

RAPPELS SUR LE SYSTÈME D'UNITÉS S.I., LES
UNITÉS USUELLES ET LES PRINCIPAUX
NOMBRES ADIMENSIONNELS

SOMMAIRE

- 1 Le système international d'unités S.I.
 - 2 Unités de base du système international S.I.
 - 3 Définitions des unités de base.
 - 4 Les unités dérivées.
 - 5 Multiples et sous multiples.
 - 6 Cas des paramètres mettant en jeu des quantités de chaleur.
 - 7 Unités concernant les rayonnements ionisants.
 - 8 Autres définitions et équivalences.
 - 9 Les unités légales en dehors du système S.I.
 - 10 Unités de mesures utilisées dans l'industrie textile.
 - 11 Règles d'écriture et de typographie.
 - 12 Principaux critères adimensionnels utilisés en génie chimique.
 - 13 Table de conversion entre unités anglo-saxonnes et unités métriques.
- ANNEXE - Quelques histoires à propos d'unités de base : le temps, la masse et la longueur.

1 - LE SYSTÈME INTERNATIONAL D'UNITÉS (S.I.)

Le Système International d'Unités (S.I.) a été adopté par la 11ème Conférence Générale des Poids et Mesures en 1960. Il doit être utilisé universellement, et obligatoirement depuis le 1er Janvier 1978, à la place des autres systèmes (c.g.s. par exemple). Deux modifications ont été apportées depuis 1960 : l'une en 1971 avec l'adoption de la mole, l'autre en Octobre 1983 avec une nouvelle définition du mètre.

La norme ISO 1000 donne toutes les indications sur les unités recommandées et les façons dont elles doivent être employées.

2 - UNITÉS DE BASE DU SYSTÈME INTERNATIONAL (S.I.)

Le Système International est fondé sur les sept unités de base suivantes :

Grandeur de base	Dimension	Unité de base	Abréviation ou symbole
Longueur	L	mètre	m.
Masse **	M	kilogramme	kg.
Temps	T	seconde	s
Intensité de courant électrique	I	ampère	A
Température thermodynamique	θ	kelvin	K
Quantité de matière	mol	mole	mol
Intensité lumineuse	cd	candela	cd

** Le Système International remplace la notion de **poids** par celle de **masse** pour désigner une quantité de matière.

3 - DÉFINITIONS.

Le mètre est la longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière en 1 / 299 792 458 seconde.

Cette définition, qui utilise une autre unité de base : la seconde, remplace la définition précédente "Le mètre est la longueur égale à 1 650 763,73 longueurs d'onde, dans le vide, de la radiation correspondant à la transition entre les niveaux $2p_{10}$ et $5d_5$ de l'atome de krypton 86".

Le kilogramme est la masse du prototype en platine iridié, sanctionné par la Conférence Générale des Poids et Mesures en 1889, et déposé au Pavillon de BRETEUIL à SÈVRES.

La seconde de temps 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.

Jusqu'en 1967, la seconde était déduite de la rotation terrestre et sa définition était "La seconde de temps est la fraction 1 / 31 556 925,9747 de l'année tropique pour 1900 -Janvier - 0 à 12 heures de temps des éphémérides"

L'ampère est l'intensité d'un courant constant qui, maintenu dans deux conducteurs parallèles, rectiligne, de longueur infinie, de section circulaire négligeable et placés à distance de 1 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.

On remarquera que l'ampère, unité de base, est défini en utilisant une autre unité de base : le mètre, et une unité dérivée : le newton, qui n'est défini que par la suite.

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

On peut employer l'échelle celsius dont le degré est égal au kelvin et dont le zéro correspond à 273,15 degrés de l'échelle thermodynamique kelvin ci-dessus définie.

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.

Lorsqu'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.

Le **candela** est l'intensité lumineuse, dans la direction perpendiculaire, d'une surface de 1 / 600 000 mètre carré d'un corps noir à la température de congélation du platine sous la pression de 101 325 pascals.

4 - LES UNITES DÉRIVÉES.

Les unités destinées à la mesure des autres grandeurs physiques sont exclusivement dérivées de ces unités de base. On distingue :

- **Les unités dérivées proprement dites.**

Ces unités sont exprimées algébriquement en fonction des unités de base. Leurs symboles sont obtenus en utilisant les signes de multiplication et de division

Exemple : unité de vitesse = mètre par seconde = m / s.

- **Les unités dérivées ayant des noms et des symboles spéciaux.**

Elles se subdivisent en deux groupes

* unités d'application générale.

* unités d'application spéciale (textile, bijouterie, ...)

Les unités d'application générale sont désignées par des noms et des symboles spéciaux.

Voir le tableau de la page suivante.

5 - MULTIPLES ET SOUS MULTIPLES.

Les noms et les symboles des multiples et sous multiples décimaux des unités sont formés par l'adjonction des préfixes suivants :

Facteur multiplicatif	Préfixe	Symbole	Facteur multiplicatif	Préfixe	Symbole
10^{18}	exa	E	10^{-18}	atto	a
10^{15}	peta	P	10^{-15}	femto	f
10^{12}	téra	T	10^{-12}	pico	p
10^9	giga	G	10^{-9}	nano	n
10^6	méga	M	10^{-6}	micro	μ
10^3	kilo	k	10^{-3}	milli	m
10^2	hecto	h	10^{-2}	centi	c
10^1	déca	da	10^{-1}	déci	d

Grandeur	Symbole	Dimensions	Nom de l'unité	Abréviation
Surface	A	L ²	mètre carré	m ²
Volume	V	L ³	mètre cube	m ³
Masse volumique	ρ	M.L ⁻³	kilogramme par mètre cube	kg / m ³
Masse linéique	ρ _l	L ⁻¹ .M	kilogramme par mètre	kg / m
Volume spécifique	v	L ³ .M ⁻¹	mètre cube par kilogramme	m ³ / kg
Débit volumique		L ³ .T ⁻¹	mètre cube par seconde	m ³ / s
Concentration	ρ _c	L ⁻³ .M	kilogramme par mètre cube	kg / m ³
Vitesse	v	L.T ⁻¹	mètre par seconde	m / s
Accélération	γ	L.T ⁻²	mètre par seconde par seconde	m / s ²
Quantité de mouvement			kilogramme mètre par seconde	kg m / s
Angle plan	a	A	radian	rad
Vitesse angulaire	ω	T ⁻¹ .A	radian par seconde	rad / s
Force	F	L.M.T ⁻²	newton	N
Moment d'une force	M	L ² .M.T ⁻²	newton mètre	N.m
Energie - Travail - Quantité de chaleur	W	L ² .M.T ⁻²	joule	J
Pression - Contrainte	P - σ	L ⁻¹ .M.T ⁻²	pascal	Pa
Tension superficielle	γ	M.T ⁻²	newton par mètre	N / m
Viscosité dynamique	η - μ	L ⁻¹ .M.T ⁻¹	pascal seconde	Pa.s
Viscosité cinématique	ν	L ² .T ⁻¹	mètre carré par seconde	m ² / s
Capacité thermique	c	L ² .M.T ⁻² .θ ⁻¹	joule par kelvin	J / K
Conductivité thermique	λ	L.M.T ⁻³ .θ ⁻¹	watt par mètre et par kelvin	W / m.K
f.e.m. - différ. de potentiel	U	L ² .M.T ⁻³ .I ⁻¹	volt	V
Résistance électrique	R	L ² .M.T ⁻³ .I ⁻²	ohm	Ω
Intensité de champ élect.	E	L.M ⁻³ .I ⁻¹	volt par mètre	V / m
Conductance électrique	G	L ⁻² .M ⁻¹ .T ³ .I ²	siemens	S
Quantité d'électricité	Q	T.I	coulomb	C
Capacité électrique	C	L ⁻² .M ⁻¹ .T ⁴ .I ²	farad	F
Inductance électrique	L	L ² .M.T ⁻² .I ⁻²	henry	H
Flux d'induction magnétique	Φ	L ² .M.T ⁻² .I ⁻¹	weber	Wb
Induction magnétique	B	M.T ⁻² .I ⁻¹	tesla	T
Activité de rayonnement	A	T ⁻¹	becquerel = 1 décomposition / s.	Bq
Exposition au rayonnement	X	T.M ⁻¹ .I	coulomb par kilogramme	C / kg
Dose absorbée	D	L ² .T ⁻²	gray	Gy
Intensité lumineuse	I	J	candela	cd
Flux lumineux	Φ	J.Ω	lumen	lm
Eclairement lumineux	E	L ² .J.Ω	lux	lx

6 - CAS DES PARAMÈTRES METTANT EN JEU DES QUANTITÉS DE CHALEUR.

Dans la plupart des problèmes qui concernent des quantités de chaleur on utilise encore très fréquemment la **calorie** comme unité de quantité de chaleur. Cette unité hors système est tolérée intermédiairement. Comme tous les ouvrages récents ont adopté les unités S.I., il importe donc de connaître les équivalences avec les expressions légales.

Définition de la calorie (définition initiale) :

La calorie est la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1 degré Celsius la température d'un corps dont la chaleur massique est égale à celle de l'eau à 15 degrés Celsius, sous la pression atmosphérique normale (101 325 pascals). Elle équivaut à 4,184 joules.

On aura par exemple en ce qui concerne les équivalences entre unités anciennes et unités nouvelles mettant en jeu des quantités de chaleur :

Définition de l'unité	Expression ancienne A	Expression nouvelle N	Facteur d'équivalence pour passer de A à N
Chaleur massique à pression constante à volume constant	Cp kcal / kg.°C	kJ / kg.K	N = 4,184 A
	Cv kcal / kg.°C	KJ / kg.K	N = 4,184 A
Chaleur latente de fusion	Δf kcal / kg	kJ / kg	N = 4,184 A
Chaleur latente de vaporisation	Δv kcal / kg	kJ / kg	N = 4,184 A
Conductivité thermique	λ kcal / m.h.°C	kW / m.K	N = 1,162 10 ⁻³ A
Coefficient de transfert	h ou k kcal / m ² .h.°C	kW / m ² .K	N = 1,162 10 ⁻³ A

7 - UNITÉS CONCERNANT LES RAYONNEMENTS IONISANTS

Pour les rayonnements ionisants on a les équivalences suivantes avec des unités anciennes qui sont toujours légales mais hors système :

Activité : 1 curie (Ci) = 3,7 10¹⁰ becquerel (Bq)

On utilisait surtout les sous multiples :

mC = millicurie	37 10 ⁶ désintégrations / s (Bq)
μC = microcurie	37 10 ³ désintégrations / s (Bq)
nC = nanocurie	37 désintégrations / s (Bq)
pC = picocurie	37 10 ⁻³ désintégrations / s (Bq)

Exposition : 1 roentgen (R) = 2,58 10⁻⁴ coulomb par kg (C / kg)

Dose absorbée. Un sous multiple du **gray** (Gy), unité de dose absorbée, est le **rad** (rd) :

$$1 \text{ rad} = 10^{-2} \text{ gray.}$$

Au début de l'étude des effets des rayons ionisants on avait défini le **rem** qui correspondait à une dose absorbée de **1 rad** et entièrement consacrée à produire un effet biologique. On s'est ensuite rendu compte que les dégâts provoqués dans la matière vivante dépendaient évidemment de l'énergie absorbée (exprimée en gray ou en rad), mais également de la nature du rayonnement

On a alors défini une unité de dose biologique qui est le **sievert** (Sv) ⇒ 1 Sv correspond à 1 Gy multiplié par un facteur d'efficacité **FQ** dépendant de la nature du rayonnement ionisant. Un rayonnement α émis de l'intérieur du corps humain ou un flux de neutrons rapides sont beaucoup plus dangereux, à énergie équivalente, que des rayons X par exemple.

Type de rayonnement	FQ
Rayons X	1
Rayons γ (gamma)	1
Rayonnement β (bêta)	1
Neutrons thermiques	3
Neutrons rapides	10
Rayonnement α (alpha)	20

8 - AUTRES DÉFINITIONS ET ÉQUIVALENCES.

8-1 - Longueur.

$$1 \text{ mètre} = 10^6 \text{ microns } (\mu\text{m}) = 10^9 \text{ nm} = 10^{10} \text{ \AA} = 39,37 \text{ inch} = 3,2808 \text{ feet} = 1,0936 \text{ yard}$$

8-2 - Surface.

$$1 \text{ mètre carré} = 1 550 \text{ square inch} = 10,764 \text{ square foot} = 1,196 \text{ square yard}$$

8-3 - Volume.

$$1 \text{ mètre cube} = 1 000 \text{ litres} = 61023 \text{ cubic inch} = 35,315 \text{ cubic foot} = 220 \text{ UK gallons}$$

$$= 264,2 \text{ US gallons} = 6,290 \text{ US barrels} = 3,381 \cdot 10^5 \text{ fl.oz (fluid ounce)}$$

$$(1 \text{ fl.oz} = 0,02957 \text{ litre} = 29,5729 \text{ cm}^3)$$

8-4 - Masse.

$$1 \text{ kilogramme} = 15\,432 \text{ grains} = 35,27 \text{ oz} = 2,205 \text{ pound (lb)} = 0,000984 \text{ UK ton}$$

$$= 0,0011 \text{ US short ton}$$

8-5 - Masse linéique.

$$1 \text{ kilogramme par mètre} = 10^6 \text{ tex} = 10^7 \text{ dtex}$$

8-6 - Masse volumique.

$$1 \text{ kg} / \text{m}^3 = 62,4 \cdot 10^{-3} \text{ pound per cubic foot (lb} / \text{ft}^3)$$

$$= 10,02 \cdot 10^{-3} \text{ pound per UK gallon (lb} / \text{UK gallon)}$$

$$= 8,34 \cdot 10^{-3} \text{ pound per US gallon (lb} / \text{US gallon)}$$

$$= 3,61 \cdot 10^{-5} \text{ pound per cubic inch (lb} / \text{cu.in)}$$

8-7 - Vitesse.

$$1 \text{ m/s} = 3,6 \text{ km/h} = 3,281 \text{ ft/s} = 2,237 \text{ status mile/h} = 1,944 \text{ nautic mile/h (NM/h)}$$

8-8 - Accélération.

Le **mètre par seconde par seconde** est l'accélération d'un mobile animé d'un mouvement uniformément varié dont la vitesse varie en une seconde de un mètre par seconde.

8-9 - Force.

Le **newton** est la force qui communique à un corps ayant une masse de 1 kg une accélération de 1 mètre par seconde par seconde.

$$1 \text{ newton} = 10^5 \text{ dynes} = 0,102 \text{ kg force} = 0,2248 \text{ pound force (lb.f)}$$

8-10 - Energie - Travail.

Le **Joule** est le travail produit par une force de 1 newton dont le point d'application se déplace de 1 mètre dans la direction de la force.

$$1 \text{ joule} = 10^7 \text{ ergs} = 2,7778 \cdot 10^{-4} \text{ watt / heure} = 2,7778 \cdot 10^{-7} \text{ kW / heure}$$

$$= 2,389 \cdot 10^{-1} \text{ calorie} = 2,389 \cdot 10^{-7} \text{ thermie} = 0,102 \text{ kg force / mètre}$$

$$= 9,478 \cdot 10^{-4} \text{ BTU} = 3,725 \cdot 10^{-7} \text{ HP / heure}$$

8-11 - Puissance.

Le **watt** est la puissance de 1 joule par seconde.

$$1 \text{ watt} = 0,102 \text{ kgf.m} / \text{s} = 1,3605 \cdot 10^{-3} \text{ CV} = 1,341 \cdot 10^{-3} \text{ HP}$$

$$= 0,7375 \text{ foot pound force per second (ft.lb.f} / \text{s)}$$

$$1 \text{ CV} = 0,735 \text{ kW}$$

$$1 \text{ kW} = 1,360 \text{ CV}$$

8-12 - Contrainte - Pression.

Le **pascal** est la pression uniforme qui, agissant sur une surface plane de 1 m², exerce perpendiculairement à cette surface une force totale de 1 newton.

$$1 \text{ pascal} = 10^{-5} \text{ bar} = 1,0204 \cdot 10^{-5} \text{ kgf} / \text{cm}^2 = 0,102 \text{ mm d'eau}$$

$$= 0,0075 \text{ mm Hg} = 0,987 \cdot 10^{-5} \text{ atmosphère} = 10 \text{ dynes} / \text{cm}^2$$

8-13 - Viscosité dynamique.

Le **poiseuille** (ou Pa.s) est la viscosité dynamique d'un fluide dans lequel le mouvement rectiligne et uniforme, dans son plan, d'une surface plane solide, indéfinie, donne lieu à une force retardatrice de 1 newton par mètre carré de la surface en contact avec le fluide, lorsque le gradient de vitesse du fluide à la surface du solide et par mètre d'écartement normal à la dite surface est de 1 mètre par seconde.

$$1 \text{ Pa.s} = 0,672 \text{ lb} / \text{ft.s} = 10 \text{ poises}$$

8-14 - Viscosité cinématique.

Le **mètre carré par seconde** est la viscosité cinématique d'un fluide dont la viscosité dynamique est de 1 poiseuille et la masse volumique de 1 kg / m^3 .

Cette unité, qui n'a pas été baptisée, est très grande. On utilise en pratique :

$$\begin{aligned} \text{le stockes (St)} &= 10^{-4} \text{ m}^2 / \text{s} \\ \text{le centistokes (cSt)} &= 10^{-6} \text{ m}^2 / \text{s} = 1 \text{ centipoise} / \text{densité (en g / cm}^3) \end{aligned}$$

Voir page suivante les facteurs de conversion concernant les viscosités dynamiques et cinématiques.

8-15 - Température.

Le **degré kelvin** a déjà été défini. Les anglo-saxons emploient encore l'échelle **FARENHEIT**. On a les relations suivantes :

$$\begin{aligned} \theta \text{ } ^\circ\text{C} &= 0,555 (\theta \text{ } ^\circ\text{F} - 32) \\ \theta \text{ } ^\circ\text{F} &= 32 + 1,8 \theta \text{ } ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

8-16 - Chaleur spécifique.

$$\begin{aligned} 1 \text{ kcal / kg.}^\circ\text{C} &= 4,184 \text{ kJ / kg.K} = 1 \text{ BTU / lb.}^\circ\text{F} \\ 1 \text{ kcal / m}^3\text{.}^\circ\text{C} &= 4,184 \text{ kJ / m}^3\text{.K} = 0,06243 \text{ BTU / ft}^3\text{.}^\circ\text{F} \end{aligned}$$

8-17 - Flux calorifique.

$$1 \text{ kcal / m}^2\text{.h} = 1,162 \cdot 10^{-3} \text{ kW / m}^2 = 0,36867 \text{ BTU / ft}^2\text{.h}$$

8-18 - Conductance - Conductibilité calorifique.

$$\begin{aligned} 1 \text{ kcal / m}^2\text{.h.}^\circ\text{C} &= 1,162 \cdot 10^{-3} \text{ kW / m}^2\text{.K} = 0,2048 \text{ BTU / ft}^2\text{.h.}^\circ\text{F} \\ 1 \text{ kcal / m}^2\text{.h.}^\circ\text{C.m} &= 1,162 \cdot 10^{-3} \text{ kW / m.K} = 0,806 \text{ BTU / ft}^2\text{.h.}^\circ\text{F.inch} \end{aligned}$$

FACTEURS DE CONVERSION CONCERNANT LES VISCOSITÉS

1 - FACTEURS DE CONVERSION POUR LA VISCOSITE DYNAMIQUE η

UNITÉ INITIALE	A CONVERTIR EN :							
	micropois e	centipoise	poise g / cm.s.	kg / m.s	kg / m.h.	kgp.s / m ²	pound / pieds.s.	pound / pieds.h.
micropoise	1	10 ⁻⁴	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷	3,6 10 ⁻⁴	1,02 10 ⁻⁸	6,72 10 ⁻⁸	2,42 10 ⁻⁴
centipoise	10 ⁻⁴	1	10 ⁻²	10 ⁻³	3,6	1,02 10 ⁻⁴	6,72 10 ⁻⁴	2,42
poise g / cm.s	10 ⁶	10 ²	1	10 ⁻¹	3,6 10 ²	1,02 10 ⁻²	6,72 10 ⁻²	2,42 10 ²
kg / m.s	10 ⁷	10 ³	10	1	3,6 10 ³	1,02 10 ⁻¹	6,72 10 ⁻¹	2,42 10 ³
kg / m.h.	2,78 10 ³	2,78 10 ⁻¹	2-78 10 ⁻³	2-78 10 ⁻⁴	1	2,84 10 ⁻⁵	1,863 10 ⁻⁴	6,72 10 ⁻¹
kgp.s / m ²	9,81 10 ⁷	9,81 10 ³	9,81 10	9,81	2,72 10 ⁵	1	6,592	2,374 10 ⁴
pound / pieds.s.	1,488 10 ⁷	1,488 10 ³	1,488 10	1,488	4,13 10 ³	1,52 10 ⁻¹	1	3,6 10 ³
pound / pieds.h.	4,13 10 ³	4,13 10 ⁻¹	4,13 10 ⁻³	4,13 10 ⁻⁴	1,488	4,21 10 ⁻⁵	2,77 10 ⁻⁴	1

Exemple : 12,6 pound / pieds.s. à convertir en poises $\Rightarrow 12,6 \cdot 1,488 \cdot 10 = 12,6 \cdot 14,88 = 187,49 \text{ Po}$
 $= 18,75 \text{ Pa.s}$

2 - FACTEURS DE CONVERSION POUR LA VISCOSITÉ CINÉMATIQUE V

UNITÉ INITIALE	A CONVERTIR EN :					
	centistokes mm ² / s	stockes cm ² / s	m ² / s	m ² / h	pieds ² / s	pieds ² / h
centistokes mm ² / s	1	10 ⁻²	10 ⁻⁶	3,60 10 ⁻³	1,07 10 ⁻⁵	3,85 10 ⁻²
stockes cm ² / s	10 ²	1	10 ⁻⁴	3,60 10 ⁻¹	1,07 10 ⁻³	3,85
m ² / s	10 ⁶	10 ⁴	1	3,60 10 ³	1,07 10	3,85 10 ⁴
m ² / h	2,78 10 ²	2,78	2,78 10 ⁻⁴	1	2,98 10 ⁻³	1,07 10
pieds ² / s	9,36 10 ⁴	9,36 10 ²	9,36 10 ⁻²	3,36 10 ²	1	3,60 10 ³
pieds ² / h	2,60 10	2,60 10 ⁻¹	2,60 10 ⁻⁵	9,35 10 ⁻²	2,78 10 ⁻⁴	1

Exemple : 37,4 pieds² / s à convertir en stockes ⇒ 37,4 . 9,36.10² = 3,5 10⁴ stockes

9 - LES UNITÉS LÉGALES EN DEHORS DU S.I.

Certaines unités ont été admises par décret de Décembre 1975 bien que n'étant pas rattachées au S.I. Les unes sont nécessaires aux physiciens, les autres sont utiles dans la vie courante.

9-1 - Longueur.

Le **mille** - on écrit aussi **mille** - (1 852 m) est très utile en navigation maritime et aérienne car il correspond à la distance que l'on doit parcourir en moyenne sur le globe à longitude constante entre des latitudes différentes de une minute d'arc. Le mille nautique n'a pas de symbole officiel. On utilise habituellement le symbole **NM** (Nautical Mille)

9-2 - Angle.

La seule unité d'angle du S.I. est le **radian** (rad), angle qui ayant son sommet au centre d'un cercle, intercepte sur la circonférence de ce cercle un arc de longueur égale à celle du rayon du cercle.

Hors S.I. sont admis :

- le tour (tr) = 2 π rad
- le grade (gr) = π / 200 rad
- la minute (')
- la seconde (") = π / 648 000 rad
- le degré (°) = π / 180 rad

9-3 - Masse.

Le **carat métrique**, unité propre au négoce et au commerce des pierres précieuses, vaut 0,2 gramme.

9-4 - Masse atomique.

L'unité de masse atomique (symbole μ) s'appelle le **dalton**. Elle est définie comme le 1 / 16 de la masse d'un atome d'oxygène 16.

9-5 - Temps.

Minute, heure et jour ne sont pas des multiples décimaux de la seconde et ne se trouvent pas rattachés au système S.I.

9-6 - Vitesse angulaire.

Seul le **radian par seconde** (rad / s) appartient au S.I. Le **tour par minute** (tr / min) (**rpm** en anglais) et le **tour par seconde** (tr / s) sont tolérés.

9-7 - Energie.

Wattheure et **kilowattheure**, qui font intervenir l'heure, n'appartiennent pas au S.I. L'**électronvolt** (eV) non plus mais il est cependant indispensable aux atomistes : c'est l'énergie acquise par un électron accéléré sous une différence de potentiel de 1 V dans le vide.

9-8 - Quantité d'électricité.

L'**ampère heure** (Ah) est légal mais n'appartient pas au S.I. Sa valeur est de 3600 coulombs.

10 - UNITÉS DE MESURE UTILISÉES DANS L'INDUSTRIE TEXTILE.

Les unités de mesure utilisées dans l'industrie textile sont un mélange - toujours toléré - d'unités provenant de différents systèmes :

- Système S.I. : pascal, newton
- Ancien système c.g.s. dyne, cm^2
- Système spécifique : tex, décitex
- Hors système : bar

Le tableau ci-dessous donne les principales équivalences.

TABLEAU DES ÉQUIVALENCES ENTRE UNITÉS DE MESURE TEXTILES USUELLES

UNITÉ INITIALE	A TRANSFORMER EN :								
	GPa	N / m ² (Pa)	dyne / cm ²	hectobar	g / den	g / tex	g / dtex	N / tex	cN / tex
GPa	1	10 ⁹	10 ¹⁰	10 ²	11,3 / d	1,02.10 ² / d	10,2 / d	1 / d	10 ² / d
N / m²	10 ⁻⁹	1	10	10 ⁻⁷	1,13.10 ⁻⁸ / d	1,02.10 ⁻⁷ / d	1,02.10 ⁻⁸ / d	1.10 ⁻⁹ / d	1.10 ⁻⁷ / d
dyne / cm²	10 ⁻¹⁰	0,1	1	10 ⁻⁸	1,13.10 ⁻⁹ / d	1,02.10 ⁻⁸ / d	1,02.10 ⁻⁹ / d	1.10 ⁻¹⁰ / d	1.10 ⁻⁸ / d
hectobar	10 ⁻²	10 ⁻⁷	10 ⁸	1	0,113 / d	1,02 / d	0,102 / d	0,01 / d	1 / d
g / den	8,83.d. 10 ⁻²	8,83.d. 10 ⁷	8,83.d. 10 ⁸	8,83.d	1	9	0,9	8.83.10 ⁻²	8,83
g / tex	9,81.d. 10 ⁻³	9,81.d. 10 ⁶	9,81.d. 10 ⁷	0,981.d	0,111	1	0,1	9,81.10 ⁻³	0,981
g / dtex	9,81.d. 10 ⁻²	9,81.d. 10 ⁷	9,81.d. 10 ⁸	9,81.d	1,11	10	1	9,81.10 ⁻²	9,81
N / tex	d	10 ⁹ .d	10 ¹⁰ .d	10 ² .d	11,3	10 ²	10,2	1	100
cN / tex	10 ⁻² .d	10 ⁷ .d	10 ⁸ .d	d	0,113	1,02	0,102	10 ⁻²	1

Rappels : $g = 9,81 \text{ m} / \text{s}^2$ - $1,02 = 10 / g$ - $1,13 = 100 / (9.g)$ - $8,83 = 9.g / 10$ - d = densité en g / cm^3

Exemples : * 6,5 g / den à transformer en cN / tex ?

$$\Rightarrow 6,5 \cdot 8,83 = \underline{57,4 \text{ cN} / \text{tex}}$$

* 3.2 g / dtex à transformer en pascals (N / m²) avec d = 1,340 ?

$$\Rightarrow 3,2 \cdot 9,81 \cdot 10^7 \cdot 1,340 = \underline{4,206 \cdot 10^8 \text{ Pa}}$$

* 5.10⁴ dynes / cm² à transformer en g / tex avec d = 1,210 ?

$$\Rightarrow 5 \cdot 10^4 \cdot 1,02 \cdot 10^{-8} / 1,201 = \underline{4,2 \cdot 10^{-2} \text{ g} / \text{tex}}$$

11 - RÈGLES D'ÉCRITURE ET DE TYPOGRAPHIE.

11-1 - Les noms d'unités, même s'ils sont formés par des noms de savants, sont grammaticalement des **noms communs**. Ils doivent donc s'écrire sans majuscule et ils suivent les règles normales pour la formation du pluriel : ils prennent donc un s, sauf :

- o Dans les cas où ils se terminent par **s**, **x** ou **z**.
 \Rightarrow un lux, des lux - un hertz, des hertz - un siemens, des siemens
- o Dans le cas où leur terminaison est en **al**
 \Rightarrow un quintal, des quintaux
 Exception un pascal ne donne pas des pascaux

11-2 - Les noms composés s'écrivent sans trait d'union et sans majuscule :

hectogramme, kilowattheure, électronvolt

11-3 - Les symboles des unités sont - à l'exception du symbole de l'**ohm**, qui est Ω - exprimés en caractères romains minuscules. Ainsi **kg** pour **kilogramme**.

Cependant si le nom de l'unité est celui d'un nom propre, le symbole est un caractère romain majuscule et s'il est composé de deux ou trois lettres, les suivantes sont des minuscules. Ainsi :

A	pour ampère
Bq	pour becquerel
C	pour coulomb
F	pour farad (en l'honneur de FARADAY)
Gy	pour gray
J	pour joule
K	pour kelvin
N	pour newton
Pa	pour pascal
P	pour poise (Po admis) (en l'honneur de POISEUILLE)
St	pour stockes
T	pour tesla
V	pour volt (en l'honneur de VOLTA)
W	pour watt
Wb	pour weber

11-4 - Attention les symboles ne doivent jamais prendre la marque du pluriel :

On n'écrit pas 50 kms, 18 kgs ou 145 bars

12 - PRINCIPAUX CRITÈRES ADIMENSIONNELS UTILISÉS EN GÉNIE CHIMIQUE.

Nombre de BIOT	Bi	$k.r / \lambda$
Nombre d'ECKERT	Ec	$v^2 / C_p.\Delta\theta$
Nombre d'EULER	Eu	$\rho / \rho.v^2$
Nombre de FROUDE	Fr	$v^2 / L.g$
Nombre de FOURIER	Fo	$\lambda.T / \rho.C_p.L^2$
Nombre de GRAETZ	Gz	$W.C_p / \lambda.L$
Nombre de GRASHOF	Gr	$L^3.\rho^2.g.\beta.\Delta\theta / \eta^2$
Nombre de KNUDSEN	Kn	x_m / L
Nombre de MARGOULIS ou de STANTON	Ma	$k / C_p.\rho.V$
Nombre de NUSSELT	Nu	$k.L / \lambda$
Nombre de MACH	M	V / a
Nombre de PECLET	Pe	$L.V.\rho.C_p / \lambda$
Nombre de RAYLEIGH	Ra	$g.\rho^2.C_p.\beta.\Delta\theta.D^3 / \eta.k$
Nombre de BRINKMANN	Br	$\eta.u_m^2 / k \Delta\theta$
Nombre de PRANDTL	Pr	$C_p.\eta / \lambda$
Nombre de REYNOLDS	Re	$L.V.\rho / \eta$
Nombre de SCHMIDT	Sc	$\eta / D.\rho$
Nombre de WEBER	We	$L.\rho.V^2 / \sigma$

Expressions dans lesquelles :

a	vitesse du son	$L.T^{-1}$
L	longueur ou diamètre	L
r	rayon	L
T	temps	T
θ	température	θ
V	vitesse	$L.T^{-1}$
g	accélération de la pesanteur	$L.T^{-2}$
ρ	masse volumique	$M.L^{-3}$
η	viscosité dynamique	$M.L^{-1}.T^{-1}$
β	Coefficient de dilatation	$L.θ^{-1}$
x_m	libre parcours moyen d'une molécule	L
k	coefficient de transfert thermique	$M.θ^{-1}.T^{-3}$
λ	conductibilité thermique	$M.L.θ^{-1}.T^{-3}$
C_p	chaleur spécifique sous P Cte.	$L^2.θ^{-1}.T^{-2}$
σ	tension superficielle	$M.T^{-2}$
D	coefficient de diffusion	$L^2.T^{-1}$
P	pression	$M.L^{-1}.T^{-2}$
W	débit massique	$M.T^{-1}$
u_m	vitesse moyenne d'un écoulement	$L.T^{-1}$

13 - TABLE DE CONVERSION ENTRE UNITÉS ANGLLO-SAXONNES ET UNITÉS MÉTRIQUES

A - UNITÉS DE LONGUEUR					
In. USA	x	0,0254	=	m.	
ft. USA	x	0,3048	=	m.	
Yd.	x	0,9144	=	m.	
mile terrestre	x	1,6043	=	km.	
mil	x	$2,54 \cdot 10^{-5}$	=	m.	
mile nautique	x	1,852	=	km.	
B - UNITÉS DE SURFACE					
sq. in.	x	6,45163	=		
sq. ft.	x	0,0929	=	m^2	
sq. in.	x	$6,45163 \cdot 10^{-4}$	=	m^2	
sq. yd.	x	0,83613	=	m^2	
sq. mile	x	2,5899	=	km^2	
acre	x	4046,85	=	m^2	
C - UNITÉS DE VOLUME					
Barrel	x	0,15924	=	m^3	
cu. in.	x	$16,3872 \cdot 10^{-6}$	=	m^3	
cu. ft.	x	0,028317	=	m^3	
cu. yd.	x	0,76456	=	m^3	
Gallon US	x	$3,785 \cdot 10^{-3}$	=	m^3	
Shipping ton	x	1,13268	=	m^3	
D - UNITÉS DE POIDS					
Grain (gr)	x	$0,0648 \cdot 10^{-3}$	=	kg.	
oz.	x	$2,835 \cdot 10^{-2}$	=	kg.	
lb. pound	x	0,4536	=	kg.	
Short ton	x	907,185	=	kg.	
Long ton	x	1016,05	=	kg.	
E - MASSE VOLUMIQUE					
lb / yd ³	x	0,59327	=	kg./m ³	
lb / ft ³	x	16,018	=	kg./m ³	
F - VITESSE - DÉBIT					
ft./min. (fpm)	x	0,00508	=	m./s.	
lb./ h	x	0,4536	=	kg./h.	
SCFM (cfm)	x	0,028317	=	m ³ /min	
lb./ min	x	27,2160	=	kg./h.	
SCFM (cfm)	x	1,699	=	m ³ /h.	
ft ³ / h.	x	$7,866 \cdot 10^{-6}$	=	m ³ /s.	
G - PRESSION - VISCOSITÉ					
lb./sq.in. = psig	x	0,0681	=	Atm.	
mm Hg.	x	133	=	Pa	
lb./sq.in. = psig	x	0,0703	=	bar	
In. H ₂ O	x	0,002540	=	bar	
1 bar	=	760 mm Hg.	=	10^5 Pa	
Atm.	x	1,0323	=	bar	
lb./sq.in.	x	51,8	=	mm Hg.	
lb./ft.,s.	x	1,488	=	Pa.s.	

H - PUISSANCE							
ft.lb /s.	x	1,3554	=	W	HP	x	1,0139 = CV
ft.lb /s.	x	0,00184	=	CV	CV	x	0,7362 = kW
HP	x	0,7458	=	kW			
I - TRANSFERT DE CHALEUR							
BTU	x	0,25202	=	kcal	BTU./ft.h.°F	x	1,7035 = W./m.K.
BTU	x	1,0555	=	kJ.	BTU./ft.s.°F	x	5356,8 = kcal./m.h.°C
BTU	x	2,999 10 ⁻⁴	=	kW./h.	BTU./ft.s.°F	x	6232,5 = W./m.K.
BTU./lb	x	0,556	=	kcal./kg	BTU.in./ft ² .h.°F	x	0,124 = kcal./m.h.°C
BTU./lb	x	2,3285	=	kJ./kg.	BTU.in./ft ² .h.°F	x	1,163 = W./m.K.
BTU./lb,°F	x	1,000	=	kcal/kg.°C	kcal./m.h.°C	x	1,163 = W./m.K;
BTU./lb,°F	x	4,187	=	kJ./kg.°C	BTU./ft ²	x	2,713 = kcal./m ²
BTU./ft ² .h.°F	x	4,883	=	kcal/m ² .h.°C	BTU./ft ²	x	11,36204 = kJ./m ²
BTU./ft ² .h.°F	x	5,678	=	W./m ² .h.°C	°F	=	1,80000.(°C + 17,8)
BTU./ft.h.°F	x	1,488	=	kcal./m.h.°C	°C	=	0,5555.(°F - 32)

ANNEXE

QUELQUES HISTOIRES A PROPOS D'UNITÉS DE BASE

le temps - la longueur - la masse

1 - LA MESURE DU TEMPS - D'après Paul LOUBIÈRE - 1991 -

La notion du temps a varié selon les époques et les hommes et a conduit à une grande diversité de moyens pour le mesurer.

Les premières horloges utilisaient l'ombre. Baptisées "GNOMONS", elles étaient constituées d'un simple bâton, ou d'un quelconque objet vertical, dont l'ombre est projetée sur une surface plane. Plus l'ombre est courte, plus midi est proche. Dès le 4ème siècle avant J.C. on prend l'habitude d'inscrire des nombres sur le parcours de l'ombre. C'est ainsi que naît le cadran solaire.

L'innovation majeure apparaît au 17ème siècle avec les pendules. Avant de représenter un type d'horloge à balancier, le pendule n'est rien d'autre qu'un poids qui oscille au bout d'une ficelle. C'est le physicien hollandais Christian HUYGENS qui, poursuivant les travaux de GALILEE, applique le principe du pendule pour régulariser la descente du poids des horloges et c'est Salomon COSTER qui construit la première pendule au milieu du 17ème siècle.

Rappel : On sait que la période τ d'un pendule ne dépend pas de la masse m au bout du fil, mais de la longueur l de ce fil et de l'accélération g de la pesanteur en un lieu donné :

$$\tau = \sqrt{l/g}$$

Les horloges, pendules et autres gnomons restent encore peu précis. Si ce n'est pas trop grave dans la vie quotidienne, ce manque de précision devient vite dramatique pour les marins qui s'aventurent de plus en plus loin par tout les temps. A la suite d'une erreur dans le calcul de la longitude, l'escadre de Sir Cloudesley SHOVEL se perd corps et biens : en 1707 elle se jette sur les îles SCILLY (ou SORLINGUES) au sud ouest des CORNOUAILLES alors qu'elle croit entrer dans la Manche. L'erreur aurait pu être évitée si l'heure avait été correcte. A cette époque on finit par comprendre que toute mesure de l'espace - sauf sur la terre ferme - dépend de la mesure du temps. Les progrès en horlogerie auront alors des répercussions en astronomie, cartographie, navigation, ... etc.

L'ANGLETERRE réagit vite. En 1714 elle lance, avec d'autres états, un grand concours pour trouver "une méthode capable de déterminer la longitude en mer" avec une prime de 10 000 livres pour celui qui donnera un résultat n'excédant pas un degré d'erreur, 15 000 livres pour 40 minutes d'erreur et 20 000 livres pour moins de un demi degré. Plus de 20 ans plus tard, l'inventeur John HARRISON, qui s'était déjà fait remarquer par un pendule, touche la première partie de la prime avec un chronomètre d'une précision d'un degré. En 1773, il met encore au point un autre chronomètre qui atteint le demi degré, ce qui lui permet d'empocher le reste de la prime.

Au cours du 19^{ème} siècle, de nombreux perfectionnements voient le jour : montre électrique, antimagnétique, etc. Dès 1933 on utilise les oscillations du quartz (16 384 alternances par seconde) pour gagner en précision. Il faudra attendre les années 1970 pour que soient commercialisées les premières montres à quartz numériques. Aujourd'hui les horloges au césium ont une précision extraordinaire : une seconde tous les 45 siècles. Elles ont une durée moyenne de 6 ans, du fait de la décroissance radioactive, et coûtent environ 400 000 F.

Cette avancée technologique a permis de changer la définition légale de la seconde. Au lieu d'être calculée par rapport au jour (le jour solaire est arbitrairement divisé par 24 pour obtenir une heure, puis l'heure par 3600 pour obtenir la seconde) elle est devenue :

“la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133”

En clair le temps n'est plus "astronomique", mesuré par rapport à la rotation de la terre, mais "atomique", donné par la fréquence d'oscillation d'un matériau.

Quelle heure est-il ? Il suffit de regarder sa montre. Aujourd'hui l'heure qu'elle donne est valable non seulement à l'endroit où l'on se trouve mais partout à l'intérieur d'un même fuseau horaire. Il n'en a pas toujours été ainsi. Jusqu'au 19^{ème} siècle c'est l'heure locale qui domine. Chacun calcule son heure, un peu comme bon lui semble, par rapport au soleil. Résultat : quand il est midi à PARIS, il est 12 h 19 min. 46 s à NICE et 11 h 42 min. à BREST. En FRANCE, l'écart le plus important va de STRASBOURG à BREST et vaut 49 minutes. Dans une même ville, il arrive que les cloches sonnent midi les unes après les autres. A PARIS cela peut durer une demi heure !!

Pour remédier à cette anarchie, qui fait la joie des chansonniers, PARIS se dote en 1881 d'un système de distribution horaire unique au monde : les horloges municipales électriques sont reliées à un réseau de 15 régulateurs synchronisés par une horloge mère installée à l'Observatoire. Mais l'unification à PARIS ne signifie pas encore l'unification en FRANCE. Les hommes vivent tranquillement au rythme des heures locales et ne voient pas bien l'intérêt d'un "centralisme horaire". Ce sont les développements du chemin de fer et du télégraphe qui vont modifier les données du problème.

La GRANDE BRETAGNE est la première à prendre des décisions : elle impose l'heure de GREENWICH sur tout son territoire dès 1848. La FRANCE, plus étendue en longitude, hésite longtemps. Il faut attendre la loi du 14 Mars 1891 pour que soit proclamée une heure légale en FRANCE et en ALGERIE : celle de PARIS. Ce temps moyen de PARIS est celui du méridien central de l'Observatoire, origine des longitudes en FRANCE depuis le 17^{ème} siècle, matérialisé depuis 1729 par une règle en bronze longue de 32 mètres dans la salle CASSINI de l'Observatoire.

Le réseau mondial des fuseaux horaires est défini au plan international en 1884. Il fixe aussi une limite de changement de date dans le Pacifique. Selon ce réseau, la FRANCE se situe dans le premier fuseau, dont l'heure est celle du méridien de GREENWICH. La décision provoque un beau tollé : la FRANCE doit elle "capituler" en se soumettant à l'heure anglaise ? Elle attendra 30 ans pour s'y mettre en se débrouillant pour ne pas prononcer le nom de GREENWICH. La loi du 9 Mars 1911 stipule que ***“l'heure légale est l'heure du temps moyen de PARIS retardée de 9 minutes 21 secondes”***, ce qui n'empêche pas les nationalistes de continuer de râler.

Aujourd'hui, l'Observatoire de PARIS établit le temps légal en FRANCE à partir d'une horloge au césium avec une précision d'un millionième de seconde par an. Une telle précision oblige d'ailleurs à compenser les irrégularités de mouvement de la terre en rajoutant des "secondes intercalaires" tous les deux ans environ.

Le temps légal est diffusé en FRANCE par l'horloge parlante. On compte 20 000 appels quotidiens. Heureusement pour elles, les personnes qui appellent, en remettant leur montre à l'heure, n'ont pas besoin de songer au temps revu par EINSTEIN, le père de la relativité.

En effet la précision atteinte par les horloges atomiques a permis de vérifier sa théorie. Le temps n'est pas ce que l'on croit, il dépend de l'espace et de la matière tout autour. Il s'écoule plus lentement près du Soleil que sur la Terre et plus lentement sur la Terre qu'en orbite. La prédiction fut mise à l'épreuve en 1962 à l'aide d'une paire d'horloges très exactes installées au sommet et au pied d'une tour. On trouva que l'horloge du pied, qui était la plus proche de la terre, marchait plus lentement, en accord avec la théorie de la relativité générale.

La différence de vitesse des horloges à différentes hauteurs au dessus de la Terre est de nos jours d'une importance pratique considérable avec l'avènement de systèmes de navigation très exacts basés sur des signaux de satellites. Si l'on n'avait tenu aucun compte des prédictions de la relativité générales, les positions que l'on aurait ainsi calculées auraient été fausses de plusieurs kilomètres.

2 - L'ÉPOPÉE DU MÈTRE : LONGUE HISTOIRE, JAMAIS FINIE...- D'après Jean-François AUGEREAU - 1989 -

Que la place de la Bastille soit le symbole de la Révolution française, personne ne songerait à le contester. Mais que la place Vendôme, haut lieu de la bijouterie de luxe, le soit aussi a de quoi surprendre. Pourtant, sur cette place bien sage que ceinturent des immeubles cossus, subsiste le vestige d'une révolution plus silencieuse mais tout aussi profonde et tout aussi universelle que celle de 1789. Celle de la mise en place du système métrique décimal, dont le bicentenaire a été célébré à PARIS (en 1989) par le Comité international des poids et mesures et le Comité international de métrologie légale. Là, au 13 de la place Vendôme, à gauche de l'entrée du ministère de la justice, existe une plaque de marbre scellée sous une fenêtre. Sous l'inscription "mètre" apparaît le tracé en creux, limité par deux talons, d'un mètre divisé en décimètres, le décimètre le plus à droite étant lui-même divisé en centimètres.

Ce vestige, vieux de deux siècles, est l'un des rares survivants des 16 mètres étalons en marbre - un second est encore visible sur la façade des communs du Petit Luxembourg, à droite du porche d'entrée du 36 de la rue de Vaugirard - que

L'Agence temporaire des poids et mesures, mise en place par la Convention, avait décidé de placer dans les lieux les plus fréquentés de PARIS.

On notera cependant que de ces deux mètres de marbre, seul celui de la rue de Vaugirard est sur son site d'origine, même si, au début des années 80, il a été descellé puis re-scellé lors des travaux de réfection du bâtiment qui l'abrite. Quant à celui de la place Vendôme, il semble qu'il ait été placé là en 1848, après avoir été enlevé de son emplacement d'origine, où il était peut-être devenu inutile.

Ces quelques "monuments peu considérables" sur la base desquels "serait fixé ou simplement tracé un mètre" se devaient, selon l'Agence, d'être "assez apparents pour attirer la curiosité et assez solides pour résister aux injures de l'air et aux atteintes de la malveillance". Ainsi devenait-il possible de familiariser le peuple avec les nouvelles unités de mesure de longueur et à tout un chacun de vérifier que ses instruments de mesure étaient en accord avec les vœux de l'Assemblée nationale constituante bien décidée, à partir de 1790, à mettre fin au désordre régnant alors en FRANCE dans le domaine des poids et mesures.

La révolution du mètre était en route. Du moins sur le papier. Sur le conseil de l'Académie des sciences, il avait en effet été décidé de retenir pour définition du mètre "**la dix millionième partie du quart du méridien terrestre entre le pôle Nord et l'équateur**". Le mètre naissait donc en ce mois de juillet 1792, et deux astronomes, MECHAIN et DELAMBRE, se voyaient confier la charge de calculer de la façon la plus précise la valeur de ce mètre à partir de mesures de l'arc de méridien existant entre DUNKERQUE et BARCELONE. Mais leurs travaux s'éternisant, la Convention, pressée de réaliser l'uniformité des poids et des mesures pour faciliter la libre circulation des grains, lance le nouveau système métrique par la loi du 1er août 1793 et la loi du 18 germinal an III (7 avril 1795) en créant un mètre provisoire défini à partir de la mesure du méridien effectuée....cinquante ans auparavant !

C'est sur cette base que seront construits et installés avec retard, entre février 1796 et décembre 1797 - en raison notamment de la mauvaise qualité du marbre initialement fourni - les seize mètres étalons destinés à la ville de PARIS. Aussi ne faut-il guère s'étonner que ces mètres-là aient pu présenter quelques excès de longueur (de l'ordre de 0,32 millimètre), auxquels s'ajoutent désormais les effets cumulés de ceux qui, voulant contrôler leurs mètres rigides, ont fini par écarter quelque peu les talons marquant les limites exactes des mètres de référence installés dans PARIS. Certains n'hésitent pas d'ailleurs à dire que ces essais en force ont peut-être donné aux mètres de marbre un demi-millimètre ou un millimètre de plus. C'est pratiquement le cas de celui de la place Vendôme dont la cérémonie d'étalonnage du 27 septembre 1989 a pu montrer qu'il mesurait, à un demi-millimètre près, 1,0021 mètre.

A l'époque de la Révolution, cet "à peu près" fut de peu d'importance, même si, dès le 4 messidor an VII (22 juin 1799), les savants déposèrent aux Archives de la République les étalons définitifs en platine du kilogramme et du mètre, fruits des travaux de MECHAIN et DELAMBRE. Car il a fallu dix ans pour créer un système et donner ainsi corps à la demande que TALLEYRAND et PRIEUR avaient faite en 1790 devant l'Assemblée constituante en faveur de poids et mesures uniformes pour tout le pays. Force est de constater qu'il faudra quarante ans pour l'imposer définitivement en FRANCE.

En effet, si dès 1800, le système métrique est bâti, s'il est également clair qu'il suffit de mettre en place un corps de fonctionnaires compétents et une fabrication de nouveaux instruments permettant de remplacer les anciens pour le faire appliquer, il apparaît aussitôt que l'on manque de crédits pour cela. En outre, si les régimes politiques changent, les habitudes restent les plus fortes. Le recul des pouvoirs publics en 1800 et 1812, appuyé par le public qui estime qu'il faut "apprendre le grec pour faire ses achats chez l'épicier", et conjugué aux inévitables dérogations accordées ici et là, entraîna une confusion telle qu'il fallut réagir.

En fait, ce n'est qu'avec la loi du 4 juillet 1837 que le système métrique allait être rendu obligatoire en FRANCE à compter du 1er janvier 1840. Désormais le débat portera surtout sur l'amélioration de la définition du mètre et la recherche d'un phénomène universel permettant de le décrire. Les mesures de MECHAIN et DELAMBRE sur un arc du méridien terrestre étaient de cette nature. Elles avaient donc donné au pays un mètre théorique, immuable, résistant en principe aux outrages du temps, et un mètre plus pratique représenté par le mètre en platine déposé aux Archives. Mais ce mètre utile, dont dérivèrent pendant près d'un siècle tous les mètres construits, se révéla par la suite trop court de deux dixièmes de millimètre.

C'était inacceptable. Le mètre des Archives n'était donc pas un étalon de très haute qualité métrologique.... et les diverses nations n'étaient pas très heureuses de devoir aller chercher leur étalon aux Archives de la République française. C'est la raison pour laquelle un mouvement international prit corps vers 1867 en vue d'une internationalisation du système métrique et de la préparation de nouveaux étalons. Ainsi naquit le fameux mètre étalon en platine iridié - le prototype international - conservé au pavillon de BRETEUIL, à SEVRES.

S'il permettait de gagner en précision sur celui issu des travaux de MECHAIN et DELAMBRE, il marquait cependant une régression eu égard aux principes originels de la Révolution qui voulaient que le mètre soit défini, non par deux traits fins gravés sur une règle, mais par un phénomène universel et reproductible.

Aussi divers scientifiques émirent-ils l'idée, à la fin du 19ème siècle, de recourir pour définir le mètre, à des phénomènes qui, comme l'interférométrie, permettaient d'effectuer des mesures extrêmement précises en utilisant la raie rouge de la lumière émise par une lampe à cadmium. Malheureusement cette raie n'était pas assez fine pour concurrencer le prototype international du mètre. Mais le débat était lancé, et les progrès accomplis après la deuxième guerre mondiale dans les domaines de la spectroscopie et de la physique atomique permirent, en 1960, de retenir la raie orangée émise par un atome de krypton 86 pour mettre en place un nouvel étalon de longueur. La pureté spectrale de cette radiation est en effet si fine qu'elle permet d'atteindre une précision de 0,01 millième de millimètre sur un mètre.

C'est ainsi que le mètre devint "**la longueur égale à 1 650 763,73 longueurs d'onde dans le vide de la radiation correspondant à la transition entre les niveaux $2p_{10}$ et $5d_5$ de l'atome de krypton 86**". On ne pouvait rêver plus simple. C'était hélas oublier que le laser, source de lumière merveilleusement monochromatique, venait de naître. Les métrologistes n'allaient pas se passer d'un si bel outil. La tentation était bien trop grande de remplacer la raie du krypton 86 par celle du nouveau laser. Mais c'était s'exposer aussi à de fréquents changements en fonction des progrès rapides que

les lasers risquaient de faire. Aussi, lors de la 17^{ème} Conférence générale des poids et mesures, réunie à PARIS en octobre 1983, les représentants de quarante six Etats décidèrent-ils de relier la définition du mètre à une constante fondamentale de la physique - la vitesse de la lumière - et non à une transition atomique d'un atome choisi parmi de nombreux autres

Le 20 octobre 1983, il fut donc décidé - et pour de très longues années puisque la vitesse de la lumière n'est pas près de changer - **que le mètre serait la longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière en 1 / 299 792 458 seconde**. Enfin du solide, puisque la précision de la définition du mètre a gagné un facteur 30 par rapport au krypton 86, qui lui-même avait amélioré d'un facteur 20 à 50 les mesures fournies par l'étalon en platine iridié. Reste que cette universalité du mètre reconnue par tous est très relative : de l'autre côté de l'Atlantique on jongle toujours avec les inches, les gallons et les miles, qu'ils soient nautiques ou ordinaires.

3 - LE KILOGRAMME : SON EXISTENCE DÉPEND D'UNE IMPALPABLE CARESSE **D'après Sally CROFT - 1995 -**

Les Français sont connus pour leur méticulosité dans de nombreux domaines. Les physiciens britanniques constatent que cette réputation valait également dans celui, très mystérieux, des poids et mesures. Des années durant, Georges GIRARD, un spécialiste du Bureau international des poids et mesures (BIPM) de SEVRES, a travaillé pour que les polluants de l'air n'accroissent pas le poids du kilogramme étalon. Ses outils ? Une simple peau de chamois, un flacon de produit nettoyant et une bonne dose de je-ne-sais-quoi. Georges GIRARD est maintenant à la retraite, et deux physiciens du National Physical Laboratory de TEDDINGTON, près de LONDRES, Martin SEAH et Peter CUMPSON, espèrent faire aussi bien pour conserver la pureté de l'étalon en utilisant l'ozone et les rayons ultraviolets.

Au BIPM, les conservateurs du cylindre de platine iridié ont hâte de tester la méthode des Britanniques. Pour le moment, ils nettoient encore l'étalon à la main. Mais les gardiens du dernier étalon, habitués à un objet matériel plutôt qu'à une constante fondamentale de la physique - par exemple le temps est défini à partir d'une fréquence spécifique -, préféreraient que l'entretien du kilogramme dépende plus d'une méthode scientifique que de la dextérité d'un individu.

Ce cylindre, d'une hauteur et d'un diamètre de quatre centimètres environ, a vraisemblablement été fabriqué à PARIS au début des années 1880. Il est le prototype qui sert de référence aux kilogrammes étalons des laboratoires internationaux. Au bout du compte, ces étalons - copies conformes de l'original français - font le lien entre tous les systèmes de pesage et l'étalon conservé au BIPM. Cependant, depuis une dizaine d'années, des balances perfectionnées démontrent que la masse du prototype et celle des copies varient. *"Nous avons mesuré des différences entre des cylindres apparemment identiques et nous nous sommes aperçus que l'écart se creusait"* explique le Directeur de BIPM. La masse d'un étalon neuf augmente de plusieurs dixièmes de microgrammes dans les semaines qui suivent sa fabrication.

Cette prise de poids est due à l'accumulation de polluants sur le métal. En pratiquant une analyse spectroscopique de la surface des différents kilogrammes étalons, on a constaté que l'alliage de platine iridié se couvrait d'hydrocarbures issus, entre autres, de la pollution atmosphérique, ainsi que de la vapeur de mercure émise par les instruments de laboratoire. Il arrive qu'un instrument se brise ; il produit alors une infime émanation de mercure, parfaitement inoffensive et très en deçà des seuils de sécurité, mais suffisante pour se fixer à la surface de l'étalon.

GIRARD évitait l'accumulation d'hydrocarbures en frottant la surface du métal avec une peau de chamois imbibée d'un mélange d'éthanol très pur et d'éther. Ensuite, un jet de vapeur dirigé à la main éliminait tout résidu. Une fois nettoyé, l'étalon retrouvait à quelques microgrammes près, sa masse d'origine. L'effet abrasif était exactement suffisant pour éliminer la pollution carbonée sans altérer le métal.

Peter CUMPSON pense que la technique de GIRARD ne permettait pas de supprimer le mercure incorporé dans la structure du métal. Cependant, aucun autre laboratoire n'est parvenu à obtenir d'aussi bons résultats, même après qu'eut été diffusée une cassette vidéo présentant GIRARD à l'œuvre. Des chercheurs de l'US National Institute of Standards and Technology et du Physikalisch-Technische Bundesanstalt (les instituts américains et allemands des poids et mesures) sont venus à PARIS pour le voir travailler de près, mais en vain. *"Il est presque impossible de trouver le degré exact de pression nécessaire"* dit P.CUMPSON.

Aujourd'hui, deux ans après le départ en retraite de GIRARD (NdR : l'article a été écrit en 1995), c'est au tour du BIPM d'être confronté au problème. Mais CUMPSON et SEAH pensent avoir trouvé une solution : mettre le kilogramme étalon en présence d'ozone et de rayons ultraviolets pour en oxyder les hydrocarbures et leur permettre ainsi de diffuser dans l'air. Cette technique est prometteuse grâce à l'absence de contact avec le métal et aux faibles concentrations utilisées. Il y a très peu de risques d'oxydation ou d'altération de l'étalon lui-même. Mais le BIPM n'est pas pressé *"Nous ne savons peut-être pas exactement comment fonctionne l'ancienne méthode, mais nous n'en changerons pas avant d'en connaître une plus efficace"* prévient-il.

4 - PROPOSITION POUR LA DÉFINITION DU KILOGRAMME SUR LA BASE DE LA MASSE D'UN ATOME - D'après SCIENCE - 1995 -

David PRITCHARD, physicien du Massachusetts Institute of Technology (M.I.T.), pense qu'il a trouvé une alternative au cylindre de platine iridié qui représente le kilogramme étalon : la masse d'un atome. Il l'explique dans un article de Physical Review Letters paru en septembre 1994. Avec ses collègues, il a pesé neuf éléments et isotopes, sur une échelle de masse allant de l'hydrogène à l'argon avec une précision d'environ 10 décimales.

Cela ouvre la voie à une utilisation de la masse atomique comme base d'un kilogramme étalon immuable : il pourrait être défini comme un multiple de la masse atomique du silicium par exemple.

Les scientifiques ont exploité l'étrange sensibilité d'un piège de PENNING pour mesurer les éléments. Cet appareil utilise des champs électriques et magnétiques pour capturer les ions - des atomes ou des molécules chargés électriquement - qui oscillent autour des lignes de champs de la force magnétique. Plus l'ion est lourd, plus l'oscillation est lente. Les chercheurs ont obtenu des mesures de fréquence extrêmement précises en introduisant des ions isolés dans le piège et en observant les oscillations de chacun d'entre eux pendant une minute. En comparant les fréquences moléculaires de divers ions et leur différentes compositions atomiques, le groupe en a déduit la masse atomique par rapport à l'étalon atomique, le carbone 12.

Ces résultats présentent une amélioration de près d'un facteur 1 000 par rapport aux mesures précédentes. Ils ouvrent la voie à d'autres exploits dans le domaine des mesures. L'isotope azote 15, par exemple, diffère de son parent, l'azote 14, par le poids d'un neutron diminué de la masse du rayon gamma émis pendant la création de l'isotope. Utilisant leurs chiffres aussi bien pour la masse des isotopes que pour la masse du neutron, le groupe a donc pu mesurer le rayon gamma lui-même.

Aujourd'hui, explique RICHARD, les membres du groupe espèrent que cet exploit leur permettra de tester certains des fondements de la physique, comme l'interchangeabilité de la masse et de l'énergie telle qu'elle est exprimée dans $E = m.c^2$, ou la constante structurelle fine, un nombre qui relie des quantités aussi essentielles que la charge d'un électron et la vitesse de la lumière. Enfin ils comptent bien envoyer le cylindre plus que désuet à la casse une bonne fois pour toutes.

En tout état de cause, le début du XXI^{ème} siècle n'a pas encore vu partir le "cylindre" à la casse !!
