

Pierre **Mayé**

**L'USINE
NOUVELLE**

AIDE-MÉMOIRE

Électrotechnique

2^e édition

DUNOD


DU MÊME AUTEUR

Problèmes corrigés d'électronique de puissance, Dunod, 2013
Problèmes corrigés d'électrotechnique, Dunod, 2012
Moteurs électriques industriels - 2^e édition, Dunod, 2011
Électronique analogique en 20 fiches, Dunod, 2010
Générateurs électrochimiques, Dunod, 2010
Aide-mémoire Composants électroniques - 4^e édition, Dunod, 2010
L'Électronique par l'expérience - 2^e édition, Dunod, 2007
Moteurs électriques pour la robotique - 2^e édition, Dunod, 2006

Création graphique de la couverture : Nicolas Hubert

Photo de couverture : © blackred – iStockphoto

Illustrations intérieures : Alain et Ursula Bouteville

<p>Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.</p> <p>Le Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique</p>	<p>d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée. Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).</p>
	

© Dunod, 2006, 2014

5 rue Laromiguière, 75005 Paris

www.dunod.com

ISBN 978-2-10-071685-2

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2^o et 3^o a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.



Introduction

L'électrotechnique est de manière générale l'application de l'électricité dans le domaine industriel, et particulièrement, la production, le transport, la transformation et l'utilisation de l'énergie électrique. C'est plus spécifiquement aux machines électriques, domaine « classique » de l'électrotechnique, que se consacre cet ouvrage.

Les premiers chapitres rappellent quelques notions utilisées : les grandeurs et les unités, l'électromagnétisme et les circuits monophasés et triphasés. On aborde ensuite les bobines et les transformateurs dont le rôle est fondamental dans le transport de l'énergie électrique. Viennent ensuite les machines alternatives, avec un chapitre consacré aux tensions magnétiques tournantes créées par leurs enroulements, suivi de l'étude des machines synchrones, si utiles comme générateurs, mais également comme moteurs, et de l'étude des machines asynchrones, assez complète du fait de l'importance pratique de leurs applications en moteur. Le dernier chapitre est consacré aux machines à courant continu, en déclin, mais encore présentes dans les installations existantes.



1

Grandeurs et unités

1.1 Grandeurs physiques

1.1.1 Définitions

Une grandeur physique est une propriété quantifiable de la matière, de l'espace ou d'un phénomène : elle est mesurable ou repérable. Pour un état donné du système, la grandeur est constituée d'un ou plusieurs nombres et d'une unité. Une grandeur est qualifiée de scalaire quand elle est décrite par un seul nombre, de vectorielle si elle est définie par plusieurs nombres que l'on peut numéroter avec un seul indice (les composantes d'un vecteur), et de tensorielle quand elle est décrite par un ensemble de nombres avec plusieurs indices.

1.1.2 Symboles

Les symboles littéraux des grandeurs sont formés à partir de caractères latins ou grecs (*tableau 1.1*). On évite toutefois certaines lettres grecques qui peuvent se confondre avec des lettres latines.

Tableau 1.1 Alphabet grec

Nom	Minuscules	Majuscules
alpha	α	A
bêta	β	B
gamma	γ	Γ



delta	δ	Δ
epsilon	ε	E
dzêta	ζ	Z
êta	η	H
thêta	θ	Θ
iota	ι	I
kappa	κ	K
lambda	λ	Λ
mu	μ	M
nu	ν	N
xi	ξ	Ξ
omicron	\omicron	O
pi	π	Π
rhô	ρ	P
sigma	σ	Σ
tau	τ	T
upsilon	υ	Y
phi	φ	Φ
khi	χ	X
psi	ψ	Ψ
oméga	ω	Ω

1.1.3 Équations aux dimensions

La **dimension** caractérise la nature propre d'une grandeur physique. La dimension d'une grandeur G se note soit $\dim G$, soit par une majuscule entre crochets : $[G]$. Une **équation aux dimensions** exprime symboliquement les relations entre les différentes grandeurs. Elle peut servir à vérifier l'homogénéité des formules littérales, ce qui permet de détecter un certain nombre d'erreurs dans les calculs. Une formule est homogène si elle exprime l'égalité de deux grandeurs de même dimension. Les différents termes d'une somme sont de même dimension. La dimension d'un produit est le produit des dimensions. Il en est de même pour un quotient. Les variables des fonctions \cos , \sin , \tan , \exp , \ln , \lg , ch , sh , th sont sans dimension, tout comme leur image.

Toutes les dimensions s'expriment à partir de sept grandeurs fondamentales :

- ▶ la longueur L ;
- ▶ la masse M ;
- ▶ le temps T ;
- ▶ l'intensité I ;
- ▶ la température Θ ;
- ▶ la quantité de matière N ;
- ▶ l'intensité lumineuse J .

La dimension de toute grandeur physique s'écrit sous la forme suivante, où a , b , c , d , e , f et g sont des exposants rationnels :

$$[G] = L^a M^b T^c I^d \Theta^e N^f J^g$$

Nous nous limitons ici aux dimensions des grandeurs rencontrées en électrotechnique (*tableau 1.2*).

1.2 Unités

Les unités dont l'usage est obligatoire en France depuis le décret du 3 mai 1961 sont celles du système international (SI). Celui-ci comprend des unités de base et des unités dérivées. Les unités de base sont au nombre de sept (*tableau 1.3*).

Tableau 1.2 Dimensions des grandeurs utilisées en électrotechnique

Grandeur	Dimension
Intensité	I
Tension, force électromotrice	$L^2MT^{-3}I^{-1}$
Charge	TI
Charge volumique	$L^{-3}TI$
Densité de courant	$L^{-2}I$
Résistance, réactance, impédance	$L^2MT^{-3}I^{-2}$
Conductance, susceptance, admittance	$L^{-2}M^{-1}T^3I^2$
Inductance	$L^2MT^{-2}I^{-2}$
Capacité	$L^{-2}M^{-1}T^4I^2$
Résistivité	$L^3MT^{-3}I^{-2}$
Champ électrique	$LMT^{-3}I^{-1}$
Déplacement électrique	$L^{-2}TI$
Permittivité diélectrique	$L^{-3}M^{-1}T^4I^2$
Champ magnétique	$MT^{-2}I^{-1}$
Excitation magnétique	$L^{-1}I$
Perméabilité magnétique	$LMT^{-2}I^{-2}$
Flux magnétique	$L^2MT^{-2}I^{-1}$
Tension magnétique, force magnétomotrice	I
Réductance	$L^{-2}M^{-1}T^2I^2$
Fréquence	T^{-1}
Longueur, distance	L
Aire	L^2
Angle	1 (sans dimension)

Volume	L^3
Temps	T
Vitesse	LT^{-1}
Vitesse ou fréquence de rotation	T^{-1}
Masse	M
Force	LMT^{-2}
Moment d'un couple	L^2MT^{-2}
Moment d'inertie	L^2M
Énergie, travail	L^2MT^{-2}
Puissance	L^2MT^{-3}

Tableau 1.3 Unités de base

Grandeur	Unité	Symbole	Définition
Longueur	mètre	m	Longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière pendant 1/299 792 458 de seconde.
Masse	kilogramme	kg	Masse du prototype en platine iridié qui a été sanctionné par la Conférence générale des poids et mesures, tenue à Paris en 1889 et qui est déposé au Bureau international des poids et mesures.
Temps	seconde	s	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.
Intensité de courant électrique	ampère	A	Intensité d'un courant électrique constant qui, maintenu dans deux conducteurs parallèles, rectilignes, de longueur infinie, de section circulaire négligeable et placés à une distance de 1 mètre l'un de l'autre dans le vide, produirait entre ces conducteurs une force de 2×10^{-7} newton par mètre de longueur.

© Dunod – Toute reproduction non autorisée est un délit.

Température	kelvin	K	Le kelvin, unité de température thermodynamique, est la fraction $1/273,16$ de la température thermodynamique du point triple de l'eau.
Quantité de matière	mole	mol	Quantité de matière d'un système contenant autant d'entités élémentaires qu'il y a d'atomes dans 0,012 kilogramme de carbone 12.
Intensité lumineuse	candela	cd	La candela est l'intensité lumineuse, dans une direction donnée, d'une source qui émet un rayonnement monochromatique de fréquence 540×10^{12} hertz et dont l'intensité énergétique dans cette direction est $1/683$ watt par stéradian.

Les unités dérivées sont des unités qui peuvent être exprimées à partir des unités de base au moyen des symboles mathématiques de multiplication et de division. Certaines unités dérivées s'expriment directement à partir des unités de base (*tableau 1.4*), d'autres ont reçu un nom spécifique et un symbole particulier (*tableau 1.5*), ces dernières pouvant être utilisées avec des symboles mathématiques de multiplication et de division pour former une dernière catégorie d'unités dérivées (*tableau 1.6*).

Tableau 1.4 Exemples d'unités SI dérivées exprimées à partir des unités de base

Grandeur	Unité	Symbole
Aire	mètre carré	m^2
Volume	mètre cube	m^3
Vitesse	mètre par seconde	$m s^{-1}$
Accélération	mètre par seconde carrée	$m s^{-2}$
Masse volumique	kilogramme par mètre cube	$kg m^{-3}$
Moment d'inertie	kilogramme mètre au carré	$kg m^2$

Tableau 1.5 Exemples d'unités SI dérivées
ayant des noms spécifiques et des symboles particuliers

Grandeur	Unité	Symbole	Expression en d'autres unités
Angle	radian	rad	
Angle solide	stéradian	sr	
Fréquence	hertz	Hz	s^{-1}
Force	newton	N	$m\ kg\ s^{-2}$
Pression	pascal	Pa	$N\ m^{-2}$
Énergie, travail	joule	J	$N\ m$
Puissance	watt	W	$J\ s^{-1}$
Quantité de charge	coulomb	C	$A\ s^{-1}$
Tension	volt	V	$W\ A^{-1}$
Flux magnétique	weber	Wb	$V\ s$
Champ magnétique	tesla	T	$Wb\ m^{-2}$
Résistance	ohm	Ω	$V\ A^{-1}$
Conductance	siemens	S	Ω^{-1}
Capacité	farad	F	$C\ V^{-1}$
Inductance	henry	H	$Wb\ A^{-1}$
Flux lumineux	lumen	lm	$cd\ sr$
Éclairement	lux	lx	$lm\ m^{-2}$

Tableau 1.6 Exemples d'unités SI dérivées exprimées à partir des unités de base et des unités dérivées ayant des noms spécifiques

Grandeur	Unité	Symbole
Moment d'une force	newton mètre	N m
Vitesse angulaire	radian par seconde	rad s ⁻¹
Accélération angulaire	radian par seconde carrée	rad s ⁻²
Éclairement énergétique	watt par mètre carré	W m ⁻²
Résistance thermique	kelvin par watt	K W ⁻¹
Capacité thermique	joule par kelvin	J K ⁻¹
Conductivité thermique	watt par mètre-kelvin	W m ⁻¹ K ⁻¹
Intensité énergétique	watt par stéradian	W sr ⁻¹
Luminance énergétique	watt par mètre carré-stéradian	W m ⁻² sr ⁻¹
Champ électrique	volt par mètre	V m ⁻¹
Déplacement électrique	coulomb par mètre carré	C m ⁻²
Permittivité	farad par mètre	F m ⁻¹
Perméabilité	henry par mètre	H m ⁻¹

Les unités sont représentées par des symboles (et non des abréviations) qui n'ont donc pas à être suivis d'un point et ne prennent pas la marque du pluriel. La première lettre d'un symbole est en minuscule pour les unités qui dérivent d'un nom commun et en majuscule pour les unités qui dérivent d'un nom propre.

L'usage des préfixes simplifie l'écriture des nombres (*tableau 1.7*). Pour les préfixes introduits par le décret du 18 germinal an 3 (7 avril 1795), ceux qui correspondent à des puissances négatives ont des racines latines (milli, centi et déci) tandis que ceux qui correspondent à des puissances positives ont des racines grecques (déca, hecto et kilo). Les lettres qui symbolisent ces

préfixes d'origine sont toutes des minuscules. Par contre, pour les préfixes introduits ultérieurement, les lettres symboles s'écrivent en minuscule quand ils représentent une puissance négative de 10 et en majuscules quand ils correspondent à une puissance positive de 10.

Tableau 1.7 Multiples et sous-multiples des unités

Facteur multiplicatif	Préfixe à placer devant le nom de l'unité	Symbole à placer devant celui de l'unité
10^{24}	yotta	Y
10^{21}	zetta	Z
10^{18}	exa	E
10^{15}	peta	P
10^{12}	téra	T
10^9	giga	G
10^6	méga	M
10^3	kilo	k
10^2	hecto	h
10	déca	da
10^{-1}	déci	d
10^{-2}	centi	c
10^{-3}	milli	m
10^{-6}	micro	μ
10^{-9}	nano	n
10^{-12}	pico	p
10^{-15}	femto	f

10^{-18}	atto	a
10^{-21}	zepto	z
10^{-24}	yocto	y

Remarque

Il y a une exception à l'emploi de ces préfixes : pour l'unité de masse, on utilise les multiples et les sous-multiples du gramme et non ceux du kilogramme qui est pourtant l'unité de base du système international. Par exemple, 10^{-6} kg correspond à 1 mg et non à 1 μ kg.

Certaines unités ne faisant pas partie du système international sont néanmoins autorisées. Nous pouvons en citer quelques-unes (*tableau 1.8*).

Tableau 1.8 Unités Hors SI

Grandeur	Dénomination	Symbole	Valeur en unités SI
Volume	litre	L ou l	1 L = 1 dm ³
Temps	minute	min	1 min = 60 s
	heure	h	1 h = 60 min
	jour	d	1 d = 24 h
Angle plan	degré	°	$1^\circ = \frac{\pi}{180} \text{ rad}$
	minute	'	$1' = \left(\frac{1}{60}\right)^\circ$
	seconde	"	$1'' = \left(\frac{1}{60}\right)'$
Énergie	watt-heure	W h	1 W h = 3 600 J

Remarquons ici une exception à la règle de la minuscule pour la première lettre d'un symbole d'unité qui dérive d'un nom commun : le litre peut être désigné par L ou l. Le symbole l a été adopté par le Comité

international des poids et mesures en 1879. La Conférence générale des poids et mesures de 1979 a autorisé l'emploi de la majuscule pour éviter un risque de confusion entre la lettre l et le chiffre 1 qui se ressemblent beaucoup dans certaines polices de caractères. À l'avenir, un seul des deux symboles devrait être retenu, mais le Comité international a estimé encore prématuré, en 1990, de choisir un symbole unique du litre. Les discussions sont vives entre les partisans du maintien de la règle générale et ceux qui préconisent l'introduction d'une exception, et la question n'a toujours pas été tranchée.

1.3 Constantes physiques

Certaines constantes physiques ont une valeur exacte qui résulte des définitions adoptées pour les unités de mesure, tandis que d'autres n'ont qu'une valeur approchée qui résulte d'un calcul ou d'une mesure.

L'unité de longueur étant définie comme la distance parcourue par la lumière dans le vide en $1/299\,792\,458$ de seconde, la vitesse de la lumière dans le vide est une constante dimensionnelle dont la valeur exacte est :

$$c = 299\,792\,458 \text{ m s}^{-1}$$

L'unité d'intensité d'un courant électrique est définie de telle sorte que la perméabilité magnétique du vide vaut exactement :

$$\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ H m}^{-1}$$

La permittivité diélectrique du vide ϵ_0 , la perméabilité magnétique du vide μ_0 et la vitesse de la lumière dans le vide sont liées par la relation $\epsilon_0 \mu_0 c^2 = 1$, ce qui impose la valeur de la permittivité diélectrique du vide :

$$\epsilon_0 = 8,854\,187\,817\dots \times 10^{-12} \text{ F m}^{-1}$$

Une autre constante, expérimentale celle-là, fréquemment rencontrée est la charge élémentaire :

$$e = 1,602\,176\,53\dots \times 10^{-19} \text{ C}$$



La constante de Planck est :

$$h = 6,626\ 0693 \times 10^{-34} \text{ J s}$$

La constante de Boltzmann est :

$$k = 1,380\ 650\ 5 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$$

Les valeurs indiquées sont celles qui ont été retenues par le Comité sur les données scientifiques et technologiques (CODATA) de 2002. Certaines diffèrent légèrement des valeurs utilisées avant cette date.