ÉLECTROTECHNIQUE ET ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

Tout le catalogue sur
www.dunod.com

ÉDITEUR DE SAVOIRS

ÉLECTROTECHNIQUE ET ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

Luc Lasne
Professeur agrégé à l'université de Bordeaux 1

Préface de
Jean-Claude Gianduzzo
Enseignant-Chercheur en physique et électrotechnique
à l'université de Bordeaux 1

2e édition

DUNOD

Du même auteur

• L. Lasne
Exercices et problèmes d'électrotechnique.
Paris, Dunod, 2005, 256 p.

• L. Lasne
Électronique de puissance
Paris, Dunod, 2011, 288 p.

Illustration de couverture : © *TebNad, iStockphoto*

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.
Le Code de la propriété intellectuelle du 1er juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements 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).

© Dunod, Paris, 2008, 2013
ISBN 978-2-10-059892-2

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° 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.

Préface

Comme en littérature, un livre scientifique ou technique révèle la personnalité de l'auteur. En premier lieu, par delà la rigueur scientifique de son propos, Luc Lasne nous fait découvrir le résultat du travail opiniâtre qu'il a fourni tant pour le contenu lui-même, que pour la qualité de la rédaction et pour la somme des schémas et illustrations. En deuxième lieu on y découvre l'enseignant heureux de faire partager sa vision des choses et son savoir. Luc Lasne concrétise ici la qualité des contacts qu'il a avec « ses étudiants ». Fasse que par l'intermédiaire de ce livre il transmette sa passion de l'électrotechnique à ses lecteurs.

Les premiers chapitres sont consacrés à l'étude des réseaux en régime sinusoïdal monophasé et triphasé en insistant bien sur l'aspect énergétique, ce qui est primordial en électrotechnique. L'ensemble des exercices devrait amener l'étudiant à maîtriser le sujet assez rapidement.

Le chapitre 4, en dehors de son aspect un peu abstrait, est fondamental pour la compréhension du comportement des réseaux triphasés dans le cas de déséquilibres et pour la justification des couplages des enroulements des transformateurs industriels.

Les chapitres 5 et 6 traitent des circuits magnétiques linéaires. Ceux-ci sont indispensables à la compréhension de la structure des machines tournantes. C'est là qu'on découvre que la majeure partie de l'énergie magnétique utile est stockée dans « le vide » des entrefers et non pas dans la masse du matériau magnétique.

L'étude des aimants est faite au chapitre 7 avec une intéressante comparaison entre les aimants classiques et les aimants terres rares.

Le chapitre 8 est abstrait, il fait penser à un cours de physique. Il donne en effet des résultats très généraux, à partir de considérations énergétiques, sur les calculs de forces ou de moments de couples électromagnétiques. Ce chapitre est fondamental pour l'étude des machines de type pas à pas en particulier. Deux exemples d'application sont donnés en fin de chapitre pour illustrer les notions de force et de couple.

Le chapitre 9 étudie le transformateur, il exploite les acquis des chapitres 5 et 6. Ce dispositif est omniprésent dans la majorité des appareils électroniques que nous manipulons quotidiennement et au chapitre 17 on découvrira pourquoi il est indispensable dans la distribution de l'énergie électrique. La lecture de la plaque signalétique d'un transformateur industriel sera facilitée après avoir acquis la notion de « grandeurs réduites ».

Le chapitre 10 traite des isolants et des condensateurs, de leurs technologies de fabrication à leur modélisation, en passant même par les réalisations récentes de « super condensateurs ».

Les chapitres 11, 12, 13 et 14 sont encore une application des chapitres 5 et 6 à des circuits magnétiques en interaction via un ou plusieurs entrefers : c'est l'étude des moteurs électriques.

© Dunod – Toute reproduction non autorisée est un délit

Avant de rentrer dans le détail de chacun d'eux, le chapitre 11 fait un survol très instructif sur l'ensemble des moteurs électriques utilisés actuellement.

Le chapitre 15 peut être omis en première lecture mais il faut le lire ! Il est certes abstrait car il donne une vision inattendue d'une machine. En fait il nous montre qu'il existe une machine diphasée capable d'avoir les mêmes performances qu'une machine polyphasée. De plus, les équations qui décrivent le fonctionnement de cette machine diphasée ne sont pas les mêmes si l'observateur qui les écrit le fait à partir du stator ou à partir du rotor. Le contenu de ce chapitre est à la base de la commande vectorielle des machines à champ tournant, il est de ce fait fondamental. C'est en quelque sorte la partie « dépoussiérée » de l'électrotechnique car c'est là que la microélectronique, l'informatique, l'automatique, l'électronique de puissance et l'électrotechnique se rencontrent. La complémentarité de ces disciplines se révèle ici.

Notons à ce propos que la transformation de Concordia-Park a vu le jour au début du vingtième siècle, c'était un très bel outil mais inutilisable faute des moyens électroniques dont nous disposons actuellement.

Le chapitre 16 rappelle les bases de l'analyse harmonique et traite des origines des perturbations harmoniques dans les réseaux de distribution. La non-production d'harmoniques par des dispositifs naturellement « polluants » ou leur atténuation par des dispositifs (actifs) sophistiqués sont un sujet de recherches très actuel.

Enfin le chapitre 17 traite des réseaux de distribution. La somme des informations recueillies par Luc Lasne est précieuse pour comprendre la structure d'un tel réseau et pour qui veut se faire une idée de l'ampleur des problèmes que doivent résoudre producteurs et distributeurs d'énergie électrique.

La lecture et l'assimilation du contenu de cet ouvrage permettent d'acquérir une excellente culture générale en électrotechnique. Pour ceux qui souhaitent approfondir leurs connaissances, il y a, en dehors des ouvrages spécialisés, des documents accessibles en Bibliothèque Universitaire. Je pense « aux Techniques de l'Ingénieur ». Les articles sont écrits par des spécialistes avec des mises à jour régulières. Depuis 1994 paraît une revue (contenu accessible en ligne) nommée *3EI* qui est rédigée par des enseignants-chercheurs, des ingénieurs...Tous les sujets qui touchent à l'électrotechnique et l'électronique de puissance sont abordés.

Jean-Claude GIANDUZZO,
Enseignant retraité de l'Université de Bordeaux 1

Table des matières

PRÉFACE v

AVANT-PROPOS xv

REMERCIEMENTS xvi

INTRODUCTION 1

1 Qu'est ce que l'électrotechnique ? 1

2 Quelle est aujourd'hui la place de l'énergie électrique parmi les autres énergies ? 2

3 Quels sont les domaines concernés par l'électrotechnique ? 3

4 Quels sont les programmes universitaires liés à l'ingénierie électrotechnique ? 3

5 Comment tester ses connaissances ? 4

CHAPITRE 1 • **RAPPELS ET GRANDEURS SINUSOÏDALES** 5

1.1 Lois de base et conventions des dipôles électriques 5

1.2 Récepteurs électriques linéaires 6

1.3 Régime continu et régimes variables 7

1.4 Valeurs caractéristiques des grandeurs périodiques quelconques . . . 8

1.5 Le régime sinusoïdal et sa représentation complexe (vectorielle) . . . 9

1.6 Généralisation du théorème de Thévenin 16

Exercices 17

CHAPITRE 2 • **LES PUISSANCES ÉLECTRIQUES** 20

2.1 Énergie et puissance 20

© Dunod – Toute reproduction non autorisée est un délit

2.2 Généralités sur la notion de puissance en électrotechnique 22
2.3 La puissance active en régime continu 23
2.4 Puissances électriques en régime alternatif sinusoïdal 23
2.5 Puissance apparente complexe, puissances associées aux récepteurs communs rencontrés en électrotechnique 26
2.6 Théorème de Boucherot et triangle des puissances 27
2.7 Facteur de puissance, compensation de la puissance réactive 28
2.8 Puissances électriques en régime périodique non-sinusoïdal 30
2.9 Mesure des puissances électriques 32
Exercices 34

CHAPITRE 3 • **CIRCUITS À COURANTS ALTERNATIFS TRIPHASÉS** 37
3.1 Introduction 37
3.2 Système de tensions triphasé équilibré direct (TED) 38
3.3 Générateur triphasé et différents couplages des phases 40
3.4 Charges triphasées, équilibre et déséquilibre 42
3.5 Puissances en triphasé 44
3.6 Équivalence de charges, transformations « Y/D » 46
3.7 Neutre, neutre fictif et schéma équivalent monophasé 46
3.8 Mesures de puissances en triphasé 49
Exercices 50

CHAPITRE 4 • **SYSTÈMES TRIPHASÉS DÉSÉQUILIBRÉS, RÉSOLUTIONS MATRICIELLES ET COMPOSANTES SYMÉTRIQUES** 52
4.1 Notion de déséquilibre local et charges à neutre relié 52
4.2 Déséquilibre local sur charge à neutre non relié 54
4.3 Exemple : Charge déséquilibrée et rupture de neutre 57
4.4 Problématique générale des déséquilibres 59
4.5 Présentation des composantes symétriques 59
4.6 Constructions graphiques et remarques importantes 62

4.7 Composantes symétriques des grandeurs triphasées 64
4.8 Applications des composantes symétriques 66
Exercices 70

CHAPITRE 5 • **MAGNÉTISME, MATÉRIAUX ET CIRCUITS MAGNÉTIQUES** 73
5.1 Le magnétisme : le phénomène et ses grandeurs 73
5.2 Classification des matériaux magnétiques 74
5.3 Les matériaux ferro-magnétiques 75
5.4 Notions incontournables et théorème d'Ampère 78
5.5 Les circuits magnétiques 82
5.6 Limites de la théorie des C.M. et logiciels de calcul de flux 87
Exercices 89

CHAPITRE 6 • **CIRCUITS MAGNÉTIQUES EN RÉGIME ALTERNATIF SINUSOÏDAL** 91
6.1 Introduction 91
6.2 Relations importantes en régimes alternatifs 91
6.3 Pertes et particularités liées aux matériaux réels 93
6.4 Notions complémentaires 95
6.5 Modèle linéaire d'une bobine à noyau de fer 98
Exercice 99

CHAPITRE 7 • **CIRCUITS MAGNÉTIQUES À AIMANTS PERMANENTS** 101
7.1 Point de fonctionnement d'un aimant permanent inséré dans un circuit magnétique 101
7.2 Critère de choix d'un aimant permanent 103
7.3 Caractéristiques particulières des différents types d'aimants et utilisations classiques 104
7.4 Détermination pratique des dimensions d'un aimant permanent ... 105
Exercice 106

© Dunod – Toute reproduction non autorisée est un délit

CHAPITRE 8 • **ÉNERGIES, PUISSANCES ET FORCES LIÉES AU MAGNÉTISME, MÉTHODE DES TRAVAUX VIRTUELS** 107

8.1 Formules générales des énergies d'un matériau aimanté 107

8.2 Variations d'énergie, puissance et force 110

8.3 Principe de réluctance minimale 112

8.4 Méthode des travaux virtuels 113

Exercices 117

CHAPITRE 9 • **TRANSFORMATEURS** 120

9.1 Transformateur monophasé idéal 120

9.2 Mieux comprendre le transformateur 123

9.3 Le transformateur monophasé réel et son modèle 124

9.4 Grandeurs associées au schéma et chute de tension au secondaire 126

9.5 Notions complémentaires associées au transformateur réel 128

9.6 Transformateurs triphasés 131

9.7 Impédances associées aux transformateurs et ordres de grandeur . 134

9.8 Transformateurs en parallèle 138

9.9 Autotransformateurs 140

Exercices 141

CHAPITRE 10 • **MATÉRIAUX ISOLANTS ET CONDENSATEURS** 145

10.1 Introduction 145

10.2 Matériaux isolants 145

10.3 Approche physique du condensateur 147

10.4 Formules courant/tension et énergies 149

10.5 Schéma équivalent et comportement en fréquence 150

10.6 Technologies de construction des condensateurs 151

10.7 Applications classiques du domaine de l'énergie 153

10.8 Supercondensateurs 157

CHAPITRE 11 • **CONVERTISSEURS ÉLECTROMÉCANIQUES** 160
11.1 Champ d'application et classification 160
11.2 Principes généraux 161
11.3 Les grandes familles de machines électriques 163
11.4 Machines à courant continu (MCC), machines « à collecteur » 163
11.5 Machines synchrones (MS) 166
11.6 Machines asynchrones (MAS) ou « Machines à induction » 171
11.7 Moteurs « pas à pas » 173
11.8 Nombres de « pôles » des machines électriques 176
11.9 Illustrations 179

CHAPITRE 12 • **MACHINES À COURANT CONTINU** 182
12.1 Principes et relations générales 182
12.2 Fonctionnement en régime permanent continu linéaire 186
12.3 Non-linéarités dues à la saturation du circuit magnétique 188
12.4 Fonctionnement en régime transitoire 190
12.5 Les différents montages des machines à courant continu 194
Exercices 197

CHAPITRE 13 • **ALTERNATEURS ET MACHINES SYNCHRONES** 199
13.1 Principes et relations générales 199
13.2 Alternateur indépendant débitant sur charge linéaire 206
13.3 Machine synchrone couplée à un réseau d'énergie infinie 208
13.4 Réaction d'induit d'une machine synchrone 210
13.5 Étude des machines à pôles lisses : Diagramme de Potier 212
13.6 Étude des machines à pôles saillants : Diagramme de Blondel 214
13.7 Impédances associées réduites, ordres de grandeur 216
13.8 Moteur synchrone 218
Exercices 221

© Dunod – Toute reproduction non autorisée est un délit

CHAPITRE 14 • **MACHINES ASYNCHRONES** 224

14.1 Principes et relations générales 224

14.2 Fonctionnement à tension et fréquence constantes 230

14.3 Démarrage des moteurs asynchrones 234

14.4 Variation de vitesse des moteurs asynchrones 235

14.5 Fonctionnement en génératrice et en frein 241

14.6 Moteurs asynchrones monophasés 242

Exercices 243

CHAPITRE 15 • **TRANSFORMATIONS MATRICIELLES. MODÈLES « D, Q » DES MACHINES À COURANTS ALTERNATIFS TRIPHASÉS** 247

15.1 Matrices d'impédances et d'inductances 247

15.2 Transformations matricielles classiques 248

15.3 La transformée de Park et le repère du champ tournant 250

15.4 Modèle « d,q » des machines synchrones 253

15.5 Modèle « d,q » des machines asynchrones 258

15.6 Conclusion sur les modèles *d,q* 262

CHAPITRE 16 • **HARMONIQUES ET RÉGIMES DÉFORMÉS** 264

16.1 Bases mathématiques de l'étude des harmoniques 265

16.2 Expressions des puissances en régime déformé 271

16.3 Sources, propagation et conséquences des harmoniques 274

16.4 Harmoniques pairs et impairs, courant de neutre 275

16.5 Réduction et compensation des harmoniques 278

Exercices 278

CHAPITRE 17 • **LES RÉSEAUX ÉLECTRIQUES** 282

17.1 Introduction 282

17.2 Structure générale des réseaux électriques 282

17.3 Production de l'énergie électrique 283
17.4 Caractéristiques générales du transport et de la distribution 285
17.5 Principes fondateurs des réseaux électriques 288
17.6 Phénomènes liés au fonctionnement des réseaux électriques 292
17.7 Stratégie de fonctionnement des réseaux 297
17.8 Outils de modélisation et d'étude des réseaux électriques 302
17.9 Exemples de calculs liés aux modélisations 307

CONCLUSION 311

BIBLIOGRAPHIE ET LIENS 313

INDEX 315

Avant-propos

L'étude de l'énergie électrique, ou électrotechnique, est une science appliquée qui occupe une place centrale, à la fois au sein des « sciences de l'ingénieur » et au cœur de l'industrie mondiale. Aujourd'hui, à peu près 45 % de l'énergie produite dans le monde l'est sous forme électrique et le « parc technologique » associé est immense. En dehors de cet aspect industriel et social, étudier l'énergie électrique nécessite, d'une part, la maîtrise de notions et de techniques mathématiques et physiques, et d'autre part une bonne connaissance technologique des applications communes, qui sont assez diversifiées et concernent des puissances réparties sur une vaste échelle d'ordres de grandeurs. En conséquence, l'approche doit être à la fois rigoureuse, pratique, efficace, et respecter une relation intime entre les notions théoriques et les applications industrielles.

Le but de ce livre est d'accompagner l'étudiant ou l'ingénieur depuis l'apprentissage des notions de base jusqu'aux notions avancées utilisées régulièrement dans le domaine professionnel. Parallèlement, il peut également convenir à une formation ciblée, à la compréhension de points particuliers ou de principes généraux, souvent préalables à la spécialisation. Dans tous les cas, il est construit de manière à ce que la lecture d'un chapitre permette de comprendre, avec les notions qui y sont développées, le « pourquoi » et le « comment » de ces notions, leurs applications classiques ainsi que les points à retenir absolument. À titre d'exemple, l'approche matricielle des machines électriques, ou la résolution des circuits triphasés déséquilibrés, ne sont pas des choses faciles. Souvent très mathématisées et présentées en fin d'études, ces notions sont pourtant très présentes dans l'industrie d'aujourd'hui. En « comprenant » intimement leur origine et leurs applications, c'est ensuite tout le travail de formalisation, de mémorisation et d'interprétation des résultats qui est facilité. Enfin, chaque chapitre est clôturé par des exercices d'applications ou des illustrations destinés à cimenter les acquis et la progression scolaire.

La seconde édition de cet ouvrage, qui auparavant était appelé simplement « Électrotechnique », s'adresse de façon très générale aux étudiants des « sciences de l'ingénieur » et de la physique. À ce titre, elle convient aux formations de type IUT, BTS, aux cycles universitaires Licence et Masters, aux écoles d'ingénieurs de formation généraliste ou spécialisée, mais aussi aux préparations aux concours de l'enseignement CAPET, CAPES et Agrégation.

Les particularités de cette deuxième édition sont essentiellement centrées sur les deux nouveaux chapitres qui l'enrichissent : le *chapitre 10* qui est dédié aux matériaux isolants et aux condensateurs permettra au lecteur, en complément de l'étude de l'énergie magnétique, d'appréhender le stockage temporaire de l'énergie électrique dans des condensateurs, ou même des « supercondensateurs ». Le *chapitre 17*, qui était auparavant en complément accessible sur le Web, présentera au lecteur un exposé inédit sur les réseaux électriques. Son objectif est ambitieux : faire comprendre les origines, les particularités et les grands principes de fonctionnement et de gestion des grands réseaux électriques. Ce domaine, paradoxalement assez peu présent dans la littérature de l'électricité en France, représente pourtant la quasi-totalité de la production, du transport et de la fourniture de l'énergie électrique dans le monde entier, et à ce titre est indissociable de la notion même d'énergie électrique.

© Dunod – Toute reproduction non autorisée est un délit

Remerciements

Je tiens à remercier tout particulièrement M. Jean-Claude Gianduzzo pour sa relecture complète et assidue, ses nombreuses suggestions, précisions et discussions concernant les différents aspects de cet ouvrage. Je le remercie également de façon beaucoup plus générale pour sa passion des sciences, son travail d'enseignant à l'Université de Bordeaux 1 et les innombrables aides dont j'ai bénéficié en enseignant à ses côtés.

Je remercie M. Benoît Delourme, Ingénieur RTE (Réseau de Transport de l'Électricité), pour sa relecture attentive et ses nombreuses contributions concernant la partie relative aux réseaux électriques. Je remercie également Mme Souad Mechta et la médiathèque RTE ©, pour leur contribution à mes recherches de documents propres aux réseaux électriques.

Je remercie M. Bruno Duvallet (RTE) pour toutes les photos qu'il a aimablement mis à ma disposition.

Je remercie du fond du cœur M. Bernard Multon, enseignant à l'École normale supérieure de Cachan (ENS, Antenne de Bretagne), à la fois pour la qualité et l'actualité de ses cours et pour sa contribution substantielle au chapitre concernant les actionneurs électriques.

De la même manière, je remercie M. Gilles Feld, également enseignant à l'ENS de Cachan, pour ses enseignements concernant les modèles matriciels des machines électriques et plus généralement pour sa capacité à « expliquer simplement » ce que tant d'autres cachent derrière des équations.

De façon assez « décousue », je ne remercierai jamais assez M. Paul Bourgois, Messieurs Guy et Michel Lavabre, M. Louf, Mme Pénélon, et de façon très générale tous ces enseignants fabuleux qui m'ont permis d'accéder à un métier que j'aime et qui me passionne.

Je joins à ces remerciements une pensée très forte vers tous les collègues et amis du monde de l'enseignement et des sciences.

Plus personnellement, plus intimement, mais de façon infiniment plus forte, je remercie mon petit Vadim, ma petite Salomé, Armelle ma femme, ainsi que ma Maman pour tout le reste... vraiment TOUT le reste.

Introduction

Avant de commencer à parcourir cet ouvrage, il est important de bien savoir ce qu'est l'électrotechnique et quels sont ses champs d'application. Bien situer la place de cette matière, autant dans le paysage industriel que dans le monde des études supérieures, constitue une bonne manière d'aborder ensuite des notions, parfois compliquées, dont la présence dans les programmes scolaires n'est pas anodine. Il est en effet essentiel de retenir que l'électrotechnique est une science appliquée et, à ce titre, représente un ensemble de principes et d'applications utiles dans le monde technologique actuel. Cette introduction est donc destinée à répondre, de façon préalable, à quelques questions simples énoncées ci dessous :

1 QU'EST CE QUE L'ÉLECTROTECHNIQUE ?

Définition *« **Électrotechnique** adj. et n. f. XX^{e} siècle. **1.** Adj. Relatif à la production, au transport, à la distribution et à l'utilisation de l'énergie électrique. **2.** N. f. Étude des applications techniques et industrielles de l'électricité. » (source : Dictionnaire en ligne de l'Académie Française)*

De façon plus détaillée, l'électrotechnique est l'étude de l'ensemble des technologies qui sont relatives aux industries suivantes :

- L'industrie de la production d'énergie électrique, c'est-à-dire l'ensemble des centrales thermiques, nucléaires, hydroélectriques, éoliennes, etc.
- L'industrie du transport ou de la distribution électrique, c'est-à-dire l'ensemble des lignes électriques constituant le maillage des territoires, des transformateurs, des postes de conversions et d'interconnexion, etc.
- L'industrie de la conversion de l'énergie électrique, c'est-à-dire l'ensemble des convertisseurs statiques et dynamiques, des machines et moteurs électriques, etc.
- L'industrie de l'appareillage et des installations électriques, c'est-à-dire l'ensemble des dispositifs permettant l'utilisation industrielle ou particulière de l'électricité.

Le point commun à tous les éléments de cette liste est un rapport à l'**énergie électrique**. Ainsi, de façon plus synthétique, il est possible de retenir que « l**'électrotechnique est l'étude des techniques relatives aux aspects énergétiques de l'électricité et des systèmes électriques** ».

Sur un plan purement scolaire, l'électrotechnique est une matière qui fait partie intégrante des « Sciences de l'Ingénieur » et qui s'inscrit généralement dans les parcours de type « EEA » (Électronique, Électrotechnique, Automatique). C'est une science appliquée qui fait souvent partie de l'enseignement technique et technologique dans les lycées et des enseignements liés à l'**ingénierie** dans les études supérieures.

© Dunod – Toute reproduction non autorisée est un délit

2 QUELLE EST AUJOURD'HUI LA PLACE DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE PARMI LES AUTRES ÉNERGIES ?

L'énergie électrique (et donc l'électrotechnique) est très présente dans la vie quotidienne de pratiquement tous les habitants de la planète. Les pays fortement industrialisés, en particulier, consomment une partie importante de leur énergie sous forme électrique. À titre d'information, le graphe de la *figure 1* représente la répartition des énergies dites « primaires » (c'est-à-dire totales) consommées en France en 2010 (source : INSEE et http://www.developpement-durable.gouv.fr/-Energie-Air-et-Climat-).

N.B. : 1 Tera Watt-heure = 1TWh = 10^9 kWh.

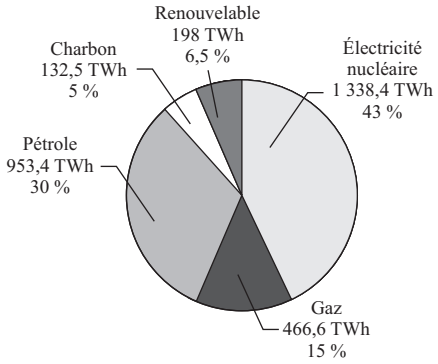


Figure 1 L'énergie primaire en France (2010)

Il est bien visible sur ce graphe qu'environ 45 % de l'énergie totale consommée l'a été sous forme d'électricité (les éoliennes font partie des énergies renouvelables). Si les répartitions diffèrent d'un pays à l'autre, cette proportion reste du même ordre de grandeur. Par voie de conséquence, il faut bien comprendre que les industries de la production, du transport, de l'appareillage et de l'équipement électriques représentent une partie très importante des industries mondiales.

Autrement dit, parmi les autres énergies la place de l'énergie électrique est tout à fait centrale. Par ailleurs cette dernière est directement liée à l'ensemble des énergies existantes, elle se transporte bien, elle est inodore, « invisible » et autorise des transferts à très bons rendements. Pour toutes ces raisons, l'énergie électrique représente une proportion toujours croissante des énergies primaires. À titre d'exemple, la *figure 2* présente l'évolution de la consommation électrique en France de 1996 à 2006. (source : *DGEMP*, les données sont ramenées à un équivalent ne dépendant pas des grandes fluctuations des conditions météorologiques). Enfin, les difficultés liées à l'environnement, à l'épuisement des ressources fossiles, la croissance des populations et de leur consommation d'énergie donnent aujourd'hui à penser que cette augmentation devrait se confirmer dans les années à venir.

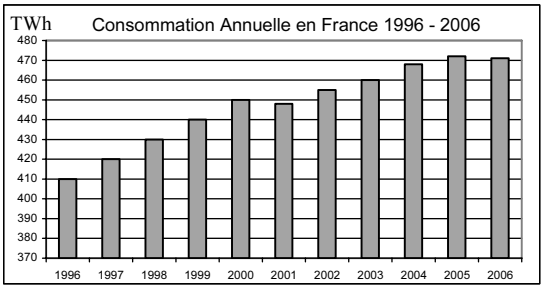


Figure 2 Consommation d'électricité en France de 1996 à 2006

3 QUELS SONT LES DOMAINES CONCERNÉS PAR L'ÉLECTROTECHNIQUE ?

En réalité, l'électrotechnique concerne directement, ou indirectement, un grand nombre de domaines. À titre d'exemple, la plus grande partie des appareillages domestiques, sous le terme « d'électroménager », utilise de l'énergie électrique. La plus grande partie des motorisations associées aux processus industriels aussi. De la même manière, l'électricité au sens large est utilisée aussi bien dans l'industrie électronique et informatique que dans les industries chimiques, mécaniques, le transport ferroviaire, etc. Ainsi, et de façon très générale, les notions et les outils spécifiques de l'électrotechnique sont utilisables en physique, en chimie, mécanique, thermique, génie civil, etc. L'ensemble de ce cours ne s'applique donc **pas exclusivement** aux domaines de l'EEA.

4 QUELS SONT LES PROGRAMMES UNIVERSITAIRES LIÉS À L'INGÉNIERIE ÉLECTROTECHNIQUE ?

Les programmes correspondant au domaine de l'électrotechnique comprennent généralement les points suivants :

- L'étude des grandeurs électriques alternatives sinusoïdales (en régime permanent).
- L'étude des différentes puissances électriques.
- L'étude des systèmes triphasés (qui constituent les réseaux électriques et les installations de puissance).
- L'étude du magnétisme, des circuits magnétiques et des énergies liées au magnétisme (car le magnétisme est la base du fonctionnement d'un très grand nombre d'appareils et de machines électriques).
- L'étude des transformateurs (omniprésents dans les appareillages et à travers tous les ordres de grandeur).
- L'étude des systèmes déformés (c'est-à-dire non sinusoïdaux).

Ces points sont en général étudiés en début de cyle Licence (ou équivalent), après quoi l'étude des machines électriques, le plus souvent abordées en fin de cycle Licence et en Masters, est constituée de :

- L'étude des machines à courant continu (très présentes dans l'électroménager et les actionneurs).
- L'étude des alternateurs (outil quasi universel de la production électrique) et des machines synchrones (qui constituent les meilleurs moteurs de traction actuels).
- L'étude des machines asynchrones (très présents dans les motorisations de moyenne puissance et à bon marché).
- L'étude des modèles classiques des moteurs et des modèles matriciels qui permettent aujourd'hui des pilotages fins et très rentables.

La motorisation représente en effet un domaine particulièrement imposant qui couvre quasiment toutes les gammes de puissances mises en jeu sur les réseaux. Afin de mettre en évidence les points

© Dunod – Toute reproduction non autorisée est un délit

communs et les angles d'approche classiques, *le chapitre 11* présente un « tour d'horizon » des principes de fonctionnement des convertisseurs électromécaniques les plus courants.

Enfin, l'étude des réseaux électriques constitue une approche généralement liée à certaines écoles d'ingénieur assez proches de l'industrie de la production et du transport de l'énergie électrique. C'est pourtant un point central de la culture électrotechnique, qui mérite une place centrale dans les formations correspondantes

5 COMMENT TESTER SES CONNAISSANCES ?

Ce livre est un cours. À ce titre, il présente beaucoup de notions, liées à l'électricité et au magnétisme en général ainsi qu'à la réalité industrielle de l'électrotechnique. Pour un étudiant, il n'est pas évident de passer de la lecture du cours au fait de savoir appliquer les notions de façon pratique. Pour ce faire, cet ouvrage présente dans chaque chapitre plusieurs exercices corrigés. Ces derniers permettent de se faire une idée de la manipulation pratique des notions exposées. Parallèlement, et dans la même collection, le livre « *Exercices et problèmes d'électrotechnique* » (ISBN : 978-2-10-049064-6) propose de nombreux exercices et problèmes corrigés qui sont le reflet de ce qui est effectivement demandé à l'étudiant des cycles universitaires et des écoles d'Ingénieur.

Chapitre **1**

Rappels et grandeurs sinusoïdales

1.1 LOIS DE BASE ET CONVENTIONS DES DIPÔLES ÉLECTRIQUES

Il est impératif de bien connaître les lois de base de l'électricité pour pouvoir accéder aux différents chapitres de cet ouvrage. Sous forme de rappels, la loi des mailles, la loi des nœuds, les conventions « récepteur » et « générateur », sont rappelés ci dessous, de façon adaptée et suffisante à l'étude des systèmes de conversion d'énergie. Toutes ces notions étant des outils indispensables à l'étude des circuits électriques, il est naturel de les considérer par la suite comme des prérequis de fond.

1.1.1 Loi des mailles

C'est le fondement de l'étude des circuits. La loi des mailles s'écrit : « **la somme des tensions orientées le long d'une maille de circuit électrique est nulle** ». L'exemple représenté sur la *figure 1.1* présente une maille de principe à quatre dipôles, idéale pour mettre en œuvre le mécanisme de la loi des mailles à travers l'équation associée.

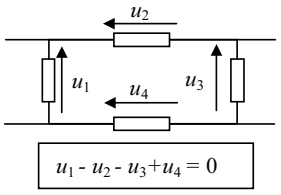


Figure 1.1 Loi des mailles

1.1.2 Loi des nœuds

Elle est également incontournable pour l'étude des circuits électriques, et s'écrit ainsi : « **la somme des courants orientés à un nœud de circuit est nulle** ». Encore une fois l'exemple figurant sur la *figure 1.2* présente un nœud de principe, à quatre branches, idéal pour mettre en œuvre le mécanisme de la loi des nœuds à travers l'équation correspondante.

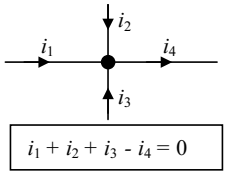
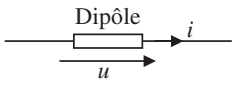


Figure 1.2 Loi des nœuds

1.1.3 Conventions « générateur » et « récepteur »

Lorsqu'un dipôle électrique constitue le générateur de tension d'un circuit électrique, on oriente naturellement ses grandeurs électriques en « **convention générateur** ». Lorsqu'un dipôle électrique

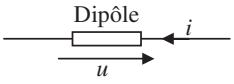
n'est pas générateur, on le dit « récepteur » et on oriente naturellement ses grandeurs électriques en « **convention récepteur** ». Les *figures ci-dessous* représentent ces orientations de principe, parallèlement il faut retenir que ces deux conventions se rapportent au sens « pressenti » d'écoulement des puissances d'un générateur vers un récepteur électrique.



Convention générateur

En convention générateur, la puissance électrique associée au dipôle s'écrit : $p = u.i$

- Si $p = u.i > 0$, le dipôle **fournit** de la puissance au reste du circuit.
- Si $p = u.i < 0$, le dipôle **reçoit** de la puissance du reste du circuit.



Convention récepteur

En convention récepteur, la puissance électrique s'écrit également : $p = u.i$, mais cette fois :

- Si $p = u.i > 0$, le dipôle **reçoit** de la puissance du reste du circuit.
- Si $p = u.i < 0$, le dipôle **fournit** de la puissance au reste du circuit.

Ces considérations reviennent bien au fait qu'un générateur est naturellement fait pour fournir de la puissance ($p_{\text{fournie}} > 0$) et un récepteur pour en recevoir ($p_{\text{reçue}} > 0$). Quand la puissance s'inverse c'est que le sens du transfert est en réalité inverse à celui pressenti dans l'approche du circuit.

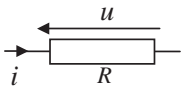
NB : Cette notion de convention est très importante puisqu'elle permet de fixer le sens dit « conventionnel » des tensions et courants d'un circuit, juste en ayant une idée de la nature de ses composants. Très souvent, c'est la première chose à faire lors de l'étude d'un circuit pour lequel les sens des grandeurs électriques ne sont pas imposés. Si par hasard on se trompe de convention pour un dipôle, ce n'est pas grave, sa puissance sera juste négative.

1.2 RÉCEPTEURS ÉLECTRIQUES LINÉAIRES

Il existe trois types de récepteurs électriques dits « linéaires » : les **résistances**, les **inductances** (ou selfs) et les **condensateurs** (ou « capacités »). Leurs relations « courant/tension » générales font apparaître des coefficients constants indépendants de $u(t)$ et de $i(t)$, c'est ce qui caractérise leur « linéarité ». Ces relations sont précisées, naturellement en convention récepteur, ci-après.

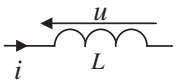
- Résistance : $u(t) = R.i(t)$

Le coefficient R s'appelle la **résistance**, son unité est l'Ohm (Ω).



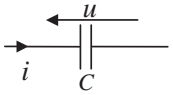
- Inductance : $u(t) = L.\dfrac{\mathrm{d}\, i(t)}{\mathrm{d}\, t}$

Le coefficient L s'appelle l'**inductance**, son unité est l'Henry (H).



- Condensateur : $i(t) = C.\dfrac{\mathrm{d}\, u(t)}{\mathrm{d}\, t}$

Le coefficient C s'appelle la **capacité**, son unité est le Farad (F).



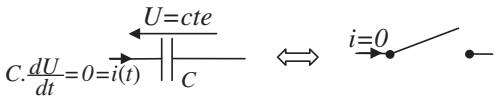
Ces formules sont fondamentales et décrivent le comportement de ces dipôles de façon générale. Pourtant, en fonction des particularités des tensions d'alimentation des circuits électriques, il existe des simplifications possibles, ou encore d'autres écritures de ces formules. Il est ainsi fondamental de savoir adapter ces relations aux différents régimes de fonctionnement des circuits.

1.3 RÉGIME CONTINU ET RÉGIMES VARIABLES

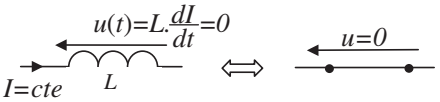
1.3.1 Régime continu

On parle de régime (permanent) continu dès lors que les grandeurs électriques (courants et tensions) d'un circuit sont indépendantes du temps. C'est le cas lors qu'on utilise des générateurs de tension ou de courant continu tels les piles, accumulateurs, batteries, génératrices à courant continu, etc. Dans ce régime particulier, les formules générales de fonctionnement des inductances et condensateurs se simplifient considérablement (voir la *figure 1.3*). Étant donné que ces deux récepteurs deviennent sans effet en régime continu, les résistances restent alors les seuls récepteurs linéaires existants. On retiendra ainsi l'ensemble des caractéristiques générales du régime continu citées ci dessous :

- Les condensateurs sont équivalents à des « circuits ouverts ».



- Les inductances sont équivalentes à des « courts-circuits ».

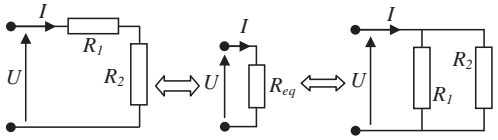


- Association de deux résistances en série :

$$R_{eq} = R_1 + R_2$$

- Association de deux résistances en parallèle :

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad \text{ou} \quad R_{eq} = \frac{R_1.R_2}{R_1 + R_2}$$



- Les circuits électriques de conversion d'énergie se ramènent ainsi souvent à l'association classique : générateur (E), résistance de sortie du générateur (R_s) et charge (R).

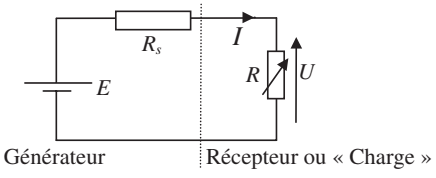


Figure 1.3 Régime continu, association générateur récepteur

NB : La puissance reçue par la charge est alors : $P = U.I = R.I^2$, celle fournie par le générateur est alors : $P = E.I$.

NB : À partir de la définition donnée dans le chapitre 3, on remarque qu'en régime permanent continu, le facteur de puissance vaut systématiquement 1.

© Dunod – Toute reproduction non autorisée est un délit

1.3.2 Régimes variables

Il existe deux grands types de régimes variables, c'est-à-dire dans lesquels les grandeurs électriques dépendent du temps : les « **régimes transitoires** » et les « **régimes entretenus périodiques** ».

- **Les régimes transitoires** : Ce sont des évolutions particulières des grandeurs électriques qui apparaissent lors des modifications brutales des caractéristiques d'un circuit électrique. En général ils ne se produisent pas de façon répétée, sinon on parle de régime entretenu périodique.
- **Les régimes périodiques** : Ils se caractérisent par le fait que les variations des grandeurs électriques en fonction du temps sont périodiques (répétitives). La durée de répétition s'appelle alors la période (T en secondes) et son inverse est appelée la fréquence ($f = \frac{1}{T}$ en Hertz).

1.4 VALEURS CARACTÉRISTIQUES DES GRANDEURS PÉRIODIQUES QUELCONQUES

On parle de grandeur périodique dès lors qu'un signal s présente une période temporelle, T, telle que pour tout temps t : $s(t + T) = s(t)$.

Pour caractériser facilement les grandeurs électriques variables des régimes périodiques, on dispose de paramètres **incontournables** qui sont : la **période**, la **fréquence**, la **valeur moyenne** et la **valeur efficace**.

Ces notions sont des notions phares en électrotechnique et il est **impératif** de les maîtriser parfaitement d'autant qu'elles sont universelles dans le domaine des régimes périodiques. La *figure 1.4* représente une grandeur périodique quelconque, s (en électronique on parle plus généralement de signal), pour laquelle on précise l'ensemble de ces notions.

- La période : c'est la durée de répétition de la grandeur, on la note T et elle s'exprime en secondes (s).
- La fréquence : c'est le nombre de périodes effectuées par seconde par la grandeur, on la note $f = \frac{1}{T}$ et elle s'exprime en Hertz (Hz).
- La pulsation : c'est l'équivalent d'une vitesse de rotation de la grandeur, on la note $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$ et elle s'exprime en radians par seconde (Rad/s). Attention, cette grandeur n'est définie qu'en régime sinusoïdal.

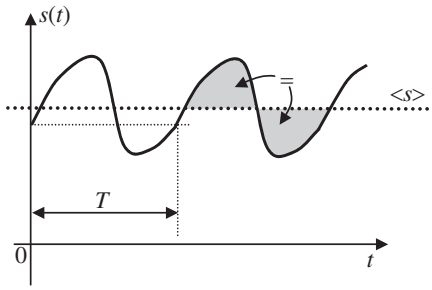


Figure 1.4 Grandeur périodique quelconque

1.4.1 Valeur moyenne

La valeur moyenne d'une grandeur variable s'appelle aussi la « **composante continue** », c'est-à-dire la partie constante de cette grandeur. Pour le signal périodique s, de période T, on note $< s >$

sa valeur moyenne dont on retiendra l'écriture générale :

$$S_{\text{moy}} =< s >= \frac{1}{T}\int_{(T)} s(t)\mathrm{d}\,t$$

NB : La valeur moyenne d'un signal est la valeur qui sépare le signal sur une période en deux aires égales (voir la figure 1.4). On la calcule souvent en écrivant : $< s >= \frac{1}{T}\int_0^T s(t)\,\mathrm{d}t$*, mais il est possible de faire l'intégration sur n'importe quel intervalle de largeur* T*.*

1.4.2 Valeur efficace

La valeur efficace d'une grandeur variable est une notion très largement utilisée en électricité dès lors qu'on s'intéresse aux régimes variables. On note S ou S_{eff} la valeur efficace du signal périodique s et on retiendra absolument la formulation générale :

$$S_{\text{eff}} = S = \sqrt{\frac{1}{T}\int_{(T)} s^2(t)\,\mathrm{d}t}$$

C'est la recherche de la puissance par effet Joule due à un courant alternatif qui mène à la notion de valeur efficace. En réalité la valeur efficace d'un courant alternatif est celle qui produit la même puissance consommée par effet Joule qu'un courant continu de même valeur. On retiendra par exemple qu'un courant de 10A efficace passant dans une résistance produira la même chaleur quelle que soit la nature de ce courant.

Autrement dit, et c'est très important en électrotechnique, le fait de prendre en compte les valeurs efficaces des tensions et des courants permet d'unifier l'écriture des puissances électriques. Ces considérations sont développées dans le chapitre relatif aux puissances.

NB : Étant donné des formules précédentes, on remarque que la valeur moyenne d'une somme est égale à la somme des valeurs moyennes, en revanche c'est généralement faux pour les valeurs efficaces. En d'autres termes : si $s(t) = s_1(t)+s_2(t)$ *alors* $< s >=< s_1 > + < s_2 >$ *mais attention :* $S_{eff} \neq S_{1eff} + S_{2eff}$*.*

1.5 LE RÉGIME SINUSOÏDAL ET SA REPRÉSENTATION COMPLEXE (VECTORIELLE)

C'est en régime sinusoïdal que les transformateurs, les machines tournantes, etc., ont un fonctionnement optimal. C'est également en régime sinusoïdal qu'il est possible de transporter l'énergie électrique sous très haute tension grâce à l'utilisation des transformateurs. Sans pour autant les développer dans ce chapitre, il est important de comprendre qu'un certain nombre de raisons font que ce régime correspond à la plus grande partie des configurations rencontrées dans le domaine de l'énergie électrique, et donc de l'électrotechnique. Il est impératif de maîtriser parfaitement les notions et les méthodes d'approche, elles sont incontournables pour aborder les chapitres suivants sans difficulté.

© Dunod – Toute reproduction non autorisée est un délit

1.5.1 Nature et représentation des grandeurs alternatives sinusoïdales

Un signal alternatif sinusoïdal est un cas particulier de signal périodique. La *figure 1.5* représente un tel signal sur un peu plus d'une période et ses caractéristiques sont les suivantes :

- $s(\mathrm{t}) = S_{\max}.\sin(\omega \mathrm{t} - \varphi)$
- Période : T (s)
- Fréquence : $f = \dfrac{1}{T}$ (Hz)
- Pulsation : $\omega = 2\pi f$ (rad/s)
- Phase à l'origine : φ
- Valeur moyenne : $< s >= 0$
- Valeur efficace : $S_{\text{eff}} = S = \dfrac{S_{\max}}{\sqrt{2}}$

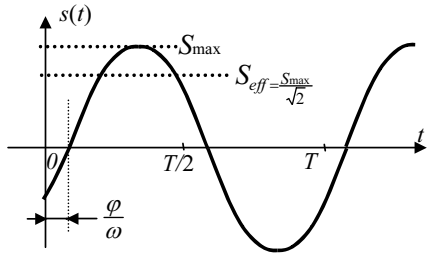


Figure 1.5 Caractéristiques des grandeurs sinusoïdales

1.5.2 Représentation en fonction de l'angle $\theta = \omega.t$

Si les valeurs maximales et efficaces de la grandeur s apparaissent naturellement sur sa représentation temporelle, la contribution de la phase à l'origine φ se traduit, en revanche, par un temps de retard à l'origine très peu pratique à quantifier. On préfère ainsi très souvent faire la représentation des grandeurs sinusoïdales en fonction de l'angle $\theta = \omega.t$ (voir *figure 1.6*), ce qui implique les conséquences suivantes :

- La période de répétition du signal devient la valeur 2π, quelle que soit la fréquence du signal.
- La phase devient lisible directement en radians sur l'axe des abscisses. (voir *figure 1.6*)
- Les intégrations, relatives aux valeurs moyennes et efficaces, faites en fonction de la variable $\theta = \omega.t$ sont plus faciles à réaliser qu'en utilisant la variable t.

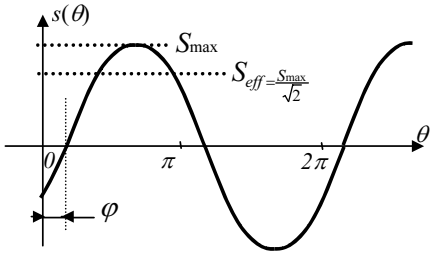


Figure 1.6 Représentation en fonction de l'angle $\theta = \omega.t$

NB : Il est impératif de retenir qu'une grandeur sinusoïdale d'amplitude $S_{\max}$ a pour valeur efficace $S_{eff} = S = \dfrac{S_{\max}}{\sqrt{2}}$. Attention, il est également impératif de se souvenir que ce résultat est un cas particulier et n'est valable que pour une grandeur sinusoïdale !

NB : démonstration de la formule de la valeur efficace

$$S_{eff} = S = \sqrt{\frac{1}{T}\int_{(T)} s^2(t).dt} = \sqrt{\frac{S_{\max}^2}{2\pi}\int_0^{2\pi} \sin^2(\theta).d\theta}$$

$$= \sqrt{\frac{S_{\max}^2}{2\pi}\int_0^{2\pi} \frac{1-\cos(2\theta)}{2}.d\theta} = \sqrt{\frac{S_{\max}^2}{4\pi}\int_0^{2\pi} d\theta}$$

$S_{eff} = S = \sqrt{\frac{S_{\max}^2}{4\pi}.2\pi} = \frac{S_{\max}}{\sqrt{2}}$. *La disparition du terme* $\cos(2\theta)$ *dans la troisième étape du calcul est due au fait que la valeur moyenne d'une sinusoïde est nulle, il est donc inutile de calculer l'intégrale de ce terme.*

1.5.3 Nécessité d'une notation particulière des grandeurs sinusoïdales

En régime sinusoïdal, les relations de maille exprimées à l'aide des relations Courant/Tension des récepteurs linéaires deviennent des équations différentielles dont la résolution se complique de façon prohibitive dans les circuits comportant plus d'un ou deux récepteurs. Pourtant le régime sinusoïdal est le plus utilisé dans le domaine de l'énergie électrique. Il est donc **impératif** de mettre en œuvre une notation et une méthodologie particulières portant sur les grandeurs sinusoïdales. Cette notation est la « **notation complexe** » (ou **vectorielle**) des grandeurs sinusoïdales.

1.5.4 Rappels élémentaires sur les nombres complexes

Soit $\underline{z} \in \mathbb{C}$, l'espace en deux dimensions des nombres complexes. L'écriture en coordonnées cartésiennes du nombre complexe $\underline{z}$ est : $\underline{z} = a + i.b$, avec i le nombre complexe unité tel que $i^2 = -1$, a et b ses coordonnées.

On préfère, en électricité, et pour ne pas confondre i avec un courant, écrire $\underline{z} = a + j.b$ en notant j le nombre complexe unité tel que $j^2 = i^2 = -1$.

On représente les nombres complexes, à partir de leurs coordonnées, dans un plan appelé « *plan complexe* » représenté sur la *figure 1.7*. Par ailleurs il est important de savoir mettre en œuvre les notions suivantes :

- La norme (ou module) du complexe $\underline{z}$ s'écrit : $r = |\underline{z}| = \sqrt{a^2 + b^2}$
- La projection du module sur les axes donne : $a = r.\cos\theta$ et $b = r.\sin\theta$. Ainsi : $\underline{z} = a + j.b = r(\cos\theta + j.\sin\theta)$. D'où l'écriture polaire du nombre complexe :

$$\underline{z} = r.e^{j\theta}$$

- θ est appelé « l'argument » de $\underline{z}$, on écrit : $\theta = \text{Arg}\,(\underline{z})$. Comme $\tan\theta = \frac{b}{a}$, on retiendra :

$$\theta = \text{Arg}\,(\underline{z}) = \text{Arctan}\left(\frac{b}{a}\right)$$

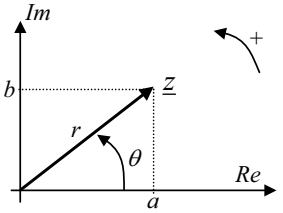


Figure 1.7 Plan et nombre complexes

1.5.5 Écriture spécifique des courants sinusoïdaux en électrotechnique

En électrotechnique, une source de tension (c'est-à-dire un générateur) fournit généralement de l'énergie à un ensemble de charges connectées en parallèle les unes sur les autres. À titre d'exemple, les appareils électriques d'une maison sont généralement tous connectés en parallèle sur la même tension, on appelle celle-ci « tension d'alimentation ». Ainsi, lorsqu'une tension sinusoïdale $u(t)$ (caractérisée par sa valeur efficace U) est la tension d'alimentation d'un système de charges, il est très usuel de considérer que sa phase à l'origine est nulle ($\varphi = 0$). C'est un élément de

© Dunod – Toute reproduction non autorisée est un délit