

Chapitre I

CONSTANTES PHYSIQUES ET UNITES

La résolution des exercices et problèmes de thermodynamique appliquée au génie énergétique nécessite de connaître certaines constantes physiques ainsi que les facteurs de conversion des unités usuelles des divers systèmes : système international, système anglo-saxon, voire même des systèmes anciens ou de type technique. Par ailleurs, il est important de respecter les règles d'écriture des unités et de leurs symboles.

L'objet de ce chapitre est de rappeler ces divers éléments utiles dans les métiers scientifiques et techniques.

1. Valeurs de quelques constantes physiques

Constante	Symbole	Valeur	Unité
Nombre d'Avogadro	N_A	$6,02214 \cdot 10^{23}$	
Constante du gaz parfait	\bar{R}	8,3145	J/K.mol
Constante de Planck	h	$6,626 \cdot 10^{-34}$	J.s
Constante de Boltzmann	$k = \bar{R}/N_A$	$1,380 \cdot 10^{-23}$	J/K
Température normale	T_0	273,15	K
Volume molaire normal du gaz parfait	\bar{V}_0	$22,414 \cdot 10^{-3}$	m ³ /mol
Pression atmosphérique normale	P_0	101325	Pa
		760	mmHg
		1	atm
Pression atmosphérique technique	P_{at}	1	at
		1	kgf/cm ²
		98066,5	Pa
Accélération de la pesanteur	g	9,80665	m/s ²

2. Facteurs de conversion des unités usuelles

Longueur. Unité fondamentale : le mètre (m)

1 foot (ft)	= 0,3048 m
1 inch (in)	= 0,0254 m
1 yard (yd)	= 0,9144 m

Masse. Unité fondamentale : le kilogramme (kg)

1 pound (lbm)	= 0,4536 kg
1 ton (ton)	= 1016,05 kg
1 tonne (t)	= 1000 kg

Temps. Unité fondamentale : la seconde (s)

Température. Unité fondamentale : le kelvin (K)

degré Celsius (°C) :	$\theta_C = T_K - 273,15$
degré Fahrenheit (°F) :	$t_F = \frac{9}{5} \theta_C + 32$
degré Rankine (°R) :	$T_R = t_F + 459,67 = 1,8 T_K$

Force. Unité de base : le newton (N) = 1 kg.m.s⁻²

1 kilogramme-force (kgf)	= 1 kg.g = 9,80665 N
1 dyn	= 10 ⁻⁵ N
1 pound (Lb)	= 4,4483 N

Pression. Unité de base : le pascal (Pa) = 1 N/m² = 1 kg.m⁻¹.s⁻²

1 bar	= 10 ⁵ Pa = 1,020 kgf.cm ⁻² = 10,2.10 ³ mm CE
1 atmosphère (atm)	= 101325 Pa = 760 torr = 1,033 kgf.cm ⁻²
1 atmosphère technique (at)	= 98,066 kPa = 10 mCE
1 mmHg ou 1 torr	= 133,32 Pa
1 mm de colonne d'eau (mmCE)	= 9,81 Pa
1 pound force per square inch (psi ou Lb/in ²)	= 6894,87 Pa = 51,72 torr
1 pound force per square foot (Lb/ft ²)	= 47,88 Pa

Énergie. Unité de base : le joule (J) = 1 kg.m².s⁻²

1 cal	= 4,1864 J
1 thermie (ou frigorie)	= 1000 kcal = 1,163 kWh = 1,581 ch.h
1 kWh	= 1,36 ch.h = 3600 kJ
1 british thermal unit (Btu)	= 1055,06 J = 252 cal
1 J	= 10 ⁷ erg

Puissance. Unité de base : le watt (W) = $1 \text{ J.s}^{-1} = 1 \text{ kg.m}^2.\text{s}^{-3}$

1 kW = 1,36 ch = 0,86 th/h

1 horse power (HP) = 1,01387 ch = 745,7 W

1 cheval (ch) = 735,5 W

1 Btu/min = 17,58 W

3. Définitions officielles des unités et règles d'écriture

On donne ci-après les définitions officielles des unités de base telles qu'elles ont été arrêtées par des conférences générales de poids et mesures. Elles sont données dans leur intégralité administrative, ce qui peut nuire à leur limpidité mais garantit leur précision.

3.1. Unités du système international (SI)

Le mètre

Lorsque la Convention, en 1790, voulut, sur le rapport de Talleyrand, créer une unité de longueur, sur une base fondamentalement naturelle, unité qui puisse être acceptée par tous les pays, elle avait le choix entre trois possibilités :

- prendre la longueur du pendule battant la seconde, à la latitude de 45° ,
- se référer au quart de cercle de l'équateur terrestre,
- se référer au quart de cercle du méridien terrestre.

La première solution avait deux inconvénients : d'une part elle exigeait une définition précise de l'unité de temps, d'autre part elle dépendait de l'intensité de la pesanteur en un lieu donné, intensité dont on commençait à supposer qu'elle n'était pas strictement identique en tous les points du globe. La seconde se heurtait aux difficultés d'accès aux zones équatoriales. On choisit donc la troisième solution.

La définition du mètre fut basée sur les mesures géodésiques de Delambre et Méchain. Mais, au cours du 19^{ème} siècle, on comprit que ces mesures étaient entachées de légères erreurs : la 40 000 000^{ème} partie du méridien terrestre était un peu plus grande que l'étalon. Il était cependant impossible de modifier l'étalon, lequel, dans cette perspective, aurait dû varier avec les progrès de la géodésie. Aussi, en 1889, abandonna-t-on les mesures géographiques pour se référer au mètre prototype déposé au Pavillon de Breteuil à Sèvres, prototype en platine iridié dont la longueur reproduisait celle du « Mètre des Archives » de 1799 pris dans « l'état où il se trouvait ».

Cette précaution oratoire était nécessaire, car on pensait que la barre pouvait, à la longue, se courber sous son propre poids. De plus, ses extrémités portaient la trace des palpeurs qui avaient servi à en faire des copies. Le mètre dit « à bouts » qui était mesuré d'une extrémité à l'autre fut donc remplacé par un étalon en platine allié de 10 % d'iridium – afin d'accroître sa dureté – et long d'environ 102 cm. La longueur de référence était déterminée par la distance entre deux traits lus avec un microscope micrométrique.

Mais les progrès de la physique permirent de choisir une nouvelle référence véritablement universelle : la longueur d'onde d'une radiation atomique. Depuis la X^{ème} conférence internationale de 1960, la définition de l'unité de longueur est la suivante : *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 $2 p_{10}$ et $5 d_5$ de l'atome de krypton 89 (1960).*

Le kilogramme

Le kilogramme est la seule unité qui comporte un préfixe. Un tel illogisme a été reconnu nécessaire car on ne pouvait modifier une unité si largement répandue. C'est aussi la seule unité qui reste rattachée à un étalon. Sa définition est la suivante : le kilogramme est l'unité de masse ; il est égal à la masse du prototype international du kilogramme (1889).

La seconde

Jusqu'en 1967, la seconde était déduite de la rotation terrestre. Désormais, elle est ainsi définie : la seconde est la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133 (1967).

L'ampère

L'ampère est l'intensité d'un courant constant qui, maintenu dans deux conducteurs parallèles, rectilignes, de longueur infinie, de section circulaire négligeable et placés à une distance de un mètre l'un de l'autre dans le vide, produirait entre ces conducteurs une force égale à $2 \cdot 10^{-7}$ newton par mètre de longueur (1946).

Le kelvin

Le kelvin, unité de température thermodynamique, est la fraction $1/273,15$ de la température thermodynamique du point triple de l'eau (1967).

La mole

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 (1967).

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 de telles particules.

La candela

La 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 101325 pascals (1967).

Les sept unités fondamentales adoptées en 1960 et 1971		
Grandeur	Unité	Symbole
Longueur	mètre	m
Masse	kilogramme	kg
Temps	seconde	s
Température	kelvin	K
Quantité de matière	mole	mol
Intensité électrique	ampère	A
Intensité lumineuse	candela	cd

3.2. Unités légales en dehors du système international

Certaines unités ont été admises par décret du 4 décembre 1975 bien que n'étant pas rattachées au SI. Les unes sont nécessaires aux physiciens, les autres sont utiles dans la vie

courante.

Longueur : le mille (1852 m) est très utile en navigation, aérienne comme maritime, car il correspond à la distance que l'on doit parcourir en moyenne sur le globe, à longitude constante, entre des latitudes différentes d'une minute d'arc (le mille n'a pas de symbole).

Angle : la seule unité d'angle du SI 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. En dehors du SI, sont admis : le tour (tr), qui représente la circonférence (2π rad), le grade ou gon [$(\pi/200)$ rad], le degré [$(\pi/180)$ rad], la minute [$(\pi/10800)$ rad], la seconde [$(\pi/648000)$ rad].

Masse : le carat métrique, unité propre au négoce et au commerce des pierres précieuses, il vaut $2 \cdot 10^{-1}$ g.

Masse atomique : l'unité de masse atomique (symbole μ) n'a pas de nom particulier. Elle est définie comme le 1/12 de la masse de carbone 12.

Temps : seule la seconde appartient au SI. Minute, heure et jour sont des multiples non décimaux de la seconde, qui ne se trouvent pas rattachés au système.

Vitesse : seules les vitesses exprimées en m/s appartiennent au SI ; le km/h et le nœud, vitesse correspondant à un mille par heure, n'en font pas partie.

Vitesse angulaire : seul le radian par seconde (rad/s) appartient au SI. Le tour par minute (tr/min) et le tour par seconde (tr/s) sont en dehors.

Énergie : wattheure et kilowattheure, qui font intervenir l'heure, n'appartiennent pas au SI. L'électronvolt (eV) non plus ; il est pourtant indispensable aux atomistes : énergie acquise par un électron accéléré sous une différence de potentiel de 1V dans le vide.

Quantité d'électricité : l'ampère heure (Ah) est légal mais n'appartient pas au SI. Sa valeur est de 3600 coulombs.

Activité d'un radionucléide : la seule unité SI est le becquerel (Bq) (le curie (Cu) n'appartient pas à ce système). Il est défini ainsi : activité d'une quantité de nucléide radioactif où se produisent spontanément $3,7 \cdot 10^{10}$ transitions nucléaires spontanées par seconde.

3.3. Règles d'écriture et de typographie des unités

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 dans le cas où ils se terminent par s, x, ou z (ainsi pour les lux, les hertz, les siemens) et dans le cas où leur terminaison est en al (un quintal, des quinaux – exception : des pascals).

Les noms composés, pour les multiples et sous-multiples, s'écrivent sans trait d'union et sans majuscule : hectogramme, kilowattheure.

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. Exceptions : 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, le premier est une majuscule. D'où A pour ampère, Bq pour becquerel (unité de radioactivité), C pour coulomb, F pour farad (en l'honneur de Faraday), Gal pour gal (en l'honneur de Galilée), Gy pour gray (unité de rayonnement ionisant), H pour henry (unité d'inductance électrique), Hz pour hertz, J pour joule, K pour kelvin, N pour newton, Pa pour pascal (unité de pression), P pour poise (en l'honneur de

Poiseuille) et Pl pour poiseuille (unité de viscosité dynamique), S pour siemens (unité de conductance), St pour stokes (unité de viscosité cinématique), T pour tesla (unité d'induction magnétique), V pour volt (en l'honneur d'Alexandre Volta), W pour watt, Wb pour weber (unité de flux d'induction magnétique).

Attention ! Les symboles ne doivent jamais prendre la marque du pluriel. La remarque est d'importance car on lit souvent dans la presse, par exemple, 1000 « kms ».

3.4. Préfixes

Préfixe	Symbole	Facteur par lequel est multipliée l'unité	Préfixe	Symbole	Facteur par lequel est multipliée l'unité
déci	d	10^{-1}	déca	da	10^1
centi	c	10^{-2}	hecto	h	10^2
milli	m	10^{-3}	kilo	k	10^3
micro	μ	10^{-6}	méga	M	10^6
nano	n	10^{-9}	giga	G	10^9
pico	p	10^{-12}	téra	T	10^{12}
femto	f	10^{-15}	peta	P	10^{15}
atto	a	10^{-18}	exa	E	10^{18}

Chapitre II

PREMIER PRINCIPE

1. Rappels

1.1. Conventions

- De l'énergie qui entre dans le système est considérée comme étant positive.
- Les variables intensives sont notées en lettres majuscules (ex : P pour la pression, T pour la température).
- Les variables extensives sont notées en lettres majuscules si elles correspondent à une quantité quelconque de système (ex : V pour le volume, U pour l'énergie interne, H pour l'enthalpie). Elles sont notées en minuscules lorsqu'elles sont "spécifiques", c'est-à-dire rapportées à une unité de système, par exemple, l'unité de masse (ex : q chaleur massique, w travail massique, v volume massique, u énergie interne massique, h enthalpie massique). On les note par une majuscule surlignée lorsque ces grandeurs sont relatives à une mole.

1.2. Énoncé du Premier Principe (PP) ou Principe de la conservation de l'énergie

$$Q + W + EL + \dots = \Delta U + \Delta E_c + \Delta E_p + \Delta E_{el} + \dots$$

différents types
d'énergies échangées
entre le système et
son milieu extérieur

variation des différents types
d'énergies propres au système

Q = énergie thermique (ou chaleur)

W = énergie mécanique (ou travail)

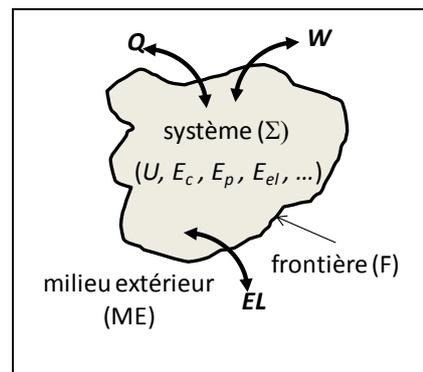
EL = énergie électrique (transitant à travers la frontière du système)

U = énergie interne

E_c = énergie cinétique macroscopique

E_p = énergie potentielle gravifique

E_{el} = énergie électrique (contenue dans le système)



Pour l'unité de masse du système, on écrit :

$$w + q + el + \dots = \Delta u + \Delta e_c + \Delta e_p + \Delta e_{el} + \dots$$

1.3. Premier Principe sous forme technique

Dans de nombreux cas techniques, le système est un élément de fluide en écoulement **permanent** à travers une machine. On a alors l'habitude de séparer, dans l'énergie mécanique échangée entre le fluide et son milieu extérieur, l'énergie échangée avec les éléments mobiles de la machine (qui sont en relation avec un arbre moteur ou récepteur), notée W_t (dit **travail technique**) de l'énergie échangée entre le fluide-système et le fluide-milieu extérieur dans les canalisations, à l'entrée (repérée 1) et à la sortie (repérée 2) de la machine. Cette énergie, due à l'écoulement du fluide et à la pression est égale à $P_1V_1 - P_2V_2$. On a :

$$W = W_t + P_1V_1 - P_2V_2$$

Alors, en admettant que les seules formes d'énergie mises en jeu sont de type mécanique et thermique, on a :

$$W_t + Q = \Delta U_{12} + P_2V_2 - P_1V_1 + \Delta E_{c12} + \Delta E_{p12}$$

soit :

$$W_t + Q = \Delta H_{12} + \Delta E_{c12} + \Delta E_{p12}$$

avec :

$$\Delta H_{12} = \Delta U_{12} + \Delta(PV)_{12}$$

Pour l'unité de masse de fluide transitant de l'état 1 à l'état 2 :

$$w_{t12} + q_{12} = \Delta h_{12} + \Delta \left(\frac{c^2}{2} \right)_{12} + \Delta(gz)_{12}$$

H, h = enthalpie, enthalpie massique : $h = u + Pv$

c = vitesse

z = altitude

g = accélération de la pesanteur

Remarques

1) Entre le travail technique W_t et l'énergie mécanique mise en jeu sur l'arbre de la machine W_a existe une différence due à la dégradation d'énergie par les divers frottements.

2) Dans la quasi totalité des cas d'études de transformations sur des gaz, on est en droit de négliger la variation d'énergie potentielle. La seule exception pratique est celle de l'étude des cheminées.

3) De même dans de nombreux problèmes et en première approximation, on peut négliger la variation d'énergie cinétique devant les autres types d'énergie mis en jeu. Cette remarque a pour conséquence que la plupart des énoncés de problèmes ne fournit aucune information permettant de calculer la variation d'énergie cinétique comme par exemple les

