dunod université

526

physique

m. balkanski, c. sébenne

physique

1 - mécanique
physique des particules

sciences
médecine 1er cycle

dunod

L'établissement ou la vérification des lois de la physique conduisent à la construction de systèmes de mesure expérimentale complexes et de plus en plus perfectionnés qui sont par la suite utilisés dans d'autres branches de la science et permettent des progrès notables. Ainsi le microscope issu de l'optique fait avancer la biologie, les accélérateurs de particules produits par la physique nucléaire font progresser la chimie, les télescopes et les satellites, l'astronomie, etc..

1.2 *Métrologie.*

Grandeurs physiques
Systèmes d'unités
Dimensions
Longueurs
Temps
Masses
Erreurs

1.2.1 *Nature et mesure des grandeurs physiques.*

Nous avons caractérisé les particules élémentaires par leur masse et leur charge : ces quantités sont des grandeurs physiques. De la même manière, si deux particules sont en présence, leur distance est une caractéristique du système qu'elles forment : c'est une grandeur physique, qui peut varier si les deux particules se déplacent l'une par rapport à l'autre.

D'une façon générale *nous appelons grandeur physique toute caractéristique éventuellement variable d'un système physique quelconque.*

Deux grandeurs physiques sont de la même nature si elles peuvent être comparées : ainsi, si la distance de deux particules varie, elle peut devenir plus grande ou plus petite que la distance qui les séparait antérieurement.

La description précise des systèmes physiques et de leur évolution se fait en exprimant les grandeurs physiques qui les caractérisent ainsi que leurs variations.

Une des préoccupations essentielles du physicien consiste en la **mesure** des grandeurs physiques. Les résultats de la mesure et leur précision sont extrêmement importants car ils permettent l'établissement ou la vérification des lois de la physique. Le processus de la connaissance scientifique suit un chemin fermé que l'on peut schématiser de la façon suivante :

$$
\begin{array}{c}
\textit{mesure} \\
\downarrow \quad \uparrow \\
\textit{loi expérimentale} \\
\downarrow \quad \uparrow \\
\textit{modèle théorique}\ .
\end{array}
$$

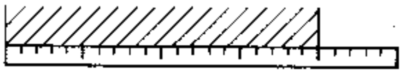

Figure 1.2
Mesure directe.

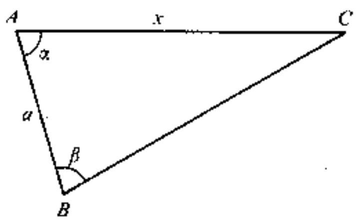

Figure 1.3
Mesure indirecte. On détermine x, après mesure de a et des angles α et β, à l'aide des relations du triangle.

L'amélioration de la précision des mesures a, dans certains cas, montré des déviations entre la loi expérimentale considérée jusque-là comme valide et les résultats expérimentaux obtenus, qui ont conduit à un modèle théorique tout à fait différent du modèle antérieur : c'est ainsi par exemple que l'étude du rayonnement du corps noir a conduit à la théorie particulaire de la lumière jusque-là considérée seulement comme une onde et qu'à son tour cette théorie a permis de comprendre l'effet photoélectrique.

La mesure d'une grandeur physique peut se faire de façon directe ou indirecte : dans une mesure directe on compare la grandeur à une grandeur connue de même nature ; c'est ce que nous faisons lorsque nous prenons la longueur d'une table à l'aide d'un mètre gradué. Dans une mesure indirecte on utilise une loi qui permet de passer automatiquement ou par l'intermédiaire d'un calcul à la grandeur cherchée ; par exemple nous pouvons déterminer une vitesse constante en mesurant la distance et le temps mis pour la parcourir, le rapport des deux mesures nous donne la vitesse.

Dans tous les cas le résultat de la mesure se traduit par un chiffre qui se réfère à une grandeur connue de même nature à laquelle on attribue arbitrairement la valeur 1 et qui est l'unité de mesure pour cette grandeur. Il y a bien entendu tout intérêt à ce que tout le monde adopte la même unité : les informations sont alors bien plus faciles à communiquer. Ce n'est pas toujours le cas, même à l'heure actuelle, bien que de nombreux progrès aient été accomplis. Il existait au Moyen Age une multitude d'unités de mesures particulièrement pour les longueurs et les masses. Le système métrique a créé petit à petit une unification certaine mais quelques pays conservent encore des systèmes différents : l'Angleterre et les Etats-Unis utilisent couramment des unités de longueurs comme le pouce, le pied, le yard et le mile et des unités de masse comme la livre, l'once et la tonne avoirdupois. Certaines unités continuent à être utilisées par tradition dans certaines corporations comme le carat (200 mg) pour la mesure des masses des pierres et métaux précieux. Dans le domaine des sciences cependant l'unification est à peu près réalisée et les unités employées universellement bien définies et normalisées.

Une fois l'unité choisie, si un nombre suffit à préciser la

1.2.3 *Dimensions des grandeurs physiques.*

La plupart des grandeurs physiques sont liées aux quatre grandeurs de base que sont la longueur, la masse, le temps et l'intensité de courant électrique. Ainsi, la vitesse est-elle une longueur divisée par un temps ; dans ce cas, si nous symbolisons la grandeur vitesse par [v], la grandeur longueur par [L] et la grandeur temps par [T], elles sont liées par :

$$[\mathrm{v}] = [\mathrm{L}]\,[\mathrm{T}]^{-1} .$$

Cette équation est tout à fait indépendante des unités, elle exprime simplement la définition d'une vitesse.

D'une façon générale, si [M] symbolise la grandeur masse et [I] la grandeur intensité de courant, une grandeur physique quelconque symbolisée par [X] peut toujours s'écrire sous la forme :

$$[\mathrm{X}] = [\mathrm{M}]^a\,[\mathrm{L}]^b\,[\mathrm{T}]^c\,[\mathrm{I}]^d .$$

Pour la vitesse [v], nous voyons que $a = 0$, $b = 1$, $c = -1$, $d = 0$ .... Ce type de relation est appelé **équation aux dimensions** de la grandeur physique considérée.

L'utilité des équations aux dimensions des grandeurs physiques est double. D'une part elle permet de s'assurer de l'homogénéité d'une relation entre différentes grandeurs physiques : si plusieurs grandeurs sont reliées par une égalité, les deux membres de l'égalité doivent avoir la même équation aux dimensions globales. Par exemple prenons la relation qui donne la vitesse de propagation d'une onde le long d'une corde, v, en fonction de la tension T_c de la corde et de sa masse par unité de longueur μ :

$$v = (T_c/\mu)^{1/2} .$$

Nous savons que $[\mathrm{v}] = [\mathrm{L}]\,[\mathrm{T}]^{-1}$.

La tension T_c est une force, dont l'équation aux dimensions est :

$$[\mathrm{F}] = [\mathrm{M}]\,[\mathrm{L}]\,[\mathrm{T}]^{-2} .$$

La masse par unité de longueur a pour équation aux dimensions :

$$[\mu] = [\mathrm{M}]\,[\mathrm{L}]^{-1} .$$

Nous en déduisons que :

$$\left[\frac{F}{\mu}\right] = [M]\,[L]\,[T]^{-2}\,.\,[M]^{-1}\,[L] = [L]^2\,[T]^{-2}$$

et par conséquent

$$[(F/\mu)]^{1/2}] = [L]\,[T]^{-1} = [v]\,.$$

L'homogénéité de la relation est bien vérifiée.

D'autre part, l'équation aux dimensions est commode lorsqu'il s'agit de convertir une grandeur physique d'un système d'unité à un autre. En effet, dans un premier système, l'unité concernant la grandeur considérée s'exprime en fonction des unités fondamentales à l'aide de l'équation aux dimensions :

$$U_{1x} = KU_{1L}^a\,U_{1M}^b\,U_{1T}^c\,U_{1I}^d\,.$$

Avec la même définition, dans un deuxième système d'unité :

$$U_{2x} = KU_{2L}^a\,U_{2M}^b\,U_{2T}^c\,U_{2I}^d\,.$$

Le rapport des unités pour la grandeur considérée s'écrit donc sous la forme :

$$\frac{U_{1x}}{U_{2x}} = \left(\frac{U_{1L}}{U_{2L}}\right)^a \left(\frac{U_{1M}}{U_{2M}}\right)^b \left(\frac{U_{1T}}{U_{2T}}\right)^c \left(\frac{U_{1I}}{U_{2I}}\right)^d\,.$$

Cherchons par exemple le rapport des unités de force dans les systèmes M.K.S. et C.G.S. ; nous savons que l'équation aux dimensions d'une force s'écrit :

$$[F] = [M]\,[L]\,[T]^{-2}\,.$$

Nous devons donc avoir :

$$\frac{U_{F\,M.K.S.}}{U_{F\,C.G.S.}} = \frac{kg}{g}\cdot\frac{m}{cm}\cdot\frac{s^{-2}}{s^{-2}} = 10^3 \times 10^2 = 10^5\,.$$

Les unités de force dans les systèmes M.K.S. et C.G.S. étant respectivement le newton et la dyne nous en déduisons :

$$1 \text{ newton} = 10^5 \text{ dynes}\,.$$

Le tableau suivant donne l'équation aux dimensions des principales grandeurs physiques utilisées en mécanique, leurs unités dans les systèmes M.K.S. et C.G.S. ainsi que leur rapport.

1.2.3 *Dimensions des grandeurs physiques.*

La plupart des grandeurs physiques sont liées aux quatre grandeurs de base que sont la longueur, la masse, le temps et l'intensité de courant électrique. Ainsi, la vitesse est-elle une longueur divisée par un temps ; dans ce cas, si nous symbolisons la grandeur vitesse par [v], la grandeur longueur par [L] et la grandeur temps par [T], elles sont liées par :

$$[\mathrm{v}] = [\mathrm{L}]\,[\mathrm{T}]^{-1}\,.$$

Cette équation est tout à fait indépendante des unités, elle exprime simplement la définition d'une vitesse.

D'une façon générale, si [M] symbolise la grandeur masse et [I] la grandeur intensité de courant, une grandeur physique quelconque symbolisée par [X] peut toujours s'écrire sous la forme :

$$[\mathrm{X}] = [\mathrm{M}]^a\,[\mathrm{L}]^b\,[\mathrm{T}]^c\,[\mathrm{I}]^d\,.$$

Pour la vitesse [v], nous voyons que $a = 0$, $b = 1$, $c = -1$, $d = 0$ .... Ce type de relation est appelé **équation aux dimensions** de la grandeur physique considérée.

L'utilité des équations aux dimensions des grandeurs physiques est double. D'une part elle permet de s'assurer de l'homogénéité d'une relation entre différentes grandeurs physiques : si plusieurs grandeurs sont reliées par une égalité, les deux membres de l'égalité doivent avoir la même équation aux dimensions globales. Par exemple prenons la relation qui donne la vitesse de propagation d'une onde le long d'une corde, v, en fonction de la tension T_c de la corde et de sa masse par unité de longueur μ :

$$v = (T_c/\mu)^{1/2}\,.$$

Nous savons que $[\mathrm{v}] = [\mathrm{L}]\,[\mathrm{T}]^{-1}$.

La tension T_c est une force, dont l'équation aux dimensions est :

$$[\mathrm{F}] = [\mathrm{M}]\,[\mathrm{L}]\,[\mathrm{T}]^{-2}\,.$$

La masse par unité de longueur a pour équation aux dimensions :

$$[\mu] = [\mathrm{M}]\,[\mathrm{L}]^{-1}\,.$$

dre pratiquement toutes les autres unités utilisées en physique.

Les trois premières s'identifient par des étalons fondamentaux.

a) *Etalon de longueur.*

L'étalon de longueur est le mètre, noté m.

Le mètre est la longueur égale à 1 650 763,73 fois la longueur d'onde dans le vide de la radiation orangée due à la transition $2\,p_{10}$-$5\,d_5$ de l'isotope 86 de l'atome de krypton.

Cette définition date de 1960 et s'identifie à la définition plus ancienne du mètre qui était la distance séparant, à 0 °C, deux traits gravés sur une barre de platine irridié. Cette dernière définition donnait une incertitude sur la longueur exacte du mètre, en raison de l'épaisseur des traits de l'ordre de 10^{-7} m. Certaines mesures nécessitent une précision supérieure et la nouvelle définition ne donne plus qu'une incertitude de 10^{-9} m.

b) *Etalon de masse.*

L'étalon de masse est le kilogramme, noté kg.

Le kilogramme est la masse d'un cylindre de platine irridié gardé par le Bureau International des Poids et Mesures, au pavillon de Breteuil à Sèvres.

Si la définition du mètre permet de reproduire l'étalon de longueur dans n'importe quel laboratoire dans le monde, celle du kilogramme ne permet la reproductibilité qu'au moyen d'une balance avec une précision qui ne dépasse pas 10^{-7} kg. L'étalon secondaire, reproductible en laboratoire, est la masse du décimètre cube d'eau pure à 4 °C, qui est égale à 0,999 973 kg.

c) *Etalon de temps.*

L'étalon de temps est la seconde, notée s. Sa définition proposée en 1964 est la suivante.

L'étalon de temps est donné par la transition entre les niveaux hyperfins $F=4$, $M=0$ et $F=3$, $M=0$ de l'état $2\,S_{1/2}$ de l'isotope 133 du césium non perturbé par des champs extérieurs et dont la fréquence est égale à 9 192 631 770 s^{-1}.

L'incertitude sur la durée de la seconde, par cette définition, est de 10^{-11} s. Les définitions antérieures de la seconde partaient d'observations astronomiques : elle fut longtemps définie comme la 86 400e partie du jour solaire moyen, mais du fait des irrégularités de la rotation terrestre, l'incertitude était de l'ordre de 10^{-7} s. Par contre la révolution de la terre autour du soleil paraît plus régulière et a conduit à la définition officielle actuelle, précise à 10^{-9} s près : **la seconde est égale à 1/31 556 925,974 7 de l'année tropique pour 1900.**

L'ensemble de ces définitions s'accorde, bien entendu, à leur degré de précision près.

Les transitions dans les atomes excités permettent une bonne reproductibilité de l'étalon de temps et permettent la réalisation d'horloges atomiques d'une remarquable précision.

Les autres grandeurs fondamentales sont définies par des effets et nous donnerons leur définition dans la suite lorsque les lois qui en sont à la base seront énoncées.

Le système d'unité le plus souvent utilisé et qui sera généralement adopté dans cet ouvrage est le système international appelé aussi M.K.S.A. rationalisé, où les unités fondamentales sont le mètre pour les longueurs, le kilogramme pour les masses, la seconde pour les temps, l'ampère pour les intensités de courant électrique, le degré Kelvin formant l'échelle des températures et la candela étant l'unité d'intensité lumineuse. Les unités dérivées correspondant aux autres grandeurs physiques peuvent dans certains cas porter un nom particulier mais ceci n'est pas absolument général : par exemple si dans ce système l'unité de force s'appelle le newton et l'unité d'énergie le joule les unités de vitesse et d'accélération ne portent pas de nom et s'expriment à l'aide des unités fondamentales. Nous préciserons le nom et l'expression, en fonction des unités fondamentales, des unités dérivées à mesure que nous les rencontrerons dans la suite.

L'emploi du système international n'exclut pas l'utilisation, pour exprimer une grandeur physique, des multiples ou des sous-multiples de l'unité correspondante. A cet effet il existe une série de préfixes indépendants de l'unité particulière considérée qui permettent de préciser la puissance de 10 par laquelle il convient de multiplier la valeur numérique donnée pour obtenir son expression dans l'unité choisie.

Multiples.

Facteur multiplicatif	10^{12}	10^9	10^6	10^3	10^2	10^1
Préfixe	terra-	giga-	méga-	kilo-	hecto-	déca-
Symbole	T	G	M	k	h	da

Sous-multiples.

Facteur multiplicatif	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-6}	10^{-9}	10^{-12}
Préfixe	déci-	centi-	milli-	micro-	nano-	pico-
Symbole	d	c	m	μ	n ou mμ	p ou μμ

Ainsi par exemple 1 kilomètre, noté 1 km, est égal à 10^3 m ou 1 000 mètres ; 1 microseconde, notée 1 μs, est égale à 10^{-6} s ; remarquons que notre unité de base pour les masses est le kilogramme, c'est-à-dire en fait 10^3 grammes (1 000 g) en raison du système d'unité C.G.S., le plus répandu avant la généralisation du système international, et dont les unités fondamentales sont le centimètre pour les longueurs, le gramme pour les masses et la seconde pour les temps. Il faut noter que le système C.G.S. est encore fréquemment utilisé. Par contre un autre système, le système M.T.S., mètre, tonne, seconde (la tonne, égale à 1 000 kg, devrait donc s'appeler le mégagramme, Mg) n'est pratiquement plus employé à l'heure actuelle.

L'usage n'impose cependant pas un emploi systématique des préfixes indiquant les multiples ou sous-multiples et il est parfaitement licite d'exprimer la valeur numérique d'une grandeur physique de manière quelconque à condition bien entendu de toujours préciser son unité. Il est néanmoins toujours préférable d'écrire les valeurs numériques de façon que l'ordre de grandeur apparaisse nettement du premier coup d'œil ; on évitera par exemple d'écrire $0{,}004 . 10^7$ μm qui nécessite une certaine réflexion pour voir qu'il s'agit de 4 cm.

1.2.3 *Dimensions des grandeurs physiques.*

La plupart des grandeurs physiques sont liées aux quatre grandeurs de base que sont la longueur, la masse, le temps et l'intensité de courant électrique. Ainsi, la vitesse est-elle une longueur divisée par un temps ; dans ce cas, si nous symbolisons la grandeur vitesse par [v], la grandeur longueur par [L] et la grandeur temps par [T], elles sont liées par :

$$[\mathrm{v}] = [\mathrm{L}]\,[\mathrm{T}]^{-1} .$$

Cette équation est tout à fait indépendante des unités, elle exprime simplement la définition d'une vitesse.

D'une façon générale, si [M] symbolise la grandeur masse et [I] la grandeur intensité de courant, une grandeur physique quelconque symbolisée par [X] peut toujours s'écrire sous la forme :

$$[\mathrm{X}] = [\mathrm{M}]^a\,[\mathrm{L}]^b\,[\mathrm{T}]^c\,[\mathrm{I}]^d .$$

Pour la vitesse [v], nous voyons que $a = 0$, $b = 1$, $c = -1$, $d = 0$ .... Ce type de relation est appelé **équation aux dimensions** de la grandeur physique considérée.

L'utilité des équations aux dimensions des grandeurs physiques est double. D'une part elle permet de s'assurer de l'homogénéité d'une relation entre différentes grandeurs physiques : si plusieurs grandeurs sont reliées par une égalité, les deux membres de l'égalité doivent avoir la même équation aux dimensions globales. Par exemple prenons la relation qui donne la vitesse de propagation d'une onde le long d'une corde, v, en fonction de la tension T_c de la corde et de sa masse par unité de longueur μ :

$$v = (T_c/\mu)^{1/2} .$$

Nous savons que $[\mathrm{v}] = [\mathrm{L}]\,[\mathrm{T}]^{-1}$.

La tension T_c est une force, dont l'équation aux dimensions est :

$$[\mathrm{F}] = [\mathrm{M}]\,[\mathrm{L}]\,[\mathrm{T}]^{-2} .$$

La masse par unité de longueur a pour équation aux dimensions :

$$[\mu] = [\mathrm{M}]\,[\mathrm{L}]^{-1} .$$

Nous en déduisons que :

$$\left[\frac{F}{\mu}\right] = [M]\,[L]\,[T]^{-2}\,.\,[M]^{-1}\,[L] = [L]^2\,[T]^{-2}$$

et par conséquent

$$[(F/\mu)]^{1/2}] = [L]\,[T]^{-1} = [v]\,.$$

L'homogénéité de la relation est bien vérifiée.

D'autre part, l'équation aux dimensions est commode lorsqu'il s'agit de convertir une grandeur physique d'un système d'unité à un autre. En effet, dans un premier système, l'unité concernant la grandeur considérée s'exprime en fonction des unités fondamentales à l'aide de l'équation aux dimensions :

$$U_{1x} = KU_{1L}^a\,U_{1M}^b\,U_{1T}^c\,U_{1I}^d\,.$$

Avec la même définition, dans un deuxième système d'unité :

$$U_{2x} = KU_{2L}^a\,U_{2M}^b\,U_{2T}^c\,U_{2I}^d\,.$$

Le rapport des unités pour la grandeur considérée s'écrit donc sous la forme :

$$\frac{U_{1x}}{U_{2x}} = \left(\frac{U_{1L}}{U_{2L}}\right)^a \left(\frac{U_{1M}}{U_{2M}}\right)^b \left(\frac{U_{1T}}{U_{2T}}\right)^c \left(\frac{U_{1I}}{U_{2I}}\right)^d\,.$$

Cherchons par exemple le rapport des unités de force dans les systèmes M.K.S. et C.G.S. ; nous savons que l'équation aux dimensions d'une force s'écrit :

$$[F] = [M]\,[L]\,[T]^{-2}\,.$$

Nous devons donc avoir :

$$\frac{U_{F\,M.K.S.}}{U_{F\,C.G.S.}} = \frac{kg}{g}\cdot\frac{m}{cm}\cdot\frac{s^{-2}}{s^{-2}} = 10^3 \times 10^2 = 10^5\,.$$

Les unités de force dans les systèmes M.K.S. et C.G.S. étant respectivement le newton et la dyne nous en déduisons :

$$1 \text{ newton} = 10^5 \text{ dynes}\,.$$

Le tableau suivant donne l'équation aux dimensions des principales grandeurs physiques utilisées en mécanique, leurs unités dans les systèmes M.K.S. et C.G.S. ainsi que leur rapport.

Grandeur	Symboles courants	Dimensions	$U_{M.K.S.}$	$U_{C.G.S.}$	$\frac{U_{M.K.S}}{U_{C.G.S.}}$
Masse	m, M	[M]	kg	g	10^3
Longueur	l, L, a, d	[L]	m	cm	10^2
Temps	t, τ, θ	[T]	s	s	1
Surface	s, S, σ, Σ	$[L]^2$	m^2	cm^2	10^4
Volume	v, V, $\mathcal{V}$	$[L]^3$	m^3	cm^3	10^6
Masse volumique ou Masse spécifique	ρ	$[M]\,[L]^{-3}$	kg/m^3	g/cm^3	10^{-3}
Vitesse	v	$[L]\,[T]^{-1}$	m/s	cm/s	10^2
Quantité de mouvement	p	$[M]\,[L]\,[T]^{-1}$	kg m/s	g cm/s	10^5
Accélération	γ	$[L]\,[T]^{-2}$	m/s^2	cm/s^2	10^2
Force	f, F	$[M]\,[L]\,[T]^{-2}$	kg m/s^2 newton, N	g cm/s^2 dyne	10^5
Travail ou Énergie	$\mathcal{C}$, W, E	$[M]\,[L]^2\,[T]^{-2}$	kg m^2/s^2 joule, J	g cm^2/s^2 erg	10^7
Puissance	P	$[M]\,[L]^2\,[T]^{-3}$	kg m^2/s^3 watt, W	g cm^2/s^3 erg/s	10^7
Moment d'inertie	I	$[M]\,[L]^2$	kg m^2	g cm^2	10^7
Pression	P, p	$[M]\,[L]^{-1}\,[T]^{-2}$	kg/m s^2 pascal, Pa	g/cm s^2 barye	10
Couple	Γ, C	$[M]\,[L]^2\,[T]^{-2}$	kg m^2/s^2 N.m	g m^2/s^2 dyne.cm	10^7