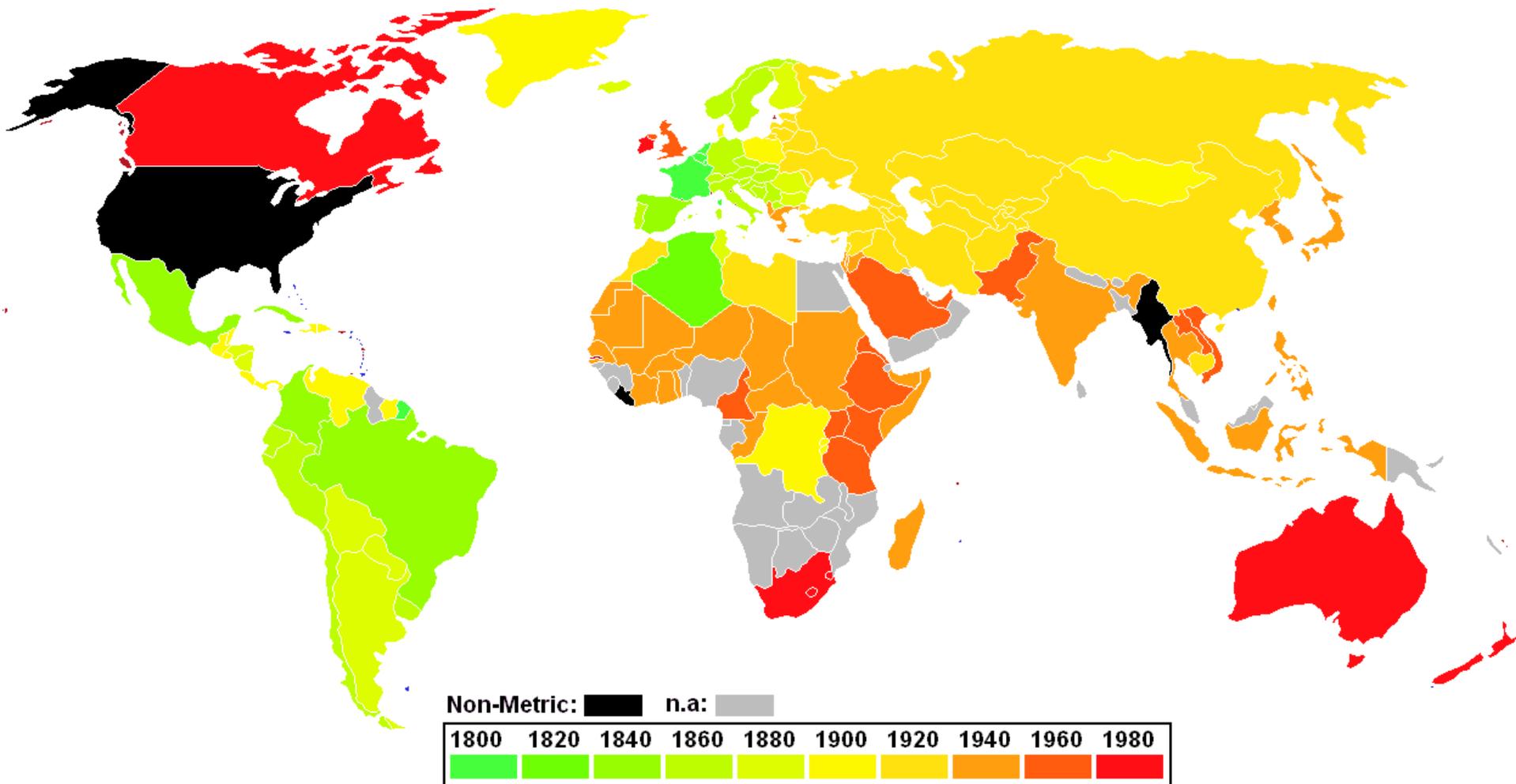
- Le 26 mars 1791 naît le mètre, dont la longueur est établie comme égale à la *dix millionième partie du quart du méridien terrestre*.
 - 1ère conséquence : la circonférence de la terre est rigoureusement égale à 40 000 km, par définition...
- Le mètre concrétise l'idée d'une " unité qui, dans sa détermination, ne renferme rien ni d'arbitraire ni de particulier à la situation d'aucun peuple sur le globe ".
 - Mais il restait encore à établir la longueur exacte du méridien, ce qui donna lieu à une véritable épopée

La loi du 18 Germinal An III * institue le système métrique

* 7 avril 1795.

- Il met un peu de temps à s'établir en France, puisqu'il ne fut rendu obligatoire que sous la monarchie de juillet par la loi du 4 juillet 1837.
- Il est rendu obligatoire aux Pays Bas dès 1816 et choisi par l'Espagne en 1849.
- 1875, création du BIPM (Bureau International des Poids et Mesures). 17 états signent la convention du mètre, chargé de reproduire des étalons de mesure.
- 1960, le Système International d'unités remplace le système métrique.

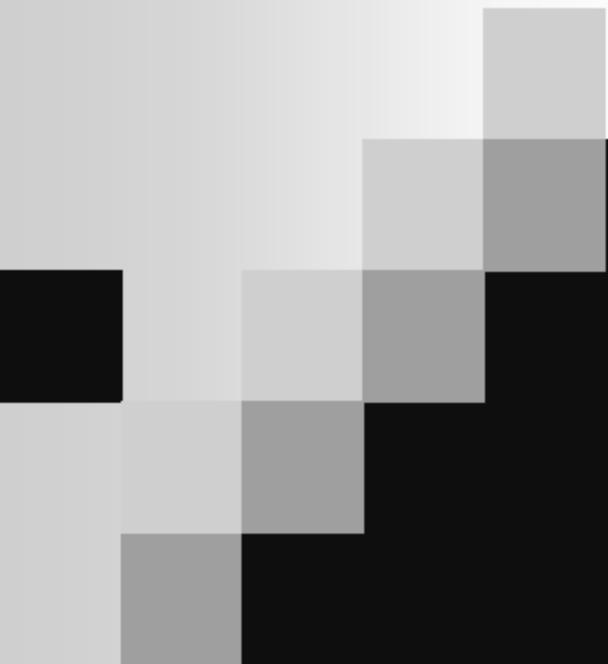
Carte montrant l'année d'adoption du système international, du plus (rouge) au moins (vert) récent



Approfondissement

Wikipedia: [les unités de mesure anglo-saxonnes](#)





Métrologie et normalisation: leur rôle dans le développement technique et économique

Aujourd'hui : La "mondialisation" de l'économie.

- Le capitalisme s'est d'abord développé à l'abri derrière des frontières et des taxes à l'importation.
- Aujourd'hui des secteurs de l'économie sont de plus en plus nombreux qui se heurtent à l'étroitesse des frontières, comme naguère les commerçants à l'intérieur d'un seul royaume :
 - **Matières premières** (dès le début du XX^{ème} siècle)
 - » **Charbon; Métaux; Céréales; ...**
 - **Produits manufacturés** (ce n'est jamais terminé)
 - » **Automobiles; Téléviseurs; ...**
 - **Capitaux** (c'est fait)
 - **Services** (la bagarre est en cours)
 - ...

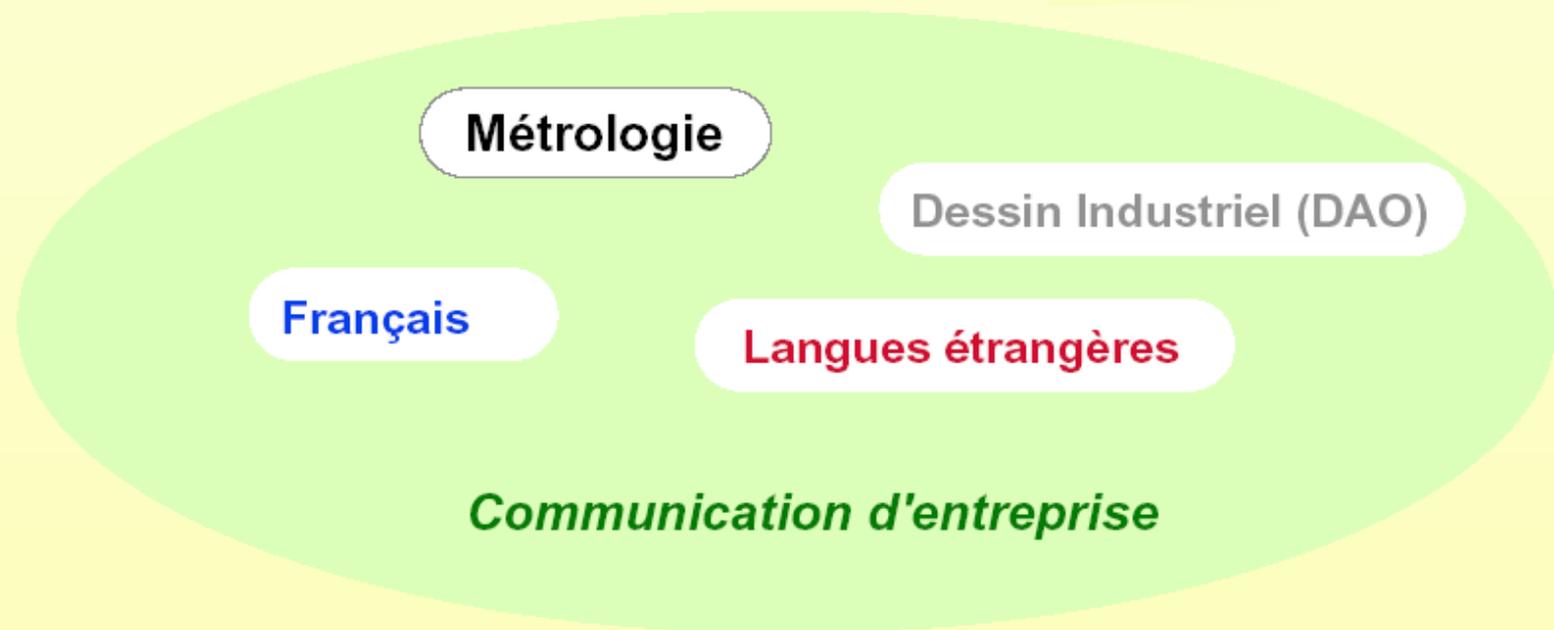
La métrologie joue plusieurs rôles dans cette évolution

- D'abord, à la suite d'accords internationaux, une part croissante des barrières douanières sont remplacées par des normes tatillonnes qui demandent un nombre toujours croissant de mesures (physiques).

Ces normes permettent d'établir des "frontières" entre les industriels, indépendamment des états.

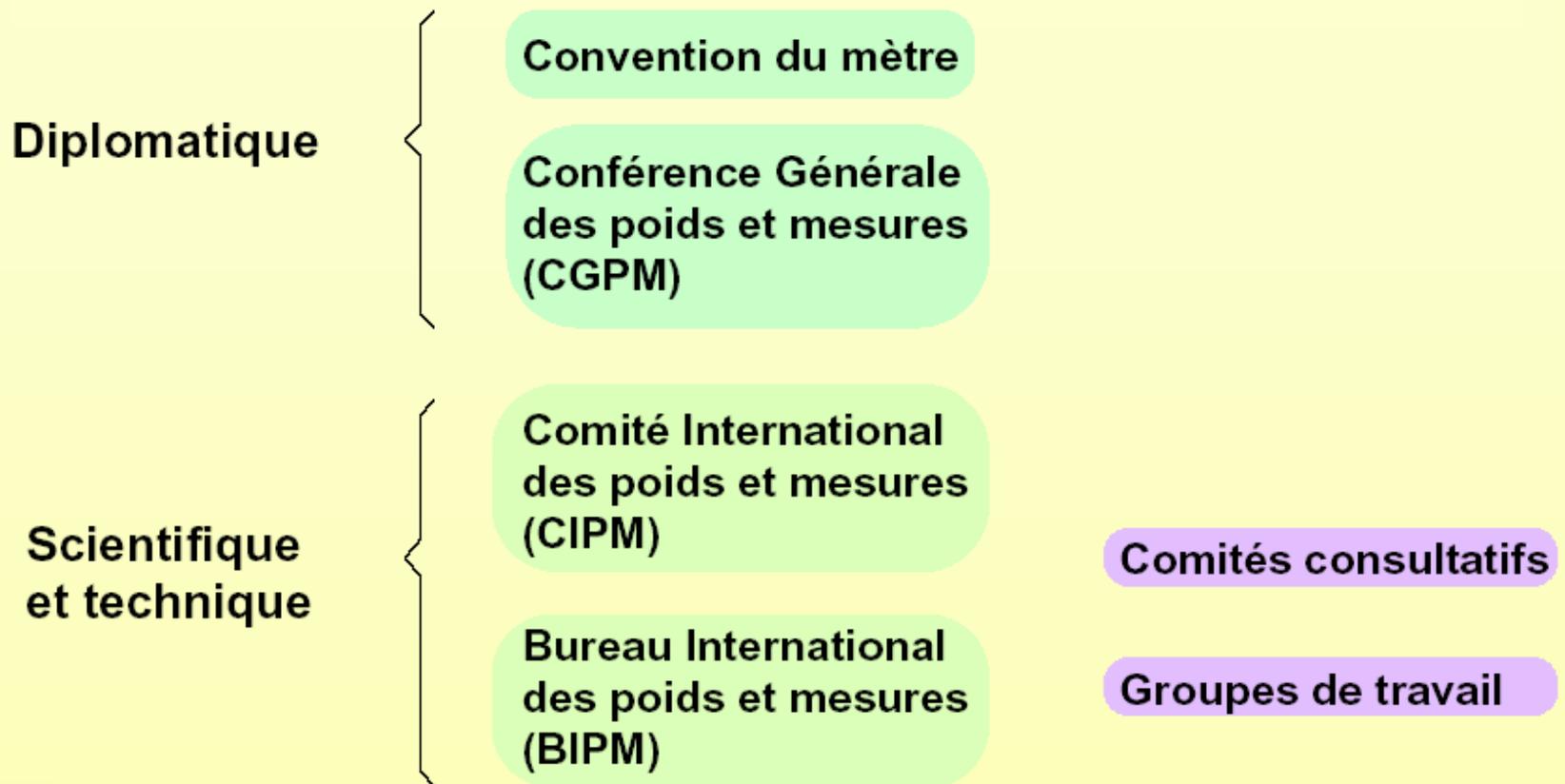
- A l'intérieur de ces nouvelles "frontières", la métrologie est chargée d'assurer la communication entre les acteurs industriels.

La métrologie favorise les échanges en les clarifiant



La métrologie utilise une terminologie propre dépourvue d'approximation

La métrologie est codifiée par des organismes internationaux



Quelques abbréviations

- **Manuels de base :**
 - VIM (1984) : Vocabulaire International de Métrologie
 - GUM (1993) : Guide to the expression of Uncertainty in Measurements
- **Organismes Internationaux :**
 - ISO : International Standard Organisation
 - OIML : Organisation Internationale de Métrologie Légale
 - BNM : Bureau National de Métrologie
 - NIST : National Institute for Science and Technology
- **Systemes de normalisation**
 - SI : Systeme International (d'unités)
 - DIN : Deutsche Industrie Normen
 - NF : Normes Françaises

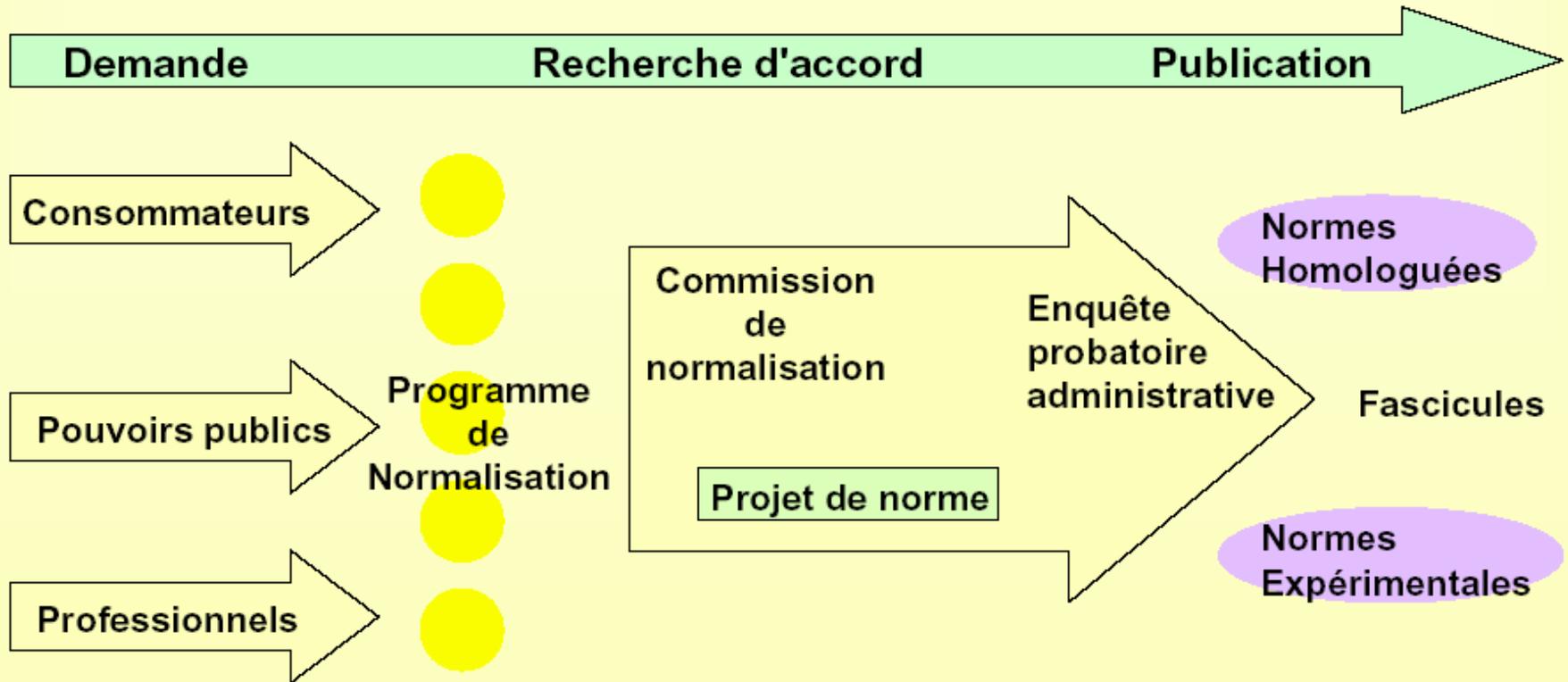
Encore des abbréviations

- **Organisations nationales**
 - EAL : European cooperation for Accreditation of Laboratories
 - AFNor : Agence Française de Normalisation
 - **METAS : Office fédéral de métrologie - www.metas.ch**
- **Organismes de Corporations :**
 - CEI : Commission Electrotechnique
 - FICC : Fédération Internationale de Chimie Clinique
 - UICPA : Union Internationale de Chimie Pure et Appliquée
 - UIPPA : Union Internationale de Physique Pure et Appliquée
 - EURACHEM : Analytical Chemistry in Europe
 - UTAC & EAQF : ? Industries Automobiles
 - ...

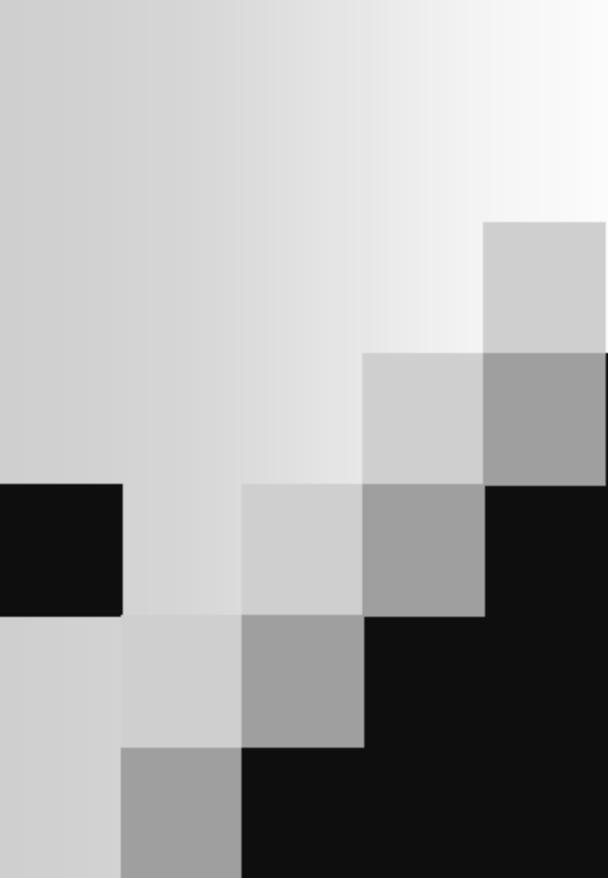
La métrologie est une des bases de la qualité.

- Les normes se répandent dans l'industrie, en particulier la série des ISO 9000.
- De nos jours, la qualité s'attaque à tous les secteurs d'une entreprise, les secteurs non productifs (comptabilité, finances, direction...) sont dans le collimateur des prochaines normes :
 - PDCA : Plan, Do, Check, Act.
(PPPP : Planifier, Pratiquer, Prouver, Progresser)
 - TQM : Total Quality Management

La production de normes







Grandeurs et unités

Définitions

- **Grandeur physique :**
 - Tout attribut d'un phénomène, d'un corps ou d'une substance susceptible d'être distingué qualitativement et déterminé quantitativement. **REPERABLE & MESURABLE**
 - Les grandeurs comparables forment des ensembles : les masses, les longueurs, ...
- **Unité :**
 - Dans un ensemble de grandeurs, c'est une grandeur particulière choisie comme référence à laquelle toutes les autres sont comparées
 - Les longueurs sont mesurées en les comparant au mètre.
 - Chaque unité est nommée et un symbole lui est attribué

Valeur numérique ou Mesure d'une grandeur

- La Valeur numérique d'une grandeur n'a de sens qu'accompagnée de l'unité à laquelle elle a été comparée pour obtenir cette valeur :

$$\text{Mesure} = \text{Valeur} * \text{Unité}$$

$$l = 5.5 \text{ m}$$

$$f = 10.1 \text{ N}$$

L'unité doit toujours être placée à droite : 18,5°

Un nombre limité d'unités de base

- Dans un effort d'unification, la plupart des unités faisant double emploi ont été éliminées (ex. *Joule* et *erg*).
- Après des années de travail patient, la plupart des unités en usage ont été ramenées à des fonctions de 7 unités de base.
- Ces 7 unités de base sont indépendantes les unes des autres.
- La recherche actuelle vise à limiter le nombre d'étalons auxquels se réfèrent les définitions des unités de base
- Les autres unités du SI sont appelées "unités dérivées".

Unités de base

(Wikipedia)

Grandeur	Symbole	Nom de l'unité	Symbole de l'unité	Description
longueur	l	mètre	m	<p>Le mètre est la longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière pendant une durée de 1/299 792 458 de seconde. (17^e CGPM (1983), Résolution 1, CR 97)</p> <p>Historiquement, la première définition officielle et pratique du mètre (1791) était basée sur la circonférence de la terre, et valait 1/40 000 000^eme d'un méridien. Auparavant, le mètre en tant que proposition d'unité décimale de mesure universelle était défini comme étant égal à 38 <i>pouces de Prussie</i> (John Wilkins, 1668), puis comme la longueur d'un pendule qui oscille avec une demi-période d'une seconde (Tito Livio Burattini, 1675).</p>
masse	m	kilogramme	kg	<p>Le kilogramme (nom originel, le grave) est l'unité de masse. Il est égal à la masse du prototype international du kilogramme. Ce dernier, en platine-iridium (90%-10%), est gardé au Bureau international des poids et mesures à Sèvres, en France. (1^{re} CGPM (1889), CR 34-38).</p> <p>Historiquement, c'est la masse d'un décimètre cube, soit un litre d'eau.</p>

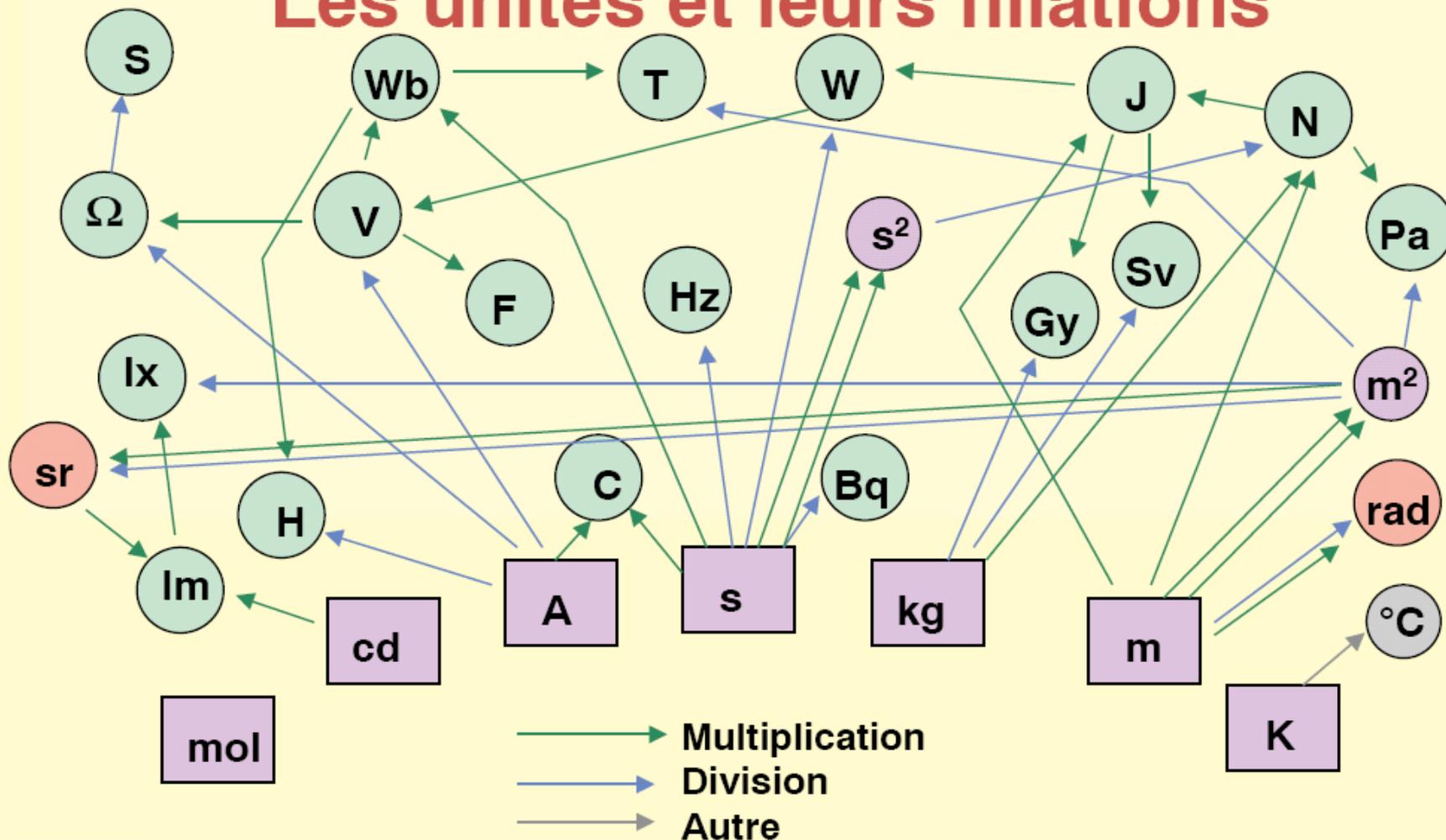
Grandeur	Symbole	Nom de l'unité	Symbole de l'unité	Description
temps	t	seconde	s	La seconde est la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133 à une température de 0 kelvin. (13 ^e CGPM (1967-1968), Résolution 1, CR 103) La seconde est bien sûr basée à l'origine sur la durée du jour terrestre, divisé en 24 heures, puis 60 minutes et 60 secondes (soit 86 400 secondes).
courant électrique	I	ampère	A	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 un mètre l'un de l'autre dans le vide produirait entre ces conducteurs une force égale à $2 \cdot 10^{-7}$ newton par mètre de longueur. (9 ^e CGPM (1948), Résolution 7, CR 70)
température	T	kelvin	K	Le kelvin, unité de température thermodynamique, est la fraction $1/273,16$ de la température thermodynamique du point triple de l' eau . (13 ^e CGPM (1967), Résolution 4, CR 104) Cette définition fait du kelvin une mesure de température égale en variation à celle du degré Celsius , mais basée sur le Zéro absolu .

Grandeur	Symbole	Nom de l'unité	Symbole de l'unité	Description
quantité de matière	n	mole	mol	<p>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. (14^e CGPM (1971), Résolution 3, CR 78) Ce nombre est appelé nombre d'Avogadro.</p> <p>Lorsque l'on emploie la mole, les entités élémentaires doivent être spécifiées et peuvent être des atomes, des molécules, des ions, des électrons, d'autres particules ou des groupements spécifiés de telles particules.</p>
intensité lumineuse	I _v	candela	cd	<p>La candela est l'intensité lumineuse, dans une direction donnée, d'une source qui émet un rayonnement monochromatique de fréquence 540.10^{12} hertz et dont l'intensité énergétique dans cette direction est de 1/683 watt par stéradian. (16^e CGPM (1979) Résolution 3, CR 100)</p>

Unités dérivées sans dimensions

Grandeur	Symbole	Nom de l'unité	Symbole de l'unité	Description
angle plan		radian	rad	Le radian est l'angle compris entre deux rayons qui interceptent sur un cercle un arc de longueur égale à celle du rayon. On utilise aussi le <i>tour</i> ($1 \text{ tr} = 2\pi \text{ rad}$), le <i>grade</i> ($1 \text{ gon} = \pi/200 \text{ rad}$) et le <i>degré</i> ($1^\circ = \pi/180 \text{ rad}$), qui se divise en 60 minutes et 3600 secondes d'angle.
angle solide		stéradian	sr	Le stéradian est l'angle solide qui, ayant son sommet au centre d'une sphère, découpe sur la surface de cette sphère une aire égale à celle d'un carré ayant pour côté le rayon de la sphère.

Les unités et leurs filiations



Les relations entre unités

- Elles font souvent appel à des constantes

Soit universelles : $1 \text{ eV} = 1 \text{ J} / e$; $W = m c^2$

Soit historiques : $1 \text{ cal} = 4.18 \text{ J}$; $1 \text{ pied} = 0,33 \text{ m}$

$1 \text{ mn} = 60 \text{ s}$; $1 \text{ h} = 3600 \text{ s}$

$1^\circ = (\pi / 180) \text{ rad}$

– Rq : la calorie "diététique" est en fait le kcal...

Conversion des unités britanniques (UK) et américaines (US) les plus courantes en unités SI

Grandeurs	Unités	Symboles	Conversion en unités SI
Longueur	inch	in	1 in = 25,4 mm
	foot	ft	1 ft = 12 in = 0,304 8 m
	yard	yd	1 yd = 3 ft = 0,914 4 m
	mile (statute)	mi	1 mi = 1 760 yd = 1,609 344 km
	nautical mile (int.)	nmi	1 nmi = 1,852 km
Vitesse	knot (international)	kn	1 kn = 1 nmi·h ⁻¹ = 0,514 44 ... m·s ⁻¹
	mile per hour	mi·h ⁻¹ , mph	1 mi·h ⁻¹ = 0,447 04 m·s ⁻¹
Surface	square inch	sq in	1 sq in = 6,451 6 cm ²
	square foot	sq ft	1 sq ft = 144 sq in = 929,030 4 cm ²
	square yard	sq yd	1 sq yd = 9 sq ft = 0,836 127 36 m ²
	rood		1 rood = 1 210 sq yd = 1 011,71 ... m ²
	acre		1 acre = 4 roods = 4 046,86 ... m ²
	square mile	sq mi	1 sq mi = 640 acres = 2,589 988 ... km ²
Volume	cubic inch	cu in	1 cu in = 16,387 064 cm ³
	cubic foot	cu ft	1 cu ft = 28,316 8 ... dm ³
	cubic yard	cu yd	1 cu yd = 0,764 555 ... m ³
Mesures de capacité UK	UK fluid ounce	UK fl oz	1 fl oz = 28,413 062 5 cm ³
	UK gill		1 gill = 5 fl oz = 0,142 065 ... dm ³
	UK pint	UK pt	1 pt = 20 fl oz = 0,568 261 ... dm ³
	UK quart	UK qt	1 qt = 2 pt = 1,136 522 5 dm ³
	UK gallon	UK gal	1 gal = 4 qt = 4,546 09 dm ³
Mesures de capacités US (liquides)	US fluid ounce	US fl oz	1 fl oz = 29,573 5 ... cm ³
	US gill	gi	1 gi = 4 fl oz = 0,118 294 ... dm ³
	US liquid pint	liq pt	1 liq pt = 4 gi = 0,473 176 ... dm ³
	US liquid quart	liq qt	1 liq qt = 2 liq pt = 0,946 353 ... dm ³
	US gallon	US gal	1 gal = 4 liq qt = 3,785 41 ... dm ³
	US barrel (oil)	bbl	1 bbl = 42 gal = 158,987 ... dm ³

Grandeurs	Unités	Symboles	Conversion en unités SI
Mesures de capacité US (solides)	US dry pint	dry pt	1 dry pt = 0,550 610 ... dm ³
	US dry quart	dry qt	1 dry qt = 2 dry pt = 1,101 2 ... dm ³
	US peck	pk	1 pk = 8 dry qt = 8,809 76 ... dm ³
	US bushel	bu	1 bu = 4 pk = 35,239 1 ... dm ³
Masse	grain	gr	1 gr = 0,064 798 91 g
	dram (avoirdupois)	dr	1 dr = 27,343 75 gr = 1,771 85 ... g
	ounce (avoirdupois)	oz	1 oz = 16 dr = 28,349 5 ... g
	troy ounce	oz tr	1 oz tr = 480 gr = 31,103 476 8 g
	pound (avoirdupois)	lb	1 lb = 16 oz = 0,453 592 37 kg
	troy pound	lb tr	1 lb tr = 12 oz tr = 0,373 242 ... kg
	stone (UK)		1 stone = 14 lb = 6,350 293 18 kg
	(long) ton (UK)	ton	1 ton = 2 240 lb = 1 016,05 ... kg
	short ton (US)	sh ton	1 sh ton = 2 000 lb = 907,184 74 kg
	Force	poundal	pdl
pound-force		lbf	1 lbf = 4,448 22 ... N
UK ton-force		UK tonf	1 tonf = 2 240 lbf = 9 964,02 ... N
US ton-force = 2 kip		US tonf	1 tonf = 2 000 lbf = 8 896,44 ... N
Pression	pound-force/sq ft	lbf·ft ⁻²	1 lbf·ft ⁻² = 47,880 3 ... Pa
	pound-force/sq in	lbf·in ⁻² , psi	1 lbf·in ⁻² = 6,894 76 ... kPa
Travail, énergie quantité de chaleur	foot pound-force	ft·lbf	1 ft·lbf = 1,355 82 ... J
	British thermal unit	Btu _{IT}	1 Btu _{IT} = 1,055 06 ... kJ
Puissance	therm		1 therm = 10 ⁵ Btu = 105,506 ... MJ
	British thermal unit/hour horsepower	Btu/h hp	1 Btu/h = 0,293 071 ... W 1 hp = 550 ft·lbf/s = 745,700 ... W
Température	degré Fahrenheit	°F	Temp. °C = (Temp. °F - 32)·5/9 différence de température 1 °F = 5/9 °C = 5/9 K
Luminance	foot Lambert	fL	1 fL = π ⁻¹ cd ft ⁻² = 3,426 4 ... cd·m ⁻²
Éclairement lumineux	foot candle	fc	1 fc = 1 lm ft ⁻² = 10,763 4 ... lx

Préfixes SI • Multiples et sous-multiples décimaux

Préfixes SI

Facteurs	Noms	Symboles
1 000 000 000 000 000 000 000 000 = 10^{24}	yotta	Y
1 000 000 000 000 000 000 000 = 10^{21}	zetta	Z
1 000 000 000 000 000 000 = 10^{18}	exa	E
1 000 000 000 000 000 = 10^{15}	péta	P
1 000 000 000 000 = 10^{12}	téra	T
1 000 000 000 = 10^9	giga	G
1 000 000 = 10^6	méga	M
1 000 = 10^3	kilo	k
100 = 10^2	hecto	h
10 = 10^1	déca	da
0,1 = 10^{-1}	déci	d
0,01 = 10^{-2}	centi	c
0,001 = 10^{-3}	milli	m
0,000 001 = 10^{-6}	micro	μ
0,000 000 001 = 10^{-9}	nano	n
0,000 000 000 001 = 10^{-12}	pico	p
0,000 000 000 000 001 = 10^{-15}	femto	f
0,000 000 000 000 000 001 = 10^{-18}	atto	a
0,000 000 000 000 000 000 001 = 10^{-21}	zepto	z
0,000 000 000 000 000 000 000 001 = 10^{-24}	yocto	y

Multiples et sous-multiples décimaux

Les nombres supérieurs à 1000 ou inférieurs à 0,01 prennent beaucoup de place et leur lecture est malaisée. C'est pourquoi le SI comporte des préfixes pour les multiples et sous-multiples. Ils sont écrits sans espace devant le symbole de l'unité. Le cumul des préfixes n'est pas autorisé. L'ensemble formé par le symbole d'un préfixe accolé au symbole d'une unité constitue un nouveau symbole insécable que l'on peut élever à une puissance. Les multiples et sous-multiples décimaux de l'unité de base kilogramme sont formés par l'adjonction de préfixes au mot « gramme » ou pour 1000 kilogrammes et plus au mot « tonne ». Les préfixes SI ne peuvent pas être utilisés avec les unités d'angle $''$, $'$ et $^{\circ}$, les unités de temps min, h, d, les unités de surface a, ha, le carat métrique ct, la dioptrie et le millimètre de mercure.

Exemple

$$12\,000\text{ N} = 12 \cdot 10^3\text{ N} = 12\text{ kN}$$

$$0,000\,05\text{ s} = 50 \cdot 10^{-6}\text{ s} = 50\ \mu\text{s}$$

$$0,004\ \mu\text{m} = 4 \cdot 10^{-3}\ \mu\text{m} = 4 \cdot 10^{-9}\text{ m} = 4\text{ nm}$$

$$0,000\,004\text{ kg} = 4 \cdot 10^{-6}\text{ kg} = 4 \cdot 10^{-3}\text{ g} = 4\text{ mg}$$

$$6 \cdot 10^9\text{ kg} = 6 \cdot 10^6\text{ t} = 6\text{ Mt}$$

$$7\,000\text{ min} = 116,7\text{ h} = 4,86\text{ d}$$



Les échelles de l'univers

Puissances de dix

<http://microcosm.web.cern.ch/Microcosm/P10/french/welcome.html>

Les règles d'écriture (important)

Les symboles des unités **doivent être écrits en caractères droits minuscules**.

Exception : **la première lettre étant néanmoins en majuscule** quand le nom de l'unité est dérivé d'un nom propre

(Newton – N, Joule – J)

Ils doivent

1. rester **invariables** au pluriel
2. être **écrits sans point final**
3. être **placés après les valeurs numériques** complètes, en laissant un espace entre valeur et symbole (exemples: 2.455 m, 11.9 kPa).

Le produit de deux unités est indiqué **par un point, qui peut être omis** en l'absence de confusion possible :

1 mN est un millinewton et non un mètre newton, c'est-à-dire un joule.

Le quotient est indiqué **par une barre, avec des parenthèses éventuelles** pour éviter toute ambiguïté (exemples: 9.81 m/s^2 ou 9.81 ms^{-2} , 2.3 W/(m.K) ou $2.3 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$).

Travail personnel

- Tous les chapitres 1 et 2 du polycopié