Les unités de mesure dans l'optique de l'ingénieur

BULLETIN

des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
de l'Association Suisse des Electriciens
des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke
de l'Union des Centrales Suisses d'Electricité

Elektrotechnik – Electrotechnique

Les unités de mesure dans l'optique de l'ingénieur

Par E. Hamburger

53.081.1

Le 6 décembre 1979 M^lle E. Hamburger a donné sa leçon d'adieux à l'Aula de l'EPFL. Nous reproduisons un extrait de son exposé sur les «mesures et unités dans l'optique de l'ingénieur» fort apprécié de tous les auditeurs.

1. L'évolution des unités

Pour chaque espèce de grandeur à mesurer, il faut une unité. Des grandeurs de même espèce sont des grandeurs qu'on peut additionner ou soustraire.

L'observation ayant précédé toute mesure, il n'est pas étonnant que l'homme ait commencé par choisir comme éléments de comparaison des grandeurs qui l'entouraient. Pour les longueurs on peut citer comme exemples: le pouce, le pied, l'aulne (avant bras), le yard (tour de taille), et pour le temps: le jour, le mois lunaire, l'année.

Dès que l'homme voulut faire du commerce avec ses voisins, il rencontra certaines difficultés parce que les pieds varient d'un homme à l'autre: pour le commerce, il était donc indispensable de *normaliser* les unités. Mis à part le cas où une armée victorieuse impose à un pays étranger ses normes, comme l'ont fait par exemple les Romains, il fallait s'entendre par des conventions. L'historien rapporte un exemple amusant datant du 16e siècle: On chercha un *pied normalisé* en prenant la moyenne des pieds de 16 fidèles cueillis au hasard à la sortie de l'église un dimanche matin (fig. 1). Comme ingénieurs du 20e siècle nous constatons avec plaisir que la démarche fait déjà intervenir le hasard pour l'échantillonnage.

Fig. 1 Gravure du 16e siècle montrant la recherche d'un «pied normalisé»

Les subdivisions des unités étaient des fractions variables. Ainsi les Anglais comptaient, il y a peu de temps encore, en système duodécimal pour certaines longueurs (1 pied = 12 pouces), en système seidécimal pour des poids (1 livre = 16 onces) et en d'autres systèmes (3, 4, 20, etc.) pour d'autres unités. Il est remarquable que sur le continent européen le système métrique (décimal) fût déja introduit en 1797 en France. En 1875, la Convention internationale du mètre pouvait consacrer une situation de fait: le système métrique, et avec lui le système décimal, avait conquis l'Europe continentale. A présent il est pratiquement universel; la seule exception est la mesure du temps maintenue à

1 jour = 24 h   1 h = 60 min   1 min = 60 s

Presque chaque fois que l'homme réussissait à cerner de plus près un nouveau phénomène de la nature, il était amené à créer une nouvelle unité par comparaison avec une grandeur de même espèce connue. Il n'y a pas si longtemps qu'on utilisait encore le cheval (vapeur) pour la puissance, l'atmosphère pour la pression, la bougie pour l'intensité lumineuse.

Les connaissances augmentant, on s'aperçut que les unités n'étaient pas indépendantes les unes des autres. Ainsi naquirent les systèmes d'unités.

2. Systèmes d'unités

Tous les systèmes d'unités ont une caractéristique commune: ils se composent d'un petit nombre d'unités de base dont sont dérivées toutes les autres unités. Il y a encore à l'heure actuelle des hommes de science qui prétendent qu'on peut créer un système valable en partant de trois unités de base.

Au 18e siècle naquit le *système technique* d'unités basé sur le mètre, le kilogramme et la seconde. A l'époque, le kilogramme était considéré comme la *force* avec laquelle 1 dm^3 d'eau était attiré par la terre. On s'aperçut rapidement qu'il était plus judicieux de choisir une masse à la place d'une force comme unité de base. Le système technique fut donc remplacé au 19e siècle par les différents systèmes CGS, qui utilisaient comme bases le centimètre, le gramme-*masse* et la seconde. Malgré cela les kilogrammes–force continuent encore maintenant à semer la confusion dans bien des esprits.

La plupart des ingénieurs actuellement dans la pratique ont connu plus ou moins bien les différents systèmes CGS pour les avoir subis durant leurs études. Ils se souviennent peut-être des casse-têtes qu'il fallait résoudre pour passer du système CGS-électrostatique au système CGS-électromagnétique et vice versa. Quoique chaque système soit cohérent en lui-même, les deux systèmes ne le sont pas entre eux. Il y des coefficients 4π et des puissances de 10, et il faut un effort de reflexion pour savoir s'il faut mettre ces coefficients au numérateur ou au dénominateur. D'autre part les ordres de grandeurs ne sont pas agréables. Pour cette raison fut créé parallèlement le *système pratique* dans lequel les unités électriques du système CGS-EM sont multipliés par 10^7, 10^8 ou 10^9 et s'appellent watt, volt, ohm, etc.

Les grandeurs électriques jouant un rôle de plus en plus important un Italien, G. Giorgi, eut l'idée en 1901 d'ajouter au système MKS une unité électrique: il choisit une unite pratique, d'abord l'ohm, puis l'ampère. Ainsi fut créé le premier système rationalisé dit système *MKSA* ou *système Giorgi*.

L'introduction de l'ampère comme unité de base a permis de rendre le système cohérent en même temps pour les unités électriques et magnétiques, et de simplifier ainsi considérablement les relations entre les unités. Déjà en 1935, la Commission Electrotechnique Internationale (CEI) adopta le système Giorgi pour toutes ses normes.

En 1960, la Conférence générale des Poids et mesures compléta le système Giorgi par l'adjonction d'autres unités et créa le Système international d'unites (SI), adopté à présent par presque tous les pays.

3. Système international d'unités

Issu du système MKSA, le SI est un système cohérent. Cela signifie que si on a entre trois grandeurs physiques une relation de la forme

$$Z = X \cdot Y$$

on a d'une part pour les valeurs numériques $\{Z\} = \{X\} \cdot \{Y\}$
et d'autre part pour les unités $[Z] = [X] \cdot [Y]$

On peut passer d'une unité à une autre sans faire intervenir des constantes telles que $4\,\pi$ ou $0{,}4\,\pi$ ou 10^7. S'il existe une constante dans une relation, elle figure dans l'équation même et elle a une valeur numérique et une unité. Pratiquement cela revient au fait que l'ingénieur-électricien doit se rappeler deux constantes universelles:

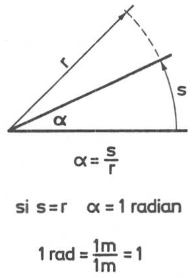

Fig. 2 Définition du radian

La constante magnétique: $\mu_0 = 4\,\pi \cdot 10^7$ H/m $\cong 1{,}256$ µH/m

la constante électrique: $\varepsilon_0 = \dfrac{10^7}{4\,\pi \cdot c_0^2}$ F/m $\cong 8{,}854$ pF/m

où $c_0 = 299{,}79 \cdot 10^6$ m/s est la vitesse de la lumière.

Le SI se compose des unités de base, d'unités supplémentaires et d'unités dérivées.

Les *unités de base* sont au nombre de sept, soient:

le mètre pour la longueur
le kilogramme pour la masse
la seconde pour le temps
l'ampère pour le courant
le kelvin pour la température thermodynamique
la mole pour la quantité de matière
la candela pour l'intensité lumineuse

Les *unités supplémentaires* sont actuellement au nombre de deux, le radian (rad) et le stéradian (sr) se rapportant respectivement à l'angle plan et à l'angle solide. On peut considérer ces unités supplémentaires comme unités de base *ou* comme unités dérivées. Pourquoi former une catégorie à part avec ces deux unités, alors qu'on pourrait les faire entrer, soit dans la catégorie des unités de base, soit dans celle des unités dérivées? La principale raison est, je crois, que les participants à la Conférence générale des poids et mesures n'ont pas pu se mettre d'accord dans laquelle des deux catégories il fallait les mettre. Les Suisses et avec eux, sauf erreur, les Anglo-Saxons tiennent à les considérer comme unités de base alors que les Allemands affirment que ce sont des unités dérivées.

Considérons un angle plan α: La figure 2 représente une figure géométrique; si on écrit $\alpha = \{\alpha\} \cdot [\alpha]$, c'est-à-dire $\alpha = \{\alpha\}$ rad, par exemple $\alpha = 1$ rad, l'unité adéquate rend visible le fait qu'il s'agit d'un angle plan. Si par contre on écrit $\alpha = 1 \times 1$ voire $\alpha = 1$, parce qu'on admet:

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

on perd un renseignement précieux.

En règle générale les *unités dérivées* sont un produit ou un quotient d'unités de base. Exemples: une vitesse est mesurée en m/s, un volume en m^3, un moment d'inertie en kg · m^2. Certaines unités dérivées du système SI ont des noms particuliers. Ces noms perpétuent généralement la mémoire de grands savants (tableau I); les symboles correspondants sont alors écrits avec une majuscule. Les symboles littéraux des grandeurs sont normalisés par la CEI. Ils sont maintenant adoptés presque universellement par tous les ingénieurs; leur usage facilite grandement la lecture de publications en langues étrangères, tout spécialement des normes. Certains physiciens trouvent inutile d'adopter les symboles normalisés, arguant qu'un universitaire doit comprendre le phénomène et pouvoir raisonner avec n'importe quel symbole et dans n'importe quel système d'unités. Ils ont raison de leur point de vue. Mais pour l'ingénieur, le praticien, la normalisation présente de grands avantages: elle lui donne un outil commode, qui lui fait gagner beaucoup de temps et éviter des hésitations, voire des erreurs.

Un autre avantage du SI est l'introduction des préfixes qui donnent les puissances 10^{3k} avec $-6 < k < +6$ (tableau II). Grâce à cet ensemble de préfixes, on peut exprimer toute valeur numérique avec au maximum trois chiffres devant la virgule, resp. sans zéro après la virgule, ce qui permet toujours de se rendre très rapidement compte de l'ordre de grandeur d'un résultat de mesurage.

Depuis le 1er janvier 1978, seules les unités SI sont légales en Suisse (Loi fédérale sur la métrologie du 9 juin 1977); pour des instruments de mesurage approuvés avant l'entrée en vigueur de la nouvelle loi, les anciennes unités sont tolérées jusqu'au 31 décembre 1982.

Les médecins ont demandé un délai plus long pour les anciennes unités de l'activité d'une source radioactive ou d'une dose de radiation absorbée: ils introduisent plus facilement une nouvelle spécialité pharmaceutique que de nouvelles unités telles que le becquerel et le gray. Mais les ingénieurs aussi ont encore des problèmes avec le SI. En voici quelques exemples.

4. Problèmes non résolus par le SI

L'unité dérivée seule ne suffit pas toujours à désigner clairement de quelle espèce de grandeur il s'agit. 60 m désigne bien une longueur et 24 s un temps, mais que signifie 45 N · m?

On sait que

$1\ \mathrm{J} = 1\ \mathrm{N \cdot m}$
donc $45\ \mathrm{N \cdot m} = 45\ \mathrm{J}$?

Oui et non (fig. 3)! – Un couple, par exemple $M = 45$ Nm ne sera jamais exprimé en joules. Par contre un travail, une énergie sera toujours exprimé en joules. (C'est ainsi que même

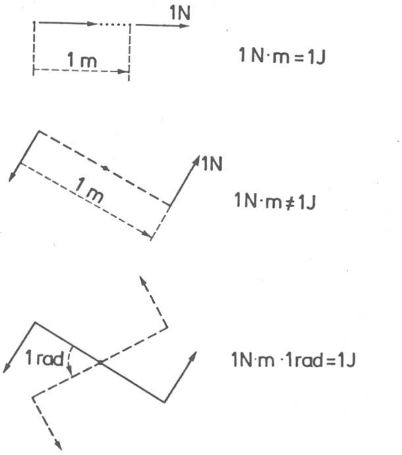

Fig. 3 1 N · m n'est pas nécessairement egal à 1 J

sur les emballages des produits alimentaires les calories ont été remplacées par des joules.) Où réside la différence?

Un couple est une grandeur *vectorielle* alors qu'un travail est une grandeur *scalaire*. Si on multiplie un couple par un angle, mais seulement dans ce cas, on obtient un travail. Donc

$1\ \mathrm{N \cdot m} \times 1\ \mathrm{rad} = 1\ \mathrm{J}$

Un couple et un travail ne sont pas des grandeurs de même espèce: voilà pourquoi il n'est pas judicieux de les mesurer avec la même unité. On ne peut pas laisser tomber l'indication du radian sans autre.

Le produit scalaire de deux vecteurs donne un scalaire. Si on remplace «1 rad» par «1» on perd la notion du déplacement: couple × déplacement angulaire = travail. Un couple devrait donc être mesuré soit en N · m soit en J/rad.

D'une façon analogue, la norme Suisse SNV 12100 recommande d'exprimer une contrainte, qui est une grandeur vecto-

Unités dérivées du SI ayant des noms particuliers Tableau I

Grandeur – Nom	Symbole	Unité – Nom	Symbole	Relation
fréquence	f	hertz	Hz	1 Hz = 1 s^{-1}
force	F	newton	N	1 N = 1 kg · m/s^2
pression	p	pascal	Pa	1 Pa = 1 N/m^2
énergie, travail	W	joule	J	1 J = 1 N · m
puissance	P	watts	W	1 W = 1 J/s
charge électrique	Q	coulomb	C	1 C = 1 A · s
tension électrique	U	volt	V	1 V = 1 W/A
capacité élect.	C	farad	F	1 F = 1 C/V
résistance	R	ohm	Ω	1 Ω = 1 V/A
conductance	G	siemens	S	1 S = 1 A/V
flux magnétique	Φ	weber	Wb	1 Wb = 1 V · s
induction magn.	B	tesla	T	1 T = 1 Wb/m^2
inductance	L	henry	H	1 H = 1 Wb/A
flux lumineux	Φ_v	lumen	lm	1 lm = 1 cd · sr
éclairement	E	lux	lx	1 lx = 1 lm/m^2
radioactivité	A	becquerel	Bq	1 Bq = 1 s^{-1}
dose absorbée	D	gray	Gy	1 Gy = 1 J/kg

Préfixes SI Tableau II

Facteur			Préfixe	Symbole
1 000 000 000 000 000 000	$= 10^{18}$	trillion	exa	E
1 000 000 000 000 000	$= 10^{15}$	billiard	péta	P
1 000 000 000 000	$= 10^{12}$	billion	téra	T
1 000 000 000	$= 10^{9}$	milliard	giga	G
1 000 000	$= 10^{6}$	million	méga	M
1 000	$= 10^{3}$	mille	kilo	k
100	$= 10^{2}$	cent	hecto	h
10	$= 10^{1}$	dix	déca	da
0,1	$= 10^{-1}$	dixième	déci	d
0,01	$= 10^{-2}$	centième	centi	c
0,001	$= 10^{-3}$	millième	milli	m
0,000 001	$= 10^{-6}$	millionième	micro	µ
0,000 000 001	$= 10^{-9}$	milliardième	nano	n
0,000 000 000 001	$= 10^{-12}$	billionième	pico	p
0,000 000 000 000 001	$= 10^{-15}$	billiardième	femto	f
0,000 000 000 000 000 001	$= 10^{-18}$	trillionième	atto	a

rielle, en N/m^2, une pression, qui est une grandeur scalaire, par contre en Pa. Le SI donne Pa indifféremment pour pression et contrainte.

Durant les années 1950 un Suédois, le professeur Wennerberg, avait déjà proposé d'accompagner l'unité par un symbole j (espèce de vecteur unité) lorsque la grandeur mesurée est vectorielle. En utilisant les produits scalaires et vectoriels et en posant que $\vec{j} \cdot \vec{j} = 1$ et $\vec{j} \times \vec{j} = \vec{j}$ on pourrait voir si la grandeur finale est scalaire ou vectorielle. Ce serait là peut-être, une idée à creuser.

5. Grandeurs et unités logarithmiques

Les sensations humaines sont en général des fonctions logarithmiques des excitations. Aussi, lorsqu'on veut traduire le résultat d'un mesurage pour faire comprendre quelle sensation en résulte, il est commode d'utiliser des échelles logarithmiques. Le mesurage d'un bruit en décibel (dB) est devenu chose courante; tout le monde en parle – beaucoup le font en connaissance de cause; d'autres n'en saisissent pas les subtilités. En 1974, la CEI a émis la Publication 27–3 intitulée «Grandeurs et unités logarithmiques» pour clarifier la situation.

Nombreux sont ceux qui disent que le dB n'est pas une unité. La CEI a tourné la difficulté en stipulant que les grandeurs mesurées à échelle logarithmique sont indiquées en dB (ou néper, Np) et que les dB (et Np) peuvent être traités comme des unités; mais au lieu d'une grandeur physique, on parle alors du *niveau* d'une grandeur.

En effet, on ne peut pas prendre le logarithme d'une grandeur physique mais seulement celui d'un nombre. Dès lors, pour mesurer, par exemple, un son d'intensité I, on choisit une grandeur de référence, c'est-à-dire un certain son d'intensité fixe I_0, et on prend le logarithme du rapport I/I_0, donc d'un nombre. Le niveau n'a de sens que si la grandeur I_0 est bien spécifiée ainsi que la base du logarithme. Les indications en Np font appel à des logarithmes à base e, celles en bels à des logarithmes à base 10. On écrira donc

$$L_I \text{ (re } I_0) = \log_{10} I/I_0 \text{ (en bels)} = 10 \log_{10} I/I_0 \text{ (en dB)}$$

L'intensité du son est proportionnelle au carré de la pression acoustique. Pour avoir la même sensation on écrit, en appelant p_0 la pression minimale perceptible correspondant à I_0:

$$L_p \text{ (re } p_0) = 10 \log_{10} (p/p_0)^2 = 20 \log_{10} p/p_0 \text{ (en dB)}$$

Pour avoir le *niveau d'une grandeur* en décibels on doit donc prendre 10 fois le logarithme à base 10 quand il s'agit d'une grandeur proportionnelle à une puissance mais 20 fois le logarithme quand il s'agit d'une grandeur dite de *champ*, telle qu'une pression ou une vitesse en acoustique resp. une tension ou un courant en électricité.

Pour un son ou un bruit, on utilise pratiquement toujours comme référence le seuil d'audibilité de l'homme qui est de 1 pW/m^2 à 1000 Hz ce qui correspond à une pression de 20 µPa; soient $I_0 = 1\ pW/m^2$ et $p_0 = 20\ \mu Pa$. Pour un son de 1000 Hz qui a une intensité de 1 $\mu W/m^2$ resp. une pression acoustique de 20 mPa le niveau est donc

$$L_I \text{ (re 1 pW/m}^2) = 10 \log_{10} \frac{10^{-6}}{10^{-12}} = 60 \text{ dB} \quad \text{resp.}$$

$$L_p \text{ (re 20 µPa)} = 20 \log_{10} \frac{20 \cdot 10^{-3}}{20 \cdot 10^{-6}} = 60 \text{ dB}$$

Pour les mesures en acoustique le seuil d'audibilité a été admis par convention; pour cette raison on parle souvent de dB tout court, sans mentionner la référence implicitement connue. D'autres mesures en dB n'ont de sens que si on indique les conditions de référence. C'est par exemple un non-sens d'indiquer une amplification en dB sans préciser s'il s'agit d'une amplification en tension, en courant ou en puissance, ni quelles sont les impédances d'entrée et de sortie.

Adresse de l'auteur
Erna Hamburger, Prof. hon. EPFL, 33 avenue de Cour, 1007 Lausanne.