

Électronique de puissance

3^e 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

<p>Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.</p> <p>Le Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique</p>	 <p>DANGER LE PHOTOCOPIAGE TUE LE LIVRE</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, Paris, 2011, 2015, 2020
ISBN 978-2-10-080935-6
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 leurrions 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

Préface

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

Table des matières

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 (<i>interleaved converters</i>)	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

Table des matières

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 ($DC < 50\text{ V}$).

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.

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*).

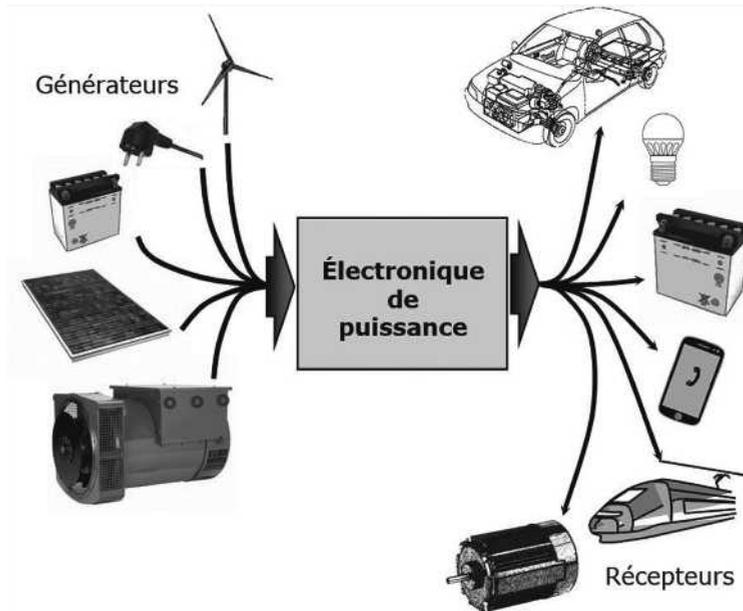


Figure 1 - L'électronique de puissance, le lien entre les diverses formes d'énergie électrique.

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 « électro-génératrices » 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 ?

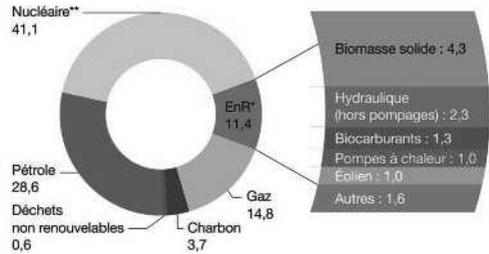
Parler d'énergie électrique, c'est depuis des décennies parler d'une forme d'énergie tout à fait démocratisée, et ce pratiquement sur l'ensemble des zones habitées de la planète. Les pays fortement industrialisés, en particulier, consomment une part

Introduction

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.



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



* 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.

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.

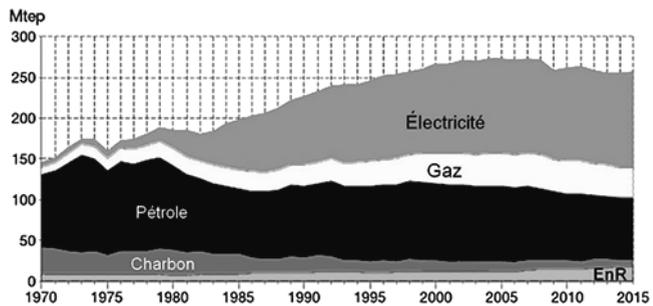


Figure 3 - Consommation primaire en France de 1970 à 2015.

La « place » de l'énergie électrique y est facile à visualiser : elle ne cesse de croître.



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 défi, 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

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*, 3^e édition, Dunod et *Exercices et problèmes d'électrotechnique*, 3^e 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,

Introduction

essentiellement dans le domaine des petites et moyennes puissances qui forme aujourd'hui la part la plus importante des applications domestiques.

Il faudra bien saisir que certaines notions, habituellement présentées sous forme de cours, ont été déportées dans ces problèmes de manière à les aborder de façon plus poussée et plus illustrée.

Cette partie, est donc indiscutablement un complément important aux chapitres de cours, et sera pour le lecteur l'occasion de parfaire son étude du fonctionnement et du dimensionnement des circuits de l'électronique de puissance.

GÉNÉRALITÉS ET NOTION DE « CONVERTISSEUR À DÉCOUPAGE »

PLAN

- 1.1 Notions de base et « découpage »
- 1.2 Classification des convertisseurs statiques
- 1.3 Généralités sur l'architecture des convertisseurs

L'électronique de puissance actuelle regroupe un ensemble très évolutif de technologies. Malgré l'apparente diversité des montages, un point commun fédère quasiment toutes les réalisations : l'utilisation du concept de « découpage » des tensions et des courants. Ce concept n'est pas vraiment « intuitif » et il est très important d'avoir bien compris pourquoi il s'est imposé en quelques décennies avant d'aborder la suite de ce cours. Cette compréhension passe par l'examen des concepts de base tels le rendement et la nature des conversions. Ce chapitre est également l'objet d'une présentation de l'architecture générale des convertisseurs qui utilisent le concept de découpage, et de leurs éléments caractéristiques.

1.1 NOTIONS DE BASE ET « DÉCOUPAGE »

1.1.1 Convertisseur et rendement

En électronique de puissance, on désigne par « convertisseur » tout circuit électrique permettant un transfert de puissance d'un générateur vers un récepteur. La plupart du temps, le convertisseur sert à modifier les valeurs ou les natures des grandeurs électriques (tensions et courants).

Comme tout transfert d'énergie s'accompagne de pertes (voir figure 1.1), il en résulte pour chaque convertisseur un rendement η non unitaire (inférieur à 1) et donné par :

$$\eta = \frac{W_{utile}}{W_{totale}} = \frac{W_{utile}}{W_{utile} + W_{pertes}}$$

L'écriture en fonction des puissances en jeu étant la plus utilisée :

$$\eta = \frac{P_{utile}}{P_{totale}} = \frac{P_{utile}}{P_{utile} + P_{pertes}}$$

Un circuit possédant un mauvais rendement (c'est-à-dire des pertes importantes par rapport à la puissance utile) chauffe inutilement, nécessite une alimentation sur-dimensionnée, et rime donc avec un poids et un prix « gonflés » par les pertes. Le rendement d'un système de conversion d'énergie est donc une grandeur fondamentale et déterminante dans les choix technologiques.

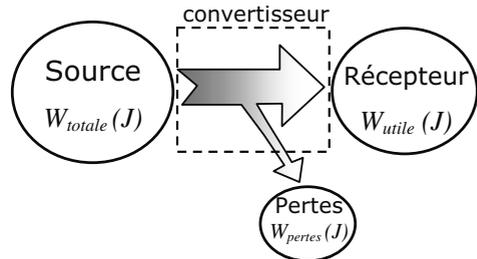


Figure 1.1 - Conversion d'énergie et pertes.

1.1.2 Convertisseurs linéaires

On appelle convertisseur « linéaire » tout circuit de conversion d'énergie basé sur l'utilisation de composants linéaires (résistances, inductances, condensateurs). Que ce soit en régime continu ou sinusoïdal, il est possible de modéliser un tel circuit par les schémas équivalents de Thévenin représentés sur la figure 1.2.

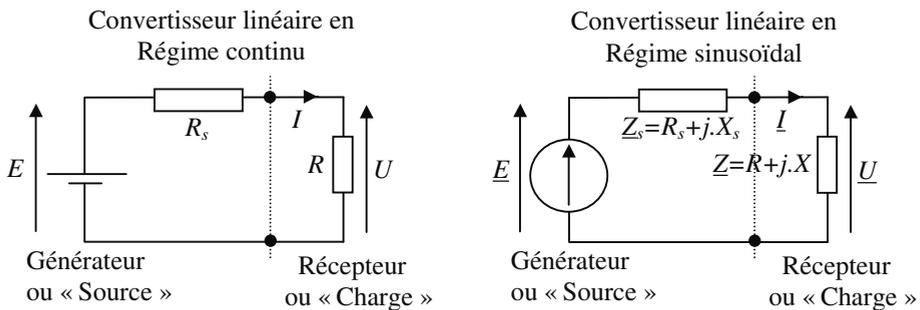


Figure 1.2 - Modélisation des convertisseurs linéaires.

La problématique du rendement de ces deux montages se ramène, dans les deux cas, au calcul du quotient :

$$\eta = \frac{P_{utile}}{P_{totale}} = \frac{R \cdot I^2}{R \cdot I^2 + R_s \cdot I^2} = \frac{R}{R + R_s}$$

Par ailleurs, en supposant la résistance R_s fixée par le circuit, la puissance consommée dans la charge s'écrit :

$$P_{utile} = R \cdot I^2 = R \cdot \left(\frac{E}{R_s + R} \right)^2$$

Afin de formaliser la problématique, il est alors suffisant de tracer sur un même graphique les évolutions de la puissance utile et du rendement en fonction de la résistance R (à R_s fixée donc). La figure 1.3 présente ainsi l'évolution de η et du quotient $\frac{P_{\text{utile}}}{P_{\text{max}}}$ en fonction de la variable normalisée $\frac{R}{R_s}$.

On y constate que la puissance transmise est maximale pour $\frac{R}{R_s} = 1$,

c'est-à-dire quand $R = R_s$, mais qu'alors le rendement ne vaut que 0,5. On y constate également que le rendement tend bien vers 1 quand $R \gg R_s$ mais qu'alors la puissance transmise est bien plus faible que la

puissance maximale $P_{\text{max}} = \frac{E^2}{4 \cdot R_s}$.

La « morale » de cette petite étude est que « les circuits électriques linéaires ne peuvent être utilisés à fort rendement que très loin de leur puissance maximale transmissible ».

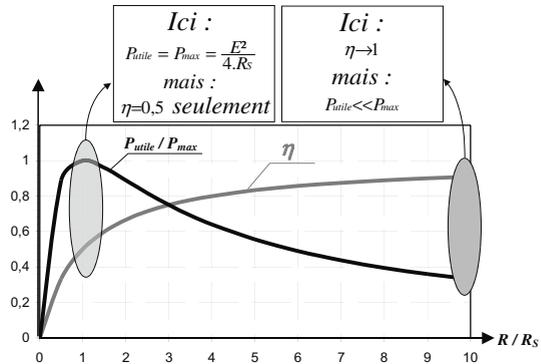


Figure 1.3 - Évolutions du couple rendement/puissance.

1.1.3 Convertisseurs à découpage (Switching converters)

On appelle « convertisseur à découpage » tout circuit de conversion d'énergie électrique basé sur l'utilisation de composants non-linéaires de type « interrupteur » (ou « commutateur ») destinés à travailler en « tout ou rien ». Pour faire simple, il s'agit de circuits pour lesquels la partie opérative fonctionne sur la conduction et le blocage de composants se comportant comme des interrupteurs (diodes, transistors en « saturé/bloqué », thyristors, etc.).

La diversité des circuits associés ne permet pas une modélisation trop générale mais le principe de fonctionnement peut être abordé sur le cas simple de la figure 1.4. Dans ce circuit, l'élément s'interposant entre le générateur et le récepteur est composé d'une « cellule de commutation » (notion présentée en fin de chapitre), c'est-à-dire de deux interrupteurs complémentaires (l'un fermé l'autre ouvert à tour de rôle).

La conduction du commutateur de gauche place le récepteur sous la tension E , celle du commutateur de droite le place sous une tension nulle. En alternant ces deux états de façon rapide (à une fréquence élevée), le récepteur se retrouve sous une « tension découpée » dont la moyenne est plus faible

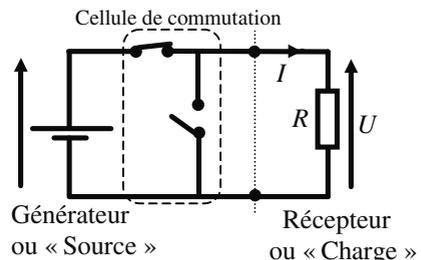


Figure 1.4 - Un convertisseur à découpage simplifié.

que E . Le circuit se comporte ainsi comme un convertisseur « abaisseur de tension ». On montrera facilement (cela fera l'objet du chapitre 7) que la valeur de la tension reçue par la charge est facilement réglable en agissant sur le « rapport cyclique » du découpage.

Parallèlement, la caractéristique principale de la fonction « interrupteur » est qu'elle impose une puissance dissipée théoriquement nulle puisqu'à tout instant soit la tension est nulle soit le courant est nul dans l'interrupteur. Ainsi, dans un tel circuit, les pertes sont théoriquement nulles !

1.1.4 Comparaison des rendements « découpage/linéaire » sur un exemple

La figure 1.5 dresse la comparaison de deux montages réels, équivalents en terme de tension et de puissance, puisqu'ils permettent tous deux de transformer une tension continue de 12 V en une tension également continue de 4 V tout en fournissant une puissance de 10 W à la charge.

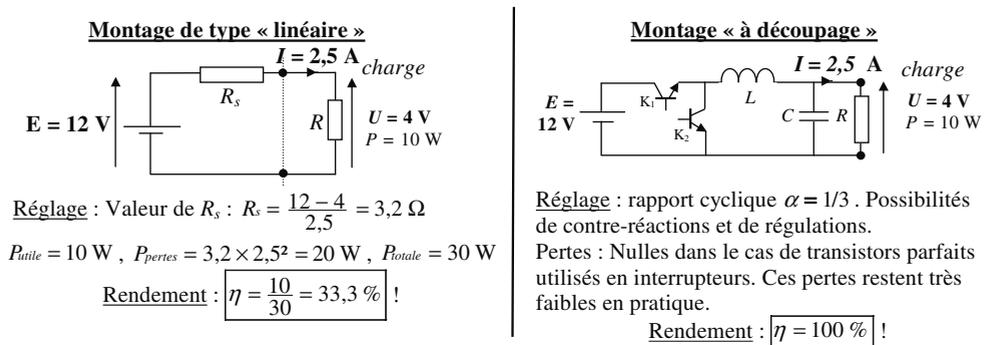


Figure 1.5 - Comparaison « découpage/linéaire ».



L'explication complète du fonctionnement du montage à découpage sera détaillée dans le chapitre 7, on reconnaît néanmoins dans ce circuit le « convertisseur abaisseur de tension » introduit plus haut, agrémenté de composants de filtrage (inductance et condensateur).

La différence d'ordre de grandeur des rendements est flagrante. En réalité, les composants de commutation (transistors, diodes, etc.) sont le siège de pertes (par conduction et par commutation) qui restent relativement faibles par rapport aux puissances transitées. Ainsi, il est habituel que les systèmes à découpage présentent des rendements réels de l'ordre de $\eta = 80$ à 95% .

Enfin, il faut bien saisir que ce rendement est assuré sur presque toute la plage de puissance disponible (bornée par les limites des composants) à la différence du cas linéaire où le rendement dépend de la puissance transitée.

À titre d'illustration, la figure 1.6 représente l'évolution du rendement associé au convertisseur linéaire en courant continu et son équivalent à découpage.

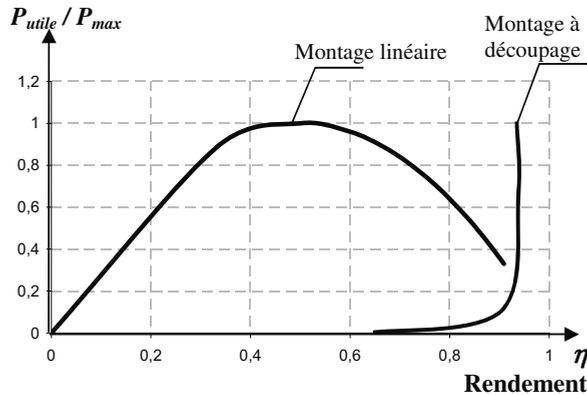


Figure 1.6 - Courbe rendement/puissance.

On relève tout particulièrement sur cette courbe la valeur presque constante du rendement du système à découpage entre 20 % et 100 % de la charge du circuit. Un tel résultat constitue en réalité un des avantages les plus manifestes des convertisseurs statiques et il est même possible d'affirmer qu'ils sont aujourd'hui la seule alternative existante aux problèmes de rendements et d'adaptation d'impédance des circuits linéaires.

En définitive, convertir de la puissance électrique à fort rendement n'est aujourd'hui possible qu'à travers l'utilisation de circuits et montages « à découpage ». Parler aujourd'hui de « conversion statique de l'énergie électrique », c'est parler de convertisseurs à découpage.

1.2 CLASSIFICATION DES CONVERTISSEURS STATIQUES

Il est nécessaire de bien noter que l'énergie électrique s'utilise soit sous la forme de tensions et courants alternatifs (le plus souvent sinusoïdaux), soit sous la forme de tensions et courants continus (en régime permanent). Sachant que « l'électronique de puissance » s'intéresse au fait de relier une source d'énergie à un récepteur donné, il devient possible de classer les structures de conversion d'énergie électrique en **quatre catégories** dont on résume les noms et types sur la figure 1.7 :



- Il est évidemment possible de s'intéresser à des sources alternatives non sinusoïdales mais ceci est assez marginal puisqu'on souhaite en général éliminer les harmoniques des tensions et courants, responsables de pertes et de perturbations supplémentaires.
- En électronique de puissance, on appelle « source » tout élément extérieur aux opérations de changement de forme. Un générateur et un récepteur sont souvent appelés « source » de façon non différenciée, l'accent étant mis plutôt sur leur nature (source de tension ou de courant).