Électronique de puissance

3e édition

Luc Lasne
Professeur agrégé à l'université de Bordeaux

Préface de Jean-Claude Gianduzzo
Enseignant-chercheur en Physique et électronique
à l'université de Bordeaux

DUNOD

Direction artistique : Élisabeth Hébert
Conception graphique : Pierre-André Gualino
Mise en page : Nord Compo
Illustration de couverture : © raigvi – Shutterstock.com



Pour aller plus loin et mettre toutes les chances de votre côté, des ressources complémentaires sont disponibles sur le site www.dunod.com.

Connectez-vous à la page de l'ouvrage (grâce aux menus déroulants, ou en saisissant le titre, l'auteur ou l'ISBN dans le champ de recherche de la page d'accueil).
Sur la page de l'ouvrage, sous la couverture, cliquez sur le lien « LES + EN LIGNE ».

© Dunod, Paris, 2011, 2015, 2020
ISBN 978-2-10-081507-4
11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff
www.dunod.com

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

Avant d'acheter ou de lire un livre, le lecteur aime bien faire défiler les pages entre ses doigts, respirer l'odeur de l'encre qui s'en échappe et prendre un premier contact avec son contenu. Le livre de Luc Lasne fera alors tout de suite apparaître son intention : fournir au lecteur quantité d'illustrations, de chronogrammes, de graphiques, de schémas, de fiches techniques, non seulement dans la partie cours, mais aussi dans la partie consacrée aux problèmes et à leurs solutions. Il n'a pas ménagé sa peine pour illustrer son propos. Son dessein est clair : attirer à la fois l'œil et l'esprit du futur lecteur vers une discipline qu'il affectionne.

L'objectif est de faire découvrir la finalité de l'électronique de puissance, l'ensemble des conversions de l'énergie électrique et les moyens mis en œuvre pour les réaliser. D'entrée, le lecteur va découvrir ce qu'est la « conversion de l'énergie électrique », la place qu'occupe l'électronique de puissance dans le secteur industriel et dans nos activités quotidiennes. Il découvrira les bases et les notions fondamentales de la discipline, centrées sur la nécessité de travailler « en commutation » pour pouvoir atteindre de forts rendements et sur le fait que certaines modalités dans le transfert d'énergie électrique de la source vers le récepteur sont alors à respecter.

Luc Lasne met tout son talent de pédagogue pour nous faire découvrir les principes et la synthèse des convertisseurs les plus usuels à partir de leurs caractéristiques, sans s'embarrasser de phénomènes inessentiels dans un premier contact avec le sujet. L'objectif affiché est de bien faire assimiler les bases, elles sont si importantes ! Ne nous leurrons pas, cette discipline est difficile mais quel bonheur pour l'étudiant, l'ingénieur, de pouvoir un jour en explorer tous les aspects : l'électronique de commande, le convertisseur, le moteur (convertisseur rotatif) ou la charge, les asservissements associés, et même l'informatique permettant la programmation des stratégies de contrôle et de commutation. Ce sont alors toutes les disciplines de l'EEA qui seront réunies dans l'approche de ces systèmes.

Ce cours est abondamment illustré, aussi bien par des exemples concrets que par des applications numériques. Le recours à des documentations techniques fait découvrir au lecteur les réalités du monde des composants (rôle de la température, des tensions inverses, des courants moyens ou de pointe tolérables…). Les données numériques concernent généralement des convertisseurs ayant à transférer de petites puissances, mais cela n'enlève rien à la généralité du propos. Et pour un premier contact, on reste à une échelle… disons humaine.

N'oublions pas que l'électronique de puissance est née du besoin de redresser de forts courants, de commander des moteurs électriques, l'activité ayant été majoritairement industrielle ; les puissances converties pouvant dépasser plusieurs dizaines de MW. Au fil du temps se sont développés les outils portatifs, l'électroménager, les

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

dispositifs industriels basse énergie, nos chargeurs de téléphone portable… et bien d'autres objets dont la liste serait difficile à énoncer ! Ceci a eu pour conséquence le développement parallèle de convertisseurs de faible puissance qui ont envahi notre univers. Si dans ces systèmes les ordres de grandeur des puissances converties vont du Watt (ou même moins !) à quelques kW pour l'électroménager, les principes de conversion restent les mêmes que pour les fortes puissances et présentent l'avantage d'être « à portée de main » du lecteur qui s'y intéressera.

L'emploi de ces convertisseurs est ainsi illustré par des problèmes ou études de cas rédigés à cet effet. Pour illustrer le fonctionnement des redresseurs, l'étude d'un pont PD2 sur plusieurs types de charges classiques est présenté. Pour compléter et illustrer le cours sur les hacheurs, ce sont plusieurs circuits qui sont explorés, des hacheurs « BOOST entrelacés » très actuels, en passant par les alimentations à découpage aujourd'hui omniprésentes, en passant par l'interface de commande d'un Half Bridge, sujet crucial qui a fait l'objet d'études spécifiques de la part des chercheurs, compte tenu de la situation particulière du transistor du haut. Ainsi le rôle du Driver est démystifié. Pour illustrer l'usage d'un onduleur, un modèle simplifié de chauffage par induction est proposé, et enfin un circuit complet programmable et multifonction permettra au lecteur une réalisation complète lui permettant de gérer des puissances en DC ou en AC à hauteur de 40V/30A ! Un esprit curieux en comprendra aisément le fonctionnement, et pourra se lancer dans la réalisation, voire dans la conception.

Cet ouvrage est à mettre entre les mains de tous ceux qui désirent avoir un large panorama de l'Électronique de Puissance. Il est vrai qu'un seul ouvrage ne suffirait pas pour cerner l'ensemble des problèmes rencontrés dans cette discipline, mais celui-ci permet d'acquérir une « vision » et aussi une certaine manière de raisonner permettant au lecteur de se plonger par la suite dans les ouvrages les plus spécialisés.

Jean-Claude GIANDUZZO
Enseignant-chercheur en Physique et Électronique de l'université de Bordeaux

TABLE DES MATIÈRES

Préface III

Table des matières V

Avant-propos IX

Remerciements X

Introduction XI

Chapitre 1 • Généralités et notion de « convertisseur à découpage » 1
1.1 Notions de base et « découpage » 1
1.2 Classification des convertisseurs statiques 5
1.3 Généralités sur l'architecture des convertisseurs 6

Chapitre 2 • Bases théoriques et régimes électriques 12
2.1 Lois de base et conventions des dipôles électriques 12
2.2 Récepteurs électriques linéaires 14
2.3 Régime continu et régimes variables 15
2.4 Valeurs caractéristiques des grandeurs périodiques 17
2.5 Régime sinusoïdal (AC) monophasé 18
2.6 Régime sinusoïdal (AC) triphasé 21
2.7 Régimes déformés et harmoniques 22

Chapitre 3 • Présentation générale des circuits de l'électronique de puissance 30
3.1 Convertir l'alternatif en continu 30
3.2 Convertir l'alternatif en alternatif (à fréquence fixe) 34
3.3 Convertir le continu en continu (de valeur différente) 36
3.4 Convertir le continu en alternatif 37

Chapitre 4 • Diodes et conversion AC/DC non commandée 40
4.1 Présentation de la conversion AC/DC non commandée 40
4.2 Le composant de base : la diode 41
4.3 Redressement à diode simple (mono-alternance) 43
4.4 Redressement à diode double (double alternance) 47
4.5 Procédés de « lissage » ou de filtrage 51

Chapitre 5 • Thyristors et conversion AC/DC commandée 56
5.1 Présentation de la conversion AC/DC commandée 56

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

5.2 Le composant commandé : le thyristor 57
5.3 Redressement commandé simple 61
5.4 Redressement commandé double 65
5.5 Transferts de puissance des montages redresseurs 70

Chapitre 6 · Triacs et conversion AC/AC directe 73
6.1 Présentation de la conversion AC/AC directe 73
6.2 Composant commandé bipolaire en courant : le TRIAC 74
6.3 Conversion AC/AC directe : le Gradateur 77
6.4 Conversion AC/AC indirecte 86

Chapitre 7 · Transistors de puissance et conversion DC/DC 87
7.1 Présentation de la conversion DC/DC 87
7.2 Composants commandés à l'amorçage et au blocage 91
7.3 Montages hacheurs non isolés non réversibles 95
7.4 Montages hacheurs isolés 109
7.5 Montages hacheurs réversibles 116
7.6 Hacheurs entrelacés (*interleaved converters*) 123

Chapitre 8 · Conversion DC/AC 131
8.1 Présentation de la conversion DC/AC 131
8.2 Principes et structures de base des onduleurs 131
8.3 Stratégie de commande « PWM » des onduleurs 146
8.4 Ponts à point milieu et onduleurs multiniveaux 154

Chapitre 9 · Principes de synthèse et modélisation des convertisseurs statiques 161
9.1 Notions importantes sur l'architecture des convertisseurs 161
9.2 Principes généraux de la synthèse des convertisseurs 166
9.3 Exemple : Synthèse complète d'un convertisseur DC/DC 10 W 169
9.4 Modèles dynamiques des convertisseurs à découpage 177
9.5 Fonctions de transfert des convertisseurs à découpage 185

Chapitre 10 · Pertes et évacuation thermique liées aux composants de puissance 189
10.1 Généralités sur les pertes dans les composants de puissance 189
10.2 Expressions particulières des pertes liées aux composants 193
10.3 Notions de thermique générale 201
10.4 Dissipation thermique dans les composants de puissance 206
10.5 Influence du mode de conduction (CCM, DCM, BCM) sur les pertes 211

Chapitre 11 · Circuits intégrés de puissance et régulateurs intégrés 214
11.1 Redresseurs intégrés 214
11.2 Ponts complets intégrés, applications et particularités 215
11.3 Régulateurs DC intégrés polyvalents 220

Chapitre 12 · Problème : Redresseur PD2 sur différents types de charges 229
12.1 Présentation du circuit 230

12.2 Redresseur sur charge résistive 230
12.3 Redresseur sur charge inductive 231
12.4 Redresseur sur charge capacitive 232
12.5 Redresseur à sortie filtrée 232
12.6 Redresseur sur charge active 233
12.7 Correction : Redresseur sur charge résistive 233
12.8 Correction : Redresseur sur charge inductive 237
12.9 Correction : Redresseur sur charge capacitive 240
12.10 Correction : Redresseur à sortie filtrée 243
12.11 Correction : Redresseur sur charge active 244

Chapitre 13 · Problème : Pont complet multifonction (UPC v4) 247
13.1 Présentation du circuit et logique de commande 248
13.2 Généralités sur le circuit intégré de puissance BTN8962 249
13.3 Montage full bridge pour moteur DC 250
13.4 Montage full bridge pour charge AC 252
13.5 Correction : Présentation du circuit et logique de commande 254
13.6 Montage full bridge pour moteur DC 260
13.7 Montage full bridge pour charge AC 264
13.8 Circuit UPC (v4) : photographies, typons et liens pour la CAO 267

Chapitre 14 · Problème : Petit hacheur BOOST régulé en tension 269
14.1 Présentation du circuit 270
14.2 Le hacheur BOOST 271
14.3 Étude de la conduction discontinue 272
14.4 Analyse de la commande et de la régulation de tension 272
14.5 Étude des commutateurs et des pertes 274
14.6 Correction : Le hacheur BOOST 274
14.7 Correction : Étude de la conduction discontinue 279
14.8 Correction : Analyse de la commande et de la régulation de tension 282
14.9 Correction : Étude des commutateurs et des pertes 284

Chapitre 15 · Problème : Hacheur réversible et problématique de commande de grille 286
15.1 Hacheur réversible en courant 287
15.2 Problématique de commande du bras de pont 288
15.3 Commande de type « BOOTSTRAP » 290
15.4 Driver «opto-isolé» à alimentation flottante 291
15.5 Correction : Hacheur réversible en courant 293
15.6 Correction : Problématique de commande du bras de pont 296
15.7 Correction : Commande de type « BOOTSTRAP » 298
15.8 Correction : Driver « opto-isolé » à alimentation flottante 300

Chapitre 16 · Problème : Onduleur monophasé à commande décalée pour chauffage par induction 304
16.1 Étude de la commande décalée 305
16.2 Bobine de chauffage par induction 306

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

16.3 Étude des commutateurs et du rendement 308
16.4 Onduleur à résonance et variation de puissance 308
16.5 Correction : Étude de la commande décalée 310
16.6 Correction : Bobine de chauffage par induction 314
16.7 Correction : Étude des commutateurs et du rendement 316
16.8 Correction : Onduleur à résonance et variation de puissance 317

Chapitre 17 • Problème : Convertisseur SEPIC 12V / 1A intégré 320
17.1 Étude de la structure SEPIC 321
17.2 Étude d'une réalisation pratique intégrée 323

Bibliographie et liens 332

Index 333

AVANT-PROPOS

L'électronique de puissance est une science appliquée qui traite de la « conversion statique de l'énergie électrique ». Elle représente une « branche » de l'électronique qui regroupe l'ensemble des technologies permettant d'opérer des « changements de forme » sur les courants et les tensions porteurs d'énergie électrique. Actuellement, le parc technologique associé à cette matière est très vaste et il est important de noter que les circuits correspondants sont présents dans la quasi-totalité des appareils électriques domestiques et industriels. Pourtant, il n'existe qu'un nombre relativement réduit de structures permettant de réaliser l'ensemble des conversions et un procédé particulier, appelé « découpage », fédère même aujourd'hui leurs fonctionnements. Il est donc possible d'aborder cette matière de façon très structurée, en assimilant au départ les principes et notions de base qui permettent, par la suite, d'étudier et de comprendre l'intégralité des circuits abordés.

Cet ouvrage a ainsi été conçu pour proposer aux étudiants, aux élèves ingénieurs, ou à toute personne intéressée par cette matière, une approche organisée, progressive et un peu « inédite ». La particularité de ce livre réside en effet dans la place importante faite à l'étude de circuits et d'applications réelles. En parallèle avec les chapitres dédiés au cours brut, le *chapitre 3* propose une découverte synthétique et illustrée des circuits classiques de conversion, et les *chapitres 12* à *17* sont constitués d'études de cas illustrant et complétant les structures de conversions étudiées et leurs commandes. Cette troisième édition a été l'occasion d'ajouter beaucoup de contenu relatif à la généralisation des structures half bridge et full bridge, à l'intégration de ces structures et à leur commande, à l'approche des commandes numériques, autrement dit de la programmation des microcontrôleurs qui font partie de l'environnement proche des circuits de puissance, mais aussi au développement concernant les structures « entrelacées » et les onduleurs multiniveaux. Le chapitre sur la synthèse des convertisseurs s'enrichit également d'un important rajout sur la modélisation et la simulation du fonctionnement des convertisseurs à partir des équations d'état qui les caractérisent.

Le chapitre 13 est nouveau, il remplace un ancien problème et est constitué d'une approche commune pour l'étude d'un convertisseur DC/DC et DC/AC. Il se termine par des photographies du circuit réel et des fichiers de conception CAO et propose un lien vers un logiciel libre où retrouver ces sources. Le lecteur pourra ainsi, après l'étude structurelle et technologique, s'inspirer de ce circuit multifonction, ou même le réaliser tel quel, afin de disposer d'un véritable circuit de puissance capable d'alimenter une belle diversité de charges sous des tensions facilement accessibles (DC < 50 V).

Chacune de ces études de cas est présentée sous la forme d'un problème corrigé, que le lecteur pourra traiter en tant que préparation à un examen, ou simplement parcourir pour découvrir le fonctionnement du circuit traité, les grandeurs étant exposées sous la forme d'oscillogrammes, de mesures et de documentation réels.

C'est donc en regroupant un cours conventionnel, des synthèses pédagogiques, des développements expérimentaux et des études de cas rédigés sous forme de problèmes corrigés que cet ouvrage propose de découvrir, de façon assez complète, l'électronique de puissance.

Ce cours s'adresse de façon très générale aux étudiants des « sciences de l'ingénieur » et plus généralement des sciences physiques. À ce titre, il convient aux formations de type IUT, BTS, aux cycles universitaires Licence et Masters, ainsi qu'aux écoles d'ingénieurs de formation généraliste ou spécialisée, mais aussi aux préparations aux concours de l'enseignement CAPET, CAPES et Agrégation.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

Remerciements

La troisième édition de cet ouvrage est pour moi l'occasion de remercier et de saluer tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à mon travail.

En tout premier lieu, et comme d'habitude dans le cadre de mon travail éditorial, je remercie du fond du cœur M. Jean-Claude Gianduzzo pour ses relectures, pour ses conseils, et pour l'intégralité de ce qu'il représente pour moi de façon plus large. À travers son passé de chercheur en physique à l'université de Bordeaux, et à travers toute la personne qu'il est, je le remercie. Sur le plan purement personnel, je remercie Jean-Claude et sa femme Jacqueline pour l'accueil permanent qu'ils m'offrent semaine après semaine, année après année…

Je remercie ensuite les éditions Dunod, et plus précisément M. Guillaume Clapeau et Eléna Chryssos sans qui ce livre n'existerait pas. Merci pour votre confiance plus que renouvelée, votre travail de montage et d'agencement de la collection, et merci de façon générale pour cette collaboration avec Dunod qui date maintenant de 15 ans !

Je remercie de façon très large tous mes collègues au sein de l'université de Bordeaux qui constitue pour moi un cadre heureux et hautement stimulant. De façon plus ciblée, je remercie toute l'équipe du Centre de Ressources EEA de l'université de Bordeaux : Myriam Boutges, Xavier Schal, Xavier Bertrand, Stéphane Ygorra, Didier Geoffroy et Laurent Fouquet. Ce dernier, avec toute mon amitié, sera peut-être un des lecteurs les plus attentifs de cet ouvrage dans les années à venir et je le remercie du fond du cœur pour tout ce qui nous rapproche déjà dans le travail, et aussi en dehors du travail. Je remercie également M. Benjamin Thomas du CENBG pour toutes les collaborations stimulantes dont il est l'origine, et également Jessica pour la touche de finesse et de tendresse qu'elle ajoute dans ce monde (malgré le fer à souder dans son sac).

Très simplement et sincèrement, je remercie TOUS mes étudiants. Ils font de mon métier une source de bonheur et d'équilibre personnel. Et s'il est si agréable pour moi d'enseigner aujourd'hui, c'est surtout à travers le partage et la relation privilégiée qui peut exister entre eux et moi. J'ai souvent l'impression que c'est surtout moi qui m'enrichis à leur contact, et je leur dois beaucoup…

Je tiens ensuite à remercier les enseignants, les collègues et les amis qui gravitent autour de l'électronique de puissance. Dans le désordre : M. Gilles Feld, MM. Michel et Guy Lavabre, M. François Forest, M. Bernard Multon, M. Alain Cunière, M. Didier Geoffroy, M. Jean-Michel Vinassa, et de façon encore plus proche M. Xavier Carcelle et M. Laurent Henry ainsi que M. Vincent Creuze. Je remercie également l'École normale supérieure de Cachan (qui s'appelle maintenant Paris-Saclay) dont proviennent la majorité des personnes citées ci-dessus.

Je passe maintenant les frontières avec un remerciement particulier pour M. Simon Ravyts (le « Best of Power Switching Electronics » Belge), Inneke et le petit Kamiel qui a vu le jour cette année. Je remercie Simon de me joindre à ses recherches et de façon particulière pour toute la connaissance qu'il m'a apporté à propos des lois de commandes « BCM » et des bières belges.

Je finis par des remerciements aux intimes, à celles et ceux qui ont supporté au jour le jour mes mauvaises humeurs et mes préoccupations d'écriture. Comme je le formulais dans l'édition précédente que je viens de relire, je ne saurais dire mieux : « Sans mes parents et ma sœur, sans toi Armelle, sans vous Salomé et Vadim, je ne serais rien. Je vous dois tellement… Merci. »

INTRODUCTION

Avant d'aborder les différents chapitres de cet ouvrage, il semble important de bien identifier ce que représente « l'électronique de puissance » aujourd'hui. En particulier, le fait de bien situer les attentes et les technologies qui ont permis à cette matière de s'affirmer dans les sciences actuelles permet de mieux comprendre ses « grandes idées », ses concepts et contraintes importants, ou encore ses grandeurs spécifiques.

Cette introduction est ainsi destinée à bien appréhender l'électronique de puissance **avant** de s'intéresser de façon ciblée aux spécificités de ses circuits et aux calculs qui y sont associés. Le lecteur est ainsi invité à se laisser guider par quelques questions simples énoncées ci-dessous… et à se laisser convaincre par leurs réponses.

QU'EST-CE QUE « L'ÉLECTRONIQUE DE PUISSANCE » ?

L'électronique de puissance est une matière assez récente. Si ses prémices datent de l'utilisation des premiers tubes à vide (Thyratron, triodes, etc.) dans les années 1930, « l'explosion » des applications liées à cette matière est due au développement des thyristors puis des transistors spécifiques dits « transistors de puissance » dans les années 1970. L'évolution permanente de ces composants n'a cessé depuis d'apporter de nouvelles possibilités et d'étendre l'influence de cette matière à pratiquement tout ce qui consomme de l'énergie électrique en basse tension…

En réalité, l'électronique de puissance peut être définie par « **la partie de l'électronique spécialisée dans le changement de forme des tensions et de courants électriques associés à l'aspect énergétique des circuits électriques** ». On l'appelle aussi « conversion statique de l'énergie électrique ».

En d'autres termes dès lors qu'un circuit électrique puise son énergie à partir d'une source donnée, les tensions et les courants produits par cette source ont des formes spécifiques dépendant de sa nature. Ainsi, une batterie de voiture produit une tension continue (de 12 V le plus souvent) quasiment constante, les alternateurs comme les réseaux électriques produisent des systèmes triphasés de tensions alternatives sinusoïdales, une cellule photovoltaïque produit une tension continue dépendant de l'intensité lumineuse qui la crée, etc.

De même, les circuits électriques qui utilisent cette énergie nécessitent des tensions parfois alternatives, parfois continues, et présentant des valeurs précises liées à leur fonctionnement. Il y a donc très souvent nécessité d'utiliser une sorte de circuit « interface » permettant de rendre compatibles les sources et les récepteurs (voir *figure 1*).

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

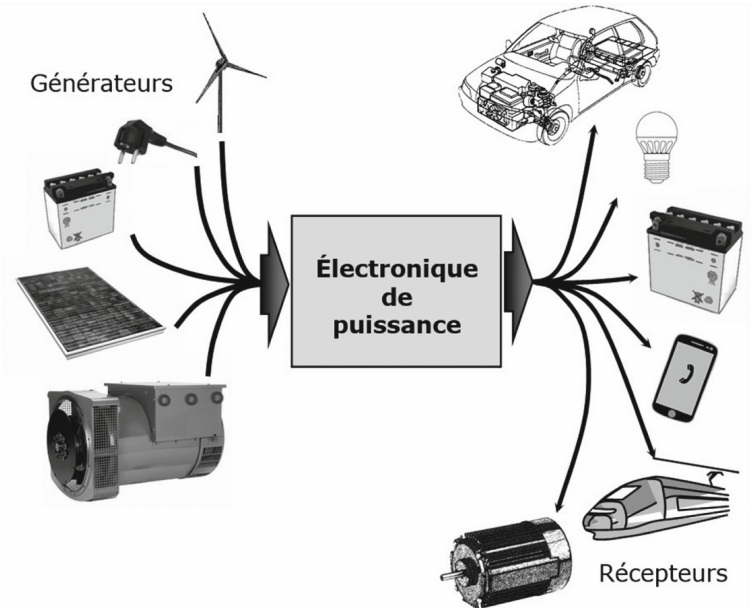


Figure 1 – **L'électronique de puissance, le lien entre les diverses formes d'énergie électrique.**

Comme il s'agit alors pour ces circuits de faire transiter l'intégralité de l'énergie consommée par les récepteurs, il convient également que ceci s'opère avec un bon rendement, un minimum d'encombrement et de contraintes, et éventuellement des possibilités de contrôle et de protection.

Ainsi, depuis plusieurs décennies, l'optimisation des rendements de ces circuits, la réduction de leurs encombrements, l'amélioration permanente de leurs capacités de commande et de contrôle ont été possibles grâce à l'utilisation de composants et de circuits électroniques dédiés et évolutifs. Leur utilisation est aujourd'hui généralisée à l'ensemble des circuits électriques et électroniques et est toujours en forte évolution.

On retiendra ainsi que **« l'électronique de puissance regroupe l'ensemble des technologies qui permettent, avec de forts rendements, de faire le lien entre les différentes natures des sources d'électricité et la grande diversité des récepteurs qui les utilisent »**.

Pourquoi parle-t-on aussi de « conversion statique » de l'énergie électrique ?

La « conversion d'énergie » de façon générale concerne les changements de forme sous lesquelles se présentent les différents types d'énergies (thermique, chimique, électrique, mécanique, etc.). La « conversion d'énergie électrique » concerne particulièrement les changements de forme de l'énergie électrique, et plus précisément des

tensions et des courants qui y sont associés. Il s'agit ainsi de la même chose que l'électronique de puissance, à la différence que ce nom est plutôt historique… En effet, avant la démocratisation des composants à semi-conducteurs, les changements de forme de tensions et de courants électriques s'opéraient à l'aide des machines électriques tournantes. Pour disposer de tensions alternatives, il fallait utiliser un « alternateur », pour une tension continue, on se servait d'une « génératrice à courant continu ». Seules les différences de constitution mécanique et électrique de ces machines « électrogénératrices » permettaient de générer au choix des tensions et des courants continus ou alternatifs. Il n'était alors possible de « passer de l'un à l'autre » qu'en couplant mécaniquement deux machines différentes, ce qui constituait la « conversion mécanique de l'énergie électrique ». Aujourd'hui, les choses ont bien changé et les composants électroniques modernes, associés à des « commandes » évoluées, permettent de réaliser une très grande variété de transformations directement sur les tensions et courants produits par un seul type de source, si bien que les termes « d'électronique de puissance » et de « conversion statique d'énergie électrique » sont devenus quasiment synonymes.

Le besoin en « changement de forme » de l'énergie électrique est-il important ?

En réalité ce « besoin » est énorme ! Il faut bien comprendre à ce sujet que ce sont quasi exclusivement les réseaux électriques qui permettent de produire, transporter et distribuer l'énergie électrique sur notre planète. Or ces réseaux souffrent de contraintes très fortes qui ont conduit les gestionnaires d'énergie à utiliser exclusivement des systèmes de tensions sinusoïdales triphasés. Pourtant, la grande majorité des récepteurs électriques ne sont pas adaptés à des tensions triphasées, ou même simplement alternatives. Il est donc déjà nécessaire, dans une très grande majorité d'appareils, de savoir transformer un système triphasé ou monophasé en un régime continu. En soi, cela représente déjà un besoin industriel très lourd. Il suffit de recenser chez soi le nombre « d'adaptateurs secteur » dont on dispose et de penser qu'il se cache le même type de circuit dans pratiquement chaque appareil électrique utilisé au quotidien pour prendre conscience de l'énormité du besoin de transformation qui est associé…

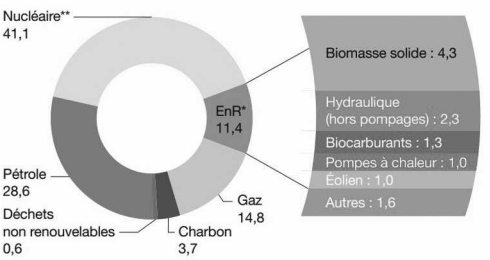
Enfin, comme il existe une très grande variété de récepteurs électriques, on comprendra qu'aujourd'hui le « parc technologique et industriel » associé à l'électronique de puissance est extrêmement vaste.

Quelle est la « place » de l'énergie électrique dans la transition énergétique ?

Parler d'énergie électrique, c'est depuis des décennies parler d'une forme d'énergie tout à fait démocratisée, et ce pratiquement sur l'ensemble des zones habitées de la planète. Les pays fortement industrialisés, en particulier, consomment une part

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

importante de leurs énergies sous forme électrique. Le graphe de la *figure 2* représente à ce sujet la répartition des différents types d'énergies primaires utilisées en France en 2018.



** EnR : énergies renouvelables.*
*** Correspond au nucléaire comptabilisé en équivalent primaire à la production (chaleur dégagée par la réaction nucléaire, puis convertie en électricité), déduction faite du solde exportateur d'électricité.*

Figure 2 – **Bouquet énergétique primaire en France en 2018.**

Source : © Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable : http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr

En remarquant que le nucléaire, l'hydraulique, l'éolien et le photovoltaïque sont des énergies qui alimentent le réseau électrique, il apparaît une convergence d'environ **45 % des énergies primaires** vers l'électricité !

En ce qui concerne les énergies « finales », celles qui sont consommées par l'ensemble des populations et des industries après transformation (et donc d'inévitables pertes), environ **un quart est consommé sous forme électrique** ! Cette proportion très importante, est sensiblement du même ordre de grandeur d'un pays à l'autre. Comme l'électricité se « transporte » plutôt bien, qu'elle est inodore, « invisible », peu encombrante et autorise des transferts à très bons rendements, elle représente aujourd'hui une proportion importante et croissante des énergies utilisées par l'Homme. À ce titre, la croissance de l'utilisation de l'énergie électrique en France est visible sur la *figure 3* qui présente l'évolution de la consommation primaire en France de 1970 à 2015. La « place » de l'énergie électrique y est facile à visualiser : elle ne cesse de croître.

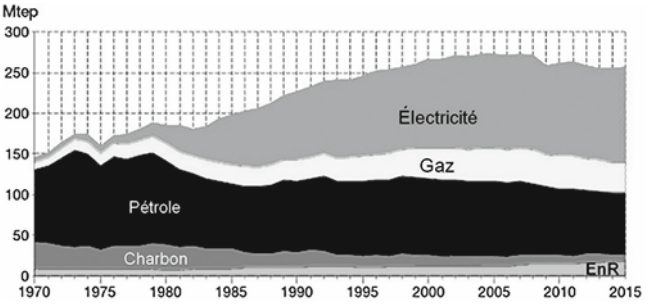


Figure 3 – **Consommation primaire en France de 1970 à 2015.**

Source : © Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable : http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr

Les données sont exprimées en Mtep, c'est-à-dire en Méga Tonnes Équivalent Pétrole.

Ces données font également apparaître, entre les années 2005 et 2010, l'augmentation sensible des énergies renouvelables (EnR) qui vont être au cœur de la transi-

tion énergétique impulsée par les grands défis du changement climatique et de l'épuisement (ou du refus) des énergies non renouvelables.

En 2020, où les effets du réchauffement du climat sont avérés, il est devenu une urgence d'adapter le « mix énergétique » à la réduction des émissions de CO_2 et au respect de la « durabilité » de l'activité humaine. Dans cet énorme défit, nous savons déjà aujourd'hui que l'énergie électrique sera l'énergie de la convergence des EnR, celle de l'optimisation des rendements et de l'optimisation et de la mutualisation des énergies diverses et ce à toutes les échelles (smart grids, interconnexions, etc). Aujourd'hui, 95 % des énergies renouvelables sont « connectées » au réseau électrique de distribution, ce qui nécessite un ensemble de transformations à fort rendement permettant la connectivité et la circulation des énergies sur ce réseaux. L'électronique de puissance va donc continuer à jouer un rôle majeur dans cette convergence et le réseau électrique de demain.

Quelles sont les technologies concernées par l'électronique de puissance ?

Actuellement, elle concerne directement, ou indirectement, un très 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 convertie à partir du réseau électrique. La plus grande partie des motorisations associées aux processus industriels aussi. Plus récemment, « l'explosion » de l'électroportatif (téléphones, baladeurs, GPS, etc.) a également induit une forte montée en puissance des circuits permettant l'optimisation d'utilisation des batteries et accumulateurs. Plus généralement, 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. Le besoin de changement de forme des tensions et courants est ainsi quasi-systématique. Finalement, c'est pratiquement tout le parc technologique actuel qui met à contribution les acquis de l'électronique de puissance dans sa gestion des énergies d'alimentation.

Quels sont les prérequis nécessaires à une bonne compréhension du cours ?

Ce cours nécessite un minimum de connaissances générales dans le domaine de l'électricité et des circuits électriques. Le lecteur s'assurera ainsi qu'il dispose des acquis suivants :

- ◇ **Électricité générale** : Maîtriser les lois des circuits (loi des mailles, loi des nœuds, etc.), bien discerner ce qu'est une tension, un courant, une puissance, etc.
- ◇ **Grandeurs électriques alternatives sinusoïdales en régime permanent** : Ces grandeurs sont fondamentales dans le domaine de l'énergie électrique puisqu'elles sont constitutives du fonctionnement des réseaux. Il sera ainsi

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

nécessaire d'avoir bien en tête les caractéristiques de ces grandeurs et leur représentation complexe (vectorielle).

- ◇ **Puissances électriques** : Bien connaître la formulation des puissances électriques dans les divers régimes rencontrés est également très important. À ce sujet, des rappels réguliers seront associés aux différents chapitres.
- ◇ **Systèmes triphasés** : Ces systèmes constituent effectivement les réseaux électriques et les installations de forte puissance, en conséquence, il est important de posséder les bases théoriques pour bien comprendre et identifier les différentes grandeurs (tensions simples, tensions composées, courants de ligne, etc.).
- ◇ **Grandeurs non sinusoïdales périodiques** : Ces grandeurs sont extrêmement fréquentes en électronique de puissance. Les outils d'approche associés, comme les développements en série de Fourier, la notion de spectres et d'harmoniques, sont absolument nécessaires à la compréhension de certains chapitres.
- ◇ **Circuits magnétiques et transformateurs** : Il est nécessaire de savoir ce que sont les « inductances » et les « transformateurs » et quelles sont les règles de base des « circuits magnétiques » qui les constituent. En effet, la plupart des circuits exposés dans ce livre utilisent ces composants régulièrement et certaines contraintes et caractéristiques importantes découlent de leurs particularités.
- ◇ **Machines électriques** : L'électronique de puissance est très utilisée dans la commande et de contrôle des machines électriques. Il est alors préférable que le lecteur ait connaissance des bases de la modélisation des différentes machines pour mieux appréhender les particularités des circuits qui les alimentent.



Le chapitre 2, appelé « bases théoriques et régimes électriques » propose un ensemble de rappels permettant au lecteur de se remémorer une grande partie de ces prérequis.

Comment compléter ses connaissances en électrotechnique ?

Ce livre n'est pas destiné à rappeler et réexpliquer toutes les bases, souvent nécessaires, de l'électrotechnique. Le lecteur soucieux de se former ou de rafraîchir ses connaissances en la matière pourra efficacement s'orienter vers les livres intitulés : *Électrotechnique et énergie électrique*, 3e édition, Dunod et *Exercices et problèmes d'électrotechnique*, 3e édition, Dunod, tous deux du même auteur que le présent ouvrage.

Quelles sont les particularités de ce livre dans l'approche de la matière ?

La particularité la plus importante de cet ouvrage réside dans sa manière d'aborder les différents aspects de la matière. Le chapitre 1 tout d'abord propose une présentation globale des notions de base liées aux convertisseurs à découpage. Associé au

chapitre 2 qui contient les bases théoriques et les rappels importants, ils constituent le « minimum vital » que le lecteur aura besoin d'avoir en tête pour aborder sereinement les chapitres ultérieurs.

Le chapitre 3 propose de façon assez particulière une approche volontairement guidée, et très illustrée, des circuits classiques qui nous entourent et qui mettent en œuvre les techniques de l'électronique de puissance. Cette partie est destinée à établir, pour les débutants ou les étudiants qui auraient du mal à « identifier » cette matière, une vision globale, concrète, appliquée et familière des notions qui seront ensuite développées de façon classique.

La partie « centrale » de l'ouvrage, constituée par les chapitres 4 à 8, est consacrée à une présentation organisée et relativement classique des grandes familles de « convertisseurs statiques ». C'est dans cette section-là que le lecteur trouvera tous les développements des circuits et des calculs permettant d'étudier ou de concevoir les systèmes classiques de l'électronique de puissance. Les composants associés aux circuits sont également présentés au sein de ces chapitres, au plus près de là où ils sont mis en œuvre plutôt que dans des parties consacrées et découplées des applications. À titre d'exemple, les « diodes » sont présentées à l'occasion du chapitre sur le redressement, les « transistors de puissance » à l'occasion du chapitre sur les hacheurs, etc.

Le *chapitre 9* est particulier puisqu'il présente de façon particulière les principes de « synthèse des convertisseurs statiques ». Cet exposé permettra au lecteur de synthétiser également les connaissances acquises et de prendre conscience des importants points communs qui existent entre les divers circuits de l'électronique de puissance.

Le *chapitre 10* traite du calcul des pertes qui sont causées par l'utilisation des diodes et des transistors de puissance. La connaissance de ces pertes permet d'aborder également les problématiques d'évacuation thermiques et leurs solutions technologiques. Ce chapitre est ainsi également l'occasion d'une approche simple et efficace des bases de la « thermique ».

Le *chapitre 11* enfin, pour finir la « partie cours », présente les circuits intégrés de puissance proposés aujourd'hui par les constructeurs de composants. L'accent est mis sur l'utilisation type de ces circuits et sur leurs possibilités étendues de modularité et de polyvalence.

Dans la dernière partie de l'ouvrage, chaque chapitre propose un problème corrigé centré sur l'étude d'un circuit réel. Chacun de ces problèmes peut être étudié en tant que tel, pour des révisions d'examen, ou pour tester ses connaissances, ou encore être lu comme une « étude de cas », concrète et appliquée.

Il est à noter que tous les circuits abordés dans les *chapitres 12 à 17* sont des circuits existants, et que les grandeurs et notions évoquées sous forme de questions (et réponses), correspondent à des grandeurs réelles décrites par des oscillogrammes et des mesures sur circuits.

Le lecteur trouvera dans cette partie de l'ouvrage, qu'il serait dommage de ne pas parcourir, de quoi nourrir sa curiosité et son intérêt pour des applications réalistes,

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.