

# La métrologie et les unités de mesure

Autor(en): **Jaggi, Alfred**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Ingénieurs et architectes suisses**

Band (Jahr): **109 (1983)**

Heft 6

PDF erstellt am: **22.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-74933>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

# La métrologie et les unités de mesure

par Alfred Jaggi, Bâle

La nouvelle «Loi fédérale sur la métrologie» du 9 juin 1977 est entrée en vigueur le 1<sup>er</sup> janvier 1978. Elle définit les unités de mesure officiellement reconnues en Suisse et règle l'obligation d'utiliser les unités légales. La nouvelle loi tient compte de l'évolution de la métrologie sur le plan international, en introduisant les unités du Système international d'unités (SI). L'ordonnance sur les unités du 23 novembre 1977 définit et précise en détail les unités légales. Les dispositions transitoires toléraient l'usage des anciennes unités jusqu'au 31 décembre 1982. Depuis le 1<sup>er</sup> janvier 1983, l'usage des unités légales est obligatoire lors de transactions commerciales ou de documentations de caractère officiel.

Le système d'unités SI répond à un réel besoin dans les domaines de la physique, de la mécanique et de l'électricité. C'est pourquoi il a été accepté spontanément par les ingénieurs mécaniciens et électriciens. Les incohérences et les inconséquences des unités techniques en usage jusqu'à présent sont par contre moins apparentes dans le bâtiment et le génie civil. Il n'est donc pas étonnant qu'architectes et ingénieurs civils aient plus de peine à sortir des ornières de la routine. Toutefois l'expérience prouve qu'un système d'unités, édifié sur une base scientifique impeccable, contribue à la clarté et à la sûreté des raisonnements.

L'introduction du système d'unités SI dans les sciences naturelles et techniques signifie certainement un grand progrès. Pour mieux comprendre la portée de cette innovation, nous voulons nous pencher sur les problèmes et l'évolution de la métrologie<sup>1</sup>.

## 1. Principes de la métrologie

L'homme vit dans un univers espace-temps, parsemé de matière. Il observe, compare et mesure. Mesurer n'est rien d'autre que comparer numériquement des grandeurs semblables. L'unité de mesure est une grandeur de comparaison, choisie arbitrairement. Pour autant que ce choix soit issu d'une convention, on pourra comparer différentes mesures entre elles.

En principe trois unités de mesure indépendantes sont nécessaires et suffisantes pour décrire tout phénomène physique. Ce sont:

- 1° L'unité de longueur pour mesurer l'espace, c'est-à-dire les distances, les angles, les surfaces et les volumes.
- 2° L'unité de masse pour mesurer la quantité de matière. La masse est une propriété commune à toutes les substances de la matière.
- 3° L'unité de temps pour mesurer l'évolution temporelle d'un phénomène physique.

La longueur est un vecteur. La masse et le temps sont des scalaires.

Dans ce qui précède nous avons tacitement admis les hypothèses suivantes:

- 1° L'espace ne dépend pas de manière mesurable du temps et de la masse.
- 2° La masse d'un corps non altéré ne dépend pas de manière mesurable de l'espace et du temps.

<sup>1</sup> La version allemande de cet article paraît dans le «Bauhandbuch 1983», publié par le Centre suisse d'études pour la rationalisation du bâtiment.

3° Le temps ne dépend pas de manière mesurable de l'espace et de la masse.

Ces hypothèses ne sont plus valables dès que le système de coordonnées d'un phénomène et celui de son observateur se déplacent à des vitesses inégales et comparable à la vitesse de la lumière. Une transformation de Galilée, qui tient seulement compte des coordonnées de l'espace, n'est plus adéquate dans ce cas. Chacun des deux systèmes de coordonnées a son propre temps; leurs relations s'expriment par une transformation de Lorentz, qui embrasse et l'espace et le temps.

Il n'existe ni un espace, ni un temps absolu. La nature ne connaît qu'une seule constante absolue: la vitesse de la lumière. Qu'un observateur se déplace ou non et qu'il mesure la vitesse de la lumière, dont la source soit au repos ou en mouvement, il trouvera toujours la même valeur:

$$c = 299\,792,5 \text{ km/s} \pm 0,2 \text{ km/s}$$

Nous retrouverons cette constante lorsque nous étudierons la relation entre les unités électrostatiques et électromagnétiques.

## 2. Aperçu historique

Les premières unités de mesure sont nées des besoins d'échanges. Elles étaient pour la plupart dérivées des dimensions du corps humain. Citons à titre d'exemple le pouce, le pied et la coudée. Les artisans et les marchands trouvaient aisément une unité de longueur ou de poids à l'échelle de leurs besoins.

On pourrait évidemment rattacher le problème des unités de mesure au conflit des générations, puisque le système SI est utilisé sans la moindre difficulté par les ingénieurs et les techniciens ayant fait leurs études ces dernières années, alors que certains aînés éprouvent beaucoup de peine à s'y rallier.

En réalité, c'est probablement la force de l'habitude — donc une force d'inertie — qui s'oppose le plus vigoureusement à l'adoption généralisée des unités SI. Accessoirement, le fait que certaines unités sont susceptibles de créer une confusion d'un ordre de grandeur (kg et daN pour les forces) a pu perturber l'ingénieur. En France, où le système SI est imposé depuis longtemps, on a eu recours à certains artifices; par exemple, on a passé des kg/mm<sup>2</sup>, pour les contraintes, à l'hectobar. Foin des 2% d'inexactitude: le jour où les calculs donneront des résultats aussi précis, on avisera!

C'est dans la vie quotidienne que l'adoption des unités fait problème: d'ici à ce que l'on ait acquis le sentiment de ce que représente un kW par rapport à un cheval-vapeur (si anachronique que soit aujourd'hui ce dernier), par exemple, le chemin sera encore long.

Relevons aussi quelques domaines techniques où l'on n'est pas près d'en venir aux unités SI: l'aviation, par exemple. En effet, dans toute la zone d'influence des Etats-Unis (c'est-à-dire l'ensemble du monde libre) les unités suivantes ont cours:

- nœud (kt) — vitesse (avion ou vent)
- mille marin (nm) — distance
- pied (ft) — altitude et hauteur.

Si l'on songe aux centaines de milliers d'instruments de bord et au sol dans un système de transport hautement normalisé, on ne peut guère espérer voir un prochain changement. Du reste, ce n'est que récemment que le mille dit «statute mile» (1609 m) et le mille par heure (mph) ont été largement remplacés par le mille marin et le nœud.

Il y a encore certaines unités qui vont coexister de part et d'autre de l'Atlantique, comme le millibar et le pouce de mercure (ins HG) pour la pression atmosphérique, toujours dans le domaine aéronautique. Tout cela ne doit pas empêcher les tenants de la vieille école de se pencher sur le système d'unités SI afin d'apprendre à en connaître les avantages et à en relever les limites pratiques.

Rédaction

Mais les relations non décimales en rendaient l'emploi laborieux. Toutefois la lacune la plus grave était l'absence de définitions précises et valables en tous lieux. Les unités des anciennes mesures variaient en effet d'un pays et même d'une région à l'autre.

### Le système métrique

Le système métrique a été mis en vigueur en France par les lois du 7 avril 1795 et du 10 décembre 1799. Il est l'œuvre d'une commission, dont Borda, Lagrange, Laplace, Monge et Condorcet étaient membres. Constituée en 1791, elle avait pour mission de mettre de l'ordre dans les poids et mesures de l'époque. La «Convention internationale du mètre» du 20 mai 1875 peut être considérée comme le premier suc-



cès substantiel du nouveau système sur le plan international. La Suisse y avait contribué en qualité d'Etat fondateur. Les unités du système métrique ont été mises en vigueur comme seules unités de mesure légales par la loi du 31 juillet 1875.

Les unités du système métrique sont:

longueur: 1 mètre  
masse: 1 kilogramme  
temps: 1 seconde

Elles sont complétées par des multiples et sous-multiples décimaux.

Les définitions primitives du mètre (dix-millionième partie du quart du méridien terrestre) et du kilogramme (poids d'un décimètre cube d'eau distillée de +4 °C) ne pouvaient guère satisfaire. Elles ont été remplacées par des prototypes en platine, déposés le 12 juillet 1799 aux Archives nationales de France. Les anciennes mesures étaient le fruit de l'expérience de nombreuses générations. Les auteurs du système métrique ont cru opportun de choisir la longueur du mètre et le poids du kilogramme de telle manière qu'aucune ressemblance ne subsiste avec les anciennes mesures. Par ce fait ils se sont écartés des réalités de la vie quotidienne. C'est peut-être la raison pour laquelle le système métrique a eu — malgré les grands avantages qu'il présente — tant de peine à prendre racine. La France ne fait pas exception: les artisans se servaient encore des anciennes mesures à la fin du 19<sup>e</sup> siècle.

La désignation de l'unité de la masse n'est pas satisfaisante non plus. Le kilogramme est — selon la définition primitive — censé être cette unité, mais il porte le nom d'un multiple d'une unité beaucoup plus petite.

La division de l'angle droit en 100 grades était une initiative qui ne pouvait guère avoir un succès substantiel. Une simple substitution des minutes et des secondes par une subdivision décimale eût été beaucoup plus réaliste. C'est d'ailleurs ce qui se pratique couramment de nos jours. Cent n'est pas divisible par trois, de sorte qu'il n'est pas possible d'indiquer les angles d'un triangle équilatéral ou d'un hexagone régulier par un nombre entier de grades. La relation avec la mesure du temps n'existe pas non plus. C'est pourquoi la division métrique des angles ne convient ni aux astronomes, ni aux navigateurs. Les constructeurs de machines divisent eux aussi le cercle en 360 degrés. La géodésie et la topographie en Europe continentale sont pratiquement les seuls domaines d'application de la division du cercle en 400 grades. Le langage courant est resté fidèle aux anciennes mesures d'angle.

#### Le système du CGS ou absolu

La notion de poids et mesure n'embrasse qu'une partie de la métrologie. Le système métrique ne définit aucune unité dérivée. Cette lacune a incité

Gauss et Weber à proposer en 1836 un système d'unités, conçu en particulier pour les besoins de la science. Il s'agit du système CGS adopté par la *Commission internationale d'électrotechnique* lors de son premier congrès, le 21 septembre 1881.

Les unités de base du système CGS sont:

longueur: 1 centimètre = 1 cm  
masse: 1 gramme = 1 gr  
temps: 1 seconde = 1 s

Les unités géométriques dérivées sont:

surface: 1 cm<sup>2</sup>  
volume: 1 cm<sup>3</sup>

Les unités mécaniques dérivées sont:

force: 1 dyn = 1 cm · g · s<sup>-2</sup>  
énergie: 1 erg = 1 cm<sup>2</sup> · g · s<sup>-2</sup>  
puissance: 1 erg · s<sup>-1</sup> = 1 cm<sup>2</sup> · g · s<sup>-3</sup>

Lorsqu'on dérive les unités électriques, il faut distinguer entre l'électrostatique et l'électromagnétisme. Un corps immobile, chargé d'électricité, engendre un champ vectoriel électrostatique, dont l'intensité est proportionnelle à la charge électrique. La présence de ce champ se manifeste par la force qu'il exerce sur un second corps également chargé d'électricité. Cette force est proportionnelle à l'intensité du champ et à la charge électrique du deuxième corps. Elle agit dans un sens qui dépend du signe des charges. Ce phénomène est décrit par la loi de Coulomb sur la force de répulsion de deux corps chargés d'électricité de même signe. Cette force devient une attraction si les charges sont de signes contraires. Cette loi s'exprime comme suit (fig. 1):

$Q_1, Q_2$  = charges électrostatiques, concentrées en un point

$r$  = distances des charges dans le vide

$$F = \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2} = \text{force de répulsion des deux charges (signe du produit } Q_1 \cdot Q_2)$$

En admettant:  $Q_1 = Q_2 = Q$

on obtient  $Q^2 = r^2 \cdot F$

ou  $Q = r \cdot \sqrt{F}$

Si l'on introduit

$F = 1 \text{ dyn}$  et  $r = 1 \text{ cm}$

on obtient l'unité de la charge électrostatique:

$$1 [Q_e] = 1 \text{ cm} \cdot \sqrt{\text{dyn}} = 1 \text{ cm}^{3/2} \cdot \text{g}^{1/2} \cdot \text{s}^{-1}$$

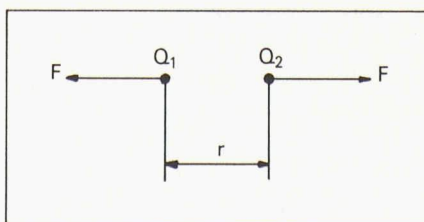


Fig. 1. — La loi de Coulomb.

Un champ vectoriel électrostatique, d'intensité  $E$  exerce sur une charge électrique  $Q$  une force:

$$F = Q \cdot E$$

d'où

$$E = \frac{F}{Q}$$

En introduisant

$$F = 1 \text{ dyn} \text{ et } Q = 1 [Q_e]$$

on obtient l'unité d'un champ vectoriel électrostatique:

$$1 [E] = 1 \cdot \frac{\text{cm} \cdot \text{g} \cdot \text{s}^{-2}}{\text{cm}^{3/2} \cdot \text{g}^{1/2} \cdot \text{s}^{-1}} = 1 \text{ cm}^{-1/2} \cdot \text{g}^{1/2} \cdot \text{s}^{-1}$$

Le magnétisme est soumis aux mêmes lois que l'électrostatique. L'unité de la masse magnétique  $P$  d'un pôle d'aimant a par conséquent la même dimension que celle d'une charge électrostatique, soit:

$$1 [P] = 1 \text{ cm}^{3/2} \cdot \text{g}^{1/2} \cdot \text{a}^{-1}$$

De même l'unité de l'intensité  $H$  d'un champ magnétique a la même dimension que celle d'un champ électrostatique, soit:

$$1 [H] = 1 \text{ cm}^{-1/2} \cdot \text{g}^{1/2} \cdot \text{s}^{-1}$$

Entre le magnétisme et l'électrostatique il y a cependant une différence fort importante. En effet, on ne peut jamais séparer les pôles d'un aimant, alors qu'il est facile d'isoler des charges électriques de signes contraires. Ceci tient au fait que le magnétisme n'existe dans la nature que par suite de charges électriques en mouvement. Celles-ci engendrent un champ magnétique autour du chemin qu'elles parcourent. Considérons le cas idéal d'un conducteur rectiligne, de longueur infinie et de section négligeable, qui serait parcouru par un courant de charge électrique d'intensité  $I$ . L'intensité  $I$  d'un courant électrique est la quantité d'électricité qui traverse une section quelconque du conducteur pendant l'unité de temps. Ce courant électrique engendre un champ magnétique, dont les vecteurs sont perpendiculaires au conducteur et orientés selon la règle du tire-bouchon. L'intensité de ce champ magnétique est (fig. 2):

$$H = \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot a}$$

Si l'on intègre  $H$  le long du cercle de rayon  $a$ , on obtient la tension magnétique:

$$U_m = H \cdot 2 \cdot \pi \cdot a = I$$

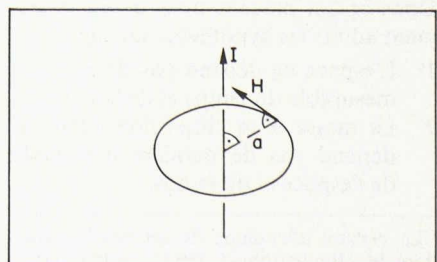


Fig. 2. — Le champ magnétique.



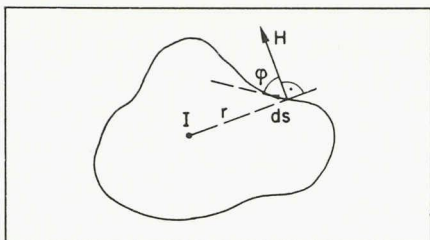


Fig. 3. — La tension magnétique.

On obtient le même résultat en intégrant le produit scalaire :

$$H_r \cdot ds \cdot \cos \varphi$$

le long de n'importe quelle courbe fermée autour du conducteur (fig. 3).

On obtient l'unité électromagnétique de l'intensité  $I$  d'un courant électrique en introduisant les unités dans l'expression

$$U_m = I.$$

$$1 [I_m] = 1 [H] \cdot \text{cm} \\ = 1 \text{ cm}^{1/2} \cdot \text{g}^{1/2} \cdot \text{s}^{-1}$$

Si l'on multiplie cette unité par une seconde, on trouve l'unité électromagnétique de la charge électrique :

$$1 [Q_m] = 1 [I_m] \cdot \text{s} \\ = 1 \text{ cm}^{1/2} \cdot \text{g}^{1/2}$$

Les unités électrostatiques et électromagnétiques diffèrent en grandeur et en dimension. Du quotient de ces unités résulte la vitesse de la lumière.

$$\frac{1 [Q_e]}{1 [Q_m]} = c \\ = 2,997925 \cdot 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$$

Ce résultat peut paraître surprenant, tant que l'on se limite à considérer les effets électromagnétiques de charges électriques, se déplaçant uniformément. La présence implicite de cette constante de la nature devient une réalité tangible dès que ces mouvements prennent la forme d'oscillations. Ils engendrent dans ce cas des ondes électromagnétiques, qui se propagent dans l'espace à la vitesse de la lumière.

Un champ magnétique exerce une force non seulement sur le pôle d'un aimant, mais aussi sur un conducteur parcouru par un courant électrique. Un tronçon infinitésimal  $ds$  de ce conducteur, orienté dans le sens du courant d'intensité  $I$ , subit une force  $dF$ , qui est également infinitésimale. On l'obtient en multipliant vectoriellement le vecteur  $I \cdot ds$  par le vecteur  $H$  de l'intensité du champ magnétique. Nous avons (fig. 4) :

$$\vec{dF} = \mu_0 \cdot I \cdot [\vec{ds} \times \vec{H}]$$

$$\text{ou : } dF = \mu_0 \cdot I \cdot ds \cdot H \cdot \sin \varphi$$

$\mu_0$  étant un facteur de multiplication, qui dépend du choix des unités.

Les forces qui se manifestent le long d'un conducteur électrique agissent en sens inverse sur la source du champ magnétique. Cette dernière peut être un second conducteur, parcouru par un courant électrique, ou les électrons qui évoluent autour des atomes d'un aimant.

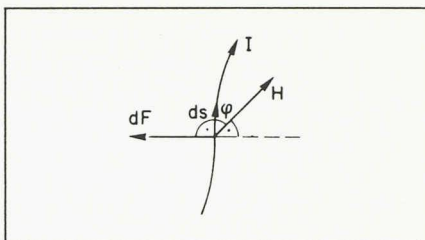


Fig. 4. — Forces sur un conducteur électrique.

Ce qui précède explique les forces qui agissent sur deux conducteurs rectilignes, de longueur infinie et d'orientation quelconque. Si les courants qui les parcourent vont en sens inverse, la résultante de ces forces sera une répulsion et un couple, tendant à orienter les deux conducteurs dans le même sens. Si par contre les deux courants ont déjà le même sens, la résultante sera une attraction et un couple, tendant à mettre les deux conducteurs dans une position parallèle. Cette force d'attraction est utilisée dans le système d'unités SI pour définir l'unité de l'intensité d'un courant électrique.

#### Les unités électriques

Le système d'unités CGS permet de décrire l'ensemble des phénomènes électriques sans aucune lacune. Le seul inconvénient est qu'il faut opérer avec des exposants fractionnaires. C'est pour cette raison que la « Commission internationale d'électrotechnique » (CIE) a adopté, lors de deux congrès, les unités spéciales suivantes :

1<sup>er</sup> Congrès, en 1881

Unité de l'intensité d'un courant électrique :

$$1 \text{ ampère} = 1 \text{ A} \\ = 10^{-1} \cdot \text{cm}^{1/2} \cdot \text{g}^{1/2} \cdot \text{s}^{-1} \\ \text{u.e.m.}$$

Unité de la charge électrique :

$$1 \text{ coulomb} = 1 \text{ C} = 10^{-1} \cdot \text{cm}^{1/2} \cdot \text{g}^{1/2} \\ \text{u.e.m.}$$

Unité de la force électromotrice, du potentiel électrique ou de la différence de potentiel (tension) :

$$1 \text{ volt} = 1 \text{ V} = 10^8 \cdot \text{cm}^{3/2} \cdot \text{g}^{1/2} \cdot \text{s}^{-2} \\ \text{u.e.m.}$$

Unité de la résistance électrique :

$$1 \text{ ohm} = 1 \Omega \\ = 1 \text{ V/A} = 10^9 \cdot \text{cm} \cdot \text{s}^{-1} \\ \text{u.e.m.}$$

Unité de la capacité électrique :

$$1 \text{ farad} = 1 \text{ F} \\ = 1 \text{ C/V} = 10^{-9} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^2 \\ \text{u.e.m.}$$

u.e.m. = unité électromagnétique du système CGS

2<sup>e</sup> Congrès, en 1889

Unité de l'énergie ou du travail :

$$1 \text{ joule} = 1 \text{ J} = 10^7 \cdot \text{erg}$$

Unité de la puissance :

$$1 \text{ watt} = 1 \text{ W} = 10^7 \cdot \text{erg} \cdot \text{s}^{-1}$$

Unité de l'inductance :

$$1 \text{ henry} = 1 \text{ H} \\ = 1 \text{ V} \cdot \text{s} \cdot \text{A}^{-1} = 10^9 \cdot \text{cm}$$

#### Les unités thermodynamiques

1<sup>o</sup> Quantité des matières

Des gaz différents, mais de même volume, de même pression et de même température, contiennent toujours le même nombre de molécules. Cette loi, énoncée par Avogadro, est à la base de la notion de la mole, qui définit une quantité d'une substance en fonction de sa masse moléculaire. L'interprétation de cette définition ne présente aucune difficulté, tant qu'il s'agit d'un gaz; elle devient problématique dès que la substance se trouve à l'état liquide ou solide. La notion de la mole a été élargie dans le système d'unités SI et s'applique à toutes les entités élémentaires telles que les atomes, molécules, ions, électrons ou autres particules. Les unités de la quantité de matière étaient définies — antérieurement au nouveau système — comme suit :

La mole (masse molaire) :

1 mol = Masse d'un gaz, dont le nombre de grammes est égal au chiffre de la masse moléculaire. Cette masse correspond à la masse d'une molécule multipliée par le nombre  $N$  de molécules contenues dans une mole.

Volume molaire :

$V_m$  = Volume en  $\text{cm}^3$  occupé par une mole, en fonction de la pression et de la température.

$V_m$  à la pression de 1 atm et à la température de 0 °C :

$$V_{m0} = 22415 \text{ cm}^3$$

Constante d'Avogadro ou de Loschmidt (nombre de molécules contenues dans une mole) :

$$N = 6,023 \cdot 10^{23} \text{ molécules/mol}$$

Constante universelle des gaz :

$$R = 8,3144 \cdot 10^7 \text{ erg/mol} \cdot \text{degré}$$

2<sup>o</sup> Thermométrie

La température d'un corps est un indice de l'énergie contenue dans la matière sous forme de mouvements des entités élémentaires. Si elles sont immobiles, nous nous trouvons au point du zéro absolu de n'importe quelle échelle de graduation thermométrique. Un apport de chaleur, ou de toute autre énergie, provoque une oscillation des atomes ou des molécules autour de leurs positions de repos. Ces mouvements prennent un caractère plus ou moins désordonné, dès que le corps en cause passe de l'état solide à l'état liquide. L'évaporation libère les molécules de toute attache; elles se déplacent à grande vitesse à travers l'espace, en percutant de temps en temps une autre molécule ou un obstacle quelconque. La translation et les



percussions expliquent l'expansion des vapeurs et des gaz et la pression qu'ils exercent sur tout objet s'opposant à la trajectoire des molécules. La température de la matière, à l'état de vapeur ou de gaz, est fonction de l'énergie cinétique de l'ensemble des molécules.

Les gaz parfaits fournissent l'exemple le plus probant de la relation entre la température de la matière et l'énergie interne qu'elle contient. Selon l'équation universelle des gaz parfaits, nous avons:

$$p \cdot V_m = R \cdot T$$

$p$  = Pression du gaz en dyn/cm<sup>2</sup>.

$T$  = Température absolue en degrés kelvin.

La théorie cinétique des gaz conduit au même résultat, soit:

$$p \cdot V_m = \frac{2}{3} \cdot N \cdot \frac{m \cdot u^2}{2} = \frac{2}{3} \cdot E_c$$

$m$  = Masse d'une molécule.

$u^2$  = Moyenne du carré de la vitesse de toutes les molécules.

$E_c$  = Energie cinétique totale d'une mole.

Nous avons par conséquent:

$$T = \frac{2}{3} \cdot \frac{E_c}{R}$$

L'énergie  $E_c$  ne dépend pas de la masse des molécules; la vitesse moyenne est de ce fait inversement proportionnelle à la racine carrée de la masse des molécules. Le thermomètre à gaz fonctionne sur la base de l'équation universelle des gaz parfaits. Il permet d'établir une graduation de la température telle qu'à chaque degré corresponde une même différence d'énergie cinétique d'un gaz parfait.

L'échelle thermométrique centigrade (selon Celsius) s'appuie sur deux points fixes:

$\pm 0^\circ\text{C}$  = Température de la glace fondant à la pression de 1 atm.

$+ 100^\circ\text{C}$  = Température de la vapeur d'eau bouillant à la pression de 1 atm.

Le zéro absolu de l'échelle centigrade se situe à  $-273,15^\circ\text{C}$ .

L'échelle thermométrique absolue (selon Kelvin) utilise la graduation centigrade, mais part du zéro absolu (de la température). Par conséquent:

$1^\circ\text{K} = 1^\circ\text{C}$

$0^\circ\text{K}$  = Zéro absolu

$273,15^\circ\text{K}$  = Température de la glace fondant à la pression de 1 atm.

Remarque:

La « Norme internationale ISO 1000 - 1973 » remplace la température de la glace fondant à la pression de 1 atm par celle du point triple de l'eau. C'est la température à laquelle les pressions de vaporisation de la glace et de l'eau sont identiques.

C'est aussi l'unique température à laquelle l'eau peut exister simultanément à l'état solide, liquide et gazeux. Elle est de  $0,0074^\circ\text{C}$  plus élevée que selon l'ancienne définition.

3° Calorimétrie

1 calorie = 1 cal = Quantité de chaleur nécessaire pour élever la température d'un gramme d'eau distillée de  $14,5^\circ\text{C}$  à  $15,5^\circ\text{C}$ , sous pression constante.

$$1 \text{ cal} = 4,185 \cdot 10^7 \text{ erg} = 4,185 \text{ joules}$$

$$1 \text{ kcal} = 10^3 \text{ cal} = 4,185 \text{ kJ}$$

La calorie a été supprimée dans le système d'unités SI. Les quantités de chaleur s'expriment en joules.

Les unités techniques

Le système métrique ne satisfait qu'une partie des besoins de la métrologie. Le système CGS est par contre sans lacunes sous ce rapport. Il a toutefois été conçu à une échelle conforme aux laboratoires et non pas aux besoins de la vie quotidienne. Les unités électriques, au contraire, se sont avérées fort pratiques en électrotechnique. Ce qui manquait, c'était des unités pratiques et précises pour les besoins de la mécanique.

La « 3<sup>e</sup> Conférence générale des poids et mesures » a défini en 1901 l'unité technique de la force de la manière suivante:

Force qu'une masse d'un kilogramme exerce dans le vide sur une base horizontale, la gravitation terrestre ayant la valeur de  $9,80665 \text{ m/s}^2$ , y compris l'influence de la rotation de la terre. Cette force a été désignée par kilogramme-poids ou kilogramme-force  $\text{kg}^*$ . On l'appelle aussi kilopond  $\text{kp}$ .

L'unité du travail ou de l'énergie a été désignée par kilogrammètre:

$$1 \text{ kg}^* \cdot \text{m} = 9,81 \text{ joules.}$$

L'unité de la puissance a reçu le nom de cheval-vapeur:

$$1 \text{ CV} = 75 \text{ kg}^* \cdot \text{m/s} = 736 \text{ watts.}$$

La définition de l'unité technique de la force peut paraître simple et naturelle à celui qui ne s'occupe que de forces statiques, dues à l'attraction terrestre. Cette conception plutôt simpliste de la force se heurte au fait que la gravitation terrestre varie d'un endroit à l'autre. Les responsables de la conférence ont forcément dû définir une accélération normale. Chaque force est liée à la notion d'un vecteur d'accélération, explicite si elle est dynamique, implicite si elle est statique.

Le défaut le plus grave de l'unité technique de la force est de créer une promiscuité entre les notions du scalaire masse et du vecteur force. Celui qui veut calculer des actions dynamiques est obligé d'exprimer la masse sous forme d'un

quotient d'une force par une accélération. Les unités techniques ne sont pas cohérentes; elles n'ont aucun lien avec les unités électriques. La conférence de 1901 a peut-être retardé la réalisation d'un véritable progrès en métrologie.

Le système d'unités rationnelles de Giorgi

La métrologie moderne est étroitement liée au nom de Giovanni Giorgi, un ingénieur italien qui a vécu de 1879 à 1950. C'est également en 1901, à l'âge de 22 ans, qu'il proposa un nouveau système d'unités. Partant de quatre unités de base, il développa des unités dérivées d'après le même principe que celui du système CGS. Bien que trois unités indépendantes de base soient nécessaires et suffisantes, il les a complétées par une unité supplémentaire, afin d'éviter l'emploi d'exposants fractionnaires.

Les unités de base sont:

longueur: 1 mètre = 1 m

masse: 1 kilogramme = 1 kg

temps: 1 seconde = 1 s

intensité d'un

courant électrique: 1 ampère = 1 A

L'ampère est en principe une unité dérivée d'une façon non cohérente des trois premières. Nous avons la relation électromagnétique suivante:

$$1 \text{ A} = 10^{-1} \cdot \text{cm}^{1/2} \cdot \text{g}^{1/2} \cdot \text{s}^{-1} = 10^{-7/2} \cdot \text{m}^{1/2} \cdot \text{kg}^{1/2} \cdot \text{s}^{-1}$$

Les unités géométriques dérivées sont:

surface: 1 m<sup>2</sup>

volume: 1 m<sup>3</sup>

Les unités mécaniques dérivées sont:

vitesse: 1 m/s

accélération: 1 m/s<sup>2</sup>

force = produit d'une masse multipliée par le vecteur d'une accélération

$$1 \text{ newton} = 1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$$

énergie = produit scalaire d'une force par une distance

$$1 \text{ joule} = 1 \text{ J} = 1 \text{ N} \cdot \text{m} = 1 \text{ m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$$

puissance = quotient d'une énergie divisée par le temps

$$1 \text{ watt} = 1 \text{ W} = 1 \text{ J/s} = 1 \text{ m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3}$$

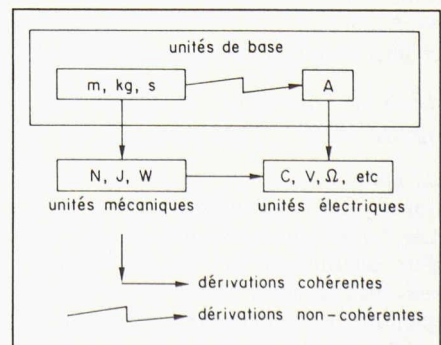


Fig. 5. — Schéma des relations entre les différentes unités.



moment d'une force = produit vectoriel d'une force multipliée par une distance

$$1 \text{ N} \cdot \text{m} = 1 \text{ m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$$

Les unités électriques dérivées sont:

charge électrique:

$$1 \text{ coulomb} = 1 \text{ C} = 1 \text{ A} \cdot \text{s}$$

force électromotrice, potentiel électrique ou différence de potentiel (tension):

$$1 \text{ volt} = 1 \text{ V} = 1 \text{ W/A}$$

résistance électrique:

$$1 \text{ ohm} = 1 \Omega = 1 \text{ V/A}$$

capacité électrique:

$$1 \text{ farad} = 1 \text{ F} = 1 \text{ C/V}$$

Les suggestions de Giovanni Giorgi peuvent être considérées comme le point de départ de la métrologie moderne. Elles ont été intégrées dans le Système international d'unités SI.

### 3. Le Système international d'unités SI

Le Système international d'unités SI découle de conventions internationales, précisées dans la « Norme internationale ISO 1000 — 1973 ». C'est un système cohérent, développé sur la base du système Giorgi. Les relations algébriques entre différentes grandeurs déterminent la composition des unités. Il n'y a jamais, ni changement de dimension, ni facteur différent de un.

Nous avons vu au début que trois unités indépendantes sont nécessaires et suffisantes pour décrire les phénomènes physiques — rappelons en passant la réserve formulée au sujet de l'indépendance de la longueur, de la masse et du temps —. Le système CGS opère avec trois unités de base; il est absolu au prix d'exposants fractionnaires. Giorgi a adopté quatre unités de base. La Norme internationale ISO 1000 — 1973 les a portées au nombre de sept. Il est clair que seules trois d'entre elles peuvent être indépendantes les unes des autres; les quatre autres contiennent les trois premières d'une façon implicite. Ce qui caractérise une unité de base, n'est donc plus l'indépendance, mais le fait que sa grandeur peut être choisie de façon arbitraire, sans pour cela compromettre le principe de la cohérence.

Les unités de base du système SI sont:

longueur:	1 mètre	= 1 m
masse:	1 kilogramme	= 1 kg
temps:	1 seconde	= 1 s
intensité d'un courant électrique:	1 ampère	= 1 A
température thermodynamique:	1 kelvin	= 1 K
quantité de matière:	1 mole	= 1 mol
intensité lumineuse:	1 candela	= 1 cd

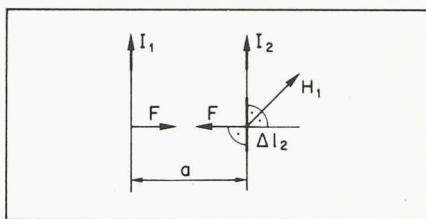


Fig. 6. — Loi de Laplace.

La norme internationale ISO 1000-1973 et l'ordonnance sur les unités du 23 novembre 1977 définissent la longueur du mètre et la durée de la seconde à l'aide de la longueur d'onde, respectivement de la fréquence de radiations bien déterminées. Le kilogramme est la masse du prototype international du kilogramme. Les mêmes documents se réfèrent à la loi de Laplace pour définir l'unité de l'intensité d'un courant électrique.

Admettons deux conducteurs rectilignes et de longueur infinie, placés parallèlement dans un espace vide. Que les sections soient de forme circulaire et de dimension négligeable en comparaison de l'écartement qui sépare les deux conducteurs. Supposons que ces derniers soient parcourus dans le même sens par des courants électriques d'intensité constante  $I_1$  et  $I_2$ . Le premier engendre le long du second un champ magnétique d'intensité (fig. 6):

$$H_1 = \frac{I_1}{2\pi a}$$

La force d'attraction que ce champ exerce sur un tronçon  $\Delta l_2$  du second conducteur est égale à:

$$F = \mu_0 \cdot I_2 \cdot \Delta l_2 \cdot H_1 \\ = \frac{\mu_0}{2 \cdot \pi} \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot \frac{\Delta l_2}{a}$$

Si l'on introduit:

$$\mu_0 = 4 \cdot \pi \\ I_1 = I_2 = 1 \text{ A} \\ a = \Delta l_2 = 1 \text{ m}$$

on obtient:

$$F = \frac{4 \cdot \pi}{2 \cdot \pi} \cdot A^2 \cdot \frac{1 \text{ m}}{1 \text{ m}} = 2 \cdot A^2$$

La définition de l'ampère exige que dans ce cas la force d'attraction des deux conducteurs soit:

$$F = 2 \cdot 10^{-7} \cdot N$$

par  $m$  de longueur des conducteurs. De cette définition découle la relation implicite entre l'ampère, le mètre, le kilogramme et la seconde. Nous avons:

$$F = 2 \cdot 10^{-7} \cdot N = 2 \cdot A^2 \\ \text{d'où}$$

$$1 \text{ A} = 10^{-7/2} \cdot \sqrt{N} \\ = 10^{-7/2} \cdot \text{m}^{1/2} \cdot \text{kg}^{1/2} \cdot \text{s}^{-1}$$

C'est la même relation que celle que nous avons trouvée en passant du système CGS au système Giorgi.

La température thermodynamique pourrait en principe être mesurée en joule/mole. Il y a en effet une relation

directe entre l'énergie cinétique des molécules d'un gaz parfait et sa température. Toutefois un thermomètre ne mesure que la température de la chaleur qui lui a été transmise par percussion des molécules ou des atomes. C'est pourquoi la température d'un corps est uniquement fonction de l'énergie cinétique due à des mouvements de translation. L'énergie d'une molécule tournant sur elle-même n'a pas d'influence sur la température. Le kelvin est la 273,16<sup>e</sup> partie de la température thermodynamique du point triple de l'eau. C'est une unité de base de grandeur arbitraire, liée cependant à la notion d'énergie.

La matière n'est pas un continuum. Elle se compose toujours de quantités discrètes, les atomes, les molécules, les ions, les électrons ou autres entités élémentaires. La mole représente un nombre constant de ces quantités discrètes, la constante d'Avogadro ou de Loschmidt. La norme internationale ISO 1000-1973 et l'ordonnance sur les unités du 23 novembre 1977 définissent ce nombre comme étant celui des atomes contenus dans 0,012 kg de carbone 12. La masse d'une mole est fonction de la nature des entités élémentaires, dont elle se compose. La grandeur de l'unité de base mole est arbitraire.

La candela est une unité de photométrie. La norme ISO et l'ordonnance définissent la température et les conditions dans lesquelles une source de lumière représente l'intensité lumineuse d'une candela. C'est une unité de base de grandeur arbitraire, qui dépend de la température et de la puissance de radiation de la source de lumière.

Le nombre relativement élevé d'unités de base a pour but de simplifier les expressions algébriques qui les relient à d'autres grandeurs. Ce sont des produits ou des fractions. Les exposants des facteurs ou des diviseurs sont toujours des nombres entiers. Une fraction peut fort bien être convertie en un produit avec des facteurs munis d'exposants négatifs. Les unités dérivées s'obtiennent en introduisant les unités de base dans les expressions algébriques des grandeurs qu'elles représentent. Tandis que la grandeur d'une unité de base est définie arbitrairement par convention, celle d'une unité dérivée est — par suite du principe de la cohérence — toujours une fonction univoque des unités de base. C'est ce critère qui nous incite à traiter les unités supplémentaires de la norme ISO comme des unités dérivées, et de les classer — comme les auteurs de l'ordonnance l'ont fait — parmi les unités de la géométrie.

Certaines unités dérivées ont reçu des noms et des symboles particuliers. En exprimant d'autres unités dérivées en fonction de ces unités particulières, on obtient très souvent des expressions plus simples et plus explicites.



Les unités géométriques dérivées sont:

angle plan:

$$1 \text{ radian} = 1 \text{ rad} = 1 \text{ m/m}$$

angle solide:

$$1 \text{ stéradian} = 1 \text{ sr} = 1 \text{ m}^2/\text{m}^2$$

surface:

$$1 \text{ mètre carré} = 1 \text{ m}^2$$

volume:

$$1 \text{ mètre cube} = 1 \text{ m}^3$$

La mesure d'un angle plan implique toujours des mesures de longueurs. La méthode classique consiste à tracer un cercle, avec le centre au sommet de l'angle, et à mesurer la longueur de l'arc compris entre les côtés de l'angle. L'ouverture de l'angle est égale à l'arc divisé par le rayon du cercle. Si l'on introduit l'unité de la longueur dans le numérateur et dans le dénominateur de ce quotient, on obtient l'unité dérivée de l'angle plan. En effet: le résultat de cette opération est univoque et la grandeur du radian ne peut pas être choisie arbitrairement. Le degré et le grade sont par contre des unités arbitraires et non cohérentes.

Le théodolite est un instrument conçu selon la méthode que nous venons de décrire. Lorsqu'on lit un azimut ou un angle d'élévation, on mesure en réalité le chemin parcouru par le micromètre de lecture le long du périmètre du cercle gradué. La graduation nomographique anticipe la division par le rayon du cercle et la conversion en degrés ou en grades.

La trilatération est une méthode indirecte de déterminer un angle plan. Elle repose également sur des mesures de longueurs.

L'angle solide se mesure selon une méthode analogue à celle employée pour définir la grandeur d'un angle plan. On trace une sphère avec le centre au sommet de l'angle solide, et l'on mesure l'aire de la portion de surface, que l'angle intercepte sur la périphérie de la sphère. La grandeur de l'angle solide est définie par le quotient de cet aire divisée par le carré du rayon de la sphère. Cette grandeur ne dit rien quant à la forme de l'angle. Si l'on introduit l'unité de la surface dans le numérateur et dans le dénominateur du quotient, on obtient le stéradian, l'unité dérivée de l'angle solide.

Les mesures de surfaces et de volumes impliquent la connaissance d'angles caractéristiques. Prenons par exemple un parallélogramme et un parallélépipède. Il faut deux vecteurs pour définir la forme et la surface de l'un, et trois pour définir la forme et le volume de l'autre. Le produit vectoriel des deux vecteurs du parallélogramme est égal à l'aire de ce dernier. C'est un vecteur perpendiculaire au plan de la surface mesurée. Pour trouver le volume du parallélépipède, il faut faire le produit scalaire de l'un des vecteurs avec le produit vectoriel de deux autres.

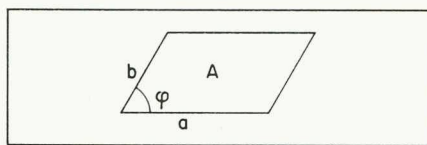


Fig. 7. — Surface du parallélogramme.

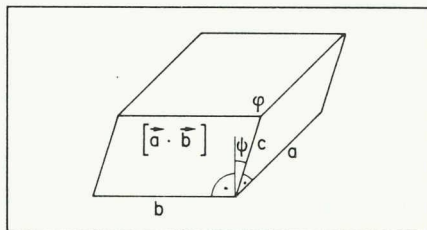


Fig. 8. — Volume du parallélépipède.

La surface du parallélogramme est (fig. 7):

$$\vec{A} = [\vec{a} \times \vec{b}]$$

$$A = a \cdot b \cdot \sin \varphi$$

En introduisant

$$a = b = 1 \text{ m} \quad \text{et} \quad \varphi = \frac{\pi}{2} \text{ rad}$$

on obtient l'unité dérivée de la surface:

$$a = 1 \text{ m}^2$$

Le volume du parallélépipède est (fig. 8):

$$V = \vec{c} \cdot [\vec{a} \times \vec{b}] = \vec{b} \cdot [\vec{c} \times \vec{a}] = \vec{a} \cdot [\vec{b} \times \vec{c}]$$

$$V = a \cdot b \cdot c \cdot \sin \varphi \cdot \cos \psi$$

en introduisant

$$a = b = c = 1 \text{ m}$$

$$\varphi = \frac{\pi}{2} \text{ rad} \quad \text{et} \quad \psi = 0$$

on obtient l'unité dérivée du volume:

$$V = 1 \text{ m}^3$$

La quintessence de cet exposé est qu'une seule unité de base suffit pour mesurer l'espace (fig. 9). Les mesures d'angles sont en réalité des mesures de longueurs. Elles sont nécessaires pour passer de la dimension linéaire à celles de deuxième et de troisième puissance.

Dotées de noms particuliers et de symboles spéciaux les unités dérivées de la mécanique et de la physique sont les suivantes:

fréquence:

$$1 \text{ hertz} = 1 \text{ Hz} = 1 \text{ s}^{-1}$$

force:

$$1 \text{ newton} \quad 1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$$

pression, contrainte:

$$1 \text{ pascal} = 1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$$

énergie, travail, quantité de chaleur:

$$1 \text{ joule} = 1 \text{ J} = 1 \text{ N} \cdot \text{m} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$$

(produit scalaire)

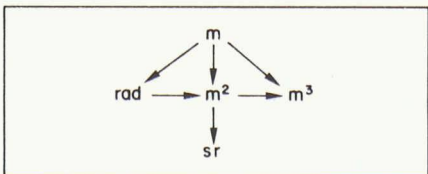


Fig. 9. — Schéma des unités géométriques.

puissance:

$$1 \text{ watt} = 1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$$

charge électrique, quantité d'électricité:

$$1 \text{ coulomb} = 1 \text{ C} = 1 \text{ A} \cdot \text{s}$$

potentiel électrique, différence de potentiel, tension, force électromotrice:

$$1 \text{ volt} = 1 \text{ V} = 1 \text{ J/C}$$

capacité électrique:

$$1 \text{ farad} = 1 \text{ F} = 1 \text{ C/V}$$

résistance électrique:

$$1 \text{ ohm} = 1 \Omega = 1 \text{ V/A}$$

conductance électrique:

$$1 \text{ siemens} = 1 \text{ S} = 1 \Omega^{-1}$$

flux d'induction, flux magnétique:

$$1 \text{ weber} = 1 \text{ Wb} = 1 \text{ V} \cdot \text{s}$$

densité de flux magnétique, induction magnétique:

$$1 \text{ tesla} = 1 \text{ T} = 1 \text{ Wb/m}^2$$

inductance:

$$1 \text{ henry} = 1 \text{ H} = 1 \text{ Wb/A} = 1 \text{ J/A}^2 = 10^7 \cdot \text{m}$$

flux lumineux:

$$1 \text{ lumen} = 1 \text{ lm} = 1 \text{ cd} \cdot \text{sr}$$

$$1 \text{ lux} = 1 \text{ lx} = 1 \text{ lm/m}^2$$

La norme ISO et l'ordonnance définissent de nombreuses unités dérivées, qui n'ont pas reçu de noms particuliers. Elles sont représentées en fonction des unités dont elles ont été dérivées. Ce sont des expressions algébriques, composées de symboles d'unités de base ou d'unités dérivées.

Citons pour terminer deux unités hors du système SI. Elles sont non cohérentes et leur légalité est marginale.

Les météorologues continuent de mesurer la pression atmosphérique en bars.

La relation est:

$$1 \text{ bar} = 100 \text{ kPa}$$

Ils auraient tout intérêt à utiliser le pascal. L'emploi du bar est à déconseiller. Les producteurs d'électricité n'ont malheureusement pas pu se décider à modifier leurs instruments de mesure et à facturer leurs fournitures d'électricité en mégajoules. La relation est:

$$1 \text{ wattheure} = 1 \text{ Wh} = 3600 \text{ J}$$

$$1 \text{ kilowattheure} = 1 \text{ kWh} = 3,6 \text{ MJ}$$

Le remplacement de la calorie par le joule garantissait un ordre simple en matière d'énergie. L'emploi du kilowattheure compromet cet ordre et désorganise la cohérence du système SI. C'est pourquoi l'emploi de cette unité est également à déconseiller.

Les multiples et sous-multiples décimaux des unités SI peuvent être exprimés par des puissances de dix. Les exposants sont bien entendu des nombres entiers; ils sont positifs s'il s'agit d'un multiple et négatifs s'il s'agit d'un sous-multiple. Les multiples et les sous-multiples dont l'exposant est divisible par trois peuvent aussi être représentés par un préfixe que l'on place immédiatement devant le symbole de l'unité. Il en est de même pour les multiples plus petits que mille et les sous-multiples plus grands qu'un millième.



$10^{18}$	= trillion	= exta	= E
$10^{15}$	= milliard	= péta	= P
$10^{12}$	= billion	= téra	= T
$10^9$	= milliard	= giga	= G
$10^6$	= million	= méga	= M
$10^3$	= mille	= kilo	= k
$10^2$	= cent	= hecto	= h
$10^1$	= dix	= déca	= da
$10^{-1}$	= dixième	= déci	= d
$10^{-2}$	= centième	= centi	= c
$10^{-3}$	= millième	= milli	= m
$10^{-6}$	= millionième	= micro	= $\mu$
$10^{-9}$	= milliardième	= nano	= n
$10^{-12}$	= billionième	= pico	= p
$10^{-15}$	= billiardième	= femto	= f
$10^{-18}$	= trillionième	= atto	= a

L'unité de la masse fait exception à la règle. Les préfixes s'appliquent à l'unité gramme, le kilogramme ayant déjà le nom d'un multiple (voir remarque au sujet du système métrique). A partir de 1000 kg, on a intérêt à utiliser l'unité tonne.

$$1 \text{ tonne} = 1 \text{ t} = 1000 \text{ kg}$$

#### 4. Conclusions

Les maîtres d'œuvre du Moyen Age ont construit des cathédrales, qui font oublier la pesanteur. Ils se sont affranchis — sur un plan spirituel — de l'attraction de cette terre, que l'autorité ecclésiastique considérait comme le centre de l'univers. Galilée avait été accusé d'hérésie, parce qu'il avait soutenu la cinématique céleste de Copernic et de Kepler. Ces ingénieries ne pouvaient empêcher la Terre de tourner sur elle-même et d'être l'une des nombreuses planètes qui évoluent autour du soleil. L'émancipation des sciences était inéluctable. Faisant abstraction de croyances mystiques, les chercheurs parvinrent à une connaissance profonde de la nature. Toutefois les physiciens du 19<sup>e</sup> siècle croyaient encore à l'existence de l'éther; ils avaient besoin d'un support matériel pour pouvoir se représenter la propagation de la lumière dans le vide.

La théorie de la relativité a eu, au début du 20<sup>e</sup> siècle, des conséquences comparables à celles de la cinématique de Copernic. Bien des vérités, que l'on croyait solidement fondées, ont été mises en question. Les mathématiciens avaient préalablement révisé la notion de l'axiome et abandonné l'idée d'une « proposition évidente par elle-même ». Ils ont simplement déclaré qu'un axiome était une convention arbitraire, que l'on peut accepter ou non en toute liberté. Cette définition sans prétentions a ouvert la vue sur de nouveaux horizons. La géométrie hyperbolique est devenue l'instrument pour démontrer la relativité de l'espace et du temps, du phénomène physique et de son observation. Le monde réel n'a ni un espace, ni un temps absolu. La vérité absolue est également hors de portée de l'esprit humain. Les autorités établies, qui préten-

dent détenir la vérité, s'appuient en réalité sur des constructions sophistiquées. Ces conclusions invitent à la tolérance. La nouvelle axiomatique des mathématiciens modernes est un exemple de réserve et de respect de la liberté et de l'opinion d'autrui. Les sciences, qui devraient régler la vie sociale, n'ont pas suivi l'évolution des sciences mathématiques et naturelles. Le matérialisme reste un facteur décisif en politique. Certains l'élèvent encore de nos jours au rang d'une idéologie. Les adeptes des « sciences » politiques et économiques sont impuissants face aux crises qui menacent l'humanité. Le droit international est encore rudimentaire et impuissant. Un énorme retard est à rattraper dans ces domaines.

La métrologie concerne les sciences mathématiques et naturelles, pures ou appliquées. On peut se demander, dans cet ordre d'idées, à quel niveau chronologique placer le système d'unités techniques. Les responsables de la « 3<sup>e</sup> Conférence générale des poids et mesures » connaissaient le système CGS et avaient suffisamment d'indices pour pouvoir pressentir l'évolution de la technologie des machines et de l'électricité. Ils ont néanmoins identifié la notion de la force à celle de l'attraction terrestre. Cette conception géocentrique était anachronique dès le début. Le grand mérite de Giovanni Giorgi est d'avoir proposé une unité de la force à l'échelle des besoins quotidiens et de l'avoir définie en faisant abstraction de la cause. Il s'est affranchi de l'attraction terrestre sur un plan intellectuel. La définition du newton est valable n'importe où sur terre ou dans l'espace, qu'il s'agisse de l'attraction des masses, de forces d'inertie ou des effets d'un champ électrique ou magnétique. Les suggestions de Giorgi ont été intégrées dans le Système international d'unités SI, adopté en 1960 par la « 11<sup>e</sup> Conférence générale des poids et mesures ». C'était à la veille des premières aventures dans l'espace. On peut les considérer comme l'affranchissement expérimental de l'attraction terrestre.

Les unités SI sont des expressions conformes aux lois géométriques ou physiques des grandeurs qu'elles représentent. La relation entre la nature d'une grandeur et sa dimension est univoque. C'est pourquoi elles répondent aux besoins de la science et de la technique. La suppression de la calorie et du cheval-vapeur met un terme à l'autarcie des différentes formes d'énergie. Elles s'expriment toutes en joules ou l'un de ses multiples. La puissance d'un moteur hydraulique, électrique ou thermique se mesure uniquement en watt ou un de ses multiples. Il en est de même d'une chaudière ou des pertes de chaleur de l'enveloppe d'un bâtiment. La suppression de la calorie et du cheval-vapeur simplifie les bilans thermiques et permet

de comparer les différentes sources d'énergie entre elles, sans avoir à tenir compte d'un changement d'unité. Dans l'industrie alimentaire, il y a longtemps qu'on indique la valeur calorifique des produits en joules. L'unité dans le secteur de l'énergie serait parfaite si les responsables de la production d'électricité avaient fait preuve de l'esprit d'avant-garde des pionniers de cette technologie.

L'introduction du nouveau système d'unités SI n'est pas sans problèmes. Celui qui a acquis son expérience professionnelle en employant les anciennes unités doit se familiariser avec de nouveaux chiffres. Il doit surtout se libérer de la nonchalance avec laquelle l'ancien système intervertissait les notions de masse et de force. Poids et pesanteur, charge et sollicitation n'ont pas le même sens. Le poids d'un objet résulte d'une opération qui consiste à comparer sa masse avec celle d'un poids témoin. Le poids est par conséquent une masse. Pesanteur exprime par contre sans équivoque la force avec laquelle cet objet est attiré par la terre.

Le mot chargé est lié à la notion d'une quantité, qui s'exprime par un nombre d'unités, un volume ou une masse. Les charges propres, permanentes ou utiles sont des quantités de matière. Elles sont la cause des sollicitations obtenues en multipliant la masse des charges par le vecteur de la gravitation terrestre ou de l'accélération d'un mouvement non uniforme. Cette opération est uniquement de la compétence du constructeur de la structure portante ou du véhicule de transport. Indiquer la pesanteur d'une charge au lieu de sa masse serait un retour aux défauts de l'ancien système. L'utilisateur d'un bâtiment ou d'un véhicule de transport n'a que faire de notions qui ne lui sont pas familières. Une charge est pour lui une quantité. Le constructeur d'autre part a besoin de connaître la masse des charges, afin d'être en mesure de calculer non seulement la pesanteur, mais aussi les forces d'inertie des charges et le comportement dynamique de la structure portante. Ce qui précède permet de déduire la règle suivante:

*Les charges sont à indiquer en unités de masse.*

*Les sollicitations sont à indiquer en unités de force, de pression ou de contrainte.*

La pesanteur et l'inertie des charges ne sont pas les seules causes de sollicitations; il y a aussi la pression des fluides, la poussée des terres, les effets du retrait et des variations de la température, ainsi que les actions du vent. Le texte allemand de la norme SIA 160 de 1970 parle de « Windlasten » (charges de vent), ce qui est absurde. Le texte français dit: « action du vent », ce qui ex-



prime fort bien la nature du phénomène. Les sollicitations sont des forces, qui engendrent des contraintes dans les structures portantes. Ces contraintes sont des tenseurs, qui se composent en général de six vecteurs. Ce sont trois tensions normales et trois efforts de cisaillement. On peut toujours transformer le système de coordonnées d'un tenseur de manière à faire disparaître les efforts de cisaillement. C'est de cette façon qu'on trouve les trois tensions et axes principaux. Un tenseur ne cesse pas d'être un tenseur lorsque les trois tensions principales sont identiques. Le caractère vectoriel des tensions n'est plus apparent — dans un tel cas — à l'intérieur d'un corps ainsi sollicité. Il se manifeste par contre le long des limites. La pression statique d'un fluide est un exemple typique de ce cas particulier. Parler d'un scalaire dans ce cas serait une erreur de raisonnement. La pression d'un fluide est un tenseur au même titre que la contrainte à l'intérieur d'un solide. L'usage du newton par millimètre carré pour les solides et du pascal exclusivement pour les fluides n'est pas une pratique très opportune. Dans une structure

métallique, on peut fort bien se représenter un effort exprimé en N/mm<sup>2</sup>. Une si petite surface de référence est par contre grotesque dès qu'il s'agit d'un élément en béton ou en béton armé. Les éprouvettes utilisées pour mesurer la résistance du béton à la compression ont en général une section de 40 000 mm<sup>2</sup>, respectivement 0,04 m<sup>2</sup>. Autrement dit: le mètre carré serait une surface de référence sensiblement mieux proportionnée. Compte tenu de la relation:

$$1 \text{ N/mm}^2 = 1 \text{ MN/m}^2 = 1 \text{ MPa}$$

et de l'écriture plus simple, le mégapascal est l'unité proportionnée à l'ordre de grandeur des contraintes dans les matériaux de construction usuels. Le kilopascal se situe par contre au niveau de la pression naturelle des fluides et de la poussée des terres.

Ces quelques remarques au sujet de l'application pratique des nouvelles unités montrent qu'il ne suffit pas de remplacer les unités d'un système désuet par celles d'un système moderne.

Une analyse approfondie de la nature des grandeurs, que les nouvelles unités représentent avec beaucoup plus de précision, est indispensable. Bien des habi-

tudes de raisonnement devront être révisées et soumises à un examen consciencieux. C'est à ces conditions que l'on peut comprendre et réaliser le progrès qu'apporte l'introduction du nouveau Système international d'unités SI.

#### Bases légales:

Loi fédérale sur la métrologie du 9 juin 1977. Ordonnance sur les unités du 23 novembre 1977.

#### Normes:

Norme internationale ISO 1000 (1973) Unités SI et recommandations pour l'emploi de leurs multiples et de certaines autres unités.

SNV 012100-1976

Unité SI et recommandations pour l'emploi de leurs multiples et de certaines autres unités.

Recommandation SIA 411 (1976) Application des unités SI au domaine de la construction.

#### Adresse de l'auteur:

Alfred Jaggi,  
Ingénieur diplômé EPFZ — ASIC/SIA  
Sonnenweg 8,  
4052 Bâle

## Bibliographie

### Inventaire suisse d'architecture 1850-1920

publié par la Société d'histoire de l'Art en Suisse, Berne 1982. Le volume 108 fr.

Le 19 novembre écoulé, la Société d'histoire de l'Art en Suisse (SHAS) a présenté à Berne, les volumes 3 et 4 de cette collection, deux ouvrages de plus de 450 pages chacun.

Le volume 3 est consacré à Bienne, à La Chaux-de-Fonds (avec un texte très important de Jacques Gubler), à Coire et à Davos.

Le volume 4 présente Delémont (étude très fouillée de Gilles Barbey), Frauenfeld, Fribourg (par Gilles Barbey et Jacques Gubler), Genève (une présentation de Gilles Barbey, Armand Brulhart, Georg Germann et Jacques Gubler), et enfin Glaris.

Chaque sujet est traité en 4 chapitres: aperçu historique, développement urbain, inventaire topographique et annexes.

Les deux volumes parus traitent de villes sises dans des régions fort différentes de Suisse; de plus, un équilibre linguistique est sauvegardé: il s'agit donc d'un effort de compréhension confédérale qu'il faut souligner.

L'époque abordée est importante: les quelques mille pages et trois mille illustrations de ces deux volumes témoignent entre autres de l'empreinte que les nouveaux moyens de transport ont laissés sur notre environnement construit. A l'heure de la

renovation urbaine, une politique efficace de mise en valeur du patrimoine requiert une connaissance systématique de milieu en cause; pour éclairer des décisions difficiles à prendre, la parution de ces deux volumes vient à point nommé; ils ne devraient donc manquer dans aucune bibliothèque de spécialistes chargés de tâches de réhabilitation urbaine, ou de plans de quartier en ville.

F. N.

### New York

par Hermann Teifer. — Un vol. 12 x 18,5 cm sous couverture cartonnée, 192 pages avec 90 illustrations, Artemis-Verlag, Zurich et Munich, 1982. Prix: Fr. 29.80.

Paru dans la série des guides d'art et de voyage *Artemis-Cicerone*, ce petit ouvrage constitue un compagnon précieux et peu encombrant pour le voyageur curieux de découvrir la métropole des bords de l'Hudson. On croit tout savoir d'une ville qui a inspiré tant de livres et de films et l'autocollant imagé «I love NY» fait partie de la décoration obligée de nombre de voitures chez nous. Pourtant, aller à New York et voir New York ne vont pas forcément de pair: ce guide permet de ne pas se borner à la première possibilité.

Au delà des caractéristiques les plus voyantes de New York, l'auteur nous présente l'histoire, l'architecture, les curiosités et les centres d'intérêt culturel de cette ville qu'on identifie trop hâtivement à l'Amérique, alors qu'elle y constitue une singularité, fort médiocrement représentative.

S'il est vrai que l'on ne connaît pas les Etats-Unis en n'ayant découvert que New York et que cette dernière peut engendrer crainte et répulsion par certains côtés, elle exerce une fascination irrésistible. A y observer les hommes et les femmes qui sont venus des quatre coins de l'horizon pour y vivre — et parfois seulement pour y survivre, sinon pour y mourir — on pense aux insectes attirés par la flamme qui va les brûler. Parallèlement à cette vie végétative des plus pauvres, la culture y bouillonne et l'on peut entendre et voir à New York les plus grands artistes ou leurs œuvres.

Avec ce livre dans la poche, on s'orientera aisément dans cette immense cité et l'on pourra choisir ses buts de promenade, qu'il s'agisse d'un cloître espagnol du 12<sup>e</sup> siècle (!), des gratte-ciel déjà historiques ou des trésors de l'art indien nord-américain.

Qu'on aime ou n'aime pas New York, c'est une ville-phénomène, appartenant à notre temps et qu'il faut connaître avant de vouloir la juger. L'auteur de cet ouvrage nous guide: à nous de nous faire une opinion.

### Vocabulaire électrotechnique international

Publication 50, chap. «Installations électriques des bâtiments», de la Commission Electrotechnique Internationale. — Une brochure au format A4, 32 pages, prix: Fr. s. 30.—. En vente au Bureau central de la CEI, rue de Varembe 1, 1211 Genève 20, 1982.

On construit actuellement de nombreux complexes commer-

ciaux et industriels; en particulier, des entrepreneurs de pays industrialisés vont construire dans les pays en développement. Il est essentiel, par conséquent, que les fabricants des matériels et appareils électriques à installer dans ces constructions ainsi que leurs utilisateurs disposent d'un langage technique normalisé qui facilite la compréhension mutuelle.

La CEI vient de faire paraître une nouvelle norme mondiale qui donne les termes et les définitions relatifs à l'installation électrique des bâtiments. Cette norme, la Publication 50(826), qui est un nouveau chapitre du Vocabulaire Electrotechnique International (VEI), comporte 50 termes en 9 langues, chacun étant accompagné de sa définition en anglais, français et russe. La CEI (Commission Electrotechnique Internationale) fait autorité pour les normes mondiales concernant les techniques de l'électricité et de l'électronique. La CEI se compose des Comités nationaux de 43 pays représentant les intérêts des milieux de l'électricité et de l'électronique de ces pays dans les discussions internationales auxquelles participent producteurs, utilisateurs, associations commerciales, techniciens de profession et gouvernement.

### Ouvrages reçus

**Directory of Industrial and Technological Research Institutes.** Une brochure au format A4, 108 pages. Edité par l'Unido, Development and Transfer of Technology Branch, P.O. Box 300, A-1400 Vienne (Autriche).