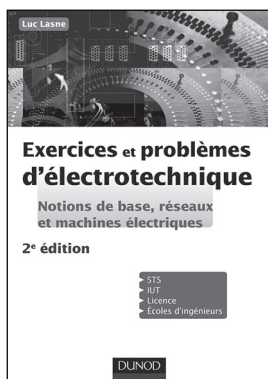


Énergie électrique

Tout le catalogue sur
www.dunod.com

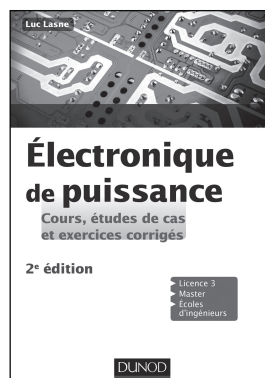


DU MÊME AUTEUR



Exercices et problèmes d'électrotechnique
Notions de bases, réseaux et machines électriques
2^e édition
Luc Lasne
272 pages
Dunod, 2011

Électronique de puissance
Cours, études de cas et exercices corrigés
2^e édition
Luc Lasne
336 pages
Dunod, 2015



Énergie électrique

3^e édition

Luc Lasne

Professeur agrégé à l'université de Bordeaux

Préface de Jean-Claude Gianduzzo

Enseignant-chercheur en physique et électrotechnique
à l'université de Bordeaux

DUNOD

Illustration de couverture : © iStock.com / Yangphoto

<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 s'est généralisée dans les établissements</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.</p> <p>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, 2008, 2013, 2018

11 rue Paul Bert, 92240 Mallakoff

www.dunod.com

ISBN 978-2-10-077883-6

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.

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 « dépoluée » 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	xvii
INTRODUCTION	1
1 Qu'est ce que l'énergie électrique ?	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'énergie électrique ?	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) ...	10
1.6 Généralisation du théorème de Thévenin	16
Exercices	17
CHAPITRE 2 • LES PUISSANCES ÉLECTRIQUES	20
2.1 Énergie et puissance	20

2.2	Généralités sur la notion de puissance.....	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.....	28
2.7	Facteur de puissance, compensation de la puissance réactive.....	29
2.8	Puissances électriques en régime périodique non-sinusoïdal.....	31
2.9	Mesure des puissances électriques.....	33
	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, RÉOLUTIONS 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
6.6	Loi de Lenz et équations générales des couplages magnétiques linéaires	99
6.7	Modélisation générale des couplages linéaires	102
	Exercices	104
CHAPITRE 7 • CIRCUITS MAGNÉTIQUES À AIMANTS PERMANENTS		108
7.1	Point de fonctionnement d'un aimant permanent inséré dans un circuit magnétique	108
7.2	Critère de choix d'un aimant permanent	110
7.3	Caractéristiques particulières des différents types d'aimants et utilisations classiques	111
7.4	Détermination pratique des dimensions d'un aimant permanent...	112

Exercice	113
CHAPITRE 8 • ÉNERGIES, PUISSANCES ET FORCES LIÉES AU MAGNÉTISME, MÉTHODE DES TRAVAUX VIRTUELS	114
8.1 Formules générales des énergies d'un matériau aimanté	114
8.2 Variations d'énergie, puissance et force	117
8.3 Principe de réluctance minimale	119
8.4 Méthode des travaux virtuels	120
8.5 Dimensionnement des circuits magnétiques – produit $A_e \cdot S_b$	124
Exercices	130
CHAPITRE 9 • TRANSFORMATEURS	134
9.1 Transformateur monophasé idéal	134
9.2 Mieux comprendre le transformateur	137
9.3 Le transformateur monophasé réel et son modèle	138
9.4 Grandeurs associées au schéma et chute de tension au secondaire	140
9.5 Notions complémentaires associées au transformateur réel	142
9.6 Transformateurs triphasés	145
9.7 Impédances associées aux transformateurs et ordres de grandeur .	148
9.8 Transformateurs en parallèle	152
9.9 Autotransformateurs	154
Exercices	155
CHAPITRE 10 • MATÉRIAUX ISOLANTS ET CONDENSATEURS	159
10.1 Introduction	159
10.2 Matériaux isolants	159
10.3 Approche physique du condensateur	161
10.4 Formules courant/tension et énergies	163
10.5 Schéma équivalent et comportement en fréquence	164
10.6 Technologies de construction des condensateurs	165

10.7	Applications classiques du domaine de l'énergie	167
10.8	Supercondensateurs.....	171
CHAPITRE 11 • CONVERTISSEURS ÉLECTROMÉCANIQUES		174
11.1	Champ d'application et classification.....	174
11.2	Principes généraux.....	175
11.3	Les grandes familles de machines électriques.....	177
11.4	Machines à courant continu (MCC), machines « à collecteur »	177
11.5	Machines synchrones (MS).....	180
11.6	Machines asynchrones (MAS) ou « Machines à induction »	185
11.7	Moteurs « pas à pas ».....	187
11.8	Nombres de « pôles » des machines électriques	190
11.9	Illustrations	193
CHAPITRE 12 • MACHINES À COURANT CONTINU		196
12.1	Principes et relations générales.....	196
12.2	Fonctionnement en régime permanent continu linéaire	200
12.3	Non-linéarités dues à la saturation du circuit magnétique	202
12.4	Fonctionnement en régime transitoire.....	204
12.5	Les différents montages des machines à courant continu.....	208
	Exercices	211
CHAPITRE 13 • ALTERNATEURS ET MACHINES SYNCHRONES		213
13.1	Principes et relations générales.....	213
13.2	Alternateur indépendant débitant sur charge linéaire	220
13.3	Machine synchrone couplée à un réseau d'énergie infinie	222
13.4	Réaction d'induit d'une machine synchrone	224
13.5	Étude des machines à pôles lisses : diagramme de Potier	226
13.6	Étude des machines à pôles saillants : diagramme de Blondel	228
13.7	Impédances associées réduites, ordres de grandeur	230

13.8 Moteur synchrone.....	232
Exercices	235
CHAPITRE 14 • MACHINES ASYNCHRONES	238
14.1 Principes et relations générales.....	238
14.2 Fonctionnement à tension et fréquence constantes.....	244
14.3 Démarrage des moteurs asynchrones	248
14.4 Variation de vitesse des moteurs asynchrones.....	249
14.5 Fonctionnement en génératrice et en frein	255
14.6 Moteurs asynchrones monophasés.....	256
Exercices	257
CHAPITRE 15 • TRANSFORMATIONS MATRICIELLES. MODÈLES « D, Q » DES MACHINES À COURANTS ALTERNATIFS TRIPHASÉS	261
15.1 Matrices d'impédances et d'inductances	261
15.2 Transformations matricielles classiques	262
15.3 La transformée de Park et le repère du champ tournant.....	264
15.4 Modèle « d,q » des machines synchrones	267
15.5 Modèle « d,q » des machines asynchrones	272
15.6 Conclusion sur les modèles d,q	276
CHAPITRE 16 • HARMONIQUES ET RÉGIMES DÉFORMÉS	278
16.1 Bases mathématiques de l'étude des harmoniques.....	279
16.2 Expressions des puissances en régime déformé	285
16.3 Sources, propagation et conséquences des harmoniques.....	288
16.4 Harmoniques pairs et impairs, courant de neutre	289
16.5 Réduction et compensation des harmoniques	292
Exercices	292

CHAPITRE 17 • LES RÉSEAUX ÉLECTRIQUES	296
17.1 Introduction	296
17.2 Structure générale des réseaux électriques.....	296
17.3 Production de l'énergie électrique.....	297
17.4 Caractéristiques générales du transport et de la distribution.....	299
17.5 Principes fondateurs des réseaux électriques.....	302
17.6 Phénomènes liés au fonctionnement des réseaux électriques en AC	306
17.7 Stratégie de fonctionnement des réseaux.....	311
17.8 Outils de modélisation et d'étude des réseaux électriques.....	316
17.9 Exemples de calculs liés aux modélisations.....	321
17.10 Réseaux en haute tension continue – HVDC	325
CHAPITRE 18 • ÉNERGIE PHOTOVOLTAÏQUE ET BATTERIES	334
18.1 Introduction	334
18.2 Modules solaires photovoltaïques	334
18.3 Installations photovoltaïques et raccordement au réseau	339
18.4 Conclusion portant sur l'énergie photovoltaïque	344
18.5 Batteries d'accumulateur et stockage d'énergie électrique.....	345
Exercices	350
CONCLUSION	355
BIBLIOGRAPHIE ET LIENS	357
INDEX	359

Avant-propos

S'intéresser à l'énergie électrique, c'est s'intéresser à comprendre et à utiliser une multitude de sciences et de techniques actuelles. L'énergie électrique occupe en effet une place tout à fait centrale, à la fois au sein des « sciences de l'ingénieur » mais plus généralement au cœur du tissu industriel mondial. 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 doit 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 telle 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 troisième édition de cet ouvrage, qui auparavant était appelé « électrotechnique et énergie électrique », 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 troisième édition sont essentiellement centrées sur les nouvelles parties et les nouveaux chapitres qui l'enrichissent.

Le *chapitre 6* présente ainsi, en complément à l'étude des circuits magnétiques en régime alternatif, une approche pédagogique de la loi de Lenz-Faraday et une généralisation des équations de couplage des circuits magnétiques. Ce type d'équations est très utilisé actuellement pour l'étude et le dimensionnement des circuits couplés sans noyaux magnétiques.

Le *chapitre 8*, qui est dédié aux énergies et aux forces associées au magnétisme, est amélioré par une approche très générale des circuits magnétiques bobinés et par l'expression concrète des énergies qu'ils permettent de stocker. La présentation des grandeurs importantes mises en jeu permet alors de comprendre le dimensionnement des inductances et des transformateurs utilisés en électronique de puissance.

Le *chapitre 17* dédié aux réseaux électriques évolue également avec une présentation des réseaux électriques à haute tension continue dits « HVDC ». Cette partie supplémentaire permet également de souligner les limites et les contraintes imposées par l'utilisation du courant alternatif dans les réseaux électriques et de justifier l'augmentation spectaculaire des projets de réseaux HVDC actuelle.

Le *chapitre 18* est nouveau. Il détaille les principes de fonctionnement des générateurs photovoltaïques, et leur intégration au réseau électrique moderne via l'électronique de puissance. Ce chapitre aborde également les technologies et les particularités liées à l'utilisation des batteries d'accumulateur qui sont très largement associées à l'exploitation de l'énergie solaire en courant continu.

Remerciements

Je tiens à remercier en premier lieu 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, sa qualité d'ami intime et pour les innombrables bénéfices intellectuels que j'ai reçus en le côtoyant. Les mots ne seront certainement pas assez forts pour exprimer ce qui me lie à lui et à Jacqueline sa femme.

Je remercie l'Université de Bordeaux et les nombreuses personnes qui lui donnent vie, tout particulièrement pour la confiance et la liberté qu'elles m'offrent dans mon travail depuis maintenant 17 ans. Je pense surtout au personnel du CREEA : Didier Geoffroy, Stéphane Ygorra, Xavier Bertrand, Xavier Schal et Myriam Boutges en première ligne.

Je reconduis bien sur les remerciements des éditions précédentes vis-à-vis de mes contacts dans l'entreprise RTE : M. Benoît Delourme, M. Jean-Marc Debruyne, M. Bruno Duvallet, et tous les anciens du SFRTE.

Je remercierai éternellement M. Bernard Multon, M. Gilles Feld, MM. Guy et Michel Lavabre, M. Alain Cunière, tous connus à l'École Normale Supérieure de Cachan en tant qu'étudiant et tous devenus, et restés, des collègues accessibles, passionnés et passionnants malgré les distances, les années et les aléas de la vie.

Je remercie sincèrement les lecteurs qui m'ont contacté pour me donner leurs avis sur ce livre, et surtout pour m'indiquer les erreurs et les coquilles dans les versions précédentes, en particulier M. Hennequin, M. Mesle, M. Nouguey.

Pour finir, les enfants grandissent et ils m'offrent en particulier cet équilibre nécessaire à une vie bien remplie. Je leur dédie tout mon travail et tout mon amour, ainsi qu'à Armelle et à ma mère.

Une pensée pour Paul... je te dois beaucoup.

Introduction

Avant de commencer à parcourir cet ouvrage, il est important de bien savoir en quoi consiste l'étude de l'énergie électrique 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. Cette introduction est donc destinée à répondre, de façon préalable, à quelques questions simples énoncées ci-dessous :

1 QU'EST CE QUE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE ?

Cette matière fait partie intégrante des « sciences de l'ingénieur » et regroupe l'ensemble des connaissances scientifiques et technologiques associées aux industries suivantes :

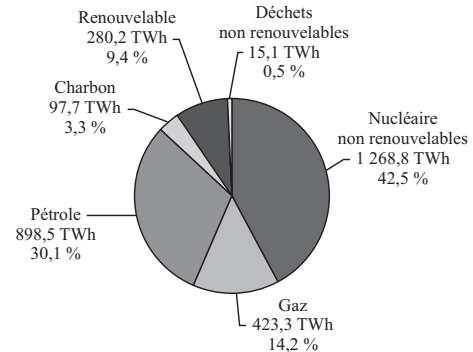
- L'industrie de la production d'énergie électrique, c'est-à-dire l'ensemble des centrales thermiques, nucléaires, hydroélectriques, éoliennes, etc.
- L'industrie du transport ou de la distribution électrique, c'est-à-dire l'ensemble des lignes électriques constituant le maillage des territoires, des 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 la notion d'**énergie**, qui est fondamentale et incontournable dans le monde physique. C'est ce qui fait que le champ d'application de cette matière est si vaste.

Sur un plan purement scolaire, l'énergie électrique 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.

2 QUELLE EST AUJOURD'HUI LA PLACE DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE PARMIS 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 2015 (source : <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/>).



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

Figure 1 L'énergie primaire en France (2015)

Il est bien visible sur ce graphe que plus de 45 % de l'énergie totale consommée l'a été sous forme d'électricité (l'énergie éolienne et photovoltaïque 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 1970 à 2015 ainsi que le détail des sources utilisées. (Source du graphique : <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/>). 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.

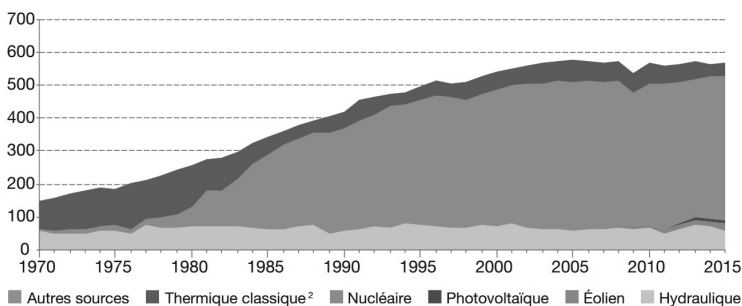


Figure 2 Production d'électricité (TWh) en France de 1970 à 2015

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 se confirme, et ce essentiellement dans les pays à fort taux de croissance.

3 QUELS SONT LES DOMAINES CONCERNÉS PAR L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE ?

En réalité, elle 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'ingénierie électrique.

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 cycle 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 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 : 978-2-10-055625-0) 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'ingénieurs.

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.

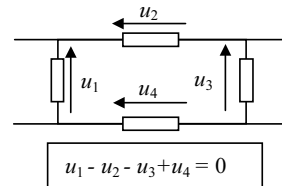


Figure 1.1 Loi des mailles

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.

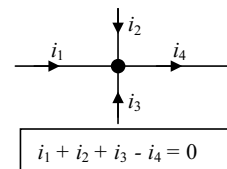
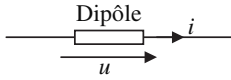


Figure 1.2 Loi des nœuds

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

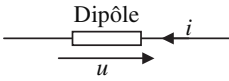
« **convention récepteur** ». Les figures ci-dessous représentent ces orientations de principe, parallèlement il faut retenir que ces deux conventions se rapportent au sens « pressenti » d'écoulement des puissances d'un générateur vers un récepteur électrique.



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.

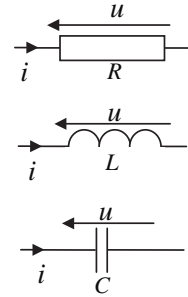
1.2 RÉCEPTEURS ÉLECTRIQUES LINÉAIRES

En électricité il existe, à la base de tout, trois phénomènes élémentaires : la conduction, l'isolation et le magnétisme. La conduction idéale dans un métal correspond au simple fait que le courant se révèle proportionnel à la force électromotrice nécessaire à son existence. En d'autres termes la tension s'écrit comme le produit du courant et d'une constante appelée « résistance électrique ». Dans le cas d'un isolant parfait, une force électromotrice appliquée aux bornes d'un isolant implique la présence d'une charge électrique stockée. Cette charge s'y révèle proportionnelle, elle s'écrit alors comme le produit de la tension et d'une constante appelée « capacité de l'isolant ». Le courant étant la simple dérivée de la charge électrique, celui-ci s'écrit comme le produit de la capacité avec la dérivée de la tension. Enfin, tout courant électrique induit un flux du « champ magnétique » auquel il est proportionnel dans les cas simples et en dehors des phénomènes dus à certains matériaux. Comme la tension induite par ce phénomène est égale à la dérivée du flux total (voir : Loi de Lenz), celle-ci se révèle être le produit de la dérivée du courant par une constante appelée « inductance ».

Pour retenir facilement ces lois, et pouvoir décomposer la superposition de tous ces phénomènes en éléments simples, on dit alors qu'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 : $u(t) = L.\frac{d i(t)}{d t}$

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

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

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

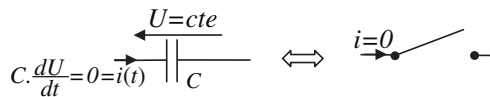
Ces formules sont fondamentales et décrivent le comportement de ces dipôles de façon générale. Pourtant, en fonction des particularités des tensions d'alimentation des circuits électriques, il existe des simplifications possibles, ou encore d'autres écritures de ces formules. Il est ainsi fondamental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

1.3 RÉGIME CONTINU ET RÉGIMES VARIABLES

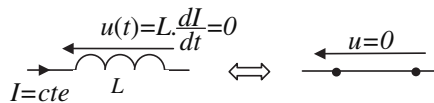
1.3.1 Régime continu

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 ».



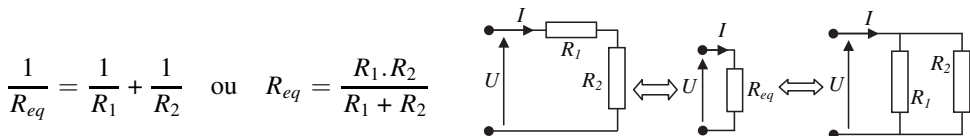
- Les inductances sont équivalentes à des « courts-circuits ».



- Association de deux résistances en série :

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

- Association de deux résistances en parallèle :



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

- 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).

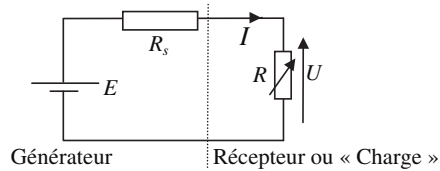


Figure 1.3 Régime continu, association générateur récepteur

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

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.

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.

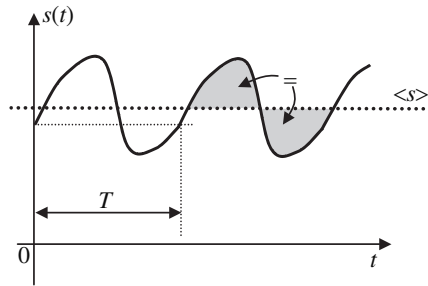


Figure 1.4 Grandeur périodique quelconque

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 $\langle s \rangle$ sa valeur moyenne dont on retiendra l'écriture générale :

$$S_{\text{moy}} = \langle s \rangle = \frac{1}{T} \int_{(T)} s(t) dt$$

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 : $\langle s \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T s(t) dt$, 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 :

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

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 $\langle s \rangle = \langle s_1 \rangle + \langle s_2 \rangle$ mais attention : $S_{\text{eff}} \neq S_{1\text{eff}} + S_{2\text{eff}}$.

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.

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 :

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

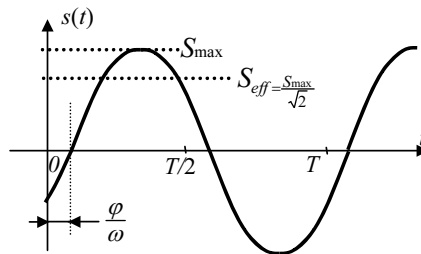


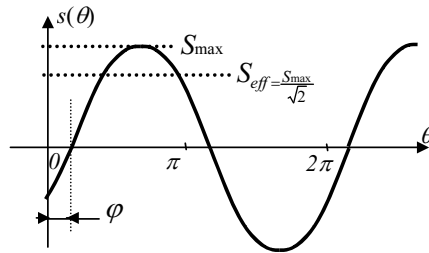
Figure 1.5 Caractéristiques des grandeurs sinusoïdales

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

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 $\theta = \omega \cdot t$ (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 $\theta = \omega \cdot t$ sont plus faciles à réaliser qu'en utilisant la variable t .

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

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

NB : Démonstration de la formule de la valeur efficace

$$\begin{aligned}
 S_{eff} = S &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_{(T)} s^2(t).dt} = \sqrt{\frac{S_{max}^2}{2\pi} \int_0^{2\pi} \sin^2(\theta).d\theta} \\
 &= \sqrt{\frac{S_{max}^2}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{1 - \cos(2\theta)}{2}.d\theta} = \sqrt{\frac{S_{max}^2}{4\pi} \int_0^{2\pi} d\theta} \\
 S_{eff} = S &= \sqrt{\frac{S_{max}^2}{4\pi} .2\pi} = \frac{S_{max}}{\sqrt{2}}
 \end{aligned}$$

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 : $a = r \cdot \cos \theta$ et $b = r \cdot \sin \theta$. Ainsi : $\underline{z} = a + j \cdot b = r(\cos \theta + j \cdot \sin \theta)$. D'où l'écriture polaire du nombre complexe :

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

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

Comme $\tan \theta = \frac{b}{a}$, on retiendra :

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

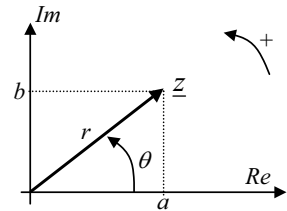


Figure 1.7 Plan et nombre complexes

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 simplification important relatif à l'écriture d'une grandeur utilisée abondamment dans les calculs ultérieurs. On écrit ainsi de façon classique une tension sinusoïdale d'alimentation sous la forme :

$$u(t) = U_{\max} \cdot \sin(\omega t) = U \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega t).$$

Par ailleurs, la grande majorité des récepteurs électriques sous tension sinusoïdale sont des récepteurs à tendance inductive. Ainsi, dans la plupart des cas, le courant $i(t)$ traversant un dipôle alimenté par la tension $u(t)$ est en « retard » par rapport à cette tension. En électrotechnique on écrit alors, par convention, les courants dans les charges sous la forme :

$$i(t) = I \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega t - \varphi).$$

Cette écriture (avec le signe « moins » dans le sinus) est une **convention d'écriture propre à l'électrotechnique** mais est rarement utilisée en électronique ou automatique. C'est juste une écriture « habituelle » qui se base sur la nature la plus fréquente des charges électriques. Les courants électriques représentés à partir de la *figure 1.8* seront **tous écrits** à partir de **cette convention**.

1.5.6 Notation complexe des tensions et des courants sinusoïdaux

Pour représenter une grandeur sinusoïdale il suffit, à fréquence constante, de connaître sa valeur efficace et sa phase. Le fait qu'il suffise de ces deux informations distinctes permet de dresser une équivalence entre une grandeur sinusoïdale et toute autre grandeur à deux dimensions, c'est-à-dire caractérisée également par deux coordonnées. Dans le domaine du génie électrique et en électrotechnique en particulier, c'est l'écriture sous forme « complexe », ou « vectorielle » qui est abondamment utilisée, elle correspond tout simplement au fait d'utiliser une équivalence entre une grandeur sinusoïdale et un vecteur.