

Introduction au dossier « électronique de puissance »

Culture Sciences
de l'Ingénieur

La Revue
3E.I

école normale supérieure paris-saclay

François COSTA^{1,2}

Édité le
22/01/2024

¹ Université Paris-Saclay, ENS Paris-Saclay, CNRS, SATIE UMR8029, 91190 Gif-sur-Yvette, France

² Université Paris Est Créteil UPEC, 94000 Créteil, France

Cette introduction fait partie du N° 111 de La Revue 3EI de janvier 2024.

L'électronique de puissance est une branche relativement récente du génie électrique : les premiers convertisseurs statiques à semiconducteurs de puissance sont en effet apparus industriellement au début des années 1960 avec la mise sur le marché du thyristor, comme l'illustrent les quelques exemples ci-dessous.

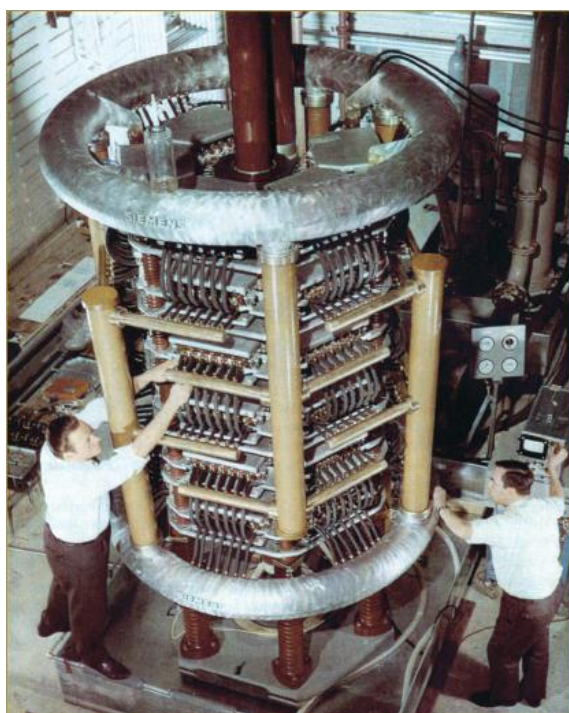


Figure 1a : 100 kV, 1 kA prototype de valve thyristor (192 thyristors 1,6 kV en série)
(photo : Siemens Corporate Archives, 1967)

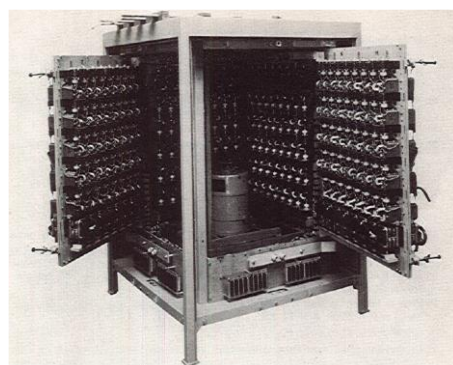


Figure 1b : locomotive BB16685 4,1 MW, bloc de puissance à thyristors, 2x1900 A 1100 V, marche et récupération, doc Alstom

Cette discipline a connu depuis 60 ans un développement extraordinaire en termes de concepts scientifiques, de technologies et de domaines d'application. Elle a permis de développer un usage à haute efficacité de l'énergie électrique grâce à l'excellent rendement de conversion et à la souplesse de contrôle qu'elle autorise : limitée initialement à la traction électrique ferroviaire (figure 1b) et à quelques usages industriels lourds, elle envahit aujourd'hui tous les secteurs et tous les niveaux de puissance : gestion des réseaux, transports terrestres aériens et maritimes, traitement de l'information, domotique, éclairage, etc.

Ainsi, le convertisseur électronique de puissance n'est pas seulement un assemblage de composants qu'on étudie comme tel, mais sa structure, ses composants et sa loi de commande sont le résultat d'un formalisme qui prend en considération l'environnement, la fonction à réaliser, les technologies disponibles et les performances souhaitées. De cette méthodologie résulte le concept de fonctions de conversion qui, assemblées entre elles permettent l'élaboration de systèmes électriques complexes, par exemple pour piloter un réseau électrique ou assurer avec efficacité l'interfaçage de panneaux photovoltaïques.

L'électronique de puissance est aussi une technologie invisible mais dont l'impact sociétal est très fort grâce à l'amélioration de l'efficacité énergétique sans égal dans des secteurs très impactant (transports, bâtiment, industrie). On peut citer les quelques chiffres¹ ci-dessous, correspondant à des valeurs moyennes mondiales sur 25 ans (1990-2015) :

- **Secteur automobile** : l'allumage et le contrôle électronique ont réduit la consommation des moteurs thermiques de plus de 10%, soit environ 4800 TWh et évité la production de 10 MdT CO₂, (pour référence : la consommation électrique annuelle en France est d'environ de 430 TWh, l'émission de CO₂ est d'environ 0,33 MdT en 2018)

- **Secteur industriel** : l'usage de la variation de vitesse électrique dans l'industrie a réduit la consommation en énergie primaire carbonée d'environ 42 000 TWh (soit environ 1 700 TWh par an à mettre en regard des 160 000 TWh de besoin mondial annuel en énergie primaire)

- **Secteur du bâtiment** : l'usage de sources d'éclairage basse consommation a réduit la consommation d'environ 9100 TWh.

C'est donc une technologie clé qui joue un rôle majeur pour accroître la soutenabilité des activités humaines en favorisant la progression rapide de l'électricité dans le mix énergétique mondial. Ainsi, les progrès technologiques successifs ont permis des avancées très importantes en termes d'efficacité énergétique, de miniaturisation et de réduction des coûts.

L'électronique de puissance est une discipline enseignée depuis les années 60 : initialement dans les lycées (ouverture des BTS en 1962) et les écoles d'ingénieurs (ENSEEHT Toulouse, ENSIEG Grenoble pour les premières) puis dans les universités. Elle constitue un domaine scientifique et technologique à part entière qui agrège de nombreux principes physiques et techniques pour concevoir, commander et réaliser des convertisseurs statiques performants généralement inclus dans des systèmes : l'automobile électrique, qui fait l'objet de l'article « Apport des convertisseurs multiniveaux modulaires aux véhicules électriques » [1] présenté dans ce dossier, est un exemple d'une telle approche qui met en évidence la problématique d'architecture de conversion de puissance, de lois de commandes et de technologies des semiconducteurs de puissance.

Actuellement, face à l'électrification rapide et massive des usages sociétaux (transport, habitat, industrie) on assiste à une demande accrue de formation dans tous les domaines du génie électrique et en particulier en électronique de puissance.

Un enjeu technologique fort réside encore et toujours dans l'intégration de puissance : les dispositifs doivent être peu volumineux (ou peu lourds), peu polluants électromagnétiquement, à haut rendement et d'une fiabilité bien contrôlée. La figure ci-dessous donne quelques valeurs de

¹ webinar de J. Baliga, 26/08/2015, Engineering a sustainable society with power semiconductor devices, North Carolina State University, Raleigh, <https://www.youtube.com/watch?v=TC2C9NCrva4>

densité volumique de puissance atteintes dans différents domaines applicatifs pour des dispositifs industriels et pour des dispositifs de recherche.

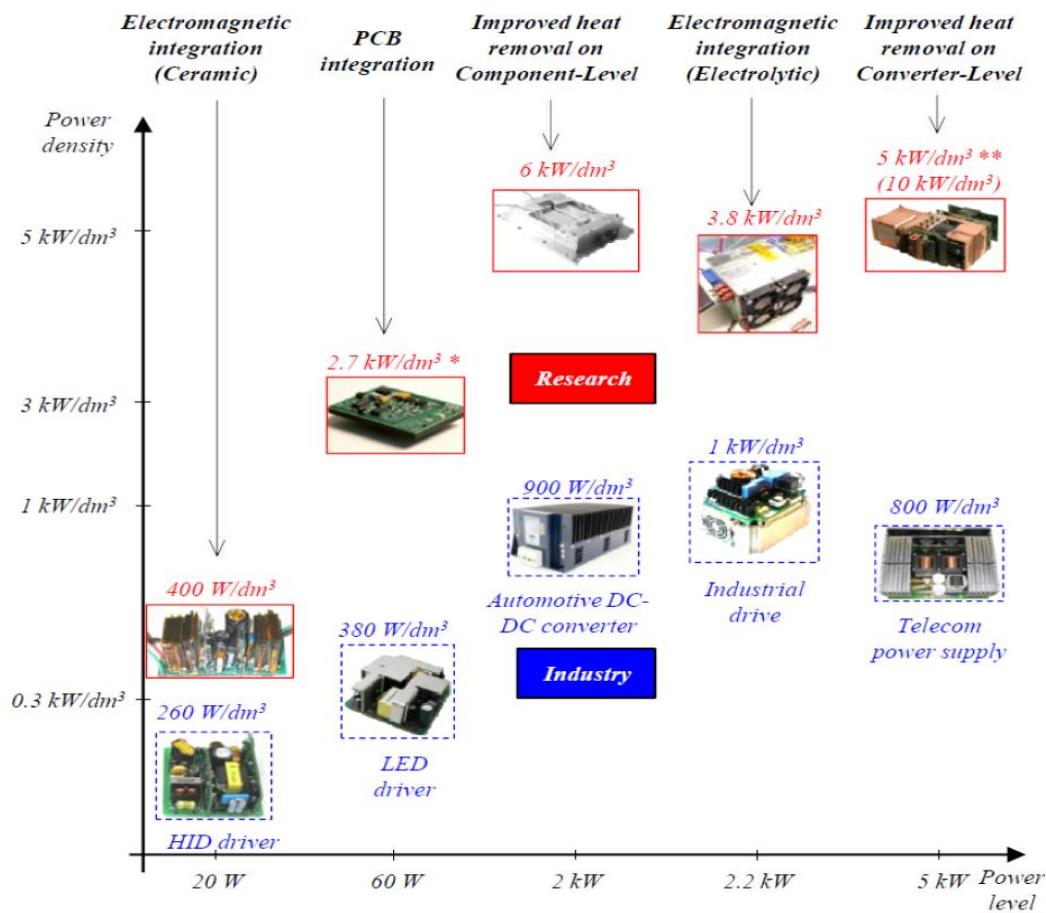


Figure 2 : densité volumique de puissance en fonction de la puissance d'un convertisseur, comparaison des technologies disponibles (doc. ECPE Tutorial "Power Electronics Packaging" Delft Septembre 2014).

Pour illustrer cette évolution, l'article du dossier «Caractérisation Thermoélectrique et Thermomécanique d'Assemblages PCB Intégrants des Puces de Puissance » [2] aborde ce thème de l'accroissement de la densité massique/volumique de puissance en s'intéressant à une nouvelle technique de prise des contacts sur les semiconducteurs enfouis dans le circuit imprimé par des mousses métalliques qui remplacent les traditionnels fil de bonding, mutualisant ainsi les fonctions d'amenée de courant et de drainage thermique tout en réduisant fortement les inductances parasites sources de perturbations électromagnétiques.

Le potentiel d'évolution du domaine reste donc très important alors que se profile la révolution des semiconducteurs à large bande interdite (encore appelés grands gap) : carbure de silicium (SiC) pour les hautes tensions et nitrure de gallium (GaN) pour les basses et moyennes tensions ouvrent la voie des hautes fréquences (> MHz) et des hautes températures (> 150°C) !

La figure suivante présente une fresque historique des semiconducteurs de puissance dans laquelle on peut observer la diversification croissante des composants notamment liée leur facilité de commande et aux domaines d'usages de plus en plus larges (calibres de tension et courant, vitesse de commutation).

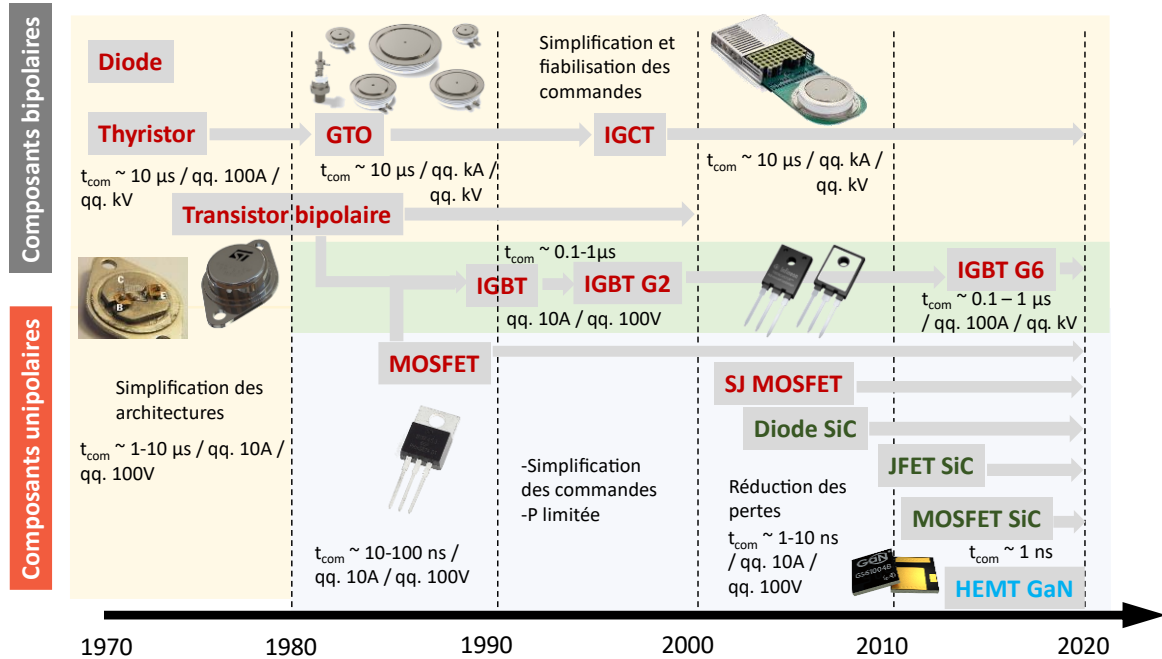


Figure 3 : fresque historique des semiconducteurs de puissance, d'après Hong LIN, YOLE, PCIM Asia 2015.

L'article « Technologie des transistors au nitrure de gallium » [3] présente ces nouveaux semiconducteurs GaN et montre leurs potentialités mais aussi leurs défauts de jeunesse et les nouvelles perspectives qu'ils offrent en termes d'accroissement de densité massique de puissance mais aussi de contraintes, notamment en compatibilité électromagnétique (CEM).

L'électronique de puissance a permis une gestion toujours plus efficace et fiable de l'énergie électrique dans des applications de plus en plus larges : électromobilités, industrie, smart grids, liaisons HVDC etc. L'évolution de ses performances est liée aux matériaux semiconducteurs (Si, SiC, GaN, diamant...), à l'inventivité en termes d'architectures, aux procédés de fabrication et au packaging avec des limitations dues au drainage thermique et à la CEM. La figure suivante permet de situer les technologies mises en œuvre selon les applications dans un repère fréquence de commutation/puissance apparente commutée.

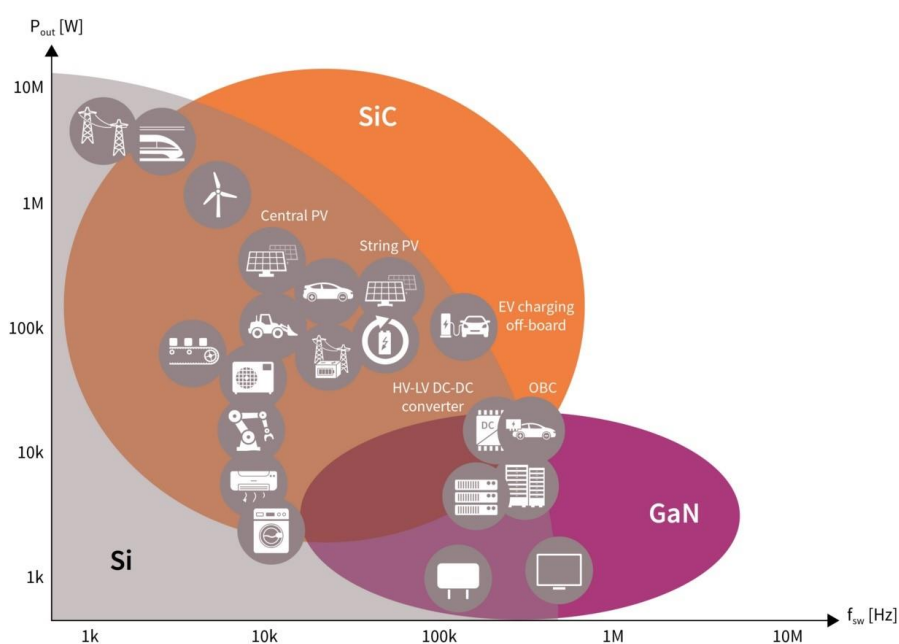


Figure 4 : domaines applicatifs selon les technologies de semiconducteurs :

<https://www.infineon.com/cms/en/product/technology/wide-bandgap-semiconductors-sic-gan/>

Conclusion

La dynamique d'évolution de l'électronique de puissance reste importante, en partie grâce aux nouveaux semiconducteurs et aux progrès des matériaux diélectriques et magnétiques. Cependant, les impératifs de développement durable imposent à présent de considérer, lors de la phase d'étude et de conception d'un convertisseur électronique de puissance, des critères de minimisation des impacts environnementaux sur cycle de vie, ce qui nécessite une approche système, une meilleure compréhension des mécanismes de défaillance et de dégradation, mais également de considérer la recyclabilité et la réparabilité des dispositifs.

L'objectif de ce dossier « électronique de puissance » est de fournir aux lecteurs les éléments de compréhension des évolutions en cours et les enjeux technologiques et sociétaux de cette discipline grâce à quelques exemples illustratifs d'applications innovantes.

Références

- [1] Gaël Pongnot et al. « Apport des convertisseurs multiniveaux modulaires aux véhicules électriques », https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources_pedagogiques/apport-des-convertisseurs-multiniveaux-modulaires-aux-ve
- [2] Mounira Bouarroudj et al., « Caractérisation Thermoélectrique et Thermomécanique d'Assemblages PCB Intégrants des Puces de Puissance », https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources_pedagogiques/caracterisation-thermoelectrique-thermomecanique-assemblages-pcb-puces-puissance
- [3] Matthieu Landel, « Technologie des transistors au nitrure de gallium », https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources_pedagogiques/technologie-des-transistors-au-nitrure-de-gallium