Commandes rapprochées pour interrupteurs de puissance

Pierre Lefranc

▶ **To cite this version:**

Pierre Lefranc. Commandes rapprochées pour interrupteurs de puissance. Energie électrique. Université Grenoble - Alpes, 2017. tel-01829694

HAL Id: tel-01829694
https://hal.science/tel-01829694

Submitted on 4 Jul 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Communauté
UNIVERSITÉ Grenoble Alpes

Manuscrit HDR

Pour obtenir le diplôme d'

HABILITATION à DIRIGER des RECHERCHES

de la

COMMUNAUTE UNIVERSITE GRENOBLE ALPES

Spécialité : **EEATS - Electronique, Electrotechnique, Automatique, Traitement du Signal**

Arrêté ministériel du 23 novembre 1988

Présenté par

Pierre LEFRANC

« Commandes rapprochées pour interrupteurs de puissance »

HDR soutenue publiquement le **« 4 juillet 2017 »**,
devant le jury composé de :

M. Nadir IDIR
Professeur Université Lille 1, L2EP, Président, Membre
M. Bruno ALLARD
Professeur INSA Lyon, AMPERE, Rapporteur, Membre
M. François COSTA
Professeur Université Paris-Est-Créteil, SATIE, Rapporteur, Membre
M. Nicolas GINOT
Professeur Université de Nantes, IETR, Rapporteur, Membre
M. Jean-Christophe CREBIER
Directeur de Recherche CNRS, G2Elab, Examinateur, Membre
M. Nicolas ROUGER
Chargé de Recherche CNRS, LAPLACE, Examinateur, Membre

"Quant aux savants, malgré l'importance de leur enquête sur la nature et malgré la profondeur de leur recherche, ils n'arrivent finalement qu'à réaliser à quel point la nature est réellement parfaite et mystérieuse. Croire que par la recherche et l'invention l'humanité peut créer quelque chose de mieux que la nature est une illusion. Je pense que les gens ne luttent pas pour d'autres raisons que d'arriver à connaître ce que l'on pourrait appeler la grande incompréhension de la nature."

Masanobu FUKUOKA
La révolution d'un seul brain de paille. Une introduction à l'agriculture sauvage.

"S'interroger sur le sens du travail manuel, s'est en fait s'interroger sur la nature de l'être humain. Pour comprendre ce qu'est une manière d'être spécifiquement humaine, il faut comprendre l'interaction manuelle entre l'homme et le monde. Ce qui revient à poser les fondements d'une nouvelle anthropologie, susceptible d'éclairer notre expérience de l'agir humain. Son objectif serait d'analyser l'attrait du travail manuel sans tomber dans la nostalgie ou l'idéalisation romantique, mais en étant simplement capable de reconnaître les mérites des pratiques qui consistent à construire, à réparer et à entretenir les objectifs matériels en tant que facteurs d'épanouissement humain."

Matthew B. CRAWFORD
Eloge du carburateur. Essai sur le sens et la valeur du travail.

Remerciements

Tout d'abord je tiens à remercier Bruno Allard, François Costa et Nicolas Ginot pour avoir acceptés d'être les rapporteurs de ce manuscrit. Mais également Jean-Christophe Crébier, Nicolas Rouger et Nadir Idir pour avoir acceptés d'être membres du jury.

Ensuite je souhaite remercier les différentes personnes qui m'ont accompagnées depuis mes débuts à aujourd'hui dans ma vie professionnelle :

Jean-Pierre Masson, Pascal Venet, Daniel Besseyre, Benjamin Ducharne, Frank Morand, Fabien Sixdenier, Dominique Bergogne, Jean-Pierre Chante, Jean-François Roche, Ludovic Derouen, Philippe Lardet, Dominique Planson, Hervé Morel, Bruno Allard, Dominique Tournier, Pierre Brosselard, Xuefang Lin-Shi, Jean-Marie Rétif, François Costa, Jean-Claude Vannier, Emmanuel Odic, Mike Kirkpatrick, Philippe Dessante, Dario Morales, Rafael Hordonez, Miguel Lopez, Xavier Jannot, Benjamin Dagusé, Christope Gutfrind, Florent Robert, Maialen Boyra, Dany Prieto, Christophe Ledoux, Kamal Ejjabraoui, Chérif Larouci, Claude Marchand, Ghislain Remy, Ivan Kravtzoff, Gilbert Bergna Diaz, Jack Robert, Emmanuel Godoy, Pedro Rodriguez, Ali Jaafar, Cristina Vlad, José De Freitas, Martin Hennebel, Yannick Phulpin, Marc Petit, Stéphanie Douesnard, Damien Huchet, Emmanuel Vazquez, Julien Bect, Filipe Vinci, Magali Brunet, Marta Molinas, James Roudet, Jean-Luc Schanen, Jean-Paul Ferrieux, Pierre-Olivier Jeannin, Yvan Avenas, David Frey, Nicolas Rouger, Jean-Christope Crébier, Edith Clavel, Yves Lembeye, Benoit Sarrazin, Alexis Derbey, Jean-Michel Guichon, Rachelle Hanna, Djidji, Florian Dumas, Roland Auvergne, Jacques Davoine, Antoine Labonne, Gérard Gruffat, Johane Delaine, Sokchea Am, Van-Sang Nguyen, Clément Fita, Mahmoud Ibrahim, Gaëtan Perez, Ole Christian Spro et tous ceux que j'ai oublié...

Je tiens à remercier mes parents et mon frère qui ont toujours été des modèles pour moi.

Je tiens à remercier tout particulièrement Mariette qui a su me donner une autre vision de la recherche, qui a su me motiver pour mener à bien mes projets de recherche et d'enseignement, qui a su me pousser dans mon projet de carrière et qui surtout est à mes côtés tous les jours ☺.

Table des matières

I Curriculum Vitae et Production Scientifique **3**

I Curriculum vitae **5**
I.1 Etat civil . . . 5
I.2 Diplômes . . . 5
I.3 Parcours professionnel . . . 5
I.4 Activités d'enseignement . . . 6
I.4.a Vacataire à l'INSA de Lyon, 2002 – 2004 . . . 6
I.4.b Professeur Assistant à Supélec, 2006 – 2012 . . . 6
I.4.b-i Formation initiale . . . 6
I.4.b-ii Formation continue . . . 7
I.4.b-iii Rédaction de documents de supports à l'enseignement à Supélec . . . 8
I.4.b-iv Vacataire à l'Ecole Centrale de Paris . . . 8
I.4.b-v Vacataire à l'ESIEA . . . 8
I.4.b-vi Concours Centrale – Supélec . . . 8
I.4.b-vii Bilan des enseignements à Supélec . . . 9
I.4.c Maître de Conférences à ENSE^3 (G-INP) . . . 9
I.4.c-i Formation initiale : réforme pédagogique (rentrée 2015) 9
I.4.c-ii Correspondant formation continue de l'ENSE3 . . . 9
I.4.c-iii Formation Initiale : 2012 - 2017 . . . 10
I.4.c-iv Formation Continue . . . 12
I.4.c-v Bilan des enseignements – ENSE3 G-INP – 2012 - 2017 13
I.4.d Bilan des responsabilités d'enseignement . . . 13
I.5 Rayonnement scientifique . . . 14
I.5.a Comités de lecture . . . 14
I.5.b Chairman . . . 14
I.5.c Participations à des jurys de thèse . . . 14
I.6 Activités de recherche menées à SUPELEC sur la période 2006–2012 . . . 16
I.6.a Commission Energie du Conseil Scientifique de SUPELEC . . . 16
I.6.b Partenariats industriels, expertises, projets de pôles de compétitivité sur la période 2006 - 2012 (Supélec) . . . 16
I.6.b-i Contrats industriels & Expertises . . . 16
I.6.b-ii Documents rédigés pour les Contrats industriels & Expertises 17
I.6.b-iii Projets de pôle de compétitivité . . . 18
I.6.b-iv Documents rédigés pour les projets de pôle de compétitivité 18
I.6.b-v Projets de recherche divers . . . 19

I.7 Activités de recherche menées au G2Elab depuis 2012 19
I.8 Encadrements – SUPELEC (2006–2012) 20
I.8.a Bilan des encadrements sur la période 2006 – Sept. 2012 20
I.8.b Thèses 20
I.8.b-i Projets initiés 20
I.8.b-ii Thèses initiées à Supélec 20
I.8.b-iii Soutenues 20
I.8.c Stages post-doc 21
I.8.d Master 2 recherche 21
I.9 Encadrements – G2Elab (2012 –) 21
I.9.a Bilan des encadrements sur la période Sept. 2012 – Mars 2017 . 21
I.9.b Thèses 22
I.9.b-i Thèses soutenues 22
I.9.b-ii Démissionnaire 22
I.9.b-iii En cours 22
I.9.c Post-doctorat 22
I.9.d Master 2 recherche 22
I.10 Bilan global des encadrements et devenir des doctorants 23

II Production scientifique **25**
II.1 Liste des publications 25
II.1.a Bilan des publications sur la période 2002–2017 25
II.1.b Revues Internationales 25
II.1.c Conférences Internationales avec comité de lecture 27
II.1.d Conférences Nationales avec comité de lecture 32
II.1.e Conférences Nationales sans comité de lecture 34

II Développement Scientifique **35**

III Modélisations dynamiques et lois de commande des convertisseurs. Interactions *physique 3D* / *performances dynamiques* **39**
III.1 Introduction à la thématique de la modélisation dynamique et lois de commande des convertisseurs de puissance 40
III.2 Travaux de recherche sur la modélisation et lois de commande sur la période 2006 – 2012 41
III.2.a Modélisation par modèles moyens et commandes linéaires – Résumé des travaux de doctorat de Muhammad USMAN IFTIKHAR (2005 – 2008) 41
III.2.b Modélisation par modèles moyens, commande non-linéaire et approches énergétiques – Résumé des travaux de doctorat de Ali JAAFAR (2008 – 2011) 42
III.2.c Modélisation affine par morceaux et commande prédictive – Résumé des travaux de doctorat de Cristina VLAD (2009 – 2012) 43
III.3 Introduction à la thématique des interactions *physique 3D* / *performances dynamiques* 44
III.3.-i Travaux de recherche de Kamal EJJABRAOUI (2007 – 2010) 45
III.3.-ii Travaux de recherche de Hadi ALAWEIH (2011) 45

III.4 Conclusion 45

IV Optimisation des convertisseurs de puissance et de sous-systèmes 47
IV.1 Introduction 47
IV.2 Travaux de recherche sur la période 2007 – 2012 49
IV.2.a Contexte et motivations 49
IV.2.b Résumé des travaux de doctorat de Kamal EJJABRAOUI 50
IV.2.c Résumé des travaux de doctorat de Christophe LEDOUX 53
IV.2.d Outil générique pour l'optimisation analytique 3D des convertisseurs DC-DC 60
IV.2.e Optimisations des fonctions de transmissions pour circuits de commande rapprochée d'interrupteurs de puissance 64
IV.3 Travaux sur la période 2012-2017 64
IV.3.a Introduction 64
IV.3.b Optimisation de μ-inductances 64
IV.3.c Optimisation de transformateur planar pour application plasma 67
IV.3.d Travaux de doctorat de Mahmoud IBRAHIM 72
IV.3.e Travaux de doctorat de Sokchea AM 74
IV.4 Conclusion 76

V Commande rapprochée des interrupteurs de puissance 77
V.1 Introduction 77
V.2 Travaux de recherche, doctorat (2002-2005) 79
V.2.a Contexte et problématique 79
V.2.b Résultats essentiels 79
V.2.c Fonction de transmission d'ordre par transformateur coreless . 79
V.2.d Modélisation du phénomène d'avalanche dynamique des cellules PT-IGBT 82
V.2.e Conclusion sur les travaux de doctorat 85
V.3 Travaux de recherche sur la période 2010-2017 85
V.3.a Introduction et motivations 85
V.3.b Fonction de transmission d'ordres 86
V.3.c Evolution et amélioration de la fonction de transmission d'ordre 89
V.3.d Vers un driver à isolation galvanique pour la moyenne tension . 95
V.3.e Drivers pour composants à commutations rapides 97
V.3.f Mise en oeuvre de matériaux à effets GMI pour une fonction de transmission d'ordres 100
V.3.g Commande rapprochée des interrupteurs en diamant 103
V.4 Conclusion 104

VI Projet scientifique & Perspectives – Commande rapprochée des interrupteurs de puissance 105
VI.1 Choix & Positionnement scientifiques 105
VI.2 Problématique & Etude bibliographique générales 107
VI.3 Haute isolation galvanique, haute vitesse de commutation, haute température, couplages 108

A Quelques projets exploratoires **1**
A.1 Projet GANEX 1
A.2 Fonction de transmission d'impulsions à base de transformateur coreless monolithique en technologie GaN 3
A.3 Convertisseur classe E à haute fréquence pour composants HEMT-GaN 6

Bibliographie **7**

Table des figures

III.1 Synoptique de la modélisation dynamique linéarisée et lois de commande classiques associées. 40
III.2 Modélisation dynamique en mode de conduction discontinue. Comparaison des modélisation par *ordre réduit, ordre plein, ordre plein corrigé* et des résultats expérimentaux pour un convertisseur abaisseur sans filtre d'entrée. 41
III.3 Convertisseur SEPIC développé dans le cadre de la thèse de Ali JAAFAR. 42
III.4 Exemple de découpage en régions d'un convertisseur abaisseur dans l'espace d'état : représentation de type PWA. 44

IV.1 Représentation des axes d'optimisation en électronique de puissance . 48
IV.2 Définition du cycle de conception des convertisseurs de puissance. . . 49
IV.3 Résultats d'optimisation d'un convertisseur abaisseur avec filtre d'entrée : front de Pareto *rendement vs volume*. Influence du volume sur le niveau de perturbation, la température de jonction de l'interrupteur de puissance et de la diode. 51
IV.4 Résultats d'optimisation d'un convertisseur abaisseur avec filtre d'entrée. Mise en évidence de l'interaction entre le volume et le temps de réponse du convertisseur et des influences des contraintes *stabilité, ondulations, rendement, thermique* et *CEM*. 52
IV.5 Optimisation du placement des puces semiconductrices pour un convertisseur abaisseur. Définition du problème d'optimisation géométrique et exemple de simulation thermique 3D avec COMSOL. 52
IV.6 Optimisation du placement des puces semiconductrices pour un convertisseur onduleur triphasé. Définition du problème d'optimisation géométrique et exemple de simulation thermique 3D avec COMSOL. 52
IV.7 Système multi-machines multi-convertisseur pour applications séquentielles. Topologie classique sans mutualisation. 53
IV.8 Système multi-machines mono-convertisseur pour applications séquentielles. Topologie avec mutualisation et aiguilleur de courant. 53
IV.9 Représentation généralisée des interrupteurs de puissance et bases de données associées. 54
IV.10 Modélisation et représentation généralisée des interrupteurs de puissance pour l'onduleur triphasé et aiguilleur. 55
IV.11 Modélisation des dissipateurs et résumé des variables d'optimisation pour les onduleurs. 55

IV.12Résultats d'optimisation des systèmes *{1 onduleur + N-aiguilleurs}* et *{N-onduleurs}*. 56
IV.13Conception par optimisation des systèmes d'électronique de puissance mutualisés : mise en évidence de deux étapes (*choix des composants* et *optimisation du placement/routage*. 57
IV.14Mise en évidence des interactions multi-physiques du placement et du routage en électronique de puissance 57
IV.15Synoptique de l'algorithme d'optimisation du placement/routage des convertisseurs de l'électronique de puissance 58
IV.16Modélisation électrique-géométrique du convertisseur abaisseur : optimisation du placement / routage. Application au convertisseur abaisseur. 59
IV.17Schéma du convertisseur abaisseur abaisseur sans filtre d'entrée 61
IV.18Modélisation électrothermique de la diode et du MOSFET. Identifications des paramètres. 61
IV.19Paramètres géométriques de l'inductance 62
IV.20Définition de l'encombrement du convertisseur 62
IV.21Fronts de Pareto du convertisseur abaisseur sans filtre d'entrée. 63
IV.22Variables d'optimisation du convertisseur abaisseur. 63
IV.23Variables d'optimisation de l'inductance 64
IV.24Exemple de géométrie pour l'optimisation d'une inductance intégrée [1] 65
IV.25Exemple de caractérisation du matériau magnétique utilisé [1] 65
IV.26Exemple de maillage de la structure géométrique et exemple d'une résolution numérique de la répartition spatiale de l'induction magnétique 66
IV.27Comparaison des fronts de Pareto entre la méthode énergétique et la méthode incrémentale. Confrontations aux mesures. 66
IV.28Premier « run » et second « run ». 66
IV.29Comparaison entre premier run et second run de l'inductance en fonction du courant continu. 66
IV.30Inductance en fonction de la fréquence, comparaison entre premier run et second run. 67
IV.31Vue 3D de l'empilement des couches de circuits imprimés et plaques de ferrites. Description 2D du transformateur et définitions des variables géométriques en vue d'une optimisation. 68
IV.32Exemple de maillage et de résolution numérique du champ magnétique dans le transformateur planaire. 69
IV.33Résultats d'optimisation sous forme de fronts de Pareto. 69
IV.34Réalisation physique du prototype. 70
IV.35Modélisation complète du transformateur planaire avec prise en compte des éléments parasites capacitifs et des sondes de tension. 70
IV.36Influence de la sonde de tension sur la mesure de la tension de sortie du transformateur dans le cas d'une charge capacitive. 71
IV.37Optimisation d'un ensemble panneaux solaires photovoltaïques et convertisseurs DC-DC associés, Mahmoud Ibrahim. 72
IV.38Modélisation et méthodologie d'optimisation d'une inductance pour redresseur synchrone, Mahmoud Ibrahim. 73

IV.39 Photo du prototype d'un convertisseur modulable pour tester des architectures DC-AC et AC-DC, Mahmoud Ibrahim. 74
IV.40 Photo du prototype d'un PFC de 3kW, Mahmoud Ibrahim. 75
IV.41 Structure MMC et sub-modules, Sokchea Am. 75
IV.42 Résultats d'optimisation pour 400kVA, Sokchea Am. 76

V.1 Mise en évidence des fonctions essentielles pour des drivers 80
V.2 Vue 3D et schéma électrique équivalent du transformateur coreless étudié 81
V.3 Photographie du dispositif réalisé et schéma électrique du circuit d'excitation et de réception. 81
V.4 Comparaison des résultats expérimentaux et de simulation de la fonction transmission d'ordres par transformateur coreless. 82
V.5 Mise en évidence de la surtension à l'ouverture lors de la décroissance du courant collecteur i_c 83
V.6 Mise en évidence du phénomène d'avalanche sur une cellule PT-IGBT : localisation de l'avalanche et profile du champ électrique 84
V.7 Résultats expérimentaux, forme d'onde à l'ouverture du module IGBT CM300DU-24H (1200V–300A) à courant collecteur de 1100A, influence de la résistance de grille r_g. 84
V.8 Résultats de la co-simulation MEDICI/SPICE d'une cellule PT-IGBT à l'ouverture. 85
V.9 Synoptique de la fonction de transmission d'ordres, mise en évidence du périmètre des recherches actuelles. 86
V.10 Vue 3D du transformateur magnétique avec matériaux magnétiques et schéma électrique du circuit d'excitation. 86
V.11 Vue 2D du transformateur magnétique avec matériaux magnétiques, définition des variables d'optimisation. 87
V.12 Résultats de simulation électromagnétique 2D du transformateur magnétique et électrique transitoire du circuit complet. 88
V.13 Synoptique de l'algorithme d'optimisation. 88
V.14 Fronts de Pareto 89
V.15 Photographie du dispositif expérimental. 89
V.16 Comparaison mesures / simulations 90
V.17 Schéma électronique de la fonction de transmission d'ordre à haute isolation galvanique et description 2D du transformateur magnétique. 91
V.18 Résultats d'optimisation : fronts de Pareto $I_{mos,max}$ *vs* $V_{out,max}$. Distances d'isolation : 1.6mm ; 2mm ; 2.5mm ; 3mm. Diamètre maximum : 7mm ; 10mm ; 13mm. 92
V.19 Schéma électronique de la fonction de transmission d'ordre, photographie du prototype. 93
V.20 Résultats expérimentaux de la fonction de transmission d'ordre. Mise en évidence du temps de propagation de 70ns pour une distance d'isolation de 2mm et un diamètre de transformateur de 13mm. 93
V.21 Prise en compte des éléments parasites pour la modélisation circuit du système de transmission d'ordres. Identifications des résistance et inductance série des condensateur des résonances. 94

V.22 Comparaison entre résultats de simulation et mesures expérimentales. 94
V.23 Driver à haute isolation galvanique. 95
V.24 Détails de réalisation des transformateurs à haute isolation galvanique. 95
V.25 Résultats expérimentaux d'un driver à haute isolation galvanique pour une distance d'isolation de 0.5mm. 96
V.26 Résultats expérimentaux d'un driver à haute isolation galvanique pour une distance d'isolation de 1mm. 96
V.27 Dispositif expérimental pour tests de tenue en tension de matériaux isolants. 97
V.28 Architectures de driver pour bras d'onduleur 98
V.29 Résultats expérimentaux, courant de circulation dû à un fort *dv/dt* (40V/ns) sur un bras d'onduleur, architecture classique 99
V.30 Résultats expérimentaux, courant de circulation dû à un fort *dv/dt* (40V/ns) sur un bras d'onduleur, nouvelle architecture 99
V.31 Mise en oeuvre expérimentale pour la caractérisation de l'impédance des fils à effet GMI en fonction d'un champ quasi-statique. 100
V.32 Exemple de caractérisation du module de l'impédance d'un fil à effet GMI de 30μm de diamètre. 101
V.33 Premier dispositif de transmission de sgnaux PWM à base de matériaux GMI. 101
V.34 Mise en évidence des temps de propagation du driver à base de matériaux GMI. 102
V.35 Diodes Schottky en diamant réalisées à l'Institut Néel. 103
V.36 Evolution de la chute de tension à l'état passant en fonction de la température et de la densité de courant. 103

VI.1 Bilan des encadrements sur la période 2006-2012 (Supélec). 106
VI.2 Bilan des encadrements depuis septembre 2012 (G2Elab). 106
VI.3 Thématique de la Commande rapprochée des interrupteurs de puissance et problématiques connexes 107
VI.4 Topologies de drivers : simple & double 108
VI.5 Driver double pour bras d'onduleur à 2-niveaux avec tension de bus (V_{BUS}) élevée 109
VI.6 Driver double pour bras d'onduleur de type MMC 109
VI.7 Synthèse des problématiques, tenue en tension, vitesse de commutation, température de fonctionnement et interactions potentielles. 110

A.1 Schéma de principe du convertisseur boost avec mise en oeuvre de puces HEMT-GaN en parallèle en structure cascode. 1
A.2 Détails de fabrication du prototype pour le projet exploratoire GANEX 2
A.3 Prototype final 2
A.4 Commutations en tension des transistors HEMT-GaN (V_{bus}=5V, 10V, 30V) 3
A.5 Schéma de principe de la fonction de transmission d'impulsions isolées. 4
A.6 Photographie du dispositif intégré (transistor HEMT-GaN, condensateurs de résonances, résistance de sortie, transformateur coreless). 4
A.7 Photographie de la mise en oeuvre du circuit intégré. 5

A.8 Résultats expérimentaux de la fonction de transmissions d'impulsions intégrée sur technologie GaN du CEA-Leti. 5
A.9 Schéma de principe du convertisseur DC-DC isolé de classe E^2. 6
A.10 Prototype du convertisseur DC-AC de classe E. 6

Introduction générale

L'exercice de l'*Introduction Générale* n'est pas chose facile. Ne pas tomber dans le piège des généralités trop *"générales"* l'est encore plus... De ce fait, je ne me risquerais surtout pas de dire que notre consommation d'énergie augmente de jour en jour, que nous nous devons de travailler sur les économies d'énergies et sur la meilleure gestion de nos consommations. Peut-être devrions nous réduire notre consommation d'énergie pour que les générations futures puissent profiter autant que nous de notre planète...

Mais je pense que je m'écarte de l'objet de cette *Introduction Générale* qui est au final de motiver mes choix de recherche dans le domaine de l'électronique de puissance. Le constat actuel (2017) de notre société nous montre que nous utilisons l'énergie électrique à beaucoup de niveaux : transports (voiture électrique, tramway, train, avion, vélo, etc.), électroménager, produits informatiques (PC, smartphone, etc.), réseaux de transports et de distribution (liaison HVDC, réseau MVDC), industrie (motorisation électrique), production (éolienne, solaire, etc.), etc. Les *interrupteurs de puissance* (communément appelés les transistors de puissance) sont au coeur de tous ces systèmes d'électronique de puissance qui permettent de réaliser des fonctions de conversion d'énergie électrique.

L'historique de mes activités de recherche montre que j'ai débuté par le pilotage de modules IGBT pour des applications de forte puissance (travaux de doctorat). Cette problématique ne cesse de m'animer et depuis l'apparition des transistors grand-gaps (JFET-SiC, MOSFET-SiC, IGBT-SiC, HEMT-GaN, MOSFET en diamant) cette thématique se repositionne au coeur des verroux technologiques actuels (2017). En effet, plusieurs indices actuels comme l'apparition des véhicules automobiles électriques, de l'intensification des actionneurs électriques en aéronautique, l'utilisation de liaisons HVDC, de déploiement des Smart Grids et des réseaux de distribution MVDC [2] [3] ... nous indiquent que l'électronique de puissance va continuer une de ses évolution vers l'utilisation de composants plus rapides, de plus haute tenue en tension, de plus haute tenue en température, etc. De ce fait, en plus de la filière Silicium, qui n'a peut-être pas dit son dernier mot, les nouvelles filières technologiques SiC et GaN nous proposent des composants pouvant fonctionner à 15kV pour des MOSFET et IGBT-SiC avec des fronts de commutation de 100V/ns [4] [5] [6] ; des HEMT-GaN pouvant commuter à 450V/ns pour des HEMT-GaN sous une tension de 400V [7]. Ce contexte actuel (2017) constitue une voie d'exploration que je développe

dans le Chapitre VI à partir la page 105.

Dans un premier temps, je propose un *curriculum vitae* détaillé sur mes activités d'enseignement et de recherche avec une liste de publications.

Ensuite je développe trois grandes parties de mes activités de recherche :

— Modélisations dynamiques et lois de commande des convertisseurs. Interactions *physique 3D* / *performances dynamiques*

— Optimisation des convertisseurs de puissance

— Commande rapprochée des interrupteurs de puissance

Pour terminer, je propose les grandes lignes d'un projet de recherche sur la thématique de la *commande rapprochée des interrupteurs de puissance*.

Première partie

Curriculum Vitae et Production Scientifique

Chapitre I

Curriculum vitae

I.1 Etat civil

Pierre LEFRANC
Maitre de Conférences ENSE^3 (G-INP) – G2Elab.

Né le 3 avril 1979 à Marseille, 37 ans.

Adresse professionnelle :
G2Elab
Bâtiment GreEn-ER
21 avenue des Martyrs
CS 90624
38031 GRENOBLE CEDEX 1
Email : pierre.lefranc@g2elab.grenoble-inp.fr
Téléphone : 04–76–82–71–83

I.2 Diplômes

— 2005 : Thèse de doctorat de l'INSA de Lyon
— 2002 : DEA de Génie Electrique de Paris XI
— 2002 : Ingénieur Supélec

I.3 Parcours professionnel

— Depuis septembre 2012 : Maître de Conférences ENSE^3 – G2Elab.
— Fev. 2006 – Sept. 2012 : Professeur Assistant au département Energie de Supélec.
— 2002-2005 : thèse de doctorat au Laboratoire Ampère de Lyon, convention CIFRE, Sociéte Arcel, Champagne au Mont d'Or (69).

I.4 Activités d'enseignement

I.4.a Vacataire à l'INSA de Lyon, 2002 – 2004

Pendant mon doctorat au Laboratorie Ampère de Lyon, j'ai effectué des enseignements à l'INSA de Lyon dans les Départements de Génie Energétique et de Génie Electrique :

- 2002–2004, TP Automatique, 3^e année INSA (Niveau L3), Travaux pratiques d'automatique, bases de l'automatique, 41,6h (TD)
- 2003–2004, Projet de de fin d'étude, 5^e année INSA (Niveau M2), Encadrement partagé d'un groupe de quatre étudiants travaillant sur l'étude d'une alimentation isolée à base de transformateurs piézoélectriques (1/2 journée par semaine), 11h (TD)
- 2003–2004, Suivi de stage à l'étranger, 4^e année INSA (Niveau M1), tuteur pour un étudiant en stage en Angleterre, 2h (TD)

I.4.b Professeur Assistant à Supélec, 2006 – 2012

I.4.b-i Formation initiale

Troisième année - Niveau M2 -

TD de simulation en électronique de puissance, option Conversion d'Energie (6h) : suite à un TD sur le dimensionnement d'une structure Flyback, le logiciel Simplorer est utilisé. La prise en main d'un outil de simulation pour l'électronique de puissance est relativement nouveau pour les étudiants. Après une prise en main du logiciel, le dimensionnement de deux circuits d'aide à la commutation est effectué et le fonctionnement est vérifié par simulation. Responsable de cours : **P.Lefranc**.

TD de modélisation dynamique des convertisseurs DC-DC, option Conversion d'Energie (9h) : la modélisation par modèles moyens est abordée en cours magistral. Ce TD a pour but de modéliser et simuler un hacheur abaisseur avec filtre d'entrée en régime dynamique et d'effectuer sa régulation. Responsable de cours : **P.Lefranc**.

Etudes Industrielles : tous les étudiants de Supélec effectuent en troisième année un projet avec un industriel. Il se déroule de début octobre à fin mars. Le problème est imposé par l'industiel. L'encadrement consiste à suivre les étudiants jusqu'à la rédaction d'un rapport final et d'une soutenance en présence de l'industriel.

Cours sur les bases de l'électronique de puissance : cours dispensé pour l'option de troisième année Energie Electrique (ENE) commune à Centrale Paris et Supélec. **Responsable de cours**. En cinq cours de 3h, il s'agit de donner aux étudiants une culture solide en électronique de puissance : composants silicium, composants passifs, théorie de base des interrupteurs, topologies des convertisseurs, classification des convertisseurs, modélisation dynamique pour la commande, les convertisseurs pour le transport et la distribution de l'énergie électrique. Les 15h de cours sont complétées par un TD de 3h sur le dimensionnement d'un convertisseur flyback afin d'entrer dans les détails des calculs et des choix de composants réels. **Ce cours est accompagné d'un polycopié** : *Introduction à l'électronique de puissance : principes de conversion, applications, composants, lois de commande et conception*, **P.Lefranc**, E.Godoy, X.Jannot, A.Thurin, A.Jaafar, M.Boyra, 275 pages.

Master 2 Recherche Véhicules et Transport Durable, Spécialité électrification et propulsion automobile - Ce Master 2 Recherche est co-habilité entre l'ENS de Cachan, l'IFP School, l'Ecole Centrale de Paris et Supélec.

Cours sur les bases de l'électronique de puissance; années 2009–2010, 2010–2011 : Bases de l'électronique de puissance : **co-responsable d'enseignement** en binôme avec Bertrant Revol de l'ENS de Cachan. 9h de cours + 3h de TD sur la modélisation dynamique des convertisseurs de l'électronique de puissance. Examen en binôme sur l'ensemble du cours.

Deuxième année - Niveau M1 -

TD d'électrotechnique (6h) : les TD sont relatifs au cours Traitement et Conversion d'Energie Electrique. Ils ont pour but d'étudier plus en détails un convertisseur forward, les ponts redresseurs de base (diode, thyristor et mixte), la machine asynchrone associée à un onduleur et la machine synchrone en génératrice couplée sur un réseau.

TD d'électrotechnique et d'automatique (12h) : les TD sont relatifs au cours Entrainement des Systèmes à Vitesse Variable. Cette matière combine des notions d'entrainement électromécanique (machine à courant continu), d'électronique de puissance (redresseur et onduleur) et d'automatique (modélisation, représentations fréquentielle et temporelle, régulateurs, observateurs).

TP d'électrotechnique et d'automatique (50h par an) : les TP sont relatifs au cours Entrainement des Systèmes à Vitesse Variable comme cité précédement. Les étudiants sont amenés à identifier les paramètres électromécaniques d'une machine à courant continu, à simuler le système complet et à effectuer une régulation cascade par simulation et enfin d'implémenter cette régulation via une carte d'acquisition et un pont en H sur un moteur de 10kW.

Projet de conception (2 mois, environ 2h d'encadrement par semaine par binome, 2 binomes par an) : les étudiants travaillent sur un sujet proposé par un enseignant (ou quelques fois à l'initiative des étudiants) pendant deux mois à la fin de l'année.

Première année - Niveau L3 -

Projet de synthèse (2 mois, environ 2h d'encadrement par semaine par binome, 2 binomes par an) : les étudiants travaillent sur un sujet proposé par un enseignant (ou quelques fois à l'initiative des étudiants) pendant deux mois à la fin de l'année.

I.4.b-ii Formation continue

- PG16 : *Modélisation dynamique et commande des convertisseurs de puissance : perfectionnement et méthodologies avancées*. Nouvelle formation au catalogue 2012. **Responsable de cette formation** avec Emmanuel Godoy du Département Automatique de Supélec.
- BG04 : *Alimentations à découpage : état de l'art et perspectives*. 2006–2011. Intervenant, TP de simulation numérique Matlab/Simulink, convertisseurs forward et demi-pont à résonance. 3.5h TP.
- BG13 : *Fondamentaux de l'électrotechnique*. 2006–2011. Intervenant, TP de simulation numérique Matlab/Simulink, ponts redresseurs, onduleurs, machines électriques. 3.5h TP.

— BpG37 : *Machines à courant alternatifs à vitesse variable*, session Renault. 2010-2012. Intervenant, cours sur les semiconducteurs de puissance. 2h de cours.
— BpG38 : *Electronique de puissance*, session Renault. 2009–2012. Intervenant, cours sur les semiconducteurs de puissance. 6.5h de cours.
— PpG20A : *Réseau d'énergie électrique*. Session SBM. 2011. Intervenant, cours sur les structures de l'électronique de puissance, composants semiconducteurs, modélisation dynamique, dimensionnement. 20h de cours.
— PpG19 : *Electronique de puissance – Structures et composants*. Session Thales. 2008–2010. Intervenant, cours sur les semiconducteurs de puissance, simulation numérique. 3h de cours + 3h de TP.

I.4.b-iii Rédaction de documents de supports à l'enseignement à Supélec

Introduction à l'électronique de puissance : principes de conversion, applications, composants, lois de commande et conception, **P.Lefranc**, E.Godoy, X.Jannot, A.Thurin, A.Jaafar, M.Boyra, 275 pages. Support de cours d'Electronique de Puissance pour les étudiants de Supélec–Centrale Paris de l'Option Energie Electrique.

Introduction à l'électronique de puissance : modélisations statique et dynamiques des convertisseurs DC-DC, lois de commande, **P.Lefranc**, E.Godoy, A.Thurin, A.Jaafar, 65 pages. Support de cours d'Electronique de Puissance pour les étudiants du Master 2 Recherche Véhicules et Transport Durable, Spécialité électrification et propulsion automobile.

I.4.b-iv Vacataire à l'Ecole Centrale de Paris

TD sur les FACTS - Niveau L3 ; années 2008–2009, 2009–2010, 2010–2011 : TD dispensés à l'Ecole Centrale de Paris. Il s'agit d'étudier, en deux TD de 1.5 heure, plusieurs solutions de compensation d'énergie réactive : condensateur, machine synchrone et onduleur (FACTS).

Encadrement de projets - Niveau M1 ; années 2008–2009, 2009–2010, 2010–2011 : Encadrement de projets en électronique au LISA (Laboratoire d'Informatique et de Systèmes Automatisés) de l'Ecole Centrale de Paris (Laurent CABARET). Coopération entre Centrale Paris et Supélec.

I.4.b-v Vacataire à l'ESIEA

Cours sur les bases de l'électronique de puissance - Niveau M2 ; années 2009–2010, 2010–2011 et 2011–2012. Cours dispensé pour des étudiants de dernière année de l'ESIEA (Ecole Supérieure d'Informatique Electronique Automatique) à Paris. En quatre cours de 3h et un TD de 3h, il s'agit de donner aux étudiants une culture en électronique de puissance.

I.4.b-vi Concours Centrale – Supélec

J'ai fait partie du Jury du Concours Centrale–Supélec de 2009 à 2011 (Epreuve écrite filière TSI) : sujet de secours pour l'année 2010 et sujet principal pour l'année 2011.

I.4.b-vii Bilan des enseignements à Supélec

Le tableau ci-dessous donne le bilan des enseignements dispensés à Supélec entre février 2006 et septembre 2012.

Tableau récapitulatifs des enseignements 2002–2012 : ***valeurs en heure****.*

Doctorat	2002–2003 ; 2003–2004	**69.96h**
Master Recherche	2010–2011 ; 2011–2012	**24h**
ESIEA	2009–2010 ; 2010–2011	
	2011–2012	**36h**
Ecole Centrale de Paris, LISA	2008–2009 ; 2009–2010	
	2010–2011	**110h**
Supélec	2006–2007 ;07–08 ;08–09	
	09–10 ;10–11 ;11–12	**1096.5h**
	Total	**1336.46h**

I.4.c Maître de Conférences à ENSE^3 (G-INP)

I.4.c-i Formation initiale : réforme pédagogique (rentrée 2015)

Une réforme pédagogique a été mise en oeuvre pour la rentrée 2015 au niveau de G-INP et plus particulièrement à l'ENSE3. Les enseignements présentés dans le paragraphe I.4.c-iii sont modifiés pour répondre à la nouvelle maquette pédagogique qui impose des Unités d'Enseignement de 60 heures.

Je porte la résponsabilité de quatre UE :

— Modélisation dynamique et commande des convertisseurs – Filière IEE (Ingénierie de l'Energie Electrique) – Niveau M1. Intervenants : R.Riu, H.Khennouf, A.Bratcu, **P.Lefranc**.

— Actionneurs de puissance – Filière ASI (Automatique Systèmes et Information) – Niveau M1. Cours d'électronique de puissance (**P.Lefranc**), Actionneurs électromécanique (D.Riu), Actionneurs hydrauliques (J-L.Amen).

— Projet d'application (conception de convertisseur) – Filière IEE – Nineau M2 : projet de réalisation d'un convertisseur sur la base d'un cahier des charges.

— Electronique de puissance pour la filière Apprentissage Génie Electrique et Energétique de l'ENSE3 (2eme année - -Niveau M1).

J'interviens dans plusieurs enseignements :

— Electronique d'interfaçage et d'instrumentation – Niveau L3 – TP.

— Semiconducteurs et drivers – Filière IEE – Niveau M2 – Cours & TP.

I.4.c-ii Correspondant formation continue de l'ENSE3

Depuis février 2015, je remplace Jean-Pierre Rognon en tant que "correspondant formation continue" à l'ENSE3. La formation continue de G-INP est organisée avec la Direction de la Formation Continue (directeur, directeur pédagogique, chargés d'affaires, personnels administratifs) puis les correspondants dans chacune des écoles du groupe dont l'ENSE3.

Tout d'abord, mon rôle est d'assurer le suivi des dossiers suivants :

— DPE (titre d'ingénieur diplômé par l'État) : l'examen conduit à la délivrance du titre d'ingénieur diplômé par l'État (D.P.E.). Il permet à des ingénieurs de fonction d'obtenir un titre d'ingénieur diplômé par validation de leurs expériences et acquis professionnels.

— VAE (Validation des Acquis de l'Expérience) : peut permettre d'obtenir un diplôme, un titre à finalité professionnelle ainsi qu'un certificat de qualification.
— VES (Validations des Etudes Supérieures) : permet de faire valider des études supérieures suivies antérieurement (université, école, institut, organisme de formation, etc.), en France ou à l'étranger dans un domaine en rapport avec le diplôme visé.
— DHET (Diplôme de Hautes Etudes Technologiques) : permet d'inscrire des personnes ayant déjà travaillé dans l'industrie à l'ENSE3 (ou à une autre école de G-INP). Il s'agit de définir un programme de cours (qui peut être partagé avec une autre école de G-INP), de lui faire passer un jury d'admission puis de le suivre lors de son année scolaire.

Ensuite, mon rôle est de promouvoir les stages de formation continue (dits Inter et Intra Entreprise). L'ENSE3 apparaît actuellement dans la rubrique "Energie - Eau - Environnement" de l'offre de la formation continue de G-INP. L'offre est déclinée en 4 sous domaines :

— Efficacité énergétique
— Production, distribution, réseaux
— Electrotechnique
— Environnement, hydrologie

Au total, cette offre correspond à environ 30 stages.

I.4.c-iii Formation Initiale : 2012 - 2017

TP d'électrotechnique – Filière IEE – Niveau M1 – Années 2012-2013, 2013-2014, 2014-2015. Ces TP ont pour objectifs de mettre en application des concepts théoriques tels que les machines synchrones, les panneaux solaires photovoltaïques, les convertisseurs à découpage. 5 TP différents sont proposés aux étudiants : étude d'une machine synchrone couplé au réseau, transformateur triphasé, onduleur pour compensation harmonique et énergie réactive, chargeur de batterie, panneau solaire et hacheur MPPT. Responsable de l'enseignement : V.Debusschere.

Electronique de puissance – Filière ASI (Automatique Systèmes et Information) – Niveau M1 – Années 2012-2013, 2013-2014 , 2014-2015, 2015-2016, 2016-2017. Ce cours a pour objectif de donner les bases de l'électronique de puissance aux étudiants de la filière ASI. Dans ce contexte d'une filière "automatique", un soin particulier est porté sur la modélisation dynamique des convertisseurs (modèles moyens) et des commandes associées. Ce cours est constitué de 12h de cours magistral (40 étudiants) et 8h de TP (20 étudiants). Responsable du cours : **P.Lefranc**.

Dimensionnement des convertisseurs – Filière IEE – Niveau M1 – Années 2012-2013, 2013-2014, 2014-2015. Ce cours a pour objectif de montrer et de donner les connaissances nécessaire pour dimensionner les convertisseurs de l'électronique de puissance. Les étudiants sont en première année de la filière IEE (Ingénierie de l'Energie Electrique). La première partie consiste à développer les connaissances théoriques des semiconducteurs et des systèmes de refroidissement dans un contexte d'ingénierie de conception. La deuxième partie consiste à travailler sur une maquette d'un convertisseur de type abaisseur pour appréhender physiquement les comportements

électro-thermique-dynamique des semiconducteurs de puissance. Ce cours est constitué de 4h de cours magistral (30 étudiants) et de 8h de TP (15 étudiants). Responsable du cours : **P.Lefranc**.

Electronique d'interfaçage et d'instrumentation – Niveau L3 – Années 2012-2013, 2013-2014 , 2014-2015. Ce cours a pour objectif de donner les bases en électronique analogique (composants passifs, transistors, diode, AOP, comparateur) dans un contexte d'instrumentation (capteur actif, passif, conditionneur, oscillateur). La première partie consiste à développer le contexte et le fonctionnement des capteurs ; la deuxième partie les composants de l'électronique (JFET, diode, AOP, comparateur) : puis la troisième partie à "concevoir" des fonctions de conditionnement et pré-traitement pour aboutir à des capteurs complets. Ce cours est constitué de 22h de cours magistral (100 étudiants), 6h de TD (25 étudiants) et 24h de TP (25 étudiants). Responsable de l'enseignement : M.Brunello.

Interrupteurs de puissance et drivers – Filière IEE – Niveau M2 – Années 2013-2014, 2014-2015. Ce cours a pour objectif d'approfondir les connaissances sur les interrupteurs de puissance à base de semiconducteurs et les systèmes de commande rapprochée (driver). Ce cours prépare les étudiants à un projet de conception-réalisation d'un convertisseur DC-DC isolé (24V-12V). Ce cours est constitué de 4h de cours magistral (20 étudiants). Responsable du cours : **P.Lefranc**.

Conception de convertisseur (Projet d'application) – Filière IEE – Niveau M2 – Années 2013-2014, 2014-2015, 2015-2016. Les étudiants de la filière IEE sont positionnés dans un contexte de conception de convertisseur sur la base d'un cahier des charges : convertisseur DC-DC isolé de 100W (24V-12V). Les cours magistraux (structure, thermique, interrupteurs de puissance et drivers) sont un appui pour la conception et la réalisation. Les étudiants doivent concevoir et réaliser le système répondant au cahier des charges. Intervenants : Y.Avenas, H.Chazal, **P.Lefranc**.

Semiconducteurs et drivers – Filière IEE – Niveau M2 – Années 2015-2016, 2016-2017. Ce cours a pour objectif d'approfondir les connaissances sur les interrupteurs de puissance à base de semiconducteurs, les systèmes de commande rapprochée (driver), les systèmes de refroidissement et la compatibilité électromagnétique. Je dispense un cours de 6h sur les MOSFET, IGBT et drivers dans cet unité d'enseignement ainsi qu'un TP de 2h sur la prise en main d'une cellule de commutation. Intervenants : Y.Avenas, J-L.Schanen, R.Hanna, **P.Lefranc**.

Modélisation dynamique et commande des convertisseurs – Filière IEE (Ingénierie de l'Energie Electrique) – Niveau M1 – Années 2014-2015, 2015-2016, 2016-2017. Ce cours a pour objectif de proposer des outils de modélisation dynamique des convertisseurs de l'électronique de puissance pour aller vers la simulation numérique des structures et surtout la conception de lois de commande. Ce cours est organisé en deux parties : modélisation dynamique (P.Lefranc) et lois de commande (D.Riu, H.Khennouf). Ce cours est constitué de 36h de cours magistral (40 étudiants) et 8h de TP (20 étudiants). Intervenants : D.Riu, H.Kennouf, **P.Lefranc**.

Electronique d'interfaçage et d'instrumentation – Niveau L3 – Années 2015-2016, 2016-2017. Ce cours a pour objectif de donner les bases en électronique analogique (composants passifs, transistors, diode, AOP, comparateur) dans un contexte d'instrumentation (capteur actif, passif, conditionneur, oscillateur). Les cours sont dispensés sous forme de documents consultables par les étudiants. Les 7 séances de TP de 4h ont pour objectifs de revenir sur les notions essentielles abordées en cours (documents disponibles) puis ensuite de travailler sur des montages, circuits élémentaires et systèmes complets pour illustrer les notions abordées. Responsable du cours : M.Brunello.

Conception de convertisseur (Projet d'application) – Filière IEE – Niveau M2 – Années 2016-2017. Les étudiants de la filière IEE sont positionnés dans un contexte de conception de convertisseur sur la base d'un cahier des charges : convertisseur DC-DC élévateur pour application automobile. En 60h de projet, les étudiants doivent concevoir et réaliser un système répondant au cahier des charges. Intervenant : **P.Lefranc**.

Electronique de puissance – Filière Apprentissage (Génie Electrique et Energétique) – Niveau M1 – Années 2016-2017. Ce cours a pour objectif de donner les bases de l'électronique de puissance aux étudiants de la filière par apprentissage Génie Electrique et Energétique. Cette unité d'enseignement comporte 20h de cours magistral, 8h de bureau d'étude de simulation et 12h de travaux pratiques sur une maquette. Intervenant : **P.Lefranc**.

I.4.c-iv Formation Continue

MIDEP (Management Ingénierie et Développement de Projet). Promotions 2011–2012 et 2012–2013. Cours d'électronique de puissance : 12h. L'objectif est de donner une culture technique en électronique de puissance à un niveau ingénieur pour un public de formation continue.

Bases de l'électonique de puissance L'objectif est de proposer une formation pour des ingénieurs/techniciens désirant se former en électronique de puissance en tant que débutants. 3 jours de formation, pluieurs intervenants (P-O.Jeannin, N.Rouger, **P.Lefranc**). Ce niveau est au catalogue de la formation continue de G-INP depuis septembre 2014. Cette formation est réalisée pour la première fois les 27-28-29 mai 2015. Responsable de la formation : **P.Lefranc**.

Projets J'ai pour projet de compléter l'offre de la formation continue dans le domaine de l'électronique de puissance sur les thématiques suivantes :

- Drivers pour interrupteurs de puissance
- Conception et optimisation des convertisseurs de puissance
- Modélisation dynamique et commande des convertisseurs

Ces projets seront possibles avec la participation des enseignants et chercheurs de l'équipe électronique de puissance (EP) du G2Elab. Ces projets sont en cours de discussion et de montage.

I.4.c-v Bilan des enseignements – ENSE3 G-INP – 2012 - 2017

Le tableau ci-dessous donne le bilan des enseignements dispensés à l'ENSE3 entre septembre 2012 et juin 2017.

Tableau récapitulatifs des enseignements 2012–2017 : ***valeurs en heure****.*

2012 – 2013	164	Décharge de service de 48h
2013 – 2014	155	Décharge de service de 48h
2014 – 2015	204	
2015 – 2016	252	
2016 – 2017	289	Prévisionnel
Total	**1064h**	**Moyenne de 212h/an**

I.4.d Bilan des responsabilités d'enseignement

A Supélec (2006 – 2012), j'ai été responsable de deux cours :
— Cours d'électronique de puissance pour la filière Energie Electrique.
— Cours d'électronique de puissance pour le Master 2 Recherche Véhicules et Transport Durable (Co-responsable Bertrand Revol).

Aujourd'hui (2017) à l'ENSE3 je porte les responsabilités suivantes :
— Responsable de l'UE "Modélisation et commande des convertisseurs" de la filière IEE
— Responsable de l'UE "Mécatronique 1" de la filière ASI
— Responsable de l'UE "Projet d'application" de la filière IEE
— Responsable de l'UE "Electronique de puissance" de la filière apprentissage
— Correspondant Formation Continue de l'ENSE3

I.5 Rayonnement scientifique

I.5.a Comités de lecture

Je suis reviewer régulier des journaux internationaux suivants et j'ai été reviewer pour les conférences nationales et internationales suivantes :

- IEEE Transactions On Industrial Electronics
- IEEE Transactions On Power Electronics
- IET Power Electronics
- International Journal Of Electronics
- European Journal of Electrical Engineering (EJEE)
- VPPC'10 (2 articles)
- CIFA'12 (1 article)
- ECCE'13 (7 articles)
- ECCE'14 (7 articles)
- PRIME'14 (4 articles)
- ECCE'15 (5 articles)
- ECCE'16 (1 article)
- SGE'16 (1 article)
- ESARS-ITEC'16 (1 article)
- APEC'17 (4 articles)
- ECCE'17 (4 articles)

I.5.b Chairman

- Chairman d'une session poster de SGE 2016.
- *Chairman Session Power Electronics* Converters IV, IECON'09 Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 3-5 novembre 2009, Porto, Portugal.
- *Chairman Session Multilevel Converter*, POWERENG'09 International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, 18-20 march 2009, Lisbon, Portugal.

I.5.c Participations à des jurys de thèse

Jury externes :

1. Rapporteur du jury de mi-thèse de Van Quang Binh NGO, *Control design algorithms for Model-Based Predictive Power Control. Application for Wind Energy*; 3 mai 2016. Directeur de thèse Pedro Rodriguez-Ayerbe, Laboratoire des Signaux et Systèmes, Université Paris-Saclay, CentraleSupélec.
2. Examinateur de la thèse de Sarah NASR, *"Optimisation d'un réseau ferroviaire à l'aide de solutions smart grids"*. Soutenue le 23 mars 2016 à CentraleSupélec. Jury : Marius Iordache, Bruno François, Luc Loron, **Pierre Lefranc (Examinateur)**, Marc Petit, Demba Diallo.
3. Examinateur de la thèse de Thi Yen Mai NGUYEN, *"Ferrite-based micro-inductors for Power Systems on Chip : from material elaboration to inductor optimisation"*. Soutenue le 9 Décembre 2014 à l'Université Paul Sabatier de Toulouse (UT3). Jury : E.Labouré, S.Roy, M.Brunet, J-P.Laur, Z.Valdez-Nava, T.Parra, F.Voiron, **P.Lefranc (Examinateur)**.
4. Examinateur de la thèse de Xavier FONTENEAU, *"Conception d'un onduleur triphasé à base de composants SiC en technologie JFET à haute fréquence de commutation"*. Soutenue le 12 Juin 2014 à l'INSA de Lyon. Jury : S.Lefebvre, P.Lemoigne, P.Lahaye, F.Morel, H.Morel, **P.Lefranc (Examinateur)**.

5. Examinateur, thèse de Moncef HAMMADI, *Contribution à l'intégration de la modélisation et la simulation multi-physique pour conception des systèmes mécatroniques*, soutenance le 12 janvier 2012. Jury : A.Riviere, M.Haddar, C.Marchand, L.Romdhame, JY.Choley, J.Louati, M.Ichou, O.Penas, **P.Lefranc (Examinateur)**.
6. Examinateur de la thèse de Michael HERNANDEZ GOMEZ, *Application of modern control in power electronics*, Dir. de thèse Roméo Ortega et Françoise Lamnabhi–Lagarrigue, Laboratoire Signaux et Systèmes. Soutenance le 22 novembre 2010 à Supélec. Jury : R.Ortega, F.Lamnabhi–Lagarrigue, O.Bethoux, **P.Lefranc (Examinateur)**, R.Grino, D.Jeltsem.
7. Rapporteur européen, thèse de Igor BARAIA ZUBIAURRE, *Series Connection of Power Semiconductors for Medium Voltage Applications*, septembre 2009, thèse soutenue le 21 octobre 2009 à la Faculté de Mandragon, Espagne.

Jurys locaux :

1. Examinateur de la thèse de Van-Sang NGUYEN, *"Conception caractérisation et mise en oeuvre d'un circuit intégré type driver en CMOS pour composants GaN"*. Soutenue le 8 décembre 2016 à l'Université Grenoble Alpes. Jury : Bruno Allard, Stéphane Lefebvre, Eric Labouré, Jean-Christope Crebier, **Pierre Lefranc (Examinateur, co-encadrant)**.
2. Examinateur de la thèse de Sokchea AM, *"Conception et optimisation de modules pour onduleurs MMC de moyenne puissance. Commande rapprochée à haute isolation galvanique et packaging 3D"*. Soutenue le 24 novembre 2016 à l'Université Grenoble Alpes. Jury : Bruno Allard, François Costa, Nicolas Ginot, Jean-Christope Crebier, **Pierre Lefranc (Examinateur, Dir. Thèse)**, David Frey.
3. Examinateur de la thèse de Mahmoud IBRAHIM, *"Conception et optimisation d'Alimentations Sans Interruption"*. Soutenue le 13 juillet 2016 à l'Université Grenoble Alpes. Jury : Bruno Allard, Chérif Larouci, Frédéric Richardeau, **Pierre Lefranc (Examinateur, Co-encadrant)**, David Frey, Jean-Paul Ferrieux.
4. Examinateur de la thèse de Cristina VLAD, *"Commande prédictive des systèmes hybrides et application à la commande de systèmes en électronique de puissance"*. Soutenue le 21 mars 2013 à Supélec. Jury : F.Bouillault, M.Fadel, E.Godoy, N.Langlois, P.Rodriguez, C.Valentin, X.Lin-Shi, **P.Lefranc (Examinateur, Co-encadrant)**.
5. Examinateur de la thèse de Christophe LEDOUX, *"Conception par optimisation de convertisseurs statiques pour applications mono-convertisseur multi-machines séquentielles ; Contribution à l'optimisation du placement-routage"*. Soutenue le 11 décembre 2012 à Supélec. Jury : F.Forest, E.Labouré, F.Lefevre, H.Morel, JL.Schanen, JC.Vannier, C.Larouci, **P.Lefranc (Examinateur, Co-encadrant)**.
6. Examinateur de la thèse de Ali JAAFAR, *Contribution à la modélisation, l'analyse et l'optimisation de lois de commande pour convertisseurs DC-DC de puissance.* Soutenance le 14 novembre 2011 à Supélec. Jury : E.Ostertag, M.Fadel, R.Ortega, X.Linshi, JM.Retif, E.Godoy (Dir.), E.Monmasson, **P.Lefranc (Examinateur, Co-Encadrant)**.
7. Examinateur de la thèse de Kamal EJJABRAOUI, *Contribution à la conception de systèmes mécatroniques automobiles : méthodologie de pré-dimensionnement*

multi-niveau multi-physique de convertisseurs statiques. Soutenance le 4 décembre 2010. Jury : JP.Ferrieux, B.Allard, J.Bigeon, C.Larouci (Co-Encadrant), **P.Lefranc (Examinateur, Co-Encadrant)**, C.Marchand (Dir.)

I.6 Activités de recherche menées à SUPELEC sur la période 2006–2012

I.6.a Commission Energie du Conseil Scientifique de SUPELEC

L'objectif de la "Commission Energie" du Conseil Scientifique de Supélec avait pour objectifs de fournir un avis et des recommandations sur les travaux de recherche menés dans le Département Energie de Supélec où j'étais enseignant-chercheur de 2016 à 2012. Cette commission était constituée d'experts extérieurs à l'établissement (professeurs d'université, directeurs de recherche et industriels). J'y ai présenté mes travaux à quatre reprises :

- C.Ledoux, **P.Lefranc**, C.Larouci, *«Optimisation des convertisseurs de puissance. Application aux systèmes multi-machines mono-convertisseur»*, Commission d'Electrotechnique du Conseil Scientifique de Supélec, 20 juin 2011.
- **P.Lefranc**, P.Dessante, E.Vazquez, *«Modélisation Electrothermique des convertisseurs en électronique de puissance. Vers une démarche d'optimisation géométrique»*, Commission d'Electrotechnique du Conseil Scientifique de Supélec, 21 septembre 2009.
- **P.Lefranc**, S.Mrad, P.Dessante, *«Modélisation thermique et dimensionnement des convertisseurs de puissance par la méthode de représentation diffusive»*, Commission d'Electrotechnique du Conseil Scientifique de Supélec, 15 octobre 2008
- **P.Lefranc**, *«Modélisation des convertisseurs en régime dynamique pour la commande»*, Commission d'Electrotechnique du Conseil Scientifique de Supélec, 5 octobre 2007

I.6.b Partenariats industriels, expertises, projets de pôles de compétitivité sur la période 2006 - 2012 (Supélec)

I.6.b-i Contrats industriels & Expertises

Dans le cadre de la formation des étudiants en dernière année de Supélec, les enseignant-chercheurs sont en charge de trouver des contrats avec des industriels (Convention d'Etude Industrielle – CEI). Chaque CEI correspond à environ 10kEuro de facturation à l'industriel, un binôme d'étudiants est affecté sur chaque étude et un binôme d'encadrement prend en charge le suivi de l'étude. Chaque étude mène à un rapport final et une présentation finale (plus des réunions intermédiaires).

2011

- Faurecia, Convention d'Etude Industrielle (CEI), *Optimisation d'un actionneur*.
- Electricfil Automotive, CEI, *Optimisation d'une application mécatronique*.
- EDF, CEI, *Etude-conception-optimisation d'un onduleur MMC (Multi-level Modular Converter)*.

2010

— Faurecia, Convention d'Etude Industrielle (CEI), *Etude et réalisation de convertisseurs DC-AC pour applications automobiles.*
— Eurocopter, CEI, *Etude-conception-optimisation d'un système de puissance pour application aéronautique.*
— Hispano Suiza, CEI, *Etude-conception-optimisation d'un système PFC pour génératrice synchrone.*

2009

— Valeo, Expertise, *Circuits de commande pour modules IGBT*, 2 jours étude.
— CNES, CEI, *Etude et réalisation d'un convertisseur DC-DC universel pour nano-lanceur et communication par courant porteur.*
— Electricfil, CEI, *Etude d'une boucle de régulation pour vanne électromécanique de boucle d'air pour application automobile.*
— Eurocopter, CEI, *Etude-conception-optimisation d'un système de puissance pour application aéronautique.*
— RTE, CEI, *Etude et modélisation des pertes dans un convertisseur pour liaison HVDC.*

2008

— Areva, CEI, *Etude et simulation d'un convertisseur back-to-back.*
— CNES, CEI, *Etude et réalisation d'un convertisseur DC-DC universel pour nano-lanceur.*
— Eurocopter, CEI, *Mise en oeuvre d'un convertisseur DC-AC pour application aéronautique.*

2007

— Eurocopter, CEI, *Etude et réalisation d'un convertisseur DC-AC pour application aéronautique.*
— France Telecom, CEI, *Etude et réalisation d'un convertisseur DC-DC réversible.*

2006

— Schlumberger, Expertise, *Etude d'un convertisseur DC-DC Classe E*, 2 semaines étude.
— Air Liquide, Expertise, *Etude d'un convertisseur DC-DC à commutations douces pour soudure*, 1 journée étude.
— Poweo, Expertise, *Etude d'un système de compensation d'énergie réactive*, 5 jours étude.
— Air Liquide, CEI, *Régulation d'un convertisseur à commutations douces pour application soudure.*
— CNES, CEI, *Etude d'architectures électriques pour nano-lanceur.*
— Schlumberger, CEI, *Etude et conception d'un convertisseur DC-DC pour outil de forage.*

I.6.b-ii Documents rédigés pour les Contrats industriels & Expertises

— 2006, mars : rapport d'expertise. Société Schlumberger. *Alimentation de classe E.* 31 pages. **P.Lefranc (100%)**.
— 2006, mars : rapport d'expertise. Société Poweo. *Power saver, electricity saving box.* 26 pages. **P.Lefranc (100%)**.
— 2006, juillet : rapport d'expertise. Société Air Liquide. *Convertisseurs pour postes à souder électriques.* 19 pages. **P.Lefranc (100%)**.

— 2009, mai : présentation d'expertise. Société Valeo. *Les transistors et modules IGBT*. 107 pages. **P.Lefranc (100%)**.
— 2009, mai : présentation d'expertise. Société Valeo. *Les transistors MOSFET pour l'électronique de puissance*. 113 pages. **P.Lefranc (100%)**.
— 2009, septembre : rapport d'expertise. Société Valeo. *Expertise driver IGBT*. 55 pages. **P.Lefranc (100%)**.

I.6.b-iii Projets de pôle de compétitivité

Sur la période 2006–2012 (Supélec), j'ai été en charge de participer aux projets de recherche initiés par les pôles de compétitivité MOVEO et ASTECH. Pour chacun des projets cités ci-dessous, j'ai rédigé les parties relatives aux implications de Supélec et ensuite j'ai assuré le suivi de ces projets (doctorants, post-doctorant, livrables, réunions d'avancement, etc.).

— 2010–2013 ; Pôle de compétitivité MOVEO, *Projet OCSYGENE 6 (optimisation du système d'admission d'air et d'EGR du moteur à combustion interne)*. Financement FUI 10.
— 2009–2012 ; Pôle de Compétitivité ASTECH, *Projet CISACS (Concept Innovant de Système d'Actionnement de Commandes de vol secondaires et de Servitudes)*. Co-encadrement de la thèse de Christophe LEDOUX. Financement Région Ile de France.
— 2007–2011 ; Pôle de Compétitivité MOVEO, DAS Mécatronique, Projet O2M (Outils de Modélisation Mécatronique), Sous-Projet SP3, *Pré-dimensionnement en mécatronique automobile*. Co-encadrement de la thèse de Kamal EJJABRAOUI. Financement Région Ile de France.
— 2007–2011 ; Pôle de Compétitivité MOVEO, DAS Mécatronique, Projet O2M (Outils de Modélisation Mécatronique), Sous-Projet SP6, *Electronique 3D pour application mécatronique automobile*. Co-encadrement du post-doctorat de Sabrine MRAD (18 mois). Financement Région Ile de France.

I.6.b-iv Documents rédigés pour les projets de pôle de compétitivité

— 2009, juin : livrable du sous-projet SP6 du projet O2M. *Bibliographie des outils existants sur le marché et de l'état de l'art en relation directe avec l'exigence des scénarios*. 26 pages. Co-rédaction S.Mrad, **P.Lefranc**, P.Dessante.
— 2009, juin : livrable du sous-projet SP6 du projet O2M. *Modélisation et caractérisation électrothermique d'un module MOSFET pour application automobile*. 33 pages. Co-rédaction S.Mrad, **P.Lefranc**, P.Dessante.
— 2010, mars : livrable du sous-projet SP3 du projet O2M. *Documentation de conception du modèle Onduleur Triphasé, Partie Electrique*. 12 pages. **P.Lefranc (100%)**.
— 2009, mars : livrable du projet CISACS. *Spécifications de simulation*. 17 pages. **P.Lefranc (100%)**.
— 2010, janvier : livrable du projet CISACS. *Spécifications de l'onduleur et de l'aiguilleur*. 40 pages. **P.Lefranc (100%)**.
— 2012, janvier : livrable du projet CISACS. *Rapport d'évaluation des performances de l'onduleur*. 9 pages. **P.Lefranc (100%)**.

— 2012, juillet : livrable du projet CISACS. *Modélisation fonctionnelle de l'électronique de puissance*. 12 pages. **P.Lefranc (100%)**.
— 2012 : juillet : livrable du projet CISACS. *Modélisation électrothermique de l'électronique de puissance*. 10 pages. **P.Lefranc (100%)**.

I.6.b-v Projets de recherche divers

Sur la période 2006 – 2012, j'ai participé au montage d'un projet interne SEEDS et de deux projets de mobilité de mes doctorants :

— 2012 ; Bourse de mobilité SEEDS pour Cristina Vlad. Financement de deux semaines pour collaboration avec le laboratoire Ampère de Lyon (Prof. Xuefang LINSHI).
— 2009–2010 ; Bourse de mobilité SEEDS pour Ali Jaafar. Financement de deux semaines pour collaboration avec le laboratoire Ampère de Lyon (Prof. Xuefang LINSHI).
— 2008–2009 ; Projet Interne SEEDS, *Commande directe d'une structure SEPIC, développement d'une brique convertisseur DC/DC universel*. Partenariat avec Xuefang LINSHI (Laboratoire AMPERE de Lyon) et Emmanuel GODOY (Département Automatique de Supélec). Financement de 10kEuros

I.7 Activités de recherche menées au G2Elab depuis 2012

Depuis mon arrivée au G2Elab en septembre 2012, je participe à des projets de recherche nationaux et européens.

— MEGaN : Module Electronique GaN, projet collaboratif national, financement OSEO BPI, 2012–2018. Participation aux workpackages WP3 (Briques génériques drivers) et WP6 (Démonstrateur aéronautique). Financement de 2 doctorants (Van-Sang Nguyen, Clément Fita) et de 2 post-doctorants (Johan Delaine, Van-Sang Nguyen).
— CARNOT Energies du Futur : financement de l'Institut Carnot Energies du Futur, 2013–2016. Financement du doctorant Sokchea Am. Ecriture et gestion du projet.
— CIFRE Eaton : financement du projet de thèse de Mahmoud Ibrahim, 2013–2016.
— Projet Européen Green Diamond : projet collaboratif piloté par l'Institut Néel, financement européen Horizon H2020, 2015–2019. Financement du doctorant G.Perez. Je travaille sur les workpackages WP8 (caractérisations des composants en diamant) et WP9 (gate drivers à haute isolation galvanique).
— Projet ANR Diamond HVDC : More Efficient Power Electronics with DIAMOND Technology for High Voltage. Projet de recherche piloté par Nicolas Rouger du LAPLACE, 2016–2020. Financement d'un post-doctorant. Je suis le correspondant de ce projet pour le G2Elab.

J'ai également été sollicité par la société Schneider Electric pour un contrat d'expertise :

— 1 mois d'étude demandée par la société Schneider Electric (2016). Responsable du contrat. Travail effectué en collaboration avec Rachelle Hanna (MCF G2Elab)

et Benoit Sarrazin (IR G2Elab).

I.8 Encadrements – SUPELEC (2006–2012)

I.8.a Bilan des encadrements sur la période 2006 – Sept. 2012

Le tableau ci-dessous donne le bilan des encadrements de doctorants, post-doctorants et stagiaires de master recherche sur la période de février 2006 à septembre 2012.

Tableau récapitulatif des encadrements sur la période 2006 – Sept. 2012

Doctorants	4
Post-doctorants	3
Master 2 Recherche	1

I.8.b Thèses

I.8.b-i Projets initiés

Avant mon départ de Supélec en septembre 2012, j'étais en cours de montage de deux projets de thèse (CIFRE Dassault Aviation et Electrifil Automotive) :

— 2012–2015 ; Projet doctoral, Supélec - SATIE - Société Dassault Aviation, *Conception par optimisation de systèmes électriques sous contraintes CEM et thermiques. Applications aux réseaux de bord avionique*. Co-encadrement F.Costa, B.Révol, **P.Lefranc**. Financement CIFRE. Cette thèse n'a pas débuté à cause de mon départ de Supélec.

— 2012–2015 ; Projet doctoral, Supélec - Chaire Thales - Société Electricfil Automotive, *Conception par optimisation d'un ensemble convertisseur-machine pour applications automobile*. Co-encadrement **P.Lefranc**, F.Vinci Dos Santos, P.Dessante. Financement CIFRE. Cette thèse a débuté en octobre 2012 mais je n'ai pas été dans l'encadrement à cause de mon départ de Supélec en septembre 2012.

I.8.b-ii Thèses initiées à Supélec

En 2011 j'avais initié deux projets de thèses (CIFRE EDF et Leroy Somer). J'ai fait partie du co-encadrement de ses doctorants jusqu'à mon départ de Supélec en septembre 2012 :

— 2011–Sept. 2012 ; Gilbert BERGNADIAZ, Supélec Département Energie. Société EDF, *Convertisseurs pour liaisons HVDC multi-terminaux.* Co-encadrement J.C. Vannier (20%), M.Petit (20%), **P.Lefranc (40%)**, A.Arzandé (20%). Financement CIFRE.

— 2011–Sept. 2012 ; Ivan KRAVTZOFF, Supélec Département Energie. Société Leroy Somer, *Conception par optimisation d'un groupe génératrice*. Co-encadrement J.C.Vannier (25%), P.Dessante (55%), **P.Lefranc (20%)**. Financement CIFRE.

I.8.b-iii Soutenues

— 2009–2012 ; Cristina VLAD, *Commande prédictive de systèmes et application à la commande de systèmes en électronique de puissance*. Supélec Département

d'Automatique et Département Energie. Co-encadrement E.Godoy (40%), P.Rodriguez (40%), **P.Lefranc (20%)**. Financement interne.

— 2009–2012 ; Christophe LEDOUX, *Onduleur mutualisé pour des applications de commandes électriques de vol secondaires et de servitudes, nouvelle topologie de puissance, conception et optimisation*. Supélec Département Energie, ESTACA. Co-encadrement J.L.Thomas (5%), **P.Lefranc (70%)**, C.Larouci (25%). Financement projet CISACS – FUI.

— 2008–2011 ; Ali JAAFAR, *Contribution à la modélisation, l'analyse et l'optimisation de lois de commande pour convertisseurs DC-DC de puissance*. Supélec Département d'Automatique et Département Energie. Co-encadrement E.Godoy (70%), **P.Lefranc (30%)**. Financement bourse ministérielle.

— 2007–2010 ; Kamal EJJABRAOUI, *Contribution à la conception de systèmes mécatroniques automobiles : méthodologie de pré-dimensionnement multi-niveau multi-physique de convertisseurs statiques*. Supélec LGEP, ESTACA, Supélec Département Energie. Co-encadrement C.Marchand (10%), C.Larouci (70%), **P.Lefranc (20%)**. Projet O2M – FUI.

I.8.c Stages post-doc

— 2012 ; 4 mois, contrat Post-Doctoral, Ali JAAFAR, *Modélisation, analyse et commande d'un convertisseur MMC pour liaison HVDC*. Encadrement : **P.Lefranc (100%)**.

— 2011–2012 ; 12 mois, contrat Post-Doctoral, Antonio SANCHEZ, *Conception et réalisation d'un onduleur-aiguilleur pour application aéronautique*. Supélec Département Energie. Encadrement **P.Lefranc (100%)**.

— 2008–2009 : 18 mois, contrat Post-Doctoral, Sabrine MRAD, *Contribution au développement de modèles électrothermiques de convertisseurs statiques pour application automobile*. Supélec Département Energie. Co-encadrement **P.Lefranc (80%)**, P.Dessante (20%). Projet O2M du pôle MOVEO, sous-projet SP6 Electronique 3D.

I.8.d Master 2 recherche

— 2011 : 6 mois, Hadi ALAWIEH, *Optimisation multi-physique d'une vanne EGR*. Supélec Département Energie, Supélec Chaire Thales. Co-encadrement **P.Lefranc (90%)**, P.Dessante (5%), F.Vinci (5%). Financement de la société Electricfil Automotive.

I.9 Encadrements – G2Elab (2012 –)

I.9.a Bilan des encadrements sur la période Sept. 2012 – Mars 2017

Le tableau ci-dessous donne le bilan des encadrements de doctorants, post-doctorants et stagiaires de master recherche sur la période septembre 2012 à mars 2017.

Tableau récapitulatif des encadrements sur la période Sept. 2012 – Mars 2017

Doctorants	5
Post-doctorants	2
Master 2 Recherche	3

I.9.b Thèses

I.9.b-i Thèses soutenues

— 2013–2016 ; Mahmmoud IBRAHIM, *Modélisation et optimisation d'onduleur pour ASI et insertion d'énergies renouvelables*. Société EATON, convention CIFRE. Encadrement : David Frey (30%), Jean-Paul Ferrieux (Dir. Thèse, 40%), **Pierre Lefranc (30%)**. Soutenue le 13 juillet 2016.

— 2013–2016 ; Sokchea AM, *Conception et optimisation de modules pour onduleurs MMC de moyenne puissance. Commande rapprochée à haute isolation galvanique et packaging 3D*. Financement Institut Carnot Energies du Futur. Encadrement : David Frey (30%), **Pierre Lefranc (Dir. Thèse, Dérogation, 70%)**. Soutenue le 24 novembre 2016.

— 2013-2016 ; Van-Sang NGUYEN, *Conception caractérisation et mise en oeuvre d'un circuit intégré type driver en CMOS pour composants GaN*. Financement OSEO, projet MEGaN Driver. Encadrement : Jean-Christophe Crébier (Dir. Thèse, 60%), **Pierre Lefranc (40%)**. Soutenue le 8 décembre 2016.

I.9.b-ii Démissionnaire

— 2014–2017 ; Clément FITA, *Packaging pour composants HEMT-GaN*, Financement OSEO, projet MEGaN Packaging. Encadrement : Pierre-Olivier Jeannin (Dir. Thèse, 34%), Edith Clavel (33%), **Pierre Lefranc, (33%)**. Démission du doctorant en juillet 2016.

I.9.b-iii En cours

— Gaetan PEREZ, *Transistors en diamant pour l'électronique de puissance : mise au point de méthodes de mesure innovantes et intégration au sein des convertisseurs de puissance*. Financement par projet européen *GreenDiamond* du programme *H2020*. Encadrement : Nicolas Rouger (34%), Pierre-Olivier Jeannin (33%), **Pierre Lefranc (33%)**.

I.9.c Post-doctorat

— Février 2017 - Février 2018 : Van-Sang NGUYEN, *Packaging et gate drivers pour HEMT-GaN*. Projet MEGaN. Encadrement : Pierre-Olivier Jeannin (33%), **Pierre Lefranc (33%)**, Jean-Christophe Crébier (34%).

— Juillet 2014 - juillet 2015 : Johan DELAINE, *Modélisation et optimisation du packaging de modules de puissance à base de composants HEMT-GaN*. Projet MEGaN. Encadrement : Pierre-Olivier Jeannin (50%), **Pierre Lefranc (50%)**.

I.9.d Master 2 recherche

— 2015 ; Yohan WANDEROILD, *Magneto-coupleur GMI – Mise en oeuvre de capteur GMI pour réaliser la transmission d'ordre à haute isolation galvanique en Electronique de Puissance*. Encadrement : Aktham Asfour (33%), Pierre-Olivier Jeannin (33%), **Pierre Lefranc (33%)**.

— 2013 ; Sokchea AM, *Driver à très haute isolation galvanique. Application aux modules IGBT pour onduleurs multi-niveaux MMC (Multi-level Modular Converter)*. Encadrement : David Frey (30%), **Pierre Lefranc (70%)**.
— 2013 ; Denis STAVILAS, *Etudes en régime de commutation de semiconducteur de puissance en diamant*. Encadrement : Nicolas Rouger (33%), Pierre-Olivier Jeannin (33%), **Pierre Lefranc (33%)**.

I.10 Bilan global des encadrements et devenir des doctorants

Sur la période 2006 – 2017, j'ai pu encadrer 9 doctorants, 5 post-doctorants et 4 stagiaires de Master 2 Recherche.

Tableau récapitulatif des encadrements sur la période 2006 – Mars 2017

Doctorants	9
Post-doctorants	5
Master 2 Recherche	4

Le tableau ci-dessous donne les informations relatives aux postes occupés par mes anciens doctorants à l'issue de leur soutenance.

Tableau récapitulatif du devenir des doctorants à l'issu de leur soutenance

Kamal Ejjabrahoui	Ingénieur chez PSA
Ali Jaafar	Ingénieur chez ALTRAN
Cristina Vlad	Enseignant-chercheur à Supélec
Christophe Ledoux	Enseignant-chercheur à ESME-SUDRRIA
Mahmoud Ibrahim	Ingénieur chez SIREPE
Van-Sang Nguyen	Post-doctorat au G2Elab
Sokchea Am	Recherche d'emploi

Chapitre II

Production scientifique

II.1 Liste des publications

II.1.a Bilan des publications sur la période 2002–2017

Le tableau ci-dessous donne le bilan de mes publications sur la période 2002 – 2017 :

Tableau récapitulatifs des publications.

RICL	RNCL	CICL	CNCL
20	0	54	12

RICL : Revue Internationale à Comité de Lecture
RNCL : Revue Nationale à Comité de Lecture
CICL : Conférences Internationale à Comité de Lecture
CNCL : Conférence Nationale à Comité de Lecture

II.1.b Revues Internationales

2016-2017

— V.S.Nguyen, L.Kerachev, **P.Lefranc**, J-C.Crebier, *«Characterization and analysis of an innovative gate driver and power supplies architecture for HF power devices in harsh environment»*, **IEEE Transactions on Power Electronics**, 2016, Early Access.

— Y.Wanderoild, A.Asfour, **P.Lefranc**, P-O.Jeannin, J-P.Yonnet, *«Giant Magneto-Impedance Sensor for Gate Driver Insulated Signal Transmission Functions»*, **IEEE Transactions on Power Electronics, Letter**, Vol. 32, Issue 4, pp. 2493-2497, 2017.

— S.Am, **P.Lefranc**, D.Frey, R.Hanna, *«Design methodology for very high insulation voltage capabilities power transmission function for IGBT gate drivers based on a virtual prototyping tool»*, **IET Power Electronics**, acceptée, à paraitre.

2015

— S.Am, **P.Lefranc**, D.Frey, *«Design methodology for optimizing a high insulation voltage IGBT gate driver signal transmission function»*, **IET Power Electronics**,

Volume 8, Issue 6, June 2015, p. 1035-1042, DOI :10.1049/iet-pel.2014.0434, Print ISSN 1755-4535, Online ISSN 1755-4543.

— **P.Lefranc**, E.Odic, M.Kirkpatrick, *«Optimization and Characterization of a Planar Transformer with a High Voltage Ratio and High Output Voltage for Plasma Reactors»*, **IET Power Electronics**, Volume 8, Issue 6, June 2015, p. 929-937 DOI :10.1049/iet-pel.2014.0139, Print ISSN 1755-4535, Online ISSN 1755-4543.

2014

— C.Vlad, P.Rodriguez, E.Godoy, **P.Lefranc**, *«Advanced Control Laws of DC-DC Converters Based on PWA Modelling. Application to a Step-Down Converter»*, **IET Power Electronics**, Vol. 7, No. 6, June 2014, pp. 1482–1498.

2013

— C.Ledoux, **P.Lefranc**, C.Larouci, *«Pre-sizing methodology of embbeded static converters using optimisation under constraints; comparaison of two power sharing topologies»*, **IET Electrical Systems in Transportation**, Vol. 3, No. 1, March 2013, pp. 1–9.

— C.Ledoux, **P.Lefranc**, C.Larouci, *«Pre-sizing methodology of DC-AC converters using a virtual prototyping tool applied to sequential multi-load systems»*, **IET Power Electronics**, Vol. 6, No. 1, February 2013, pp. 244–250.

— G.Bergna, E.Berne, P.Egrot, **P.Lefranc**, A.Arzande, J-C.Vannier, M.Molinas, *«An Energy-based Controller for HVDC Modular Multilevel Converter in Decoupled Double Synchronous Reference Frame for Voltage Oscillations Reduction»*, **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, Vol. 60, No. 6, June 2013, pp. 2360–2371.

2012

— K.Ejjabraoui, C.Larouci, **P.Lefranc**, C.Marchand, *«Pre-sizing methodology of dc-dc converters using optimization under multi-physic constraints ; Application to a buck converter»*, **IEEE Transactions On Industrial Electronics, Special Issue On Optimization**, Vol. 59, No. 7, July 2012, pp. 2781–2790.

— **P.Lefranc**, X.Jannot, P.Dessante, *«Virtual prototyping and pre-sizing methodology for buck DC-DC converters using genetic algorithms»*, **IET Power Electronics**, Vol. 5, No. 1, January 2012, pp. 41–52.

— **P.Lefranc**, X.Jannot, P.Dessante, *«Optimised design of a transformer and an electronic circuit for IGBT drivers signal impulse transmission function based on a virtual prototyping tool»*, **IET Power Electronics**, Vol. 6, No. 4, April 2012, pp. 625–633.

— A.Jaafar, A.Alawieh, R.Ortega, E.Godoy, **P.Lefranc**, *«PI Stabilization of Power Converters With Partial State Measurements»*, **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, Vol. 21, No. 2, March 2012, pp. 560–568.

— C.Larouci, K.Ejjabraoui, **P.Lefranc**, C.Marchand, *«Placement Optimization of Power Components in Static Power Converters under Spatial and Thermal Constraints»*, **Journal of Power Electronics**, Vol. 21, No. 2, March 2012, pp. 368–376.

— C.Larouci, K.Ejjabraoui, **P.Lefranc**, C.Marchand, *«Impact of Control Constraint on A Multi-Objective Buck Converter Design»*, **International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS)**, Vol. 2, No. 3, September 2012, pp. 257–266.

2010

— K.Ejjabraouai, C.Larouci, **P.Lefranc**, C.Marchand, *«Modelling and design of mechatronic actuator chain. Application to a motorized tailgate»*, Chapter book, **edition In-Tech** by Alisson Brito, ISBN 978-953-7619-68-8, pp 15-28.

2009

— **P.Lefranc**, D.Planson, H.Morel, D.Bergogne, *«Analysis of the dynamic avalanche of punch through insulated gate bipolar transistor (PT-IGBT)»*, **Elsevier Solid State Electronics**, September 2009, Vol. 53, Issue 9, pp. 944-054.

— M.Usman, **P.Lefranc**, E.Godoy, D.Sadarnac, C.Karimi, *«Theoretical and Experimental Investigation of Averaged Modeling of Non-ideal PWM DC-DC Converters Operating in DCM»*, **MASAUM Journal of Basic and Applied Sciences**, August 2009, Vol. 1, Issue 1.

— M.Usman, **P.Lefranc**, D.Sadarnac, C.Karimi, *«Efficiency Investigation of DC-DC Converters with Passively Damped Input Filter Circuit»*, **International Journal of Electronics**, Vol. 96, Issue 9, September 2009, pp. 961-976.

2006

— C.Buttay, H.Morel, B.Allard, **P.Lefranc**, O.Brevet, *«Model requirements for simulation of low-voltage MOSFET in automotive applications»*, **IEEE Transactions On Power Electronics, special issue on automotive power electronics and motor drives**, Vol. 21, No. 3, May 2006, pp. 613-624.

II.1.c Conférences Internationales avec comité de lecture

2017

— N.Rouger, T.T.Pham, G.Perez, C.Massante, **P.Lefranc**, P.O.Jeannin, D.Eon, J.Pernot, "Diamond devices for power electronics", NDNC 2017, soumis, **invited paper**.

— V-S.Nguyen, **P.Lefranc**, J.C.Crebier, *"Gate driver architectures for high speed power devices in series connection"*, 16-18 Mai 2017, Nuremberg, Germany, PCIM, **oral session**.

— S.Am, **P.Lefranc**, B.Sarrazin, R.Hanna, D.Frey, *"Gate drivers for medium voltage applications"*, 16-18 Mai 2017, Nuremberg, Germany, PCIM, session poster.

— V-S.Nguyen, **P.Lefranc**, J.C.Crebier, *"Gate driver architectures for higher switching speed of power devices in series connection"*, EPE-ECCE Europe 2017, soumis.

— G.Perez, et al, *"Parallel and interleaved structures for diamond Schottky diodes"*, EPE-ECCE Europe 2017, soumis.

— S.Morel, L.Garbuio, L.Gerbaud, **P.Lefranc**, *"Evolution of power and losses in permanent magnet synchronuous generators using nin-linear systems named MERS (Magnetic Energy Recovery Switch)"*, Electrimacs 2017, soumis.

2016

— G.Perez, N.Rouger, **P.Lefranc**, P-O.Jeannin, Y.Avenas, G.Chicot, D.Eon, *"Integrated temperature sensor with diamond Schottky diodes using a thermosensitive parameter"*, 27th International Conference on Diamond and Carbon Materials, 4-8 September 2016, Montpellier, France, **Oral Session**.

— V-S.Nguyen, L.Kerachev, **P.Lefranc**, J-C.Crebier, *"Characterization and analysis of an innovative gate driver and power supplies architecture for HF power devices in harsh environment"*, IEEE CIPS Conference, 8-10 March 2016, Nuremberg, Germany, **Oral Session**.

— N.Rouger, D.Eon, G.Perez, P-O.Jeannin, **P.Lefranc**, E.Gheeraert, J.Pernot, Y.Avenas, *"Monolithic integration in CVD diamond : Schottky power diodes and integrated temperature sensor"*, MRS Spring Meeting, 28 March - 1 April 2016, Phoenix, Arizona, USA, **Oral Session**.

— V-S.Nguyen, T-L.Te, F.Sarrafin, N-D.To, D.Colin, N.Rouger, **P.Lefranc**, B.Allard, Y.Lembeye, J-D.Arnould, J-C.Crebier, *Contributions to dedicated gate driver circuitry for very high switching speed high temperature power devices"*, ISPSD, 12-16 June 2016, Prague, Czech Republic, **Oral Session**.

— C.Fita, P-O.Jeannin, **P.Lefranc**, E.Clavel, J.Delaine, *"A Novel 3D Structure for Synchronous Buck Converter Based on Nitride Gallium Transistors"*, IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE, 18-22 September 2016, Milwaukee, USA, **poster session**.

— B.Thollin et al, *"Design of a GaN HEMT based Inverter Leg Power Module for Aeronautic Applications"*, 6th Electronics System-Integration Technology Conference, 13-16 September 2016, Grenoble, France, **poster session**.

— M.Ibrahim, L.Gonnet, **P.Lefranc**, D.Frey, J-P.Ferrieux, S.Am, *"Effectiveness of Pareto-Front Analysis Applied to the Design of a Single-Phase PFC Rectifier"*, IEEE APEC Conference, 20-24 March 2016, Long Beach, CA, USA, **poster session**.

— S.Am, **P.Lefranc**, D.Frey, M.Ibrahim, *"Design Methodology for a High Insulation Voltage Power Transmission Function for IGBT Gate Driver"*, IEEE APEC Conference, 20-24 March 2016, Long Beach, CA, USA, **poster session**.

— S.Am, **P.Lefranc**, D.Frey, *"A Virtual Prototyping Tool of a Power Transmission Function for IGBT Gate Drivers with High Insulated Voltage Capabilities"*, IEEE CIPS Conference, 8-10 March 2016, Nuremberg, Germany, **poster session**.

2015

— M.Ibrahim, **P.Lefranc**, D.Frey, J-P.Ferrieux, L.Gonnet, S.Am, *"Design Optimization of Single-Phase PFC Rectifier Using Pareto-Front Analysis and Including Electro-Thermal Modelling"*, IEEE IECON Conference, 9-12 Nov. 2015, Yokohama, Japon, **poster session**.

— S.Am, **P.Lefranc**, D.Frey, M.Ibrahim, *"A Generic Virtual Prototyping Tool for Multilevel Modular Converters (MMCs)"*, IEEE IECON Conference, 9-12 Nov. 2015, Yokohama, Japon, **poster session**.

2014

— Y.M.Nguyen, **P.Lefranc**, J.P.Laur, M.Brunet, *"Modeling and design optimization*

of micro-inductor using genetic algorithm", PwSoC 2014, Power Supply on Chip Workshop, 6-8 October 2014, Boston, USA, **poster session**.

— G. Bergna, A.Jaffar, **P.Lefranc**, *"Energy Concept-Based Nonlinear Stabilization and Control for Modular Multilevel Converters for Voltage Oscillation Reduction"*, EPE-ECCE Europe, 26-28 August 2014, Lappenranta, Finland, **poster session**.

2012

— G.Bergna, E.Berne, P.Egrot, **P.Lefranc**, A.Arzande ; J-C.Vannier, M.Molinas, *"A Generalized Power Theory in ABC Frame for Modular Multilevel Converters based on Mathematical Optimization"*, 2nd IEEE ENERGYCON Conference & Exhibition, 2012 Advances in Energy Conversion Symp, September 2012, Florence, Italy, **poster session**.

— G.Bergna, E.Berne, P.Egrot, **P.Lefranc**, A.Arzande, J-C.Vannier, M.Molinas, *"Modular Multilevel Converter-energy difference controller in rotating reference frame"*, 15th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC), 2012, **poster session**.

— G.Bergna, E.Berne, P.Egrot, **P.Lefranc**, A.Arzande, J-C.Vannier, M.Molinas, *"A Flexible and Optimal Power Theory for Modular Multilevel Converter HVDC Links based on Lagrange Multipliers"*, 11th International Workshop on Large-Scale Integration of Wind Power into Power Systems as well as on Transmission Networks for Offshore Wind Power Plants, Wind Integration Workshop, November 2012, Lisbon, Portugal, **poster session**.

— G.Bergna, J.Suul, E.Berne, P.Egrot, **P.Lefranc**, J-C.Vannier, M.Molinas, *"Mitigating DC-side power oscillations and negative sequence load currents in Modular Multilevel Converters under unbalanced faults- first approach using resonant PI"*, 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society – IECON, October 2012, Montreal, Canada, **poster session**.

— G.Bergna, J-C.Vannier, **P.Lefranc**, A. Arzande, E.Berne, P.Egrot, M.Molinas, *"Modular Multilevel Converter leg-energy controller in rotating reference frame for voltage oscillations reduction"*, 3rd IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems – PEDG, June 2012, Aalborg, Denmark, **poster session**.

— N.Li, X.Lin-Shi, B.Allard, **P.Lefranc**, E.Godoy, A.Jaafar, *"FPGA based predictive deadbeat control for high switching frequency SEPIC"*, 38th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society – IECON, October 2012, Montreal, Canada, **poster session**.

— C.Vlad, P.Rodriguez, E.Godoy, **P.Lefranc**, *"Explicit Model Predictive Control of Buck Converter"*, 15th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition, EPE-PEMC, ECCE Europe, September 2012, Novi Sad, Serbia, **poster session**.

— A.Alawieh, A.Jaafar, R.Ortega, E.Godoy, **P.Lefranc**, *"Observer-Based PI Stabilization of Power Converters"*, ACC 2012, American Control Conference, June 2012, Montreal, Canada, **poster session**.

— R.Luca, D.Beauvois, E.Godoy, A.Jaafar, **P.Lefranc**, *"Identification et commande LPV des convertisseurs de puissance. Application sur un convertisseur Buck"*, Conférence Internationale Francophone d'Automatique – CIFA, Juillet 2012, Grenoble, France, **poster session**.

— C.Vlad, P.Rodriguez, E.Godoy, **P.Lefranc**, *"Modélisation affine par morceaux et commande par retour d'état linéaire par morceaux d'un convertisseur flyback avec filtre d'entrée"*, Conférence Internationale Francophone d'Automatique – CIFA, Juillet 2012, Grenoble, France, **poster session**.
— A.Jaafar, E.Ostertag, E.Godoy, **P.Lefranc**, *"Stabilisation des convertisseurs DC-DC par retour de sortie dynamique. Application au convertisseur SEPIC"*, Conférence Internationale Francophone d'Automatique – CIFA, Juillet 2012, Grenoble, France, **poster session**.

2011

— C.Ledoux, **P.lefranc**, C.Larouci, *"Multi-technology pre-sizing optimization of a generic inverter and its input filter"*, EPE 2011, 14th European Conference on Power Electronics and Applications, 30 August-1 September 2011, Birmingham, United Kingdom, **poster session**.
— B.Daguse, X.Jannot, C.Ledoux, **P.Lefranc**, J-C.Vannier, *"Multiphysic optimal design of an inverter fed PMSM and choice of the switching frequency"*, EPE 2011, 14th European Conference on Power Electronics and Applications, 30 August-1 September 2011, Birmingham, United Kingdom, **poster session**.
— N.Li, X.Lin-Shi, **P.Lefranc**, E.Godoy, A.Jaafar, B.Allard, *"Universal DC-DC converter using SEPIC"*, EPE 2011, 14th European Conference on Power Electronics and Applications, 30 August-1 September 2011, Birmingham, United Kingdom, **poster session**.
— N.Li, X.Lin-Shi, **P.Lefranc**, E.Godoy, A.Jaafar, B.Allard, *"High frequency digital control for SEPIC based on FPGA"*, ELECTRIMACS 2011, 6-8 June 2011, Paris, **poster session**.
— N.Li, X.Lin-Shi, **P.Lefranc**, E.Godoy, A.Jaafar, *"FPGA based sliding mode control for high frequency SEPIC"*, ISIE 2011, the 36th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 27-30 June 2011, Gdansk, Poland, **poster session**.

2010

— C.Ledoux, **P.Lefranc**, J.Cathelin, C.Larouci, D.Diallo, J.L.Thomas, *«Modeling and Fault Modes Investigation of a Power Sharing AC Drive»*, IECON'10, Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 7-10 November 2010, Glendale, Arizona, USA, **oral session**.
— C.Vlad, P.Rodriguez, E.Godoy, **P.Lefranc**, *«A Hybrid Model for Buck Converter Operating in Continuous and Discontinuous Conduction Modes»*, IECON'10, Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 7-10 November 2010, Glendale, Arizona, USA, **oral session**.
— A.Jaafar, E.Godoy, **P.Lefranc**, X.Lin-Shi, *«Comparaison des lois de commande pour convertisseurs DC-DC. Application au convertisseur SEPIC»*, CIFA'10, Congrès International Francophone d'Automatique, 2-4 juin 2010, Nancy, France, session spéciale Commande des Convertisseurs Statiques, **session orale**.
— A.Jaafar, E.Godoy, **P.Lefranc**, X.Lin-Shi, A.Fayaz, L.Nan, *«Nonlinear Sliding Mode Observer and Control of High Order DC-DC Converters»*, IECON'10, Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 7-10 November 2010, Glendale, Arizona, USA, **oral session**.
— K.Ejjabraoui, C.Larouci, **P.Lefranc**, C.Marchand, *«Pre-sizing of DC-DC converters*

by optimization under constraints. Influence of the control constraint on the optimization results», ICIT'10, IEEE International Conference on Industrial Technology, ISBN 978-1-4244-5697-0/10, pp 767-773, Vina del Mare Valparaiso, Chile, 14-17 March 2010, **oral session**.

— A.Luca, P.Rodriguez-Ayerbe, D.Dumur, **P.Lefranc**, *«Buck DC-DC converter control using invariant sets techniques»*, MELECON'10, 15th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference, Valletta, Malta, 26-28 April 2010, **oral session**.

— L.Nan, L.S.Xuefang, A.Jaafar, E.Godoy, **P.Lefranc**, *«Integral Sliding Mode Controllers for SEPIC Converters»*, CCC'10, 29th Chinese Control Conference, 29-31 July 2010, Beijing, China, **oral session**.

— K.Ejjabraoui, C.Larouci, **P.Lefranc**, C.Marchand, *«Design by optimization of a Boost converter. Integration of the control aspect»*, PCIM'10, Power Conversion Intelligent Motion, ISBN 978-3-8007-3229-6, pp 679-685, Nuremberg, Germany, 4-6 May 2010, **oral session**.

— C.Ledoux, **P.Lefranc**, C.Larouci, J-L.Thomas, *«State of the art of monoconverter multiload applications and associated power electronic devices»*, ISIE'10, IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 4-7 July 2010, Bari, Italy, **poster session**.

2009

— A.Jaafar, **P.Lefranc**, E.Godoy, X.Lin-Shi, A.Fayaz, L.Nan, *«Experimental Validation with a Control Point of View Analysis of the SEPIC Converter»*, IECON'09, Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 3-5 novembre 2009, Porto, Portugal, **oral session**.

— K.Ejjabraoui, C.Larouci, **P.Lefranc**, C.Marchand, *«A new pre-sizing approach of DC-DC converters application to a Boost converter for the automotive domain»*, IECON'09, Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 3-5 novembre 2009, proceedings, pp 3803-3808, Porto, Portugal, **oral session**.

— **P.Lefranc**, E.Godoy, G.Duc, M.Usman, *«Stability Analysis of a Buck Converter with Input Filter Based on an LPV Formalism»*, POWERENG'09, IEEE International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, 18-20 march 2009, Lisbon, Portugal, **oral session**.

— C.Karimi, E.Godoy, M.Usman, **P.Lefranc**, D.Sadarnac, *«High Frequency Modeling of Peak Current Mode Control of DC-DC Converters»*, POWERENG'09, IEEE International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, 18-20 march 2009, Lisbon, Portugal, **oral session**.

— G. Remy, K. Ejjabraoui, C. Larouci, F. Mhenni, R. Sehab, **P. Lefranc**, B. Barbedette, S.A. Raka, C. Combastel, S. Cannou, F. Cardon, P. Cuvelier, C. Marchand, D. Barbier, *«Modeling guidelines and tools comparison for electromechanical system design in automotive applications - Application to a motorized hatchback»*, EMM'09, 7th European Mechatronics Meeting, CIUP, Paris, France, June 24-25, 2009, **oral session**.

— S.Mrad, **P.Lefranc**, P.Dessante, P.Chiozzi, G.Blondel, M.Fakes, P.Masson, «A Compact Transient Electrothermal Model for Integrated Power Systems : Automotive Application», IECON'09 Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 3-5 novembre 2009, Porto, Portugal, **poster session**.

— K.Ejjabraoui, C.Larouci, **P.Lefranc**, C.Marchand, *«Pre-sizing approach of DC-*

DC Buck converters for the automotive domain», PCIM'09, Power Conversion Intelligent Motion, ISBN 978-3-8007-3158-9, pp 234-239, Nuremberg, Germany, **poster session**.

— K.Ejjabraoui, C.Larouci, **P.Lefranc**, C.Marchand, *«A new pre-sizing approach of DC-DC converters application to a Buck converter for the automotive domain»*, IPEMC'09, IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference, 17-20 may 2009, Whuan, China, **poster session**.

2008

— M.Usman, E.Godoy, **P.Lefranc**, D.Sadarnac, C.Karimi, *«A Control Strategy to Stabilize PWM DC-DC Converters with Input Filters Using State-Feedback and Pole-Placement»*, INTELEC'08, IEEE International Telecommunications Energy Conference, San Diego, California USA, **oral session**.

— M.Usman, A.Bilal, D.Sadarnac, **P.Lefranc**, C.Karimi, *«Analysis of Input Filter Interactions in Cascade Buck Converters»*, ICIT'08, IEEE International Conference on Industrial Technology, Chengdu, Chine, 21-24 avril 2008, **poster session**.

— M.Usman, **P.Lefranc**, D.Sadarnac, C.Karimi, *«Theoretical and Experimental Investigation of Averaged Modeling of Non-ideal PWM DC-DC Converters Operating in DCM»*, PESC'08, IEEE Power Electronics Specialists Conference, Island of Rhodes, Greece, June 15-19, 2008, **poster session**.

2007

— **P.Lefranc**, D.Bergogne, *«State of the art of dv/dt and di/dt control of insulated gate power switches»*, IAP1'07, Workshop on Power Supply and Energy Management for Defence Applications, Bruxelles, juin 2007, 8 pages, **poster session**.

2005

— **P.Lefranc**, D.Bergogne, H.Morel, B.Allard, *«Fast over-current protection of high power IGBT modules»*, EPE'05, European Power Electronis Conference, Dresden, Germany, 10 pages, **poster session**.

2003

— **P.Lefranc**, D.Bergogne, D.Planson, B.Allard, H.Morel, JF.Roche, *«Active clamping of IGBT : capacitor replaces TRANSIL diodes»*, EPE'03, European Power Electronics Conference, Toulouse, France, 7 pages, **poster session**.

II.1.d Conférences Nationales avec comité de lecture

2016

— N.Rouger, A.Marechal, G.Chicot, G.Perez, T-T.Pham, **P.Lefranc**, P-O.Jeannin, Y.Avenas, D.Eon, J.Pernot, E.Gheeraert, *"Simulation numérique et caractérisation de composants de puissance en diamant"*, SGE, 7-9 juin 2016, Grenoble, **session orale**.

— V-S.Nguyen, T-L.Te, F.Sarrafin, N-D.To, D.Colin, N.Rouger, **P.Lefranc**, B.Allard, Y.Lembeye, J-D.Arnould, J-C.Crebier, *"Contributions aux circuits de « gate-driver » dédiés aux transistors de puissance à forte vitesse de commutation*

dans un environnement haute température", SGE, 7-9 juin 2016, Grenoble, **poster session**.

— S.Am, **P.Lefranc**, D.Frey, R.Hanna, *"Design and Optimization of IGBT Gate Drivers for High Insulation Voltage up to 30kV"*, SGE, 7-9 juin 2016, Grenoble, **poster session**.

— C.Fita, P-O.Jeannin, **P.Lefranc**, E.Clavel, J.Delaine, *"Perturbations électromagnétiques conduites d'un bras d'onduleur à base de transistors en Nitrure de Galium : Structure « 3D » pour composants horizontaux"*, SGE, 7-9 juin 2016, Grenoble, **poster session**.

2014

— S. Am, **P.Lefranc**, D.Frey, *"Driver à haute isolation galvanique. Application aux modules IGBT pour onduleurs multi-niveaux MMC (Multilevel Modular Converters)"*, Symposium de Génie Electrique, ENS Cachan, 8-9 juillet 2014, **poster session**.

2013

— B.Jan, J.Bect, E.Vazquez, **P.Lefranc**, *"Approche bayésienne pour l'éstimation d'indices de sobol"*, Journées de Statistique, 27–31 Mai 2013, Toulouse, France, **poster session**.

2012

— C.Ledoux, **P.Lefranc**, C.Larouci, *"Optimisation du placement-routage de semiconducteurs de puissance. Application à un hacheur abaisseur"*, 14eme Edition Electronique de Puissance du Futur – EPF, Juillet 2012, Bordeaux, France, **poster session**.

2010

— K.Ejjabraoui, C.Larouci, **P.Lefranc**, C.Marchand, *«Approche multi-niveaux de pré-dimensionnement de convertisseurs statiques par optimisation sous contraintes multi-physiques»*, EPF'10, Electronique de Puissance du Futur, Saint Nazaire, France, 30 juin - 2 juillet 2010, **poster session**.

2008

— **P.Lefranc**, E.Godoy, G.Duc, *«Etude d'une loi de commande à gains commutés sur un convertisseur abaisseur avec filtre d'entrée et analyse de la stabilité par une approche LPV»*, EPF'08, Electronique de Puissance du Futur, Tours, France, **poster session**.

2006

— D.Bergogne, **P.Lefranc**, D.Tournier, P.Bevilacqua, D.Planson, H.Morel, *«Onduleur à JFET sans diode de roue libre externe»*, EPF'06, Electronique de Puissance du Futur, 5 pages, **poster session**.

2004

— **P.Lefranc**, D.Bergogne, *«Clamping actif ou coupure douce de l'IGBT : comment bien protéger l'IGBT en ouverture de court-circuit ?»*, EPF'04, Electronique de Puissance du Futur, 4 pages, , **poster session**.

2003

— **P.Lefranc**, *«Clamping actif d'IGBT : diodes TRANSIL remplacées par des condensateurs»*, JCGE'03, Conférence des Jeunes Chercheurs en Génie Electrique, Saint Nazaire, France, 6 pages, **poster session**.

II.1.e Conférences Nationales sans comité de lecture

— **P.Lefranc**, *"Conception par optimisation des convertisseurs de puissance; du prototypage virtuel au prototypage physique"*, NEST'11, New Electrical Systems in Tours, 28-29 juin 2011, **conférence invité**.

— **P.Lefranc**, C.Larouci, C.Ledoux, *"Pré-dimensionnement de systèmes mécatroniques"*, Journées SEEDS ISP3D, 16-17 mars 2011, ENS de Cachan, **présentation orale**.

— **P.Lefranc**, E.Godoy, A.Jaafar, X.Linshi, J.M.Retif, L.Nan, *«Commande directe d'une structure SEPIC, développement d'une brique convertisseur DC/DC universel»*, Journées SEEDS, 3-4 Juin 2010, Toulouse, **Session Poster**.

— **P.Lefranc**, *«Tout savoir (ou presque) sur les panneaux solaires photovoltaïques. Enjeux sociétaux et technologiques»*, Conférence de l'Amicale des Ingénieurs Supélec de Savoie-Dauphiné, 30 Novembre 2009, Hotel Plazza Alpexpo, Grenoble.

— **P.Lefranc**, E.Godoy, A.Jaafar, X.Linshi, J.M.Retif, L.Nan, *«Commande directe d'une structure SEPIC, développement d'une brique convertisseur DC/DC universel»*, Journées SEEDS, 8-9 Juin 2009, Grenoble, Session Orale.

Deuxième partie

Développement Scientifique

Introduction au Développement Scientifique

Dans cette partie, je développe trois thématiques scientifiques que j'ai pu abordées lors de mes travaux de recherche.

Tout d'abord, lors de mes travaux de doctorat, j'ai travaillé sur les drivers d'IGBT de forte puissance. Cette thématique de commande rapprochée d'interrupteur de puissance reste la pièce maîtresse de mes activités de recherche comme le montre le développement scientifique proposé ensuite.

De plus, lors de mes activités de recherche, j'ai aussi travaillé sur l'optimisation en électronique de puissance qui m'a amené à optimiser des convertisseurs d'électronique de puissance mais aussi des sous-systèmes de convertisseurs comme des μ-inductances ou des fonctions de drivers.

Ensuite, j'ai également travaillé sur la modélisation et la commande des convertisseurs d'électronique de puissance par le biais d'une collaboration étroite avec le Département d'Automatique de Supélec.

Dans la suite du développement je montre que ces trois thématiques se sont nourries mutuellement mais que aujourd'hui (2017) j'ai fait le choix de me focaliser sur la commande rapprochée des interrupteurs de puissance.

De ce fait, dans la suite du manuscrit, je commence par développer la thématique de la *modélisation et la commande des convertisseurs*. J'expose ensuite mes travaux sur *l'optimisation en électronique de puissance*. Puis, pour finir et justifier mon projet de recherche, je termine par la thématique de *commande rapprochée des interrupteurs de puissance*.

Chapitre III

Modélisations dynamiques et lois de commande des convertisseurs. Interactions *physique 3D / performances dynamiques*

Dans ce chapitre, je commence par décrire la problématique de recherche de la modélisation dynamique et des lois de commande. Avec Muhammad USMAN IFTIKHAR, *j'ai commencé par traiter le cas de la conduction discontinue pour les convertisseurs DC-DC. Ensuite, nous avons étudié l'influence des circuits amortisseurs sur le rendement des structures abaisseur et élévateur. Cet aspect est un premier pas vers la thématique de recherche sur l'interaction entre les performances dynamiques et les performances quasi-statiques. Ensuite, les travaux de doctorat de Ali* JAAFAR *se focalisent sur la modélisation et la commande des convertisseurs à l'aide d'approches énergétiques relativement nouvelles en électronique de puissance. Parallèlement, les travaux de Kamal* EJJABRAOUI *ont permis d'aboutir à des résultats préliminaires sur les interactions entre les performances dynamiques (temps de réponse) et quasi-statiques (rendement, volume, poids, etc.). Ensuite, les travaux de Cristina* VLAD *sont fondés sur des approches de modélisation de type PWA (Piecewise Affine) pour systèmes hybrides associés à la technique de commande prédictive. Enfin, les travaux de recherche de Master de Hadi* ALAWIEH *aboutissent à des résultats d'optimisation d'un convertisseur de puissance pour un système mécatronique automobile (vanne EGR) où les contraintes quasi-statiques et dynamiques sont considérées dès la phase de prédimensionnement.*

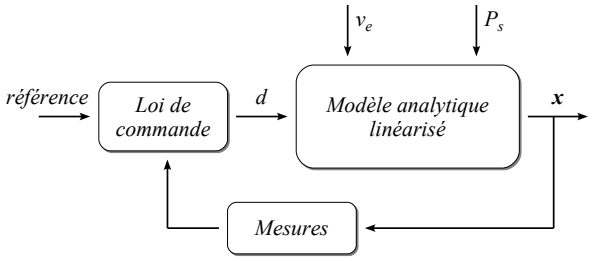


FIGURE III.1: Synoptique de la modélisation dynamique linéarisée et lois de commande classiques associées.

III.1 Introduction à la thématique de la modélisation dynamique et lois de commande des convertisseurs de puissance

Les premiers travaux significatifs sur la modélisation dynamique en électronique de puissance datent de 1976–1977 [8] [9]. Ils sont fondés sur le principe de moyennage des différentes grandeurs tension et courant. Les modèles analytiques font intervenir des variables continues. On aboutit à un modèle analytique non-linéaire défini par la forme suivante :

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}(d)\,\mathbf{x} + \mathbf{B}(d)\,v_e \tag{III.1}$$

Où d est le rapport cyclique du convertisseur fonctionnant à fréquence fixe. La représentation d'état non-linéaire III.1 peut être linéarisée autour d'un point de fonctionnement afin d'utiliser des outils d'analyse et de synthèse d'automatique linéaire : Figure III.1.

Ensuite, sur la base des modèles moyens non-linéaires (bi-linéaire en mode de conduction continue), plusieurs familles de lois de commande ont été introduites :

— commande par retour d'état linéaire [10]
— commande par retour d'état à gains commutés [10]
— commande par modes de glissement [11]
— méthodes de passivité [12] (PI sur sortie passive, Damping Injection et Interconnection and Damping Assignment Passivity-Based Control)

Avec, notamment des problématiques d'estimation d'état et de la charge :

— estimateur d'état linéaire [13]
— estimateur par modes de glissement [13]
— estimateur par immersion et invariance [13]

Dans un premier temps, je décris les travaux sur la modélisation par modèles moyens (conductions continue et discontinue) de Muhammad Usman Iftikhar ; puis les travaux sur les commandes non-linéaires et par approches énergétique de Ali Jaafar et enfin les travaux de modélisation affine par morceaux avec commande prédictive de Cristina Vlad.

Dans un deuxième temps, je présente les travaux de recherche portant sur l'interaction entre les performances dynamiques et quasi-statiques des convertisseurs de puissance.

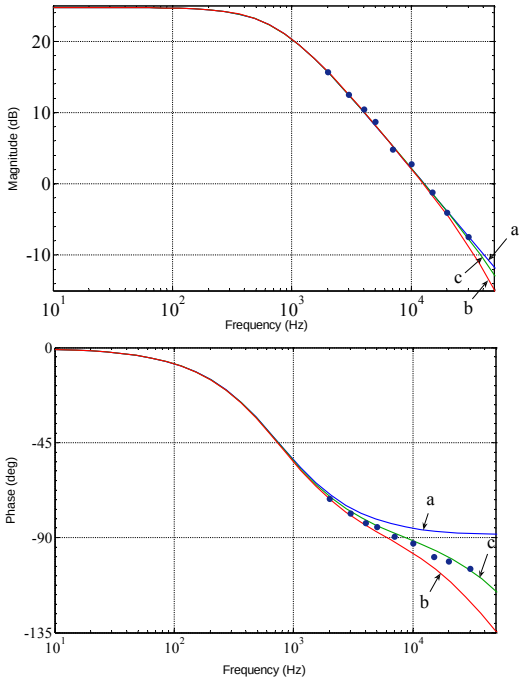


FIGURE III.2: Modélisation dynamique en mode de conduction discontinue. Comparaison des modélisation par *ordre réduit*, *ordre plein*, *ordre plein corrigé* et des résultats expérimentaux pour un convertisseur abaisseur sans filtre d'entrée.

III.2 Travaux de recherche sur la modélisation et lois de commande sur la période 2006 – 2012

III.2.a Modélisation par modèles moyens et commandes linéaires – Résumé des travaux de doctorat de Muhammad USMAN IFTIKHAR (2005 – 2008)

Directeur de thèse : Daniel Sadarnac (Département Energie de Supélec)

Muhammad USMAN IFTIKHAR a soutenu sa thèse le 15 décembre 2008 : *"Contribution à la modélisation des convertisseurs continu/continu dans une perspective de commande. Influence du filtre d'entrée"*.

A mon arrivée au Département Energie de Supélec en février 2006, j'ai commencé à travailler avec Muhammad USMAN IFTIKHAR sur la modélisation dynamique des convertisseurs de puissance. Cette collaboration a donné lieu à trois publications en conférence internationale [14] [15] [10] et un article dans International Journal of Electronics [16] puis dans MAUSAM Journal [17].

Les travaux de thèse de Muhammad USMAN IFTIKHAR abordent, dans le cas général, la modélisation dynamique des convertisseurs DC-DC. Une bibliographie complète et précise permet au lecteur de clarifier les différents niveaux de modélisation dans le mode de conduction discontinue : Figure III.2. Ensuite, la modélisation analytique

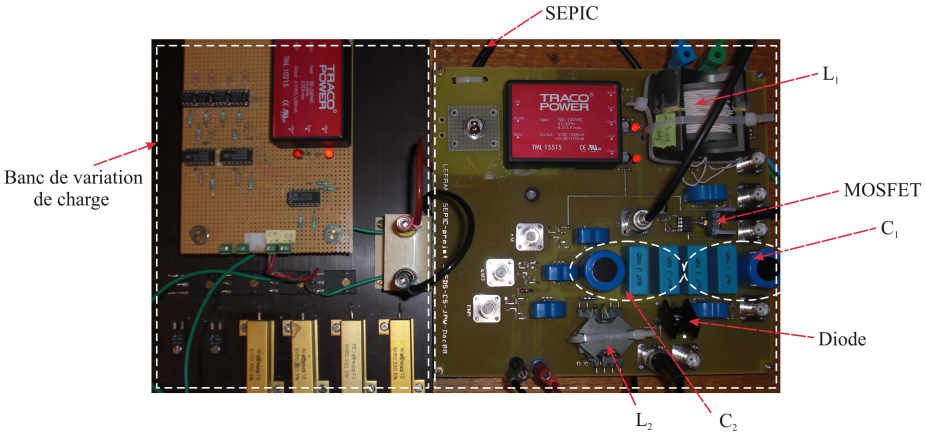


FIGURE III.3: Convertisseur SEPIC développé dans le cadre de la thèse de Ali JAAFAR.

des pertes dans les *circuits amortisseurs* et les impacts sur la stabilité permet de définir les interactions entre les performances dynamiques et les aspects énergétiques. Cette idée sera la base de futurs travaux comme le montrent les résultats de la thèse de Kamal EJJABRAOUI. De plus, la commande par mode de glissement sera un des points de départs des travaux de thèse de Ali JAAFAR.

III.2.b Modélisation par modèles moyens, commande non-linéaire et approches énergétiques – Résumé des travaux de doctorat de Ali JAAFAR (2008 – 2011)

Directeur de thèse : Emmanuel GODOY (Département d'Automatique de Supélec)
Co-encadrant : **Pierre LEFRANC** (Département Energie de Supélec)
Ali JAAFAR a soutenu sa thèse le 14 novembre 2011 : *"Contribution à la modélisation, l'analyse et l'optimisation de lois de commande pour convertisseurs DC-DC de puissance"*.

Le premier chapitre est dédié à l'état de l'art de la modélisation des convertisseurs de puissance en régime dynamique et plus particulièrement de la famille des convertisseurs DC-DC. Une attention particulière est portée sur la modélisation par approche *moyennée* en mode de conduction continue et discontinue. Ensuite, les modèles énergétiques sont introduits pour être décrits et utilisés au Chapitre 4.

Le deuxième chapitre propose l'analyse du fonctionnement des convertisseurs de type DC-DC du point de vue de la commande à travers son application au convertisseur SEPIC (Single Ended Primary Inductor Converter). Une première phase de dimensionnement et une analyse fonctionnelle permettent de dégager les principales zones de fonctionnement : zone de conduction continue, de conduction discontinue, zone de chute de tension où l'augmentation du rapport cyclique engendre la chute de la tension de sortie. Ensuite, une analyse fine est portée sur l'influence du point de fonctionnement sur les zéros instables. Enfin, la comparaison des résultats de simulations (issus des différents modèles) avec les résultats expérimentaux (Figure III.3) permettent de valider les modèles [18].

Le chapitre 3 est consacré à la commande et l'observation par mode de glissement. Après quelques concepts généraux sur les modes de glissement, l'application au

convertisseur SEPIC nous amène à considérer plusieurs surfaces de glissement : dynamiques du premier et du second ordre. Ensuite, les différentes lois de commande par mode de glissement sont comparées avec une commande de type PI puis une de type retour d'état linéaire : des résultats en simulation et expérimentaux sont présentés. L'analyse de robustesse est fondée sur le principe de la μ-analyse : les résultats montrent que la commande par mode de glissement est plus robuste (au sens de la μ-analyse) que la commande par retour d'état et par PI. Enfin, une synthèse d'observateurs par mode de glissement est proposée et aboutit à des résultats expérimentaux [11].

Dans le chapitre 4, la modélisation et la commande par approches énergétiques sont proposées. Ce type de modèle n'est pas très fréquent en électronique de puissance et de ce fait est une des originalités de ces travaux de thèse. En effet, le modèle d'*Euler-Lagrange* et le modèle *Hamiltonien* sont présentés dans la cas général puis pour le convertisseur SEPIC [12].

En conclusion, les travaux de thèse de Ali Jaafar sont originaux pour, d'une part, avoir apporté une vision d'électronicien de puissance à l'automatique théorique. D'autre part pour avoir introduit des modélisations et des lois de commande par approches énergétiques ; pour avoir introduit la méthode d'observation et d'estimation par immersion et invariance. Puis pour avoir donné une vision pragmatique de l'automatique appliquée aux convertisseurs de l'électronique de puissance en proposant systématiquement des résultats expérimentaux.

III.2.c Modélisation affine par morceaux et commande prédictive – Résumé des travaux de doctorat de Cristina VLAD (2009 – 2012)

Directeur de Thèse : Emmanuel GODOY (Département d'Automatique de Supélec)

Co-encadrant : Pedro RODRIGUEZ (Département d'Automatique de Supélec)

Co-encadrant : **Pierre LEFRANC** (Département Energie de Supélec)

Cristina VLAD a effectué son doctorat au Département d'Automatique (Emmanuel GODOY et Pedro RODRIGUEZ) et au Département Energie de Supélec : *"Commande prédictive de systèmes hybrides et application à la commande de systèmes en électronique de puissance"*.

A travers des méthodes de modélisation hybrides fondées sur une formulation de type PWA (PieceWise Affine) (Figure III.4 [19] [20] [21]) étudiées et implantées sur des convertisseurs de puissance continu-continu durant la première année de thèse, des stratégies de commande prédictive (MPC) ont été développées et appliquées sur un convertisseur simple.

Les modèles PWA sont définis par un partitionnement de l'espace d'état (régions polyhédrales) : chaque région possède sa propre dynamique (discrete ou continue) linéaire. Pour générer les modèles PWA, l'idée de départ est de diviser la période de découpage en ν-sous périodes. Pour chacune d'elles, un modèle linéaire équivalent est déterminé en fonction de l'état des interrupteurs de puissance (MOSFETs et diodes). Si le MOSFET et la diode sont définis par un seul état (ouvert et/ou fermé), le modèle dynamique exact est utilisé ; si les interrupteurs changent d'état au cours de la sous-période, un modèle moyen est appliqué.

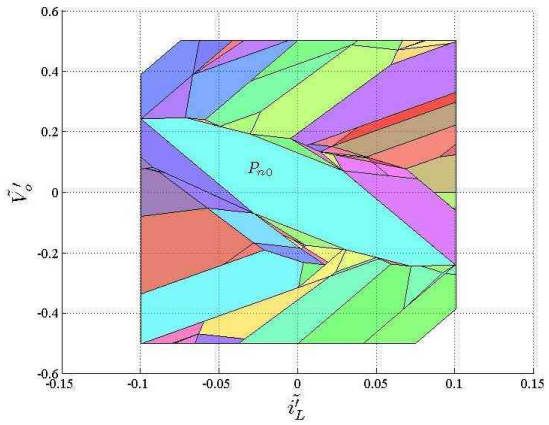


FIGURE III.4: Exemple de découpage en régions d'un convertisseur abaisseur dans l'espace d'état : représentation de type PWA.

Sur la Figure III.4, on montre un exemple de représentation PWA d'un convertisseur abaisseur.

Les modèles hybrides générés ont servi comme des modèles de prédiction pour la problématique de commande optimale avec contraintes [22]. Plusieurs choix ont été envisagés au niveau de l'horizon de prédiction et du critère à minimiser afin de synthétiser des lois de commande permettant d'assurer la stabilité, les performances vis-à-vis de présence des variations des paramètres, tout en respectant les contraintes, mais également la faisabilité de l'implantation sur des systèmes réels. Les lois de commande ont été synthétisées en utilisant des techniques de programmation linéaire multi-paramétrique ainsi que des outils issus de l'environnement Matlab et MPT (Multiparametric Toolbox). Les résultats expérimentaux obtenus sur le convertisseur abaisseur se résument à :

— Elaboration d'une commande à horizon fini à partir d'un modèle linéaire, avec des contraintes imposées sur les états (courant, tension) et le rapport cyclique du système, qui assure la stabilité de celui-ci en boucle fermée
— Mise en place d'une commande prédictive fondée sur un modèle hybride soumise aux contraintes.

III.3 Introduction à la thématique des interactions *physique 3D / performances dynamiques*

L'optimisation des convertisseurs en électronique de puissance traite souvent des aspects et performances en quasi-statique [23] [24]. Quelques travaux abordent la thématique de l'optimisation des lois de commande des convertisseurs, mais en insistant, à tort, sur l'absence d'interaction entre les performances quasi-statiques et dynamiques [25] [26]. Cependant, sur la base qu'il peut exister des interactions entre le dimensionnement quasi-statique et les performances dynamiques des convertisseurs, j'ai souhaité investiguer la problématique *"interactions statique / dynamique"* pour

les convertisseurs de l'électronique de puissance.

En effet, nous allons voir que, sur la base des travaux de doctorat de Kamal EJJABRAOUI et de stage de Master Recherche de Hadi ALAWEIH, le fait d'introduire des objectifs et/ou contraintes sur les performances dynamiques, introduit des répercussions sur le dimensionnement géométrique des convertisseurs.

III.3.-i Travaux de recherche de Kamal EJJABRAOUI (2007 – 2010)

Directeur de thèse : Claude MARCHAND (LGEP)

Co-encadrant : Chérif LAROUCI (ESTACA)

Co-encadrant : **Pierre LEFRANC** (Département Energie de Supélec)

Les résultats de la thèse de Kamal EJJABRAOUI sont présentés au Chapitre IV.4 à la Section IV.2.b page 50. Sur la Figure IV.4 page 52, on montre les trois fronts de Pareto des Cas 1, Cas 2 et Cas 3. On voit très nettement l'interaction entre le volume et le temps de réponse du convertisseur (définition même du front de Pareto) et les influences des différentes contraintes *stabilité, ondulations, rendement, thermique* et *CEM* [27].

III.3.-ii Travaux de recherche de Hadi ALAWEIH (2011)

Co-encadrant : **Pierre LEFRANC** (Département Energie de Supélec)

Co-encadrant : Philippe DESSANTE (Département Energie de Supélec)

Co-encadrant : Filipe VINCI (titulaire de la Chaire Supélec/Thales sur les systèmes analogiques complexes)

Hadi ALAWEIH a effectué son stage de Master 2 Recherche au Département Energie de Supélec : *"Optimisation multi-physique d'une Vanne EGR"*. Son financement a été assuré par la société Electric Automotive.

L'objectif de ses travaux de recherche est d'optimiser un système multi-physique constitué de *{machine électrique + convertisseur de puissance + filtre CEM + loi de commande}*. Sur la base d'une modélisation multi-physique dans le logiciel Matlab/Simulink, Hadi ALAWEIH obtient des résultats (à l'aide d'un algorithme génétique) d'optimisation qui déterminent les paramètres du filtre d'entrée, de la fréquence de découpage, des régulateurs PI avec anti-windup de la boucle cascade : la fonction objective étant le volume total du système.

Ces résultats préliminaires sont à la base des travaux de thèse entre le Département Energie de Supélec, la Chaire Supélec/Thales et la société Electricfil Automotive.

III.4 Conclusion

Dans ce chapitre, j'aborde en première approche les différents travaux de modélisation et de commande des convertisseurs de l'électronique de puissance. Nous voyons que les approches énergétiques proposées dans la thèse de Ali Jaafar sont intéressantes et permettent de synthétiser des commandes non-linéaires stabilisantes sur un espace de fonctionnement tout en estimant l'état et la charge.

Les travaux de C.Vlad sur la modélisation hybride affine par morceaux ont montré un intérêt particuliers pour l'application de lois de commande de type MPC (Model Predictive Control). Malgré une complexité de modélisation élevée et une implémentation

lourde les résultats expérimentaux montrent l'intérêt de cette philosophie de modélisation/commande dans un contexte applicatif et plus particulièrement en électronique de puissance.

Ensuite, sur la base des travaux de Kamal EJJABRAOUI, la nouvelle thématique d'étude des interactions entre les performances statiques et dynamiques des convertisseurs est introduite. Les résultats complémentaires de Hadi ALAWEIH nous montrent que ce nouvel axe de recherche est prometteur. Cependant, depuis mon arrivée au G2Elab en 2012, j'ai arrêté cet axe de recherche.

Chapitre IV

Optimisation des convertisseurs de puissance et de sous-systèmes

*Dans ce chapitre, je commence par décrire la problématique d'optimisation des convertisseurs de puissance. Une analyse des travaux antérieurs permettent de justifier et de positionner mes travaux sur la période (2007 – 2012). Ensuite, je montre, par le biais des résultats issus principalement des travaux de thèse de K.*EJJABRAOUI *et de C.*LEDOUX*, que la conception par optimisation des convertisseurs de puissance permet d'aider les concepteurs à faire des choix topologiques et technologiques dans une première approche. Pour aller plus loin dans la définition des convertisseurs, on cherche à affiner la modélisation pour réaliser des optimisations qui abordent des aspects géométriques 3D. L'utilisation des méthodologies génériques proposées sont principalement issues de monde automobile et aéronautique. Ensuite, j'introduis mes travaux de recherche engagés au G2Elab qui sont en transition entre mes travaux antérieurs et mes perspectives de recherche.*

IV.1 Introduction à l'optimisation en électronique de puissance

La notion d'*optimisation* est très générique et est applicable à de nombreux domaines : électrique, mécanique, biologie, chimie, organisation du travail, etc. Cependant, la mise en pratique d'algorithmes d'optimisation est liée aux problèmes à traiter et aux outils numériques nécessaires aux calculs.

Bien que l'électronique de puissance soit un domaine, une discipline, une spécialité à part entière, nous allons voir que l'optimisation des convertisseurs de puissance nécessitent de faire appel à des modélisations électriques, thermique, électrothermique, électromagnétique, mécanique, dynamique, etc. Les interactions entre les disciplines élémentaires fait apparaitre une difficulté évidente de maîtrise de toutes ces disciplines par un seul et même concepteur.

Dans [28] [29], les auteurs font apparaitre des axes d'améliorations des convertisseurs de puissance : poids, volume, coûts, fiabilité (MTBF) (voir Figure IV.1).

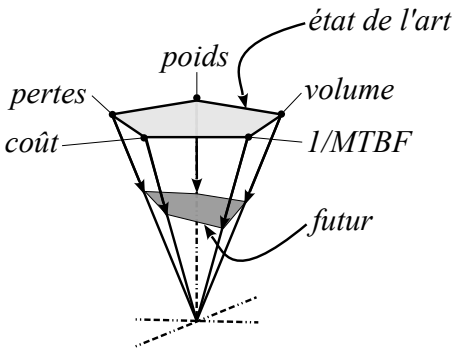


FIGURE IV.1: Représentation des axes d'optimisation en électronique de puissance

Cette représentation graphique résume bien les différents enjeux et difficultés de la conception par optimisation des convertisseurs : comment optimiser le volume d'un convertisseur tout en réduisant son poids sans détériorer son MTBF par exemple ? Un élément de réponse se trouve (peut-être ?) dans l'utilisation de *méthodologies d'optimisation* (algorithmes d'optimisation) et d'*outils de simulations* (outils numériques pour des simulations thermiques par éléments finis, outils pour simulations électriques transitoires, etc.) : on parle alors d'***optimisation par prototypage virtuel***.

Dans la pratique, un concepteur est confronté à un problème avec, au départ, une définition du produit à développer par un cahier des charges. La première phase du cycle en V correspond aux étapes de *prototypage virtuel* : modélisations analytiques, modèles numériques 0D, modèles numériques 2D-3D. Pendant cette phase, on y associe également des outils et des méthodes d'optimisation. Lors de la phase montante, les résultats issus des prototypes virtuels sont comparés à ceux des *prototypes physiques* : Figure IV.2.

Pour revenir à la notion de *conception* des convertisseurs de puissance, les auteurs de [29] définissent trois niveaux de conception :

1. Méthode de conception linéaire (*linear design flow*)
2. Prototypage virtuel manuel (*manuel virtual prototyping*)
3. Optimisation par modélisations (*linked models and optimisation*)

Cette classification est intéressante car elle met en avant plusieurs caractéristiques et évolutions de la problématique de la conception en électronique de puissance. ***(1)*** Le concepteur peut réfléchir sur la conception d'un système avec un processus linéaire et des outils simples, c'est à dire passer d'une étape à une autre sans reboucler avec la ou les précédentes. Le système final a peu de chance d'être optimisé (minimisation du volume par exmple) même si le concepteur est expérimenté. ***(2)*** Une évolution possible serait d'introduire des outils numériques pour les simulations multi-physiques par exemple puis un processus itératif manuel d'optimisation. ***(3)*** Enfin, la dernière évolution serait d'automatiser les processus de transferts de données entre les outils numériques et d'utiliser un algorithme d'optimisation adapté au problème posée (algorithmes génétiques avec variables mixtes par exemple).

Dans le suite de ce chapitre, je montre que le méthode ***(3)*** amène à une structuration de la conception par optimisation en électronique de puissance aussi bien sur des

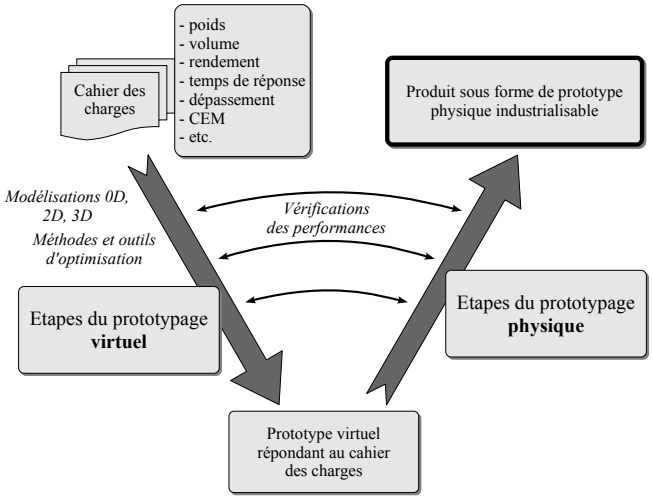


FIGURE IV.2: Définition du cycle de conception des convertisseurs de puissance.

convertisseurs que sur des sous-systèmes de convertisseurs (transformateur, inductance, etc.).

IV.2 Travaux de recherche sur la période 2007 – 2012

IV.2.a Contexte et motivations

Mes travaux de recherche sur la conception et l'optimisation en électronique de puissance ont commencé en 2007 avec la thèse de Kamal EJJABRAOUI, financé dans le cadre du projet O2M (Outils de Modélisation Mécatronique) du pôle de compétitivité MOVEO. Les industriels du secteur automobile étaient intéressés pour traiter la problématique du *prédimensionnement* des systèmes mécatroniques. Les travaux de recherche ont donc été orientés sur la thématique du prédimensionnement des convertisseurs de puissance DC-DC. La thèse a été soutenue en décembre 2010.

Ensuite, dans le cadre du projet CISACS (Concept Innovant de Système d'Actionnement de Commandes de vol secondaires et de Servitudes) du pôle de compétitivité ASTech, la thèse de Christophe LEDOUX a débuté en octobre 2009 (soutenue en décembre 2012). Les industriels du secteur aéronautique ont proposé l'idée de concevoir un convertisseur onduleur mutualisé pour des applications mono-convertisseur multi-machines séquentielles. Nous verrons dans le développement que ces travaux de thèse sont dans la continuité des travaux de Kamal EJJABRAOUI.

Pendant l'encadrement de ces deux thèses, j'ai commencé à développer une méthodologie de prototypage virtuel pour les convertisseurs DC-DC (avec l'aide de Xavier JANNOT et Philippe DESSANTE). Son application au convertisseur abaisseur a conduit à une première publication dans IET Power Electronics [30].

Entre 2010 et 2012, j'ai développé des outils d'optimisation (avec l'aide de Xavier JANNOT et Philippe DESSANTE) sur les fonctions de transmission d'ordres et de puissance

pour des circuits de commande rapprochée d'interrupteurs de puissance [31] : pour plus de détails, voir le Chapitre V.4.

IV.2.b Résumé des travaux de doctorat de Kamal EJJABRAOUI

La thèse de Kamal EJJABRAOUI est intitulée "*Contribution à la conception de systèmes mécatroniques automobiles : méthodologie de prédimensionnement multi-niveaux multi-physique de convertisseurs statiques*".

Les deux premiers chapitres introduisent des généralités sur le conception des systèmes mécatroniques et un comparatif des outils de *prédimensionnement mécatroniques*. Ils permettent au lecteur de comprendre les problématiques industrielles puis l'état de l'art des *outils* et *langages* pour la simulation / optimisation multi-physique.

Le troisième chapitre introduit les problèmes spécifiques au prédimensionnement des convertisseurs de l'électronique de puissance. On y dégage un bilan sur les méthodes de prédimensionnement par simulation et optimisation. Ensuite, une méthodologie est proposée. Elle est basée sur *trois niveaux* :

1. Sur la base d'un cahier des charges, le premier niveau effectue le choix de l'architecture et des technologies de composants du convertisseur de puissance.
2. Sur les résultats du premier niveau, une optimisation (mono ou multi-objectif) est effectuée en considérant une modélisation plus fine et plus complexe que pour le premier niveau. La modélisation est multi-physique et peut considérer les pertes, la CEM, la thermique, la commande, etc.
3. A l'issue du deuxième niveau, le convertisseur étudié est défini par une topologie, des composants (MOSFET, IGBT, diodes, condensateur, transformateur, inductance, etc.) pour minimiser un ou plusieurs objectifs. Dans le troisième niveau, l'optimisation se focalise sur un ou deux aspects : thermique et CEM par exemple. Une description 3D fait intervenir des simulations *coûteuses* en temps d'évaluation. Dans notre cas, nous avons considéré l'optimisation du placement des semiconducteurs pour affiner le prédimensionnement du dissipateur à l'aide du logiciel COMSOL.

Le quatrième chapitre est dédié aux modélisations respectives à chaque niveaux et domaines physiques / multi-physiques.

Dans le cinquième chapitre, nous proposons des résultats de prédimensionnement de convertisseurs. Le convertisseur abaisseur avec filtre d'entrée est l'exemple privilégié dans notre cas. A l'issue du premier niveau, la topologie abaisseur est confirmée et les composants sont associés à une ou plusieurs possibilités technologiques. Une première optimisation mono-objectif considère le volume total Vol. Ensuite, une première optimisation bi-objectif considère le rendement η et le volume Vol : ces résultats sont intéressants pour le concepteur car les fronts de Pareto (η *vs* Vol) apportent des informations sur les interactions entre les variables d'optimisation et les objectifs antagonistes [32] : Figure IV.3. Ensuite, afin de poursuivre l'approche de prototypage virtuel, nous avons proposé d'étudier l'impact des performances dynamiques sur les aspects physiques du convertisseur (η, Vol, poids, etc.). Nous définissons une optimisation bi-objective avec le volume Vol et le temps de réponse t_r (de l'asservissement de tension de sortie). Nous considérons trois cas pour analyser les interactions :

— Cas 1 : *contraintes de stabilité, ondulations, rendement*
— Cas 2 : contraintes de stabilité, ondulations, rendement, *thermique*

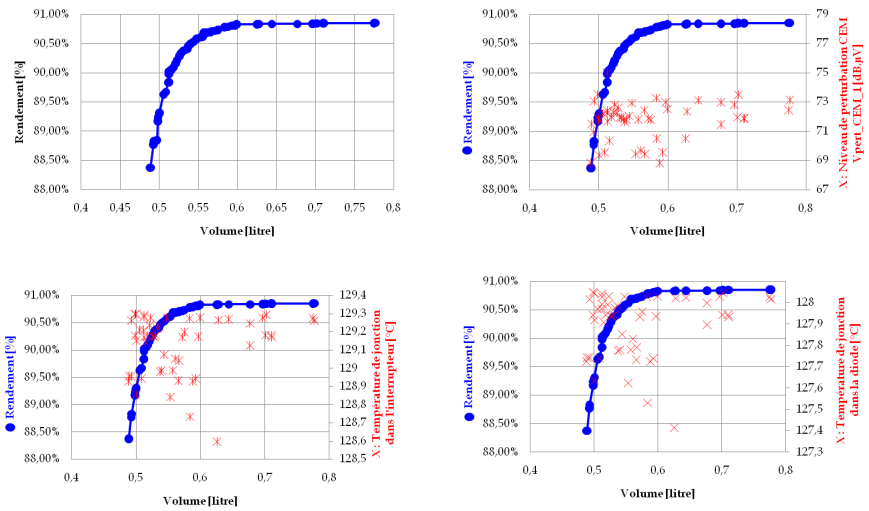


FIGURE IV.3: Résultats d'optimisation d'un convertisseur abaisseur avec filtre d'entrée : front de Pareto *rendement vs volume*. Influence du volume sur le niveau de perturbation, la température de jonction de l'interrupteur de puissance et de la diode.

— Cas 3 : contraintes de stabilité, ondulations, rendement, thermique, *CEM*

Sur la Figure IV.4 on montre les trois fronts de Pareto des Cas 1, Cas 2 et Cas 3. On voit très nettement l'interaction entre le volume et le temps de réponse du convertisseur (définition même du front de Pareto) et les influences des différentes contraintes *stabilité*, *ondulations*, *rendement*, *thermique* et *CEM*. **Cela confirme que la prise en compte des performances dynamiques dès la phase de prédimensionnement peut avoir un impact sur le dimensionnement final [27].**

Ensuite, nous traitons le cas du convertisseur abaisseur et d'un onduleur triphasé pour illustrer le troisième niveau sur le placement des semiconducteurs de puissance [33] : Figure IV.5 et Figure IV.6.

Globalement, les travaux de thèse de Kamal EJJABRAOUI ont montré la nécessité de développer des méthodes de prédimensionnement en électronique de puissance car elle répond à un besoin industriel fort. Après avoir proposé un bilan sur les outils et langages de modélisation et de simulation multi-physique, nous avons proposé une méthode basée sur trois niveaux. De ce fait, le concepteur peut valider les choix technologiques, et ensuite affiner la définition du convertisseur jusqu'aux aspects physiques fins optimisés par des simulations par éléments finis. Un des inconvénients de cette dernière étape est la lourdeur et le coût (en terme de temps) des simulations par éléments finis. Nous verrons que cette remarque est une base des travaux de recherche de Christophe LEDOUX où nous tentons d'utiliser des méthodes d'optimisation pour fonctions coûteuses (collaboration avec le Département de Signaux et Systèmes Electroniques de Supélec : Emmanuel VAZQUEZ, Julien BECT et Romain BENASSI) et que les résultats sont intéressants et prometteurs.

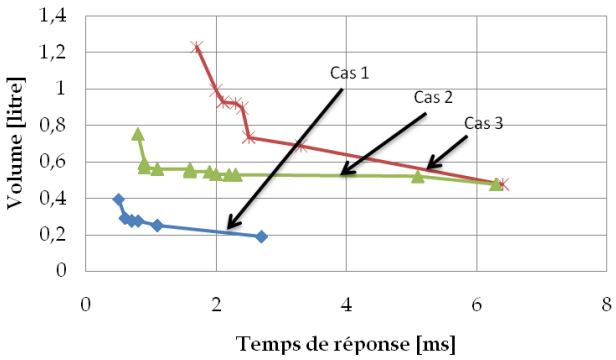


FIGURE IV.4: Résultats d'optimisation d'un convertisseur abaisseur avec filtre d'entrée. Mise en évidence de l'interaction entre le volume et le temps de réponse du convertisseur et des influences des contraintes *stabilité, ondulations, rendement, thermique* et *CEM*.

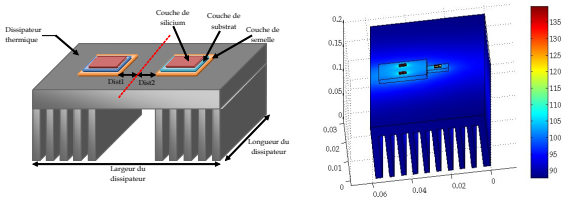


FIGURE IV.5: Optimisation du placement des puces semiconductrices pour un convertisseur abaisseur. Définition du problème d'optimisation géométrique et exemple de simulation thermique 3D avec COMSOL.

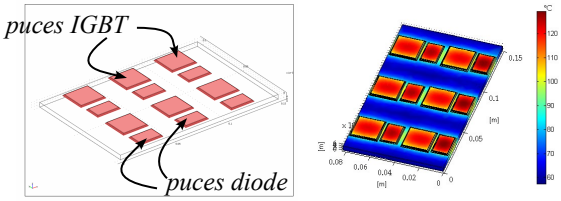


FIGURE IV.6: Optimisation du placement des puces semiconductrices pour un convertisseur onduleur triphasé. Définition du problème d'optimisation géométrique et exemple de simulation thermique 3D avec COMSOL.

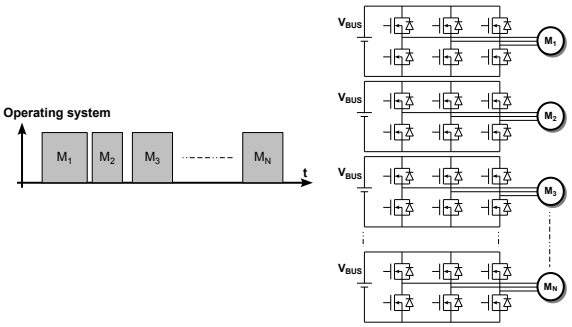


FIGURE IV.7: Système multi-machines multi-convertisseur pour applications séquentielles. Topologie classique sans mutualisation.

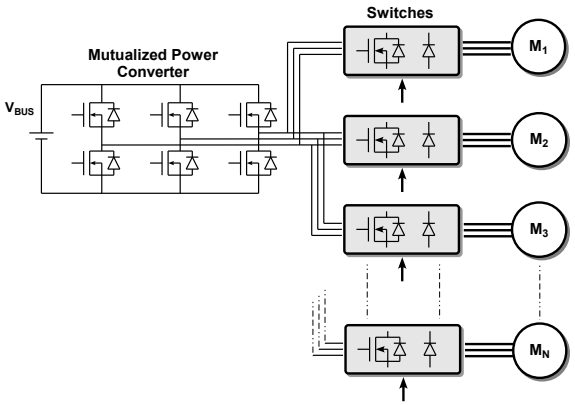


FIGURE IV.8: Système multi-machines mono-convertisseur pour applications séquentielles. Topologie avec mutualisation et aiguilleur de courant.

IV.2.c Résumé des travaux de doctorat de Christophe LEDOUX

Christophe LEDOUX a débuté sa thèse en octobre 2009 dans le cadre du projet CISACS (Concept Innovant de Système d'Actionnement de Commandes de vol secondaires et de Servitudes) du pôle de compétitivité ASTech et est intitulée : "*Onduleur mutualisé pour des applications de commandes électriques de vol secondaires et de servitudes, nouvelle topologie de puissance, conception et optimisation*".

Afin de réduire le poids des équipements aéronautiques pour réduire la consommation des aéronefs, l'idée principale du projet CISACS est de mutualiser des convertisseurs de type onduleur pour des actionneurs électriques fonctionnant de manières séquentielles comme l'illustrent la Figure IV.7 et la Figure IV.8.

Dans un premier temps, nous avons pensé aux différentes topologies de puissance afin de réduire le poids d'un système classique à N-onduleurs de la Figure IV.7 [34]. Nous avons retenu la solution d'*aiguilleurs* comme le montre la Figure IV.8 et des convertisseurs matriciels DC-AC. Après une première phase d'analyse et de prédimensionnement, ces derniers ne présentent pas un réel intérêt sur l'objectif de poids. Cependant, nous avons montré qu'ils peuvent présenter des comportements intéressants lors

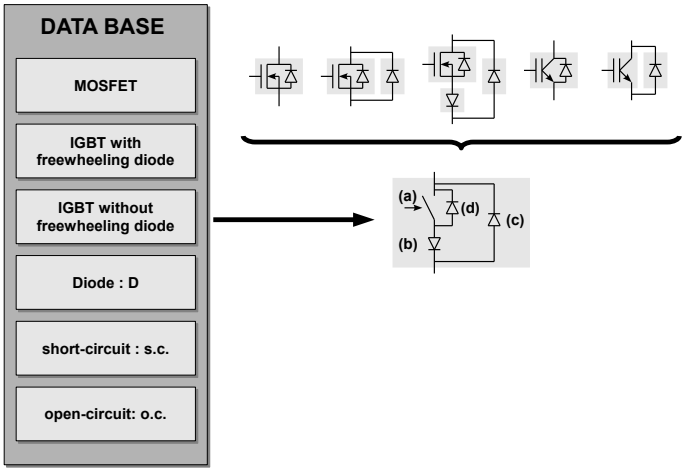


FIGURE IV.9: Représentation généralisée des interrupteurs de puissance et bases de données associées.

de défauts sur les composants élémentaires (diode, MOSFET, IGBT) : voir référence [35].

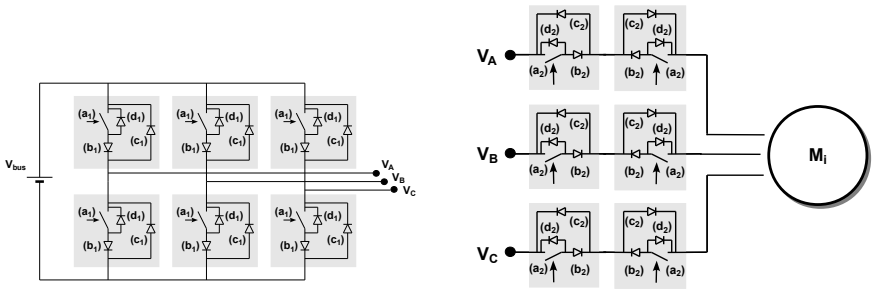
Nous avons développé une représentation généralisée pour les interrupteurs de puissance au sein des convertisseurs. En effet, un interrupteur de puissance peut être représenté comme le montre la Figure IV.9. On peut ensuite associer des bases de données de composants technologiques. La Figure IV.10 illustre cette modélisation pour un onduleur triphasé et un aiguilleur. Ensuite, on associe un modèle thermique-géométrique de dissipateurs du commerce comme le montre la Figure IV.11(a). Enfin, sur la Figure IV.11(b), on donne un résumé des variables d'optimisation pour le système onduleur. La même démarche est adoptée pour l'aiguilleur.

Afin d'étudier l'influence du nombre de machines séquentielles et de proposer un outil, une méthodologie de prédimensionnement et de choix d'architecture d'électronique de puissance, nous proposons une analyse comparative pour différentes fréquences de découpage et températures ambiantes : Figure IV.12. On remarque que le meilleur choix (en terme de poids) de topologie de puissance dépend de la fréquence de découpage, de la température ambiante et du nombre de machines électriques. Sans cet outil numérique d'optimisation, le concepteur serait confronté à la décision, certainement non-objective, de la meilleure topologie de puissance entre *{1 onduleur + N-aiguilleurs}* et *{N-onduleurs}* [36] [37].

Sur la Figure IV.13, nous montrons le découpage de notre optimisation complète du système d'électronique de puissance mutualisée. Nous faisons apparaitre deux étapes :

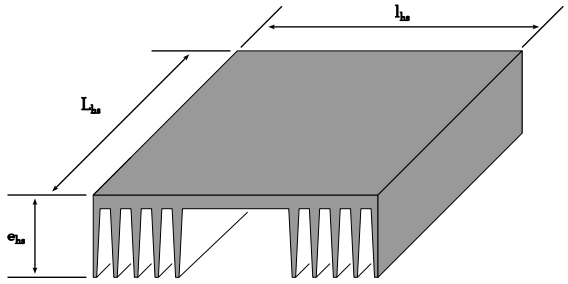
— *Step 1* : optimisation du choix des composants et comparaison des topologies
— *Step 2* : optimisation du placement routage de la meilleure topologies issue de *Step 1*.

Pour la deuxième étape (*Step 2*), nous allons mettre en oeuvre les mêmes outils que pour la thèse de Kamal EJJABRAOUI et ajouter les effets du routage sur le dimensionnement 3D du convertisseur. En effet, les éléments de cablâge ont une influence sur les

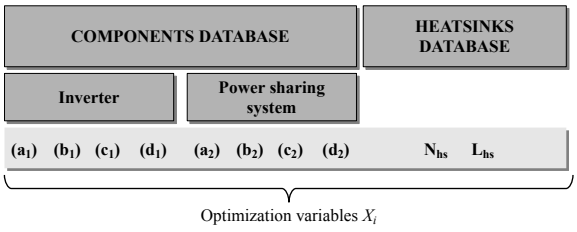


(a) ***Onduleur*** **(b)** ***Aiguilleur***

FIGURE IV.10: Modélisation et représentation généralisée des interrupteurs de puissance pour l'onduleur triphasé et aiguilleur.

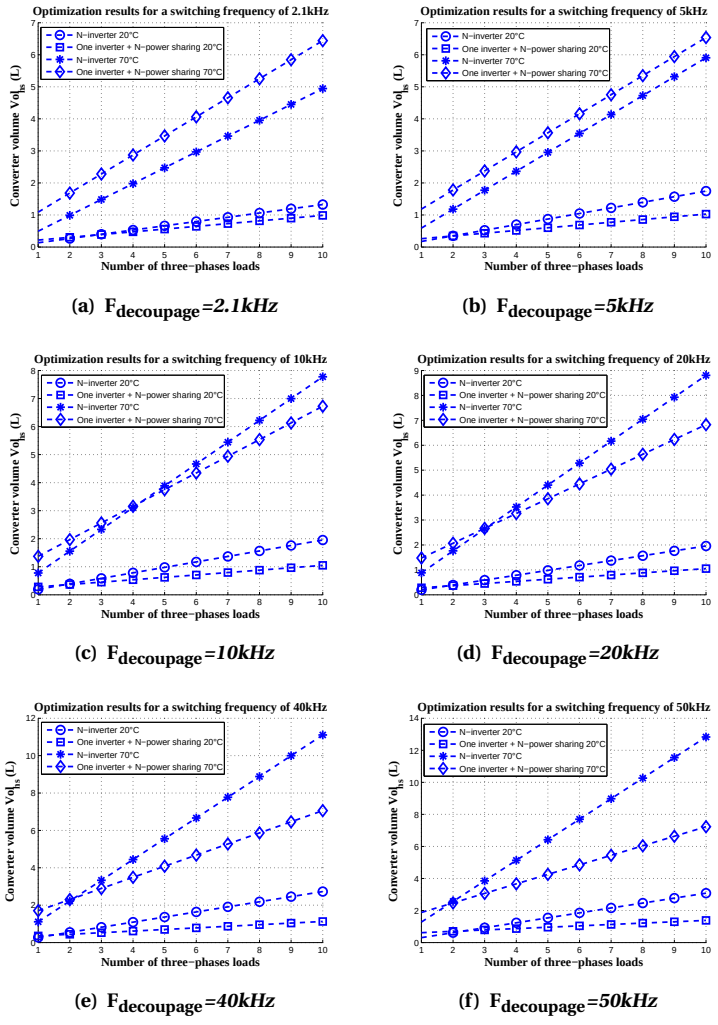


(a) ***Modélisation thermique - géométrique d'un dissipateur***



(b) ***Résumé des variables d'optimisation pour l'onduleur triphasé***

FIGURE IV.11: Modélisation des dissipateurs et résumé des variables d'optimisation pour les onduleurs.



(a) $F_{decoupage}$***=2.1kHz*** **(b)** $F_{decoupage}$***=5kHz***

(c) $F_{decoupage}$***=10kHz*** **(d)** $F_{decoupage}$***=20kHz***

(e) $F_{decoupage}$***=40kHz*** **(f)** $F_{decoupage}$***=50kHz***

FIGURE IV.12: Résultats d'optimisation des systèmes *{1 onduleur + N-aiguilleurs}* et *{N-onduleurs}*.

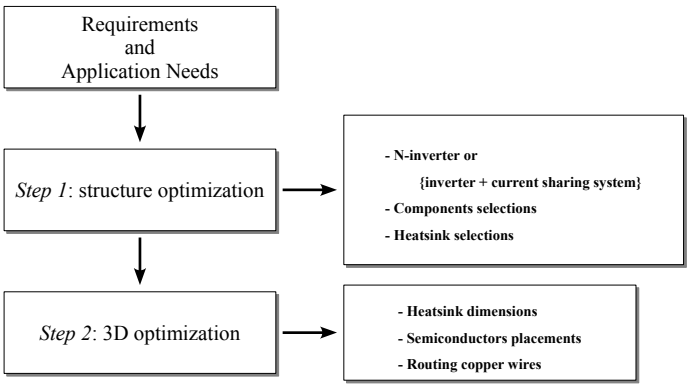


FIGURE IV.13: Conception par optimisation des systèmes d'électronique de puissance mutualisés : mise en évidence de deux étapes (*choix des composants* et *optimisation du placement/routage*.

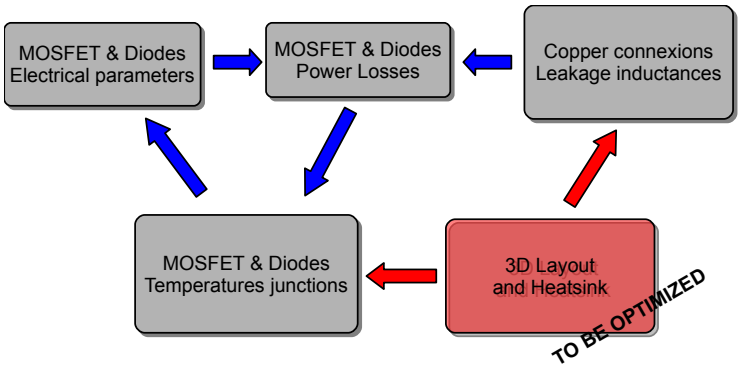


FIGURE IV.14: Mise en évidence des interactions multi-physiques du placement et du routage en électronique de puissance

pertes en commutation qui ont un effet sur les pertes : les paramètres thermo-électriques des composants de puissance sont impactés par la température qui dépendent donc du placement des semiconducteurs et du routage des pistes : Figure IV.14. Une première ébauche d'outil d'optimisation met en oeuvre les logiciels SPICE (Simulations électriques transitoires), FEMM (Calculs des éléments parasites du routage) et MATLAB (Calculs analytiques des pertes en conduction, calculs numériques des pertes en commutation à l'aide des simulations transitoires SPICE, calculs analytiques thermiques, algorithmes d'optimisation) : Figure IV.15 [38].

Afin de développer une première méthodologie et de résoudre les premiers problèmes d'interfaçage entre les logiciels SPICE/FEMM/MATLAB, nous avons simplifié le problème du placement routage de l'onduleur triphasé à un convertisseur abaisseur : Figure IV.16.

En effet, les premières difficultés d'interfaçages sont résolues et une évaluation de la fonction objective prend entre 15s et 60s. Sur ce constat, nous utilisons une méthode d'optimisation appliquée aux fonctions coûteuses : *Krigeage + Expected*

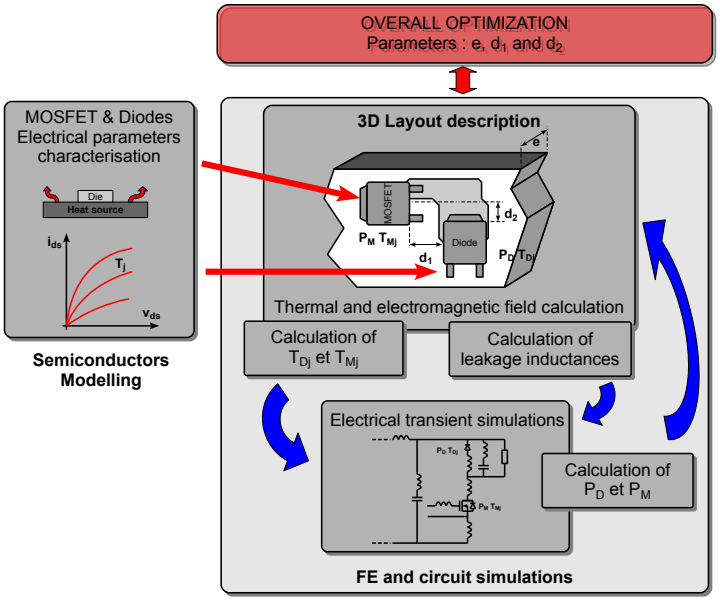


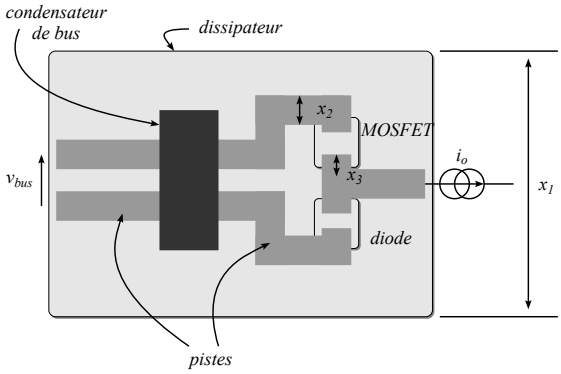
FIGURE IV.15: Synoptique de l'algorithme d'optimisation du placement/routage des convertisseurs de l'électronique de puissance

Improvement (*KEI*). Ces travaux sont réalisés en collaboration avec Emmanuel VAZQUEZ, Julien BECT et Romain BENASSI du Département des Signaux et Systèmes Electroniques de Supélec. Dans le Tableau IV.1, nous proposons les résultats d'optimisation issus de plusieurs méthodes.

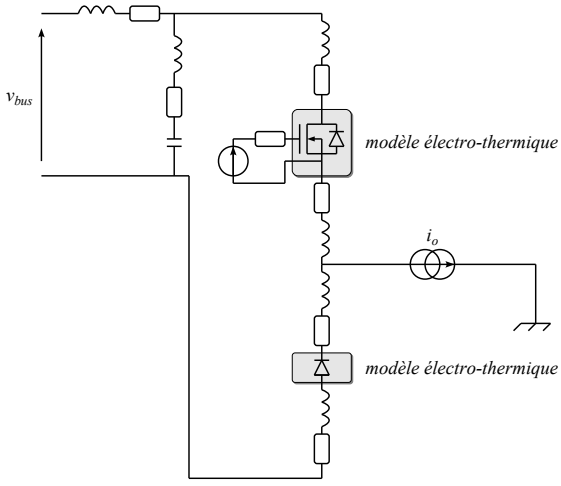
Méthode	x_1	x_2	x_3	$F_{obj} = x_2$	Temps total
AG	13.9mm	187.2mm	19.8mm	187.2mm	7.5 h
KEI	13.6mm	186.5mm	19.8mm	186.5mm	1.5 h

TABLE IV.1: Résultats d'optimisation du placement routage et comparaisons des méthodes d'optimisation (voir sur la Figure IV.16 pour les définitions de x_1, x_2 et x_3)

Les travaux de thèse de Christophe Ledoux ont tout d'abord confirmé l'intérêt de l'optimisation en électronique de puissance et ce pour des applications multi-charges séquentielles. Ils ont également montré la possibilité d'utilisation d'algorithmes spécifiques dédiés aux fonctions dites coûteuses comme le Krigeage Expected Improvement.



(a) ***Description géométrique***



(b) ***Schéma électrique équivalent***

FIGURE IV.16: Modélisation électrique-géométrique du convertisseur abaisseur : optimisation du placement / routage. Application au convertisseur abaisseur.

IV.2.d Outil générique pour l'optimisation analytique 3D des convertisseurs DC-DC

Dans cette section, je présente mes résultats de recherche sur le développement d'un outil générique pour l'optimisation 3D des convertisseurs DC-DC. L'idée directrice est de proposer un outil de pré-dimensionnement des convertisseurs basé sur une approche analytique. Une optimisation bi-objective permet d'obtenir un ensemble de solutions possibles (front de Pareto) : le concepteur peut ensuite analyser et choisir *la meilleure solution* sur le front de Pareto en ajoutant des contraintes et analyses supplémentaires.

Une première publication illustre l'ébauche d'un tel outil : *"Virtual prototyping and pre-sizing methodology for buck DC-DC converters using genetic algorithms"* [30]. Ces travaux sont effectués avec Xavier JANNOT et Philippe DESSANTE du Département Energie de Supélec. Nous considérons un convertisseur abaisseur sans filtre d'entrée : Figure IV.17. Une modélisation électrothermique des composants semiconducteurs est proposée : Figure IV.18. Ensuite, une modélisation électrogéométrique de l'inductance nous permet de calculer ses paramètres géométriques : Figure IV.19. Les fonctions objectives sont l'encombrement maximum occupé par le convertisseur (Figure IV.20) et le rendement η. Nous définissons les variables d'optimisation dans le Tableau IV.2 et les contraintes dans le Tableau IV.3. L'algorithme d'optimisation est basé sur le principe des algorithmes génétiques multi-objectifs NGSA-II [39] car il permet de gérer simplement des problèmes d'optimisation avec des variables mixtes (continues et discrètes). Nous aboutissons aux résultats d'optimisation définis sur la Figure IV.21. Notre outil d'analyse nous permet ensuite de visualiser les différentes variables d'optimisation comme le montrent la Figure IV.22 et la Figure IV.23.

Nous proposons ensuite une discussion sur le choix de la solution finale en considérant des contraintes additionnelles telles que :

- influence du volume total : en fonction de l'application finale, le concepteur peut affiner son choix en fonction des contraintes d'encombrement
- influence des températures de jonctions des semiconducteurs : le concepteur a l'information des températures de jonction des semiconducteurs qui peut donner une indicateur sur la fiabilité
- influence de la fréquence de commutation : dimensionnement des filtres d'entrée
- influence de la valeur du condensateur de sortie : prix et volume additionnel

A ce stade, cet outil reste incomplet. En effet, en y ajoutant le dimensionnement des filtres d'entrée, des contraintes dynamiques, etc., cet outil pourrait tendre vers un outil générique utilisable dans l'industrie pour le dimensionnement des convertisseurs DC-DC de l'électronique de puissance. Nous avons vu dans les travaux de thèse de Kamal EJJABRAOUI que les contraintes dynamiques sont intéressantes et ont une influence sur la géométrie 3D [27].

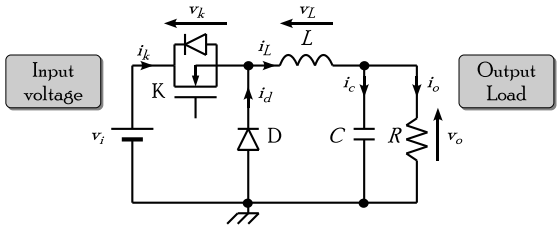
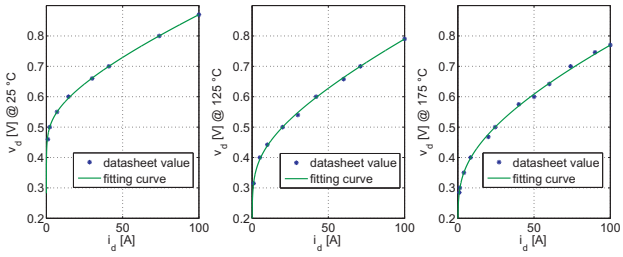
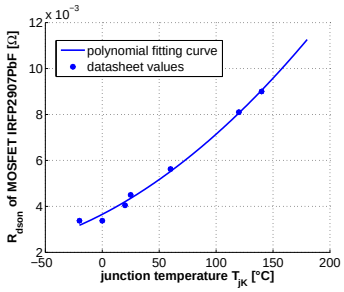


FIGURE IV.17: Schéma du convertisseur abaisseur abaisseur sans filtre d'entrée



(a) ***Diode***



(b) ***MOSFET***

FIGURE IV.18: Modélisation électrothermique de la diode et du MOSFET. Identifications des paramètres.

optimization variable	min value	max value
F [kHz] : switching frequency	10	200
C [F] : capacitor value	10^{-6}	10^{-1}
e [mm] : air gap	0	3.3
A [cm^2] : winding square area	0	100
S [m^2] : square cross section of the feritte core	10^{-6}	36×10^{-4}
s [m^2] : cross section of the elementary wire	10^{-7}	16×10^{-6}
n : wiring turn number of the inductor	1	200
L_{hs} [mm] : heatsink length	50	200

TABLE IV.2: Definition ranges of the optimization variables

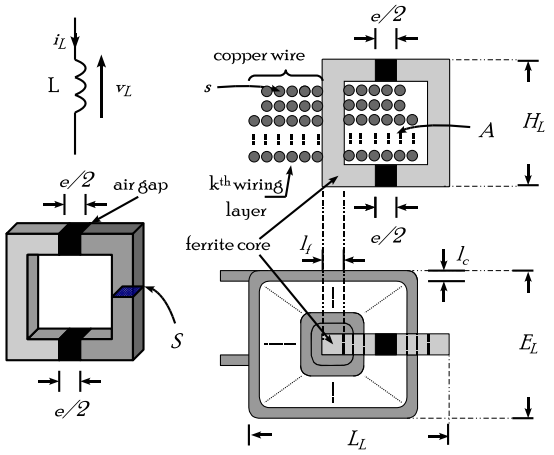


FIGURE IV.19: Paramètres géométriques de l'inductance

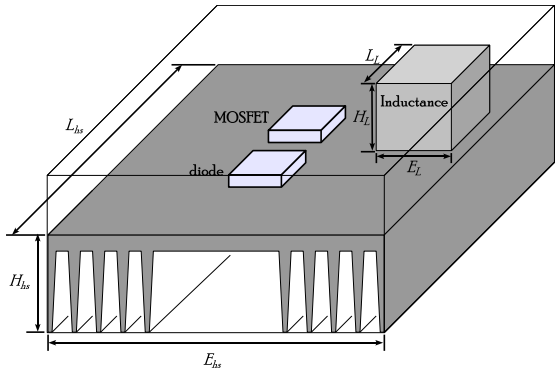
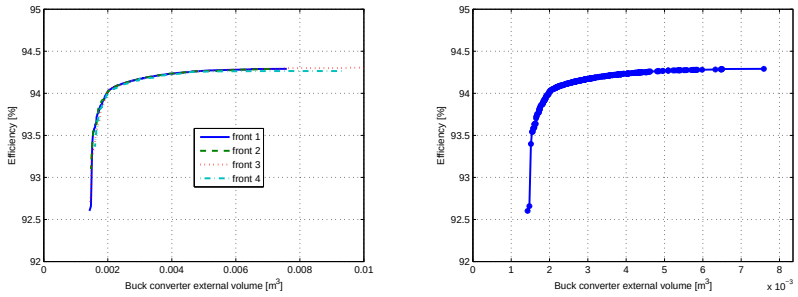


FIGURE IV.20: Définition de l'encombrement du convertisseur

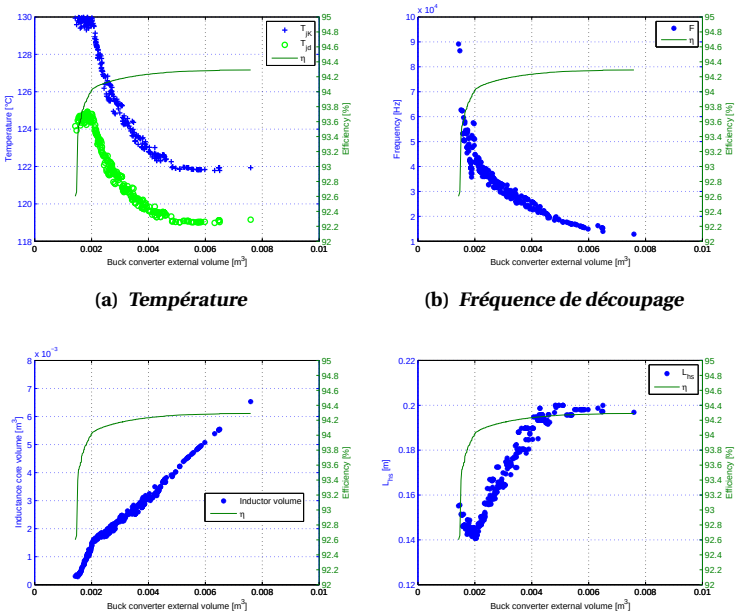
Quantity	Constraint
CCM condition	$0 < i_{Lm}$
Output voltage ripple	$\Delta v_0 < k_{v_0} v_0$
Current density	$J < 10 A.mm^{-2}$
Junction temperatures	$(T_{jK}, T_{jd}) < 130°C$
Ferrite magnetic flux density	$B_M < 0.3T$
Geometric constraint	$n.s < k_f.A$
Inductor temperature	$T_{core} < 80°C$

TABLE IV.3: Constraints of the optimization problem



(a) ***Fronts de Pareto*** **(b)** ***Front de Pareto***

FIGURE IV.21: Fronts de Pareto du convertisseur abaisseur sans filtre d'entrée.



(a) ***Température*** **(b)** ***Fréquence de découpage***

(c) ***Volume de l'inductance*** **(d)** ***Longueur du dissipateur***

FIGURE IV.22: Variables d'optimisation du convertisseur abaisseur.

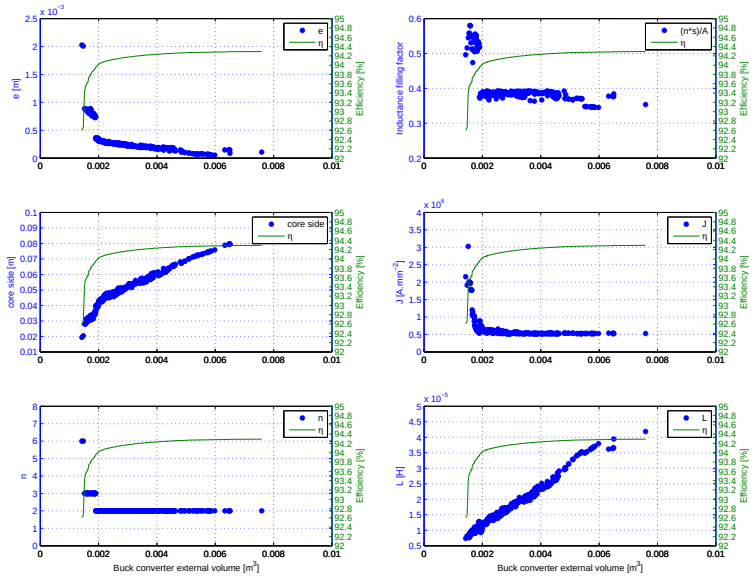


FIGURE IV.23: Variables d'optimisation de l'inductance

IV.2.e Optimisations des fonctions de transmissions pour circuits de commande rapprochée d'interrupteurs de puissance

Cette thématique de recherche est commune aux travaux présentés au Chapitre V.4 et plus spécifiquement à la Section V.3 page 85. En effet, la conception des systèmes de transmission (ordres et puissance) pour les drivers d'interrupteurs de puissance nécessite le développement d'outils d'optimisation pour le prototypage virtuel.

IV.3 Travaux sur la période 2012-2017

IV.3.a Introduction

Comme mentionné précédemment, l'année 2012 a été une année de transition entre le Département d'Energie de Supélec et le G2Elab. J'ai commencé plusieurs actions de recherche en 2012 dont l'optimisation de μ-inductances avec Magali Brunet et Jean-Pierre Laur du LAAS et l'optimisation de transformateur planar pour applications plasma avec Emmanuel Odic et Mike Kirckpatrick de Supélec. Ensuite, je développe mes activités commencées en septembre 2012 au G2Elab.

IV.3.b Optimisation de μ-inductances

La conception des μ-inductance ou inductances intégrées nécessitent une réalisation technologique lourde via des procédés dits de « salle blanche ». Dans un contexte collaboratif avec le LAAS (Magali Brunet et Jean-Pierre Laur), nous avons débuté

un travail sur l'optimisation géométrique des inductances dans la gamme 100nH-6MHz-courant continu de 0.6A. Les inductances dimensionnées et réalisées sont destinées à être utilisées dans des convertisseurs DC-DC classiques. Ces travaux ont été effectués dans le cadre de la thèse de Thi Yen Mai Nguyen (LAAS).

Tout d'abord, la géométrie de l'inductance considérée est basée sur la forme définie sur la Figure IV.24 : forme rectangulaire avec ouverture centrale.

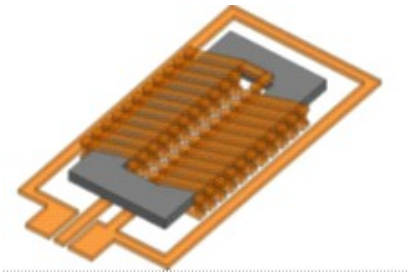


FIGURE IV.24: Exemple de géométrie pour l'optimisation d'une inductance intégrée [1]

Au préalable, le matériau magnétique a été caractérisé (B en fonction de H) : l'aspect non-linéaire du matériau est pris en compte dans la modélisation de type éléments finis : Figure IV.25. Un modèle analytique est utilisé pour l'estimation des pertes volumiques [40].

A l'aide du logiciel FEMM et d'un algorithme génétique d'optimisation implémenté avec Matlab, nous avons développé un code qui permet d'effectuer l'optimisation des inductances : inductance en fonction du courant continu. Sur la Figure IV.26, nous montrons un exemple de géométrie modélisée avec FEMM et un résultat de répartition spatiale de l'induction magnétique.

Les optimisations nous ont conduit à l'interprétation de deux modélisations différentes : estimation de l'inductance par la méthode énergétique, ou par la méthode de l'inductance incrémentale [1]. Nous constatons que la méthode dite incrémentale donne de meilleurs résultats à faible courant continu.

Deux prototypes physiques ont été comparés : le premier « run » est issu d'une démarche de conception « à la main » avec du bon sens. Le second « run » est issu de notre démarche d'optimisation.

La démarche d'optimisation proposée a conduit à l'augmentation de la densité

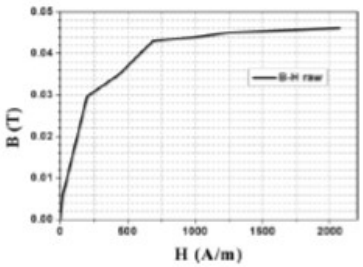


FIGURE IV.25: Exemple de caractérisation du matériau magnétique utilisé [1]

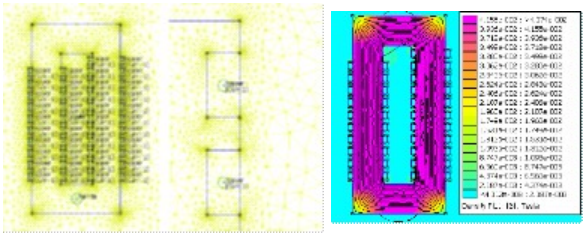


FIGURE IV.26: Exemple de maillage de la structure géométrique et exemple d'une résolution numérique de la répartition spatiale de l'induction magnétique

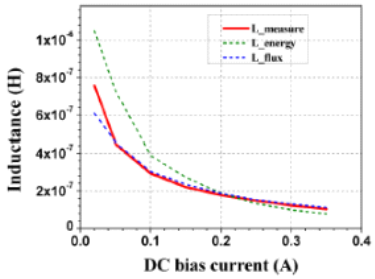


FIGURE IV.27: Comparaison des fronts de Pareto entre la méthode énergétique et la méthode incrémentale. Confrontations aux mesures.

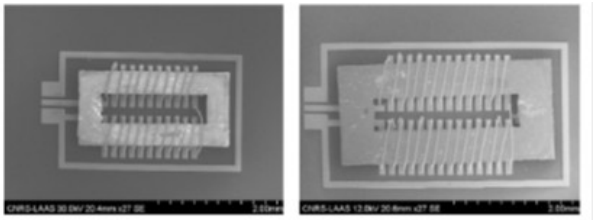


FIGURE IV.28: Premier « run » et second « run ».

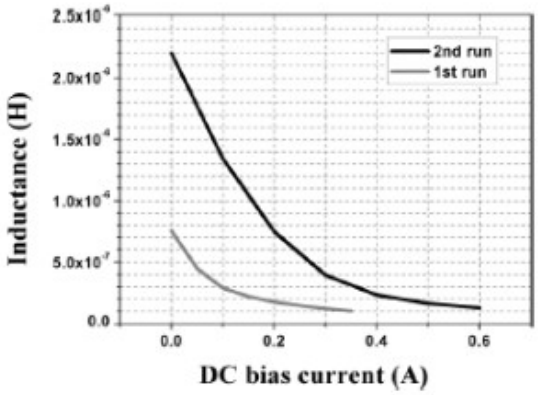


FIGURE IV.29: Comparaison entre premier run et second run de l'inductance en fonction du courant continu.

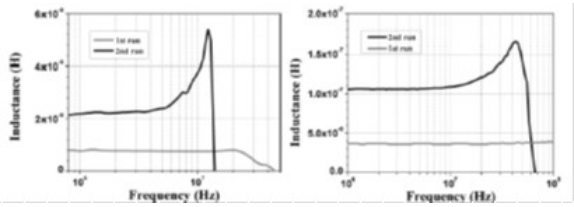


FIGURE IV.30: Inductance en fonction de la fréquence, comparaison entre premier run et second run.

d'énergie d'un facteur 1.4 et du facteur de qualité d'un facteur 2. Cependant, la fréquence de résonance a diminué mais reste au-delà de 10MHz : Figure IV.30.

En conclusion, cette démarche de conception par optimisation a permis à l'équipe du LAAS de rationaliser l'étape de dimensionnement des μ-inductances avec des outils numériques simples et faciles à mettre en oeuvre. Cependant, afin d'améliorer la modélisation numérique, il apparaît nécessaire de passer d'un environnement en deux dimensions proposés par FEMM à un environnement à trois dimensions. Ceci fait partie des ouvertures possibles de ces travaux.

IV.3.c Optimisation de transformateur planar pour application plasma

Dans le cadre des applications des décharges de type « plasma », il est nécessaire de développer des convertisseurs d'électronique de puissance spécifiques : forte tension (quelques kilo-Volt), fort dv/dt, isolation galvanique pour la sécurité, compacité pour les applications industrielles embarquées, etc. Dans ce contexte, j'ai débuté une collaboration avec Emmanuel Odic et Mike Kirckpatrick en janvier 2012 (avant mon départ de Supélec) : conception d'un transformateur magnétique à haute isolation galvanique pour la génération de forte tension (plusieurs kilo-Volts) à partir d'une basse tension (quelques centaines de Volts). Ces travaux de recherche ont abouti à une publication dans IET Power Electronics [41] dont voici un résumé.

Tout d'abord, afin de proposer une structure géométrique industrielle viable et simple à reproduire, j'ai choisi de travailler sur une structure planaire avec des empilements de circuits imprimés classiques le tout recouvert de plaques de ferrites : Figure IV.31.

Le problème de conception de ce système nous a conduit à considérer l'inductance vue du primaire du transformateur (image du courant maximum absorbé par le convertisseur de puissance) et le rapport de transformation afin de générer une forte tension au secondaire. Ces deux objectifs sont donc à maximiser pour la conception de ce système. Une modélisation de type éléments-finis avec FEMM (Figure IV.32) et un algorithme génétique implémenté avec Matlab nous permettent d'obtenir les fronts de Pareto suivants : Figure IV.33.

Le choix de la solution retenue est basée sur un compromis entre le rapport de transformation et l'inductance vue du primaire (L_a). La réalisation physique du prototype est donnée sur la Figure IV.34.

Des mesures et des caractérisations des éléments du transformateur nous ont permis de valider la modélisation magnétique et d'identifier les capacités parasites du prototype. Sur la Figure IV.35, nous avons représenté les éléments parasites du

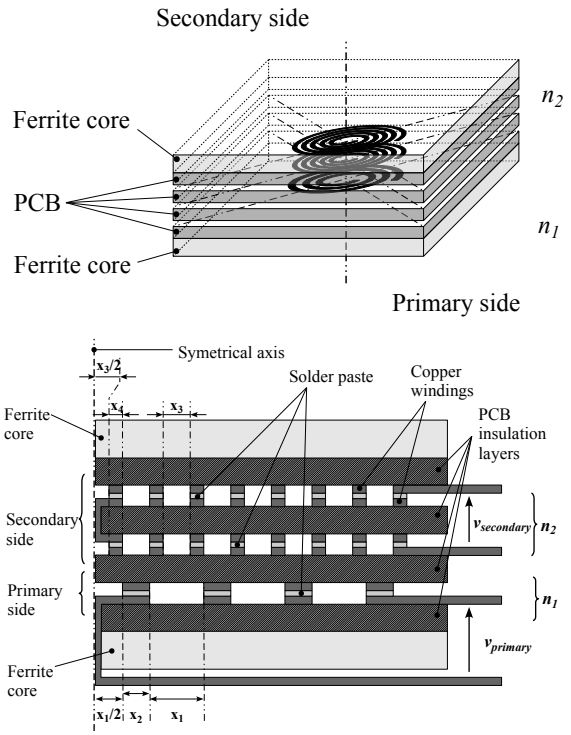


FIGURE IV.31: Vue 3D de l'empilement des couches de circuits imprimés et plaques de ferrites. Description 2D du transformateur et définitions des variables géométriques en vue d'une optimisation.

transformateur et des sondes de mesure de tension. Sur la Figure IV.36, nous montrons l'importance de la prise en compte des sondes de mesure dans ce cas particulier où les gradients de tension sont importants et où la charge au secondaire du transformateur est capacitive.

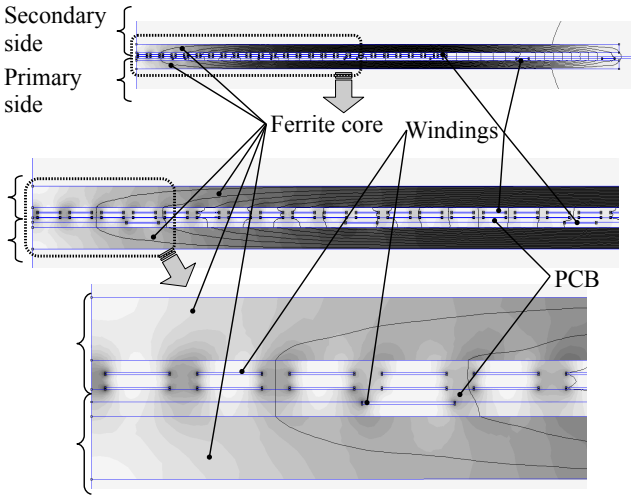


FIGURE IV.32: Exemple de maillage et de résolution numérique du champ magnétique dans le transformateur planaire.

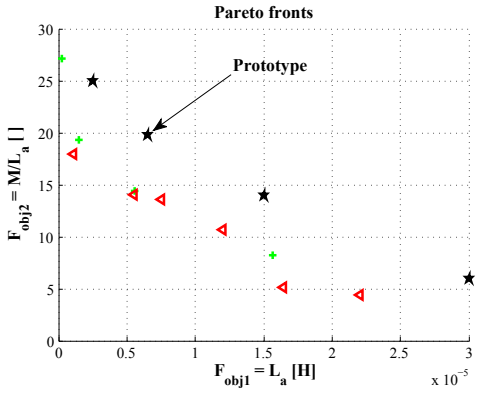


FIGURE IV.33: Résultats d'optimisation sous forme de fronts de Pareto.

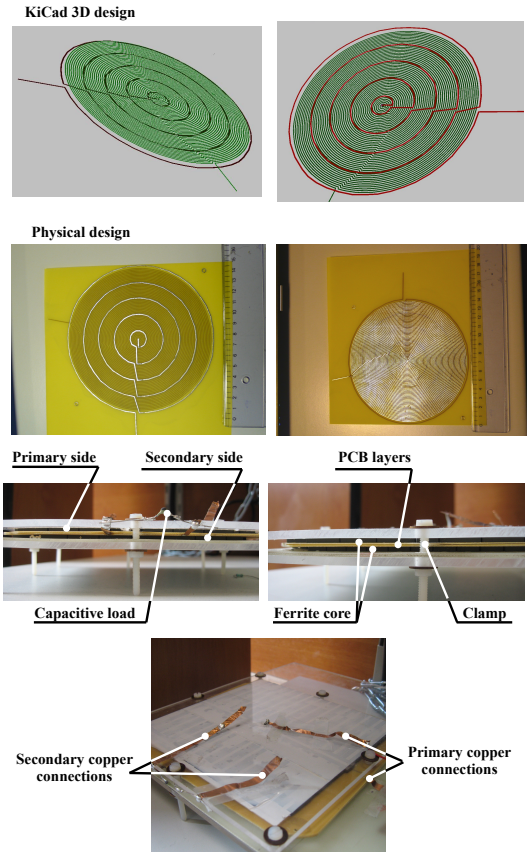


FIGURE IV.34: Réalisation physique du prototype.

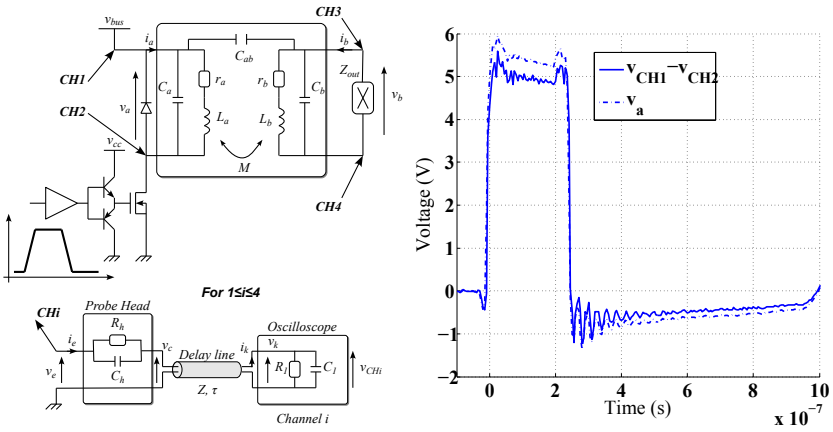


FIGURE IV.35: Modélisation complète du transformateur planaire avec prise en compte des éléments parasites capacitifs et des sondes de tension.

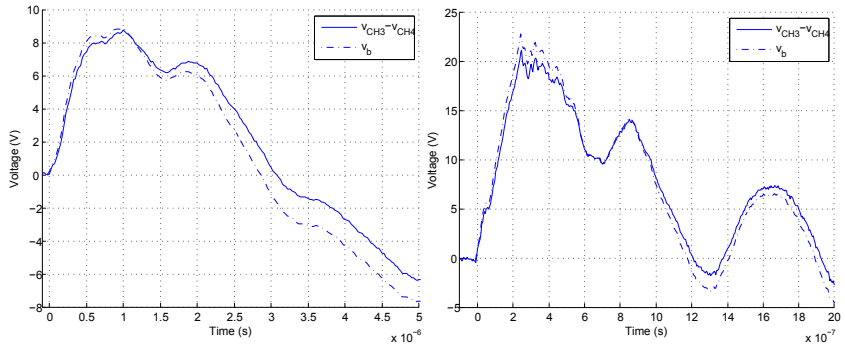


FIGURE IV.36: Influence de la sonde de tension sur la mesure de la tension de sortie du transformateur dans le cas d'une charge capacitive.

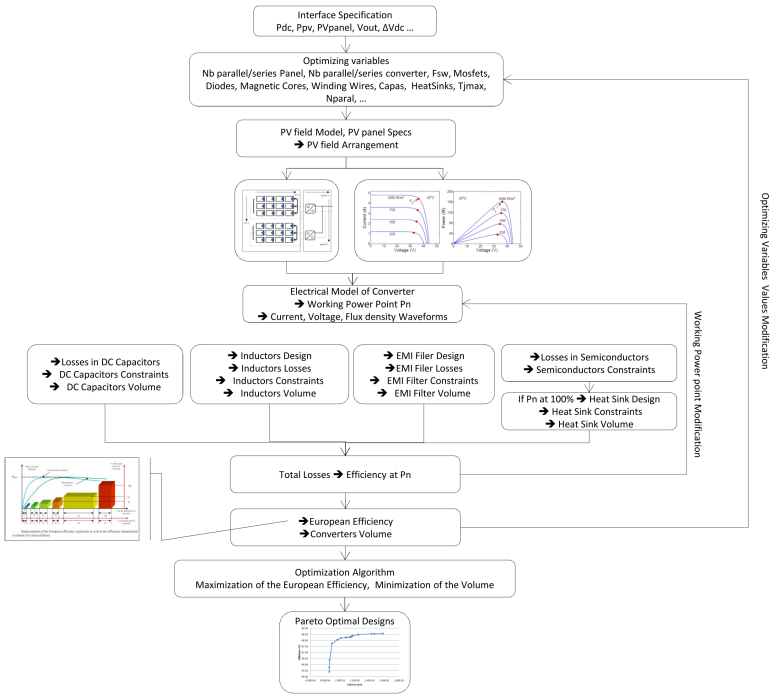


FIGURE IV.37: Optimisation d'un ensemble panneaux solaires photovoltaïques et convertisseurs DC-DC associés, Mahmoud Ibrahim.

IV.3.d Travaux de doctorat de Mahmoud IBRAHIM

Mahmoud IBRAHIM a commencé son doctorat en mars 2013 et a soutenu sa thèse le 13 juillet 2016. Il a travaillé pour la société EATON (38330 Montbonnot Saint Martin) dans le cadre d'une convention CIFRE.

Les travaux de doctorat portent sur l'optimisation de convertisseurs pour les Alimentations Sans Interruptions (ASI) pour des applications de type « Data Centre ». L'intégration des énergies renouvelables et plus spécifiquement du solaire photovoltaïque nous a amené à étudier toutes les architectures possibles au niveau des panneaux solaires et des convertisseurs associés.

Dans ce contexte, Mahmoud Ibrahim a développé des modèles de composants (inductances, condensateurs, semiconducteurs, dissipateurs, etc) afin de les intégrer dans un outil d'optimisation comme l'illustre les Figure IV.37 et Figure IV.38 [42] [43].

La première moitié de son doctorat a porté essentiellement sur la modélisation et le développement d'outils pour l'optimisation. Ensuite, entre la fin de l'année 2014 et la fin de son doctorat, Mahmoud Ibrahim a conçu un prototype physique modulable (cartes reconfigurables afin de tester toutes les topologies optimisées) : Figure IV.39.

Afin de valider ses approches de conception par optimisation, Mahmoud Ibrahim a proposé de traiter un cas d'application de type PFC de 3kW. Grâce à sa démarche,

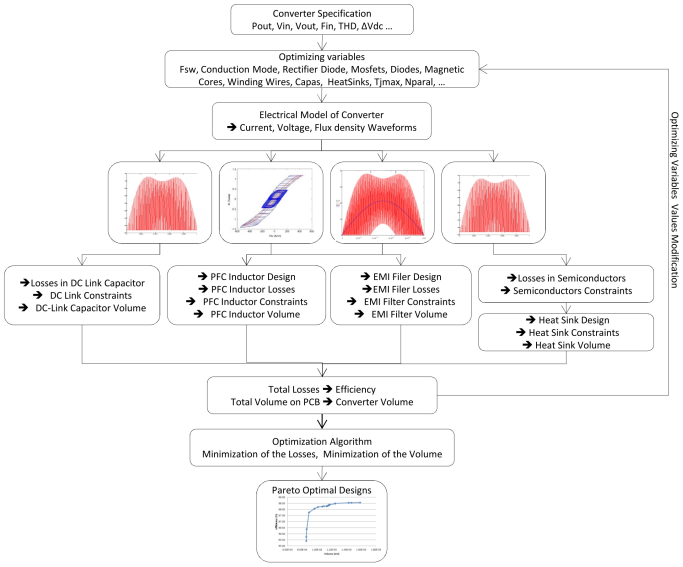


FIGURE IV.38: Modélisation et méthodologie d'optimisation d'une inductance pour redresseur synchrone, Mahmoud Ibrahim.

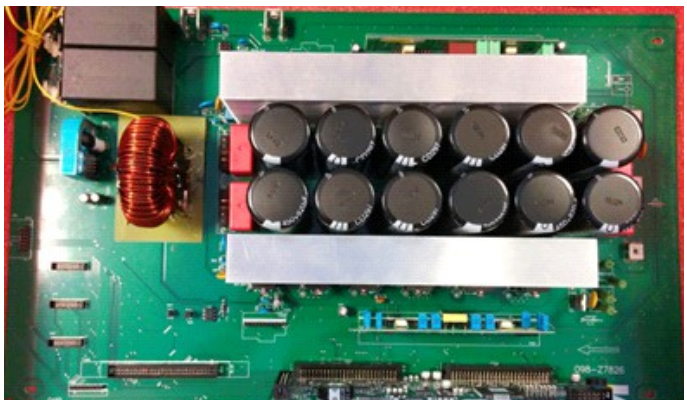


FIGURE IV.39: Photo du prototype d'un convertisseur modulable pour tester des architectures DC-AC et AC-DC, Mahmoud Ibrahim.

il propose un convertisseur physique ayant une densité de puissance de 4.2kW/L avec un rendement de 98.06 % à 3kW : Figure IV.40.

Grâce à une démarche de modélisation exhaustive et une maîtrise des outils d'optimisation, les travaux de Mahmoud Ibrahim ont montré (de nouveau), que l'optimisation en électronique de puissance permet d'obtenir des produits industriels optimisés très proche de l'état de l'art par rapport à la densité de puissance par exemple.

IV.3.e Travaux de doctorat de Sokchea AM

Sokchea AM a débuté son doctorat en novembre 2013 et a soutenu sa thèse le 24 novembre 2016. Ses travaux de recherche portent sur l'optimisation des onduleurs de type MMC (Multilevel Modular Converter) et le packaging 3D des « sub-module » MMC (semiconducteurs, élements passifs et commande rapprochée). Ses travaux relatifs aux drivers à forte isolation galvanique sont présentés à la Section V.3.d page 95

Pour rappel, la structure MMC est représentée sur la Figure IV.41. Elle est constituée de deux demi-bras eux-mêmes constitués d'une inductance et de N sub-modules.

L'originalité de cette structure réside dans sa propriété à être de type multi-niveaux et modulaire (comme son nom l'indique) : il est alors possible de la voir comme un « empilement » de briques élémentaires que l'on peut assembler afin de répondre au plus grand nombre d'applications données. C'est dans cette philosophie que j'ai défini le projet de doctorat de AM Sokchea.

De ce fait, AM Sokchea a travaillé pendant sa première année de doctorat à la commande globale de cette famille de convertisseurs, à sa modélisation fonctionnelle et à sa modélisation pour l'évaluation des pertes. Le premier objectif est de fournir un outil de prototypage virtuel le plus générique possible : il doit permettre au concepteur du convertisseur de faire un choix rapide sur le nombre de sub-module, la valeur des éléments passifs (condensateurs et inductances), de la fréquence de découpage et des paramètres des correcteurs permettant le pilotage et la stabilité du système [44].

Les résultats d'optimisation pour plusieurs cahiers des charges nous permettent

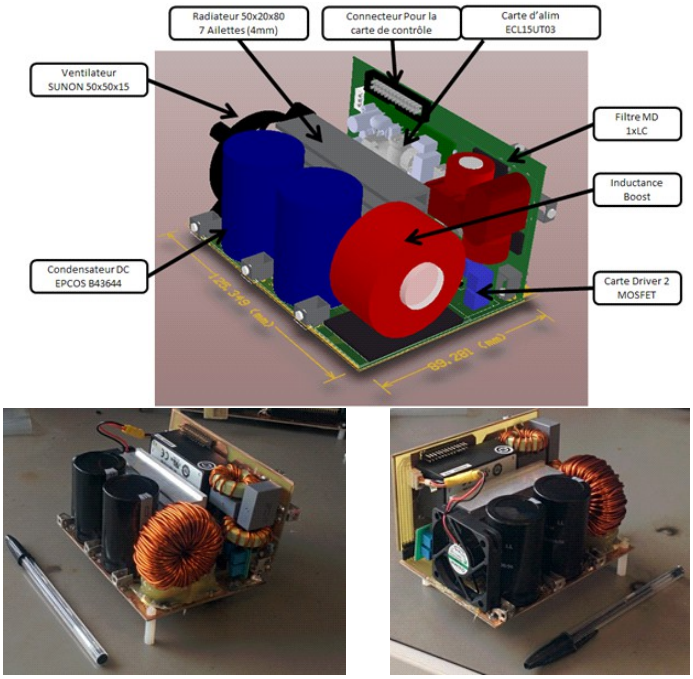


FIGURE IV.40: Photo du prototype d'un PFC de 3kW, Mahmoud Ibrahim.

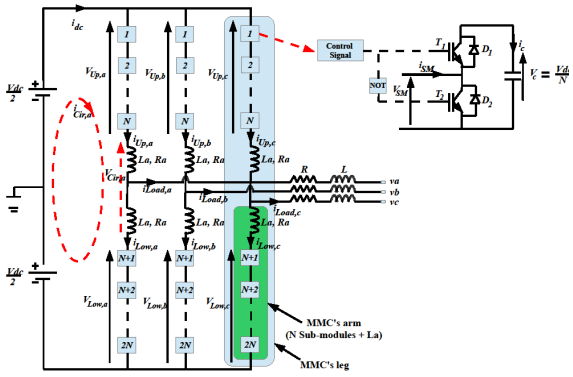


FIGURE IV.41: Structure MMC et sub-modules, Sokchea Am.

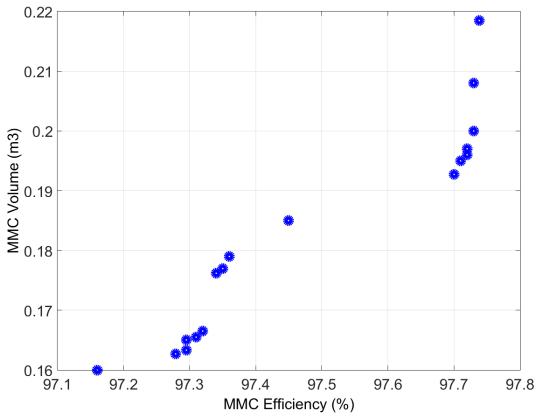


FIGURE IV.42: Résultats d'optimisation pour 400kVA, Sokchea Am.

de valider l'outil d'optimisation proposé dans ses travaux de thèse. Par exemple, pour 400kVA et 3.9kV de tension continue, nous obtenons le front de la Figure IV.42.

De part ses résultats d'optimisation de structures MMC, les travaux de Sokchea AM ont montré l'intérêt des méthodologies d'optimisation lors d'une phase de prédimensionnement.

La deuxième partie de la thèse de AM Sokchea a porté sur l'optimisation de drivers à haute isolation galvanique. Ses travaux sont développés dans le Chapitre V.3 à partir de la page 85.

IV.4 Conclusion sur l'optimisation en électronique de puissance

L'optimisation des convertisseurs de puissance est une des thématiques de l'électronique de puissance. L'encadrement de deux doctorants à Supélec sur cette thématique m'a conduit à la réflexion globale sur la conception par prototypage virtuel. Ces travaux ont conduit à une meilleure formalisation de la conception et de la modélisation des convertisseurs dans l'optique de les optimiser. Plusieurs méthodes d'optimisation (algorithmes génétiques, Krigeage Expected Improvement) ont été développées et comparées. Les méthodes d'optimisations pour fonctions coûteuses semblent être très prometteuses pour les problèmes d'optimisation de convertisseurs d'électronique de puissance qui sont des systèmes multi-physiques.

Les systèmes dédiés aux drivers pour interrupteurs de puissance font également partie de cette thématique d'optimisation : j'ai montré que ces systèmes, de petite, voire très petite puissance, peuvent être optimisés par les mêmes outils et méthodes que pour les convertisseurs de moyenne et forte puissance. Ceci est développé en partie dans le chapitre suivant.

Chapitre V

Commande rapprochée des interrupteurs de puissance

Dans ce chapitre, je commence par décrire la thématique de commande rapprochée des interrupteurs de puissance afin de comprendre les enjeux applicatifs industriels qui restent à la base de mes motivations de recherche. Dans une deuxième section, je propose un résumé de mes travaux de thèse (2002-2005) effectués pour la société ARCEL au laboratoire AMPERE de Lyon. J'expose succintement mes résultats portant sur les transformateurs "coreless" pour la fonction de transmission d'ordre puis la modélisation du phénomène d'avanlanche dynamique de cellules PT-IGBT (Punch Through - Insulated Gate Bipolar Transistor). Dans une troisième section, j'explique mes travaux de recherche sur la période 2010-2013 qui portent principalement sur la conception par optimisation de systèmes de transmission d'ordre basés sur des structures géométriques spécifiques de transformateurs magnétiques. Ensuite, je développe mes derniers travaux sur la période 2013-2017 qui portent sur la poursuite de la conception de drivers à haute isolation galvanique à bases de transformateurs magnétiques. Les drivers pour composants rapides tels que les HEMT-GaN sont également introduits. Une petite parenthèse est également proposée sur l'utilisation de matériaux à effet GMI (Giant Magneto Impedance) pour les drivers à haute isolation galvanique.

V.1 Introduction à la thématique de commande rapprochée des interrupteurs de puissance

Les interrupteurs de puissance sont à la base de l'électronique de puissance moderne dite *en commutation*. Depuis le premier transistor bipolaire de 1947 des laboratoires Bell [45], les interrupteurs de puissance sont encore en pleine évolution du point de vue des matériaux (Si, SiC, GaN, AsGa, diamant, etc.) mais également des structures des cellules élémentaires (thyristor, diode, BJT, MOSFET Lateral, VD-MOSFET, IGBT, IGCT, IEGT, FS-IGBT, CSTBT IGBT, HiGT, JFET, HEMFET, CoolMOS, FlyMOS, etc.) [46] [47], [48] [49].

Tous ces interrupteurs de puissance ont besoin d'une *commande rapprochée* pour ;

— premièrement adapter l'impédance entre le composant de puissance et le système de contrôle
— deuxièmement, assurer des fonctions de protections si nécessaires
— troisièmement, assurer une isolation "statique" et "dynamique" entre le système de contrôle et le composant de puissance [50] [51] [52].

Dans ce manuscrit, mon attention est portée sur les drivers où les fonctions d'isolation galvanique et de protection sont nécessaires afin de pouvoir les utiliser dans des applications industrielles nécessitant des niveaux de performance et de fiabilité exigeants : aéronautique, ferroviaire, automobile, transport & distribution, applications industrielles de moyenne et forte puissance, etc. Afin de clarifier mes travaux antérieurs, de justifier mes recherches actuelles et mes perspectives sur cette thématique "driver", je souhaite faire apparaître quatre grands axes de recherche :

1. Pour des drivers répondant à des applications classiques, il s'agit d'optimiser les solutions existantes, ou d'optimiser de nouvelles afin de réduire les coûts de production, augmenter la fiabilité, ajouter des fonctions de protection (v_{cesat}, dv/dt, di/dt, $v_{cedynamique}$, etc.), diminuer les temps de propagation des informations, etc.

2. Pour des applications *haute température*, grâce aux recherches menées sur les composants *grand gap*, il est absolument nécessaire de repenser la commande rapprochée de ces composants à cause de plusieurs raisons. La première est évidente car le driver doit pouvoir fonctionner au plus près du composant, donc à plus haute température ambiante. Des nouvelles technologies d'intégration haute température doivent être mises en oeuvre [53]. La deuxième raison vient du fait que les matériaux pouvant fonctionner à haute température sont le SiC (Carbure de Silicium) et le GaN (Nitrire de Gallium) à l'heure actuelle (2017). En effet, les structures d'interrupteurs de puissance avec ces matériaux peuvent être Normally-On ou Normally-Off [54]. Dans le premier cas, la problématique du pilotage des interrupteurs Normally-On nécessite une démarche particulière afin de sécuriser la fonction interrupteur de puissance [55].

3. Pour les applications *haute tension*, grâce également aux recherches menées sur les composants *grands gaps* mais aussi sur les topologies de convertisseurs multi-niveaux, il est maintenant envisageable de concevoir un onduleur pour liaison HVDC (High Voltage Direct Current electric power transmission system) par exemple avec une tension de bus continu de plusieurs centaines de kilo-Volt [56] [57] [58] [59] [60] [61] ou pour des réseaux de distribution à courant continu pouvant aller jusqu'à plusieurs dizaines de kilo-Volt. En conséquence, les circuits drivers adaptés aux applications moyenne et haute tension ont des contraintes particulières sur la tenue en tension statique et dynamique [62].

4. Pour les composants à commutations rapides, les circuits de commande rapprochée doivent pouvoir supporter de fortes contraintes sur les gradients de courant et de tension. En effet, lors des gradients de tension, les barrières d'isolation galvaniques sont soumises à des circulations de courants qui peuvent perturber, voire endommager les circuits électroniques mis en oeuvre. De ce fait, il apparaît essentiel d'une part de maitriser les élements capacitifs parasites des barrières

d'isolation puis éventuellement de recycler les courants perturbés au plus près de sa source [63].

Dans la suite de ce manuscrit, je propose de commencer par mes travaux de doctorats qui ont été orientés par des contraintes industrielles fortes. Ensuite j'expose mes travaux de recherche sur l'isolation galvanique en prenant en compte l'augmentation de la tenue en tension au niveau quasi-statique (jusqu'à 50kV) et dynamique (forts gradients de tension).

V.2 Travaux de recherche, doctorat (2002-2005)

V.2.a Contexte et problématique

Sous la direction de J.P.CHANTE et D.BERGOGNE du Laboratoire AMPERE de Lyon, mon doctorat a porté sur l'*Etude, conception et réalisation de circuits de commande de modules IGBT de forte puissance* avec le financement de la société ARCEL (Champagne au Mont d'Or, Rhône). L'objectif industriel était de concevoir une gamme de drivers industriels pour modules IGBT de forte puissance (gamme 600V–100A jusqu'à 6500V–750A).

V.2.b Résultats essentiels

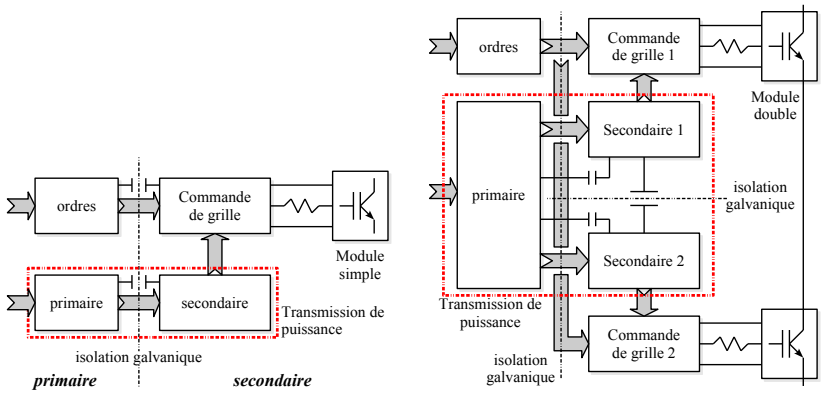
Dans un premier temps, j'ai classifié toutes les fonctions requises puis les différentes solutions technologiques associées (Figure V.1) :

— Transmission de puissance
— Transmission de signaux
— Protections
— Pilotage de la grille

Ensuite, pour chaque fonction, j'ai développé puis mis au point des solutions viables industriellement (encombrement et coût). Cependant, à l'aide du contexte académique, j'ai pu rechercher des solutions technologiques telles que les transformateurs piezoélectriques (collaborations avec D.VASIC et F.COSTA du Laboratoire SATIE de l'ENS de Cachan, P.GONNARD du LGEF de l'INSA de Lyon) ; rechercher des alternatives aux diodes TRANSIL pour la fonction d'écrêtage [64] ; rechercher des nouvelles méthodes de surveillance et de détections de défauts (court-circuits et sur-intensités) [65] [66] [67] ; rechercher une modélisation du phénomène d'*avalanche dynamique* des cellules PT-IGBT [68] à l'aide d'une approche analytique confortée par des simulations par éléments finis (logiciels MEDICI) couplées au logiciel SPICE, le tout motivé par des observations expérimentales. Dans la suite du manuscrit, je détaille plus précisément les travaux sur la fonction de transmission d'ordres par transformateur coreless car ce point est important vis à vis de mes travaux actuels et mes perspectives. Enfin, je finis par la description de mes travaux sur la modélisation du phénomène d'avalanche dynamique des cellules PT-IGBT.

V.2.c Fonction de transmission d'ordre par transformateur coreless

Tout d'abord, avant de se focaliser sur les transformateurs coreless [69] [70] [71] [72] [73] [74], rappelons que la fonction "transmission d'ordres" doit :



(a) ***Driver simple*** **(b)** ***Driver double***

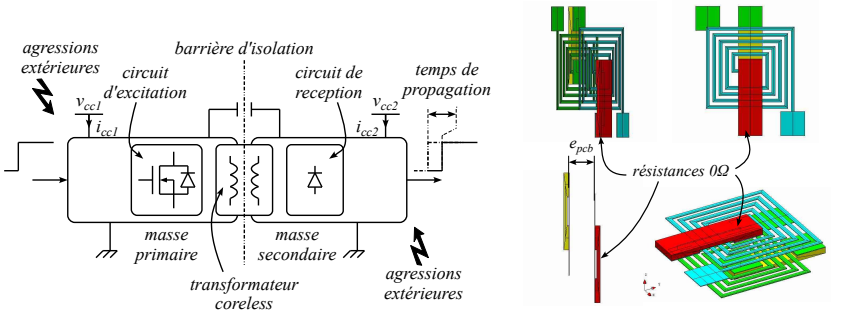
FIGURE V.1: Mise en évidence des fonctions essentielles pour des drivers *simple* (a) et *double* (b)

1. Transmettre des informations entre le primaire et le ou les secondaires avec un temps de propagation le plus faible possible
2. Consommer une puissance moyenne négligeable par rapport à la puissance moyenne nécessaire aux commutations de l'interrupteur de puissance
3. Avoir une tenue en tension statique suffisante pour être utilisée à des potentiels flottants définis par les applications visées
4. Avoir une capacité de couplage primaire/secondaire la plus faible possible afin de minimiser la circulation des courants de mode commun à cause des variations de potentiels de la partie puissance
5. Avoir un niveau d'immunité suffisant pour être inséré dans les applications visées (immunités en dv/dt, di/dt, etc.)

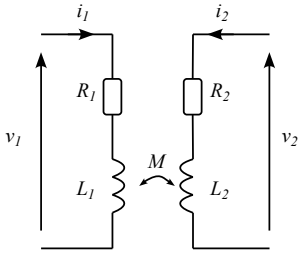
Sur la Figure V.2(a), nous faisons apparaître les différents éléments caractéristiques d'une fonction de transmission d'ordres par transformateur coreless. La géométrie 3D du transformateur coreless (Figure V.2(b)) a été développée conjointement avec son électronique associée (circuit d'excitation et de reception – (Figure V.3(b))). La première étape a été de décrire la géométrie 3D dans le logiciel InCa afin de calculer les éléments inductifs et résistifs du schéma équivalent classique : L_1, L_2, M, R_1 et R_2.

L'épaisseur e_{pcb} du circuit imprimé a été choisie de 1.6 mm afin de pouvoir faire un routage des circuits primaires et secondaires sur un circuit imprimé de quatre couches. La reprise du point milieu vers le point de connexion extérieure a été réalisée par une résistance montable en surface de 0Ω (Composant Montable en Surface – CMS) : sur la figure V.3(a), on montre une photographie d'un enroulement sans la résistance de reprise de contact.

Cette solution a de bonnes performances au niveau du temps de propagation issus des résultats expérimentaux et en simulation : Figure V.4. Cependant, la valeur maximale du courant i_{cc1} au niveau de l'alimentation v_{cc1} est de 20A sur les résultats de simulation : Figure V.4(c). Ceci implique que la consommation moyenne de cette solution est totalement prohibitive pour faire transiter des informations de type

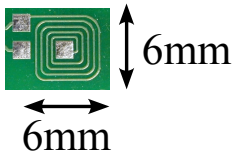


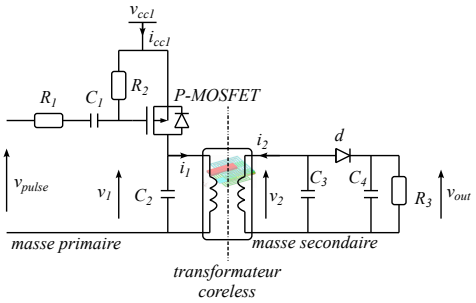
(a) ***Synoptique de la fonction transmission d'ordres,*** **(b)** ***Vue 3D du transformateur mise en évidence des différentes propriétés liées à cette coreless dans le logiciel InCa fonction.***



(c) ***Schéma électrique équivalent du transformateur coreless***

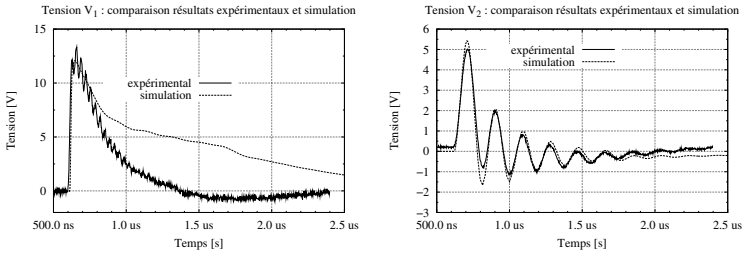
FIGURE V.2: Vue 3D et schéma électrique équivalent du transformateur coreless étudié





(a) ***Photographie d'un enroulement du transformateur coreless sans résistance 0Ω.*** **(b)** ***Schéma complet de la fonction transmission d'ordre par transformateur coreless.***

FIGURE V.3: Photographie du dispositif réalisé et schéma électrique du circuit d'excitation et de réception.



(a) ***Forme d'onde de*** v_1 **(b)** ***Forme d'onde de*** v_2

(c) ***Forme d'onde de*** i_{mos}

FIGURE V.4: Comparaison des résultats expérimentaux et de simulation de la fonction transmission d'ordres par transformateur coreless.

PWM à quelques kilo-Hertz, voire même quelques centaines de Hertz. Cette solution a été utilisée uniquement pour les informations de défauts provenant du secondaire du driver pour aller vers le primaire, et ce à une fréquence maximale de 1Hz.

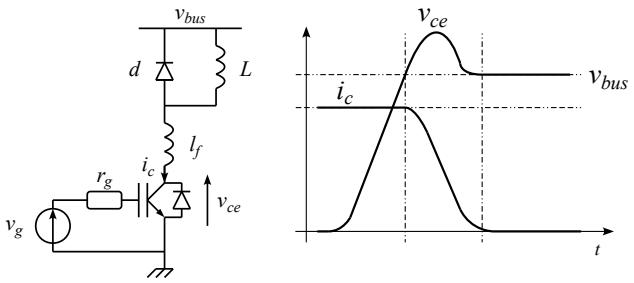
Néanmoins, je montre par la suite que l'idée de base du transformateur d'implusion avec des enroulements en pistes de cuivre associées à un circuit électronique mieux adapté et à des outils numériques d'optimisation conduisent à des solutions réalistes pour des transmissions d'ordres à des fréquences de quelques centaines de kilo-Hertz.

V.2.d Modélisation du phénomène d'avalanche dynamique des cellules PT-IGBT

Lors de mes travaux de doctorat sur les drivers de modules IGBT, lors de surintensités, nous avons observé des formes d'ondes de tension à l'ouverture qui avaient la propriété de ne pas dépasser une certaine tension comme si un circuit d'écrêtage était connecté. Cette observation a été le point de départ des travaux de recherche de compréhension et de modélisation du phénomène d'avalanche dynamique.

Le phénomène d'avalanche statique des semiconducteurs de puissance est caractérisé par la tenue en tension statique des composants de puissance. Au-delà d'une certaine tension appliquée en quasi-statique aux bornes du composant considéré, le champ électrique interne dépasse le champ critique du matériau semiconducteur (environ 250kV/cm pour le silicium) et celui-ci est souvent détruit par le courant d'avalanche qui génère des pertes importantes [46].

Lors des commutations à l'ouverture des modules IGBT, la surtension a lieu lors



(a) ***Schéma de base d'une cellule de commutation sur charge inductive avec inductance de cablage***

(b) ***Forme d'ondes à l'ouverture***

FIGURE V.5: Mise en évidence de la surtension à l'ouverture lors de la décroissance du courant collecteur i_c

de la décroissance du courant : Figure V.5. Les cellules IGBT sont donc soumises à une différence de potentiel importante avec une densité de courant J.

Sur la jonction P^+N^- de la cellule PT-IGBT (Figure V.6), on note J la densité de courant, v_{BRdyn} la tension d'avalanche de la jonction P^+N^- soumise à la densité de courant J et v_{BR} la tension d'avalanche de la jonction P^+N^- soumise à la densité de courant nulle. On montre que la densité de courant de trous J_p a une influence sur la tension d'avalanche dynamique :

$$v_{BRdyn} = \frac{1}{1 + \frac{J_p}{q\,N_d\,v_p^{sat}}}\,v_{BR} \tag{V.1}$$

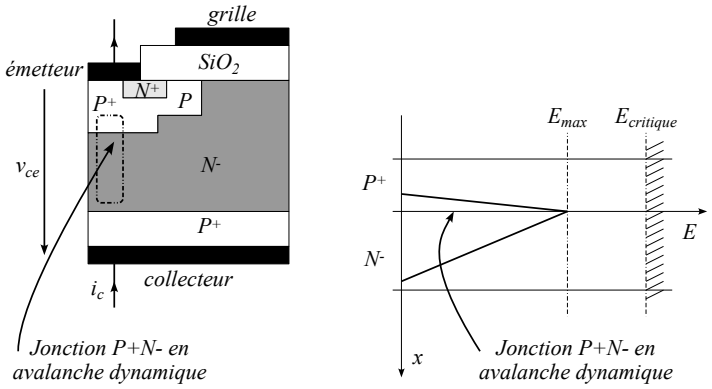
Avec,

— q : charge élémentaire d'un électron
— N_d : dopage de la zone N^-
— v_p^{sat} : vitesse de saturation des trous

Afin de confirmer ces hypothèses, des mesures ont été réalisées sur des modules IGBT CM300DU-24H (1200V–300A) : plusieurs commutations à l'ouverture sont présentées sur la Figure V.7. On remarque que le maximum de la tension v_{ce} est très peu impactée par la résistance de grille r_g. Ceci montre bien qu'au sein des cellules IGBT, un phénomène physique écrête la tension v_{ce}.

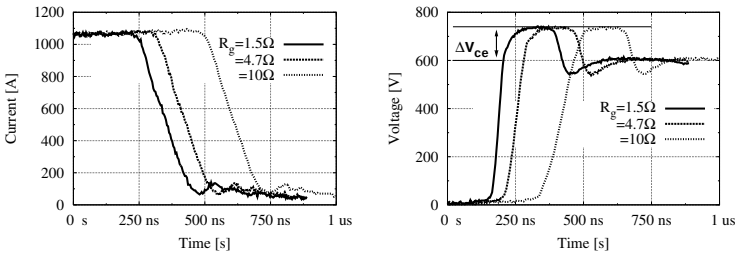
Ensuite, pour analyser plus finement le phénomène, j'ai réalisé une co-simulation MEDICI/SPICE (D.PLANSON) d'une demi-cellule PT-IGBT associée à une charge inductive comme sur la Figure V.5(a).

Lors d'une commutation à l'ouverture, à une densité de courant de 650A/cm^2, la forme d'onde de v_{ce} montre une allure caractéristique d'un phénomène d'avalanche dynamique : Figure V.8.



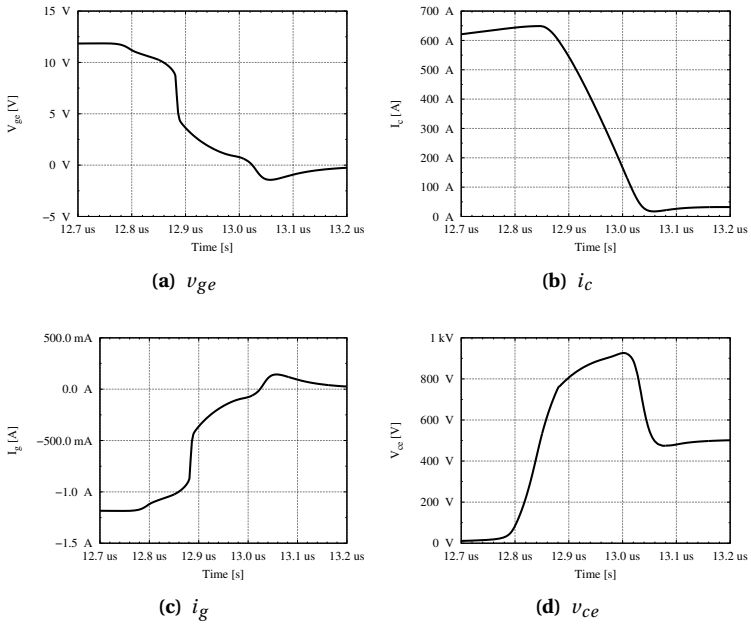
(a) ***Coupe d'une cellule PT-IGBT*** **(b)** ***Profil du champ électrique***

FIGURE V.6: Mise en évidence du phénomène d'avalanche sur une cellule PT-IGBT : localisation de l'avalanche et profile du champ électrique



(a) ***Courant collecteur*** i_c **(b)** ***Tension*** v_{ce}

FIGURE V.7: Résultats expérimentaux, forme d'onde à l'ouverture du module IGBT CM300DU-24H (1200V–300A) à courant collecteur de 1100A, influence de la résistance de grille r_g.



(a) v_{ge} **(b)** i_c

(c) i_g **(d)** v_{ce}

FIGURE V.8: Résultats de la co-simulation MEDICI/SPICE d'une cellule PT-IGBT à l'ouverture.

V.2.e Conclusion sur les travaux de doctorat

Le contexte fortement industriel et économique de ces travaux de doctorat m'a conduit à explorer des solutions de transmission d'ordres "bas coûts" mais néanmoins avec des orientations scientifiques fortes. En effet, la modélisation du transformateur planar coreless à l'aide du logiciel InCa et les simulations numériques qui ont permis d'analyser et d'expliquer le phénomène d'avanche dynamique des cellules PT-IGBT font partie des points forts de mes travaux de doctorat.

La poursuite de mes travaux de recherche sur la thématique de la commande rapprochée des interrupteurs de puissance m'a conduit à considérer de nouveaux contextes (haute température, haute tension, haute vitesse) qui m'ont poussé à introduire de nouveaux concepts pour la conception de ces fonctions : modélisation des transformateurs, mise en oeuvre du prototypage virtuel, structure DC-DC non-conventionnelle à commutations douces, nouvelles architectures de drivers, électronique intégrée haute température, etc.

V.3 Travaux de recherche sur la période 2010-2017

V.3.a Introduction et motivations

Mes travaux de recherche sur la thématique des drivers des interrupteurs de puissance se focalisent actuellement sur les fonctions de transmission d'ordres et de puissance par transformateurs magnétiques. Ces derniers permettent d'obtenir un haut niveau d'isolation galvanique grâce à une distance d'isolement élevée (quelques centaines de micro-mètre jusqu'à quelques milli-mètre) et des matériaux isolants

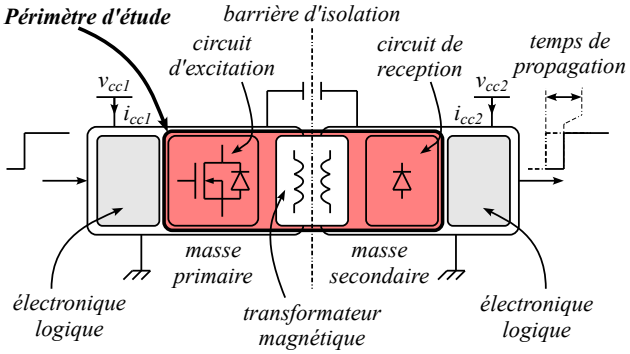


FIGURE V.9: Synoptique de la fonction de transmission d'ordres, mise en évidence du périmètre des recherches actuelles.

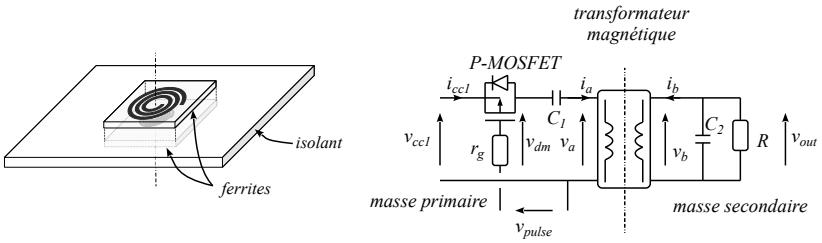


FIGURE V.10: Vue 3D du transformateur magnétique avec matériaux magnétiques et schéma électrique du circuit d'excitation.

performants (tenue en tension et/ou haute température).

Une ligne directrice est à la base de mes recherches actuelles : *optimiser la géométrie du transformateur et son électronique associée* afin de dégager des *solutions viables industriellement* pour des applications *haute tension* et ou *haute vitesse* et/ou *haute température* pour les nouveaux composants interrupteurs d'aujourd'hui et de demain.

V.3.b Fonction de transmission d'ordres

Sur la Figure V.9 est décrit le synoptique de la fonction de transmission d'ordres. Le premier périmètre d'étude est défini par le transformateur magnétique et son électronique analogique associée [31]. Les éléments de logique ne sont pas considérés dans cette étape.

La première étape a été de reprendre mes travaux de thèse sur la transmission d'ordres par transformateurs coreless avec un nouveau circuit d'excitation et de réception en y ajoutant des plaques de matériaux magnétiques : Figure V.10. En effet, la solution proposée dans mon doctorat avait la propriété de consommer un courant excessif lui interdisant de travailler pour une fonction de transmission de signaux PWM mais seulement pour des signaux de défauts.

La conception de ce système *{Géométrie + Circuit électronique }* a été traitée à l'aide d'une méthode d'optimisation bi-objective en prenant en compte le maximum

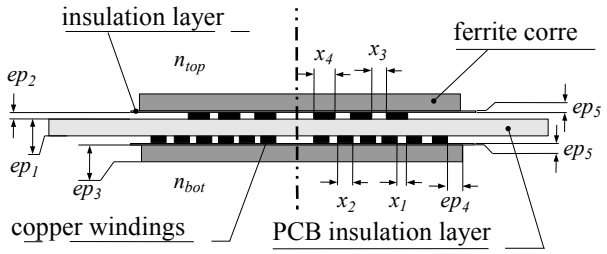


FIGURE V.11: Vue 2D du transformateur magnétique avec matériaux magnétiques, définition des variables d'optimisation.

de tension $v_{out}(t)$ et le maximum de courant $i_a(t)$ comme fonctions objectives. Les variables d'optimisation sont, d'une part pour la géométrie (Figure V.11) :

- x_1 : espacement entre les pistes sur la couche du bas
- x_2 : largeur des pistes sur la couche du bas
- x_3 : espacement entre les pistes sur la couche du haut
- x_4 : largeur des pistes sur la couche du haut
- n_{top} : nombre de tours sur la couche du haut
- n_{bot} : nombre de tours sur la couche du bas

et d'autre part pour le circuit :

- C_1 : capacité série au primaire
- C_2 : capacité parallèle au secondaire
- R : résistance parallèle au secondaire

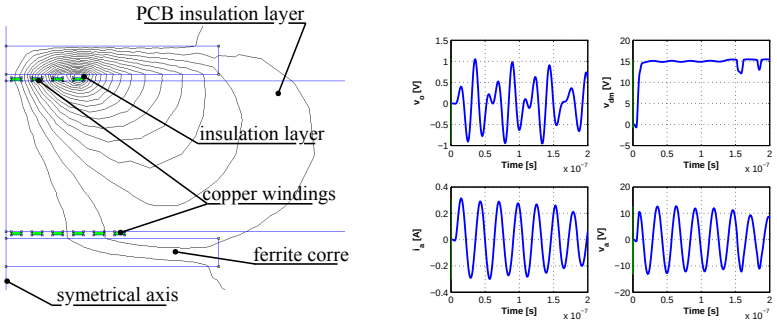
On définit $\mathbf{x}$ le vecteur d'optimisation suivant :

$$\mathbf{x} = (x_1,\ x_2,\ x_3,\ x_4,\ n_{top},\ n_{bot},\ C_1,\ C_2,\ R)^t \tag{V.2}$$

Pour une configuration donnée du vecteur d'optimisation $\mathbf{x}$, une première simulation par éléments finis en 2D (logiciel FEMM) permet de calculer $\{L_a, L_b, M\}$ (paramètres du circuit électrique équivalent du transformateur magnétique). Ensuite, une simulation du régime transitoire (logiciel SPICE) permet de calculer $v_{out,max}$, $i_{a,max}$ et le temps du premier maximum de v_{out}. $v_{out,max}$ est la valeur maximale de v_{out} et $i_{a,max}$ est la valeur maximale de i_a. Sur la Figure V.12, on montre une simulation avec le logiciel FEMM et un exemple des formes d'onde de v_o, i_a, v_a et v_{dm} issues du logiciel SPICE.

Le problème d'optimisation contient des variables discrètes (n_{top} et n_{bot}) et continues (x_1, x_2, x_3, x_4, C_1, C_2, R). Il est donc nécessaire d'utiliser un algorithme d'optimisation qui permet de gérer cette difficulté. La famille des algorithmes génétiques permet en effet de traiter ce type de problèmes [39]. A l'aide d'un code développé par P.DESSANTE et X.JANNOT, j'ai pu réaliser des optimisations bi-objectives : $v_{out,max}$ *vs* $i_{a,max}$. Sur la Figure V.13, on donne le synoptique de l'algorithme d'optimisation : un premier calcul numérique par éléments finis fournit les valeurs de L_a, L_b et M pour ensuite être données à un outil de simulation électrique transitoire.

Pour une population de 100 individus sur 200 générations, l'algorithme d'optimisation aboutit à un front de Pareto : Figure V.14. Sur la deuxième figure, on montre les solutions pour un courant maximum de 400mA.



(a) ***Exemple de simulation par éléments finis à l'aide du logiciel FEMM*** **(b)** ***Exemple de simulation électrique transitoire à l'aide du logiciel SPICE***

FIGURE V.12: Résultats de simulation électromagnétique 2D du transformateur magnétique et électrique transitoire du circuit complet.

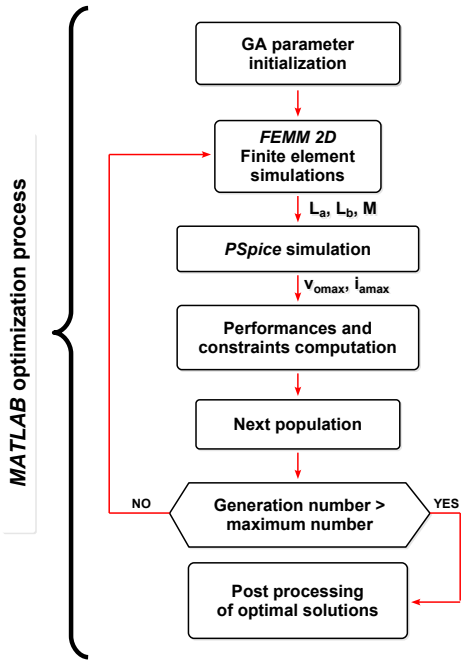
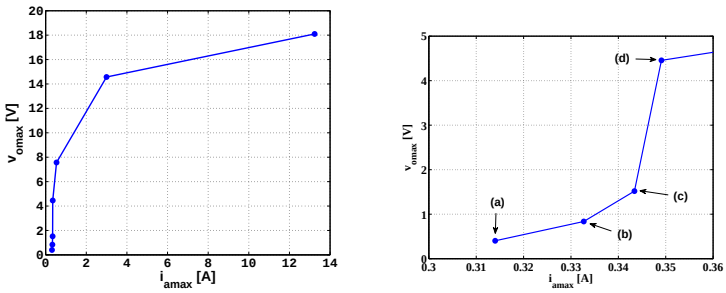


FIGURE V.13: Synoptique de l'algorithme d'optimisation.



(a) ***Comparaison de quatre fronts de Pareto issus de l'optimisation*** **(b)** ***Zoom sur les solutions viables***

FIGURE V.14: Fronts de Pareto

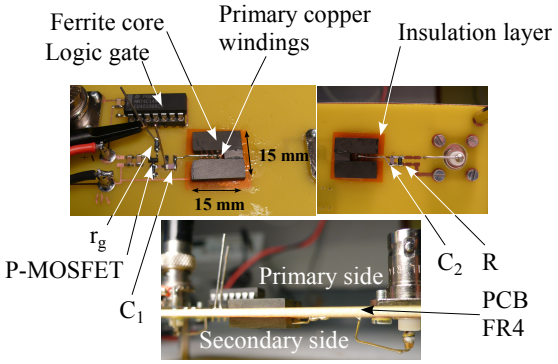
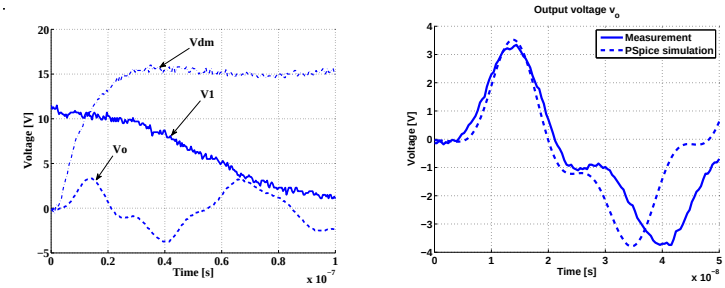


FIGURE V.15: Photographie du dispositif expérimental.

Ensuite, afin de valider la démarche d'optimisation et du prototypage virtuel, j'ai réalisé un prototype physique de la solution *(d)* de la Figure V.14(b) : sur la Figure V.15 est décrit le dispositif expérimental avec un matériau magnétique 3F3. Sur la Figure V.16 est proposée d'une part la forme d'onde expérimentale de la tension issue d'une porte logique pour piloter le P-MOSFET puis les résultats en simulation et expérimentaux pour $v_{out}(t)$. On identifie un temps de premier maximum d'environ 13ns et une valeur de $v_{out,max}$ de 3.3V. Les résultats issus du prototype virtuel sont, a posteriori, fidèles aux résultats expérimentaux.

V.3.c Evolution et amélioration de la fonction de transmission d'ordre

Dans [31], nous avons proposé le dimensionnement d'un système de transmission d'ordre basé sur la topologie résonante série-parallèle excitée par un P-MOSFET. Lors du stage de Master Recherche de AM Sokchea, nous avons démontré la possibilité d'augmenter la distance d'isolation entre le primaire et le secondaire afin d'aller vers un driver pour des tensions de plusieurs dizaines de kilo-Volt dans l'optique de piloter des structures multi-niveaux de type MMC (Multilevel Modular Converter).



(a) ***Mesures en sortie de la porte logique*** **(b)** ***Comparaison mesures / simulations de la tension*** v_o

FIGURE V.16: Comparaison mesures / simulations

Ces travaux de recherche effectués en 2013 ont donné lieu à une publication dans IET Power Electronics [75].

Le schéma électronique est basé sur une résonance série-parallèle et est excité par un N-MOSFET. La structure géométrique du transformateur est désormais basée sur des circuits imprimés double-couche afin de renforcer le couplage magnétique tout en augmentant la distance d'isolation galvanique entre primaire et secondaire : Figure V.17.

L'optimisation du système est basée sur la même méthodologie que dans le cas précédent [31]. Nous avons effectué plusieurs optimisations en fonction de la distance d'isolation notée ep_1. Les fronts de Pareto donnent les tendances lorsque la distance d'isolation augmente 1.6mm ; 2mm ; 2.5mm ; 3mm et lorsque le diamètre du transformateur est contraint à 7mm, 10mm puis 13mm : Figure V.18.

Afin de valider la modélisation et la démarche d'optimisation, nous avons réalisé plusieurs prototypes de transformateurs dont le transformateur noté "Transfo 5" qui donne les résultats suivants : temps de premier maximum de 18ns, tension maximum de 4.66V pour un courant maximum de 0.97A (résultats issus de la simulation) avec une puissance consommée au primaire de 4.4mW pour une fréquence de signal MLI de 10kHz. Nous avons mis en oeuvre ce transformateur sur un prototype qui permet également de transformer les impulsions en état logiques puis en tension de ±15V sur la grille d'un IGBT : Figure V.19.

Nous avons mesuré les temps de propagation entre la tension v_{ds} du MOSFET au primaire et la tension v_{ge} de l'IGBT à piloter pour les deux commutations : mise en conduction, extinction. Nous avons mesuré environ 70ns : Figure V.20.

Afin d'améliorer la modélisation globale du système de transmission d'ordre, nous avons pris en compte des imperfections du câblage et des composants passifs (résistance et inductance série des condensateurs de résonance) : Figure V.21.

La comparaison entre la simulation transitoire (LTSpice) et la mesure nous donne un indice de confiance sur notre outil de conception car nous observons des écarts faibles (écart de maximum de tension de 200mV pour une valeur maximum de 3V) : Figure V.22.

En conclusion, nous arrivons à dimensionner un système de transmission d'ordres à haute isolation galvanique (de 1mm à 3mm de distance d'isolation) avec un outil de prototypage virtuel. De plus, l'utilisation d'un outil d'optimisation nous permet

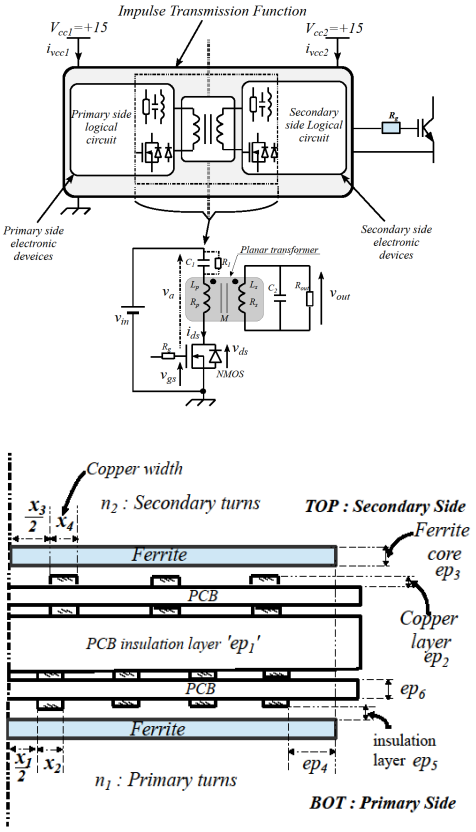


FIGURE V.17: Schéma électronique de la fonction de transmission d'ordre à haute isolation galvanique et description 2D du transformateur magnétique.

de dimensionner de façon rationnelle ce système et nous permet d'analyser les effets de chaque variable d'optimisation. Enfin, la comparaison entre simulations et mesures nous prouvent que cette démarche est pertinente et nous permet de concevoir un système sans à priori.

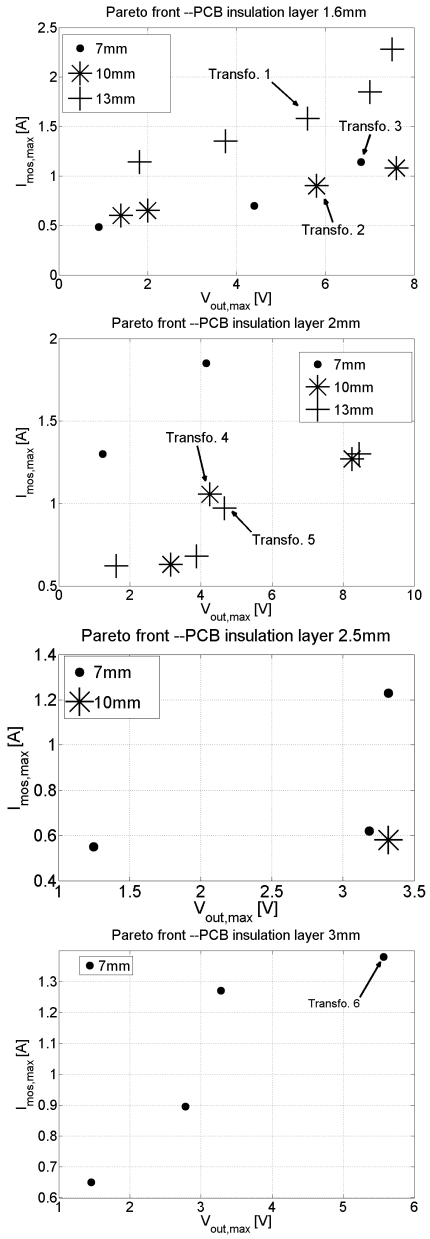


FIGURE V.18: Résultats d'optimisation : fronts de Pareto $I_{mos,max}$ vs $V_{out,max}$. Distances d'isolation : 1.6mm ; 2mm ; 2.5mm ; 3mm. Diamètre maximum : 7mm ; 10mm ; 13mm.

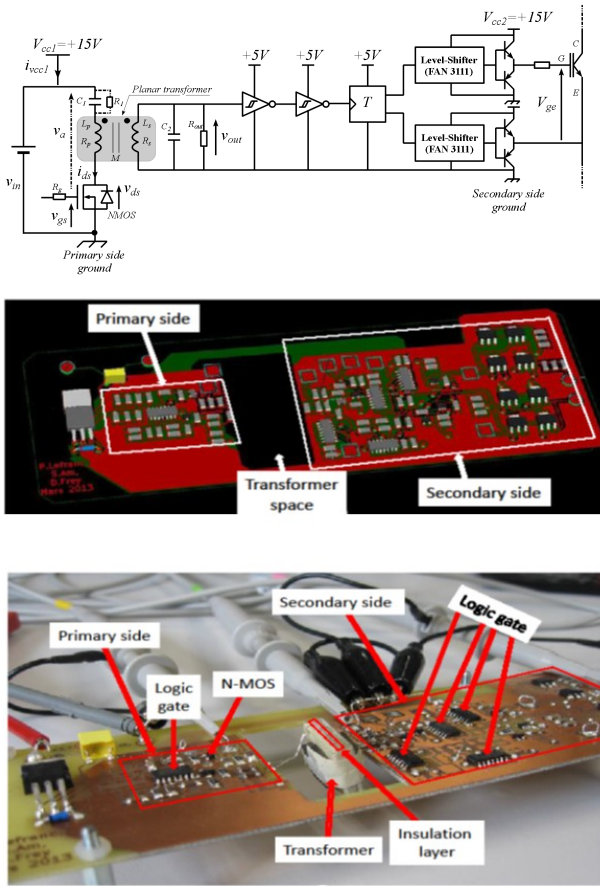


FIGURE V.19: Schéma électronique de la fonction de transmission d'ordre, photographie du prototype.

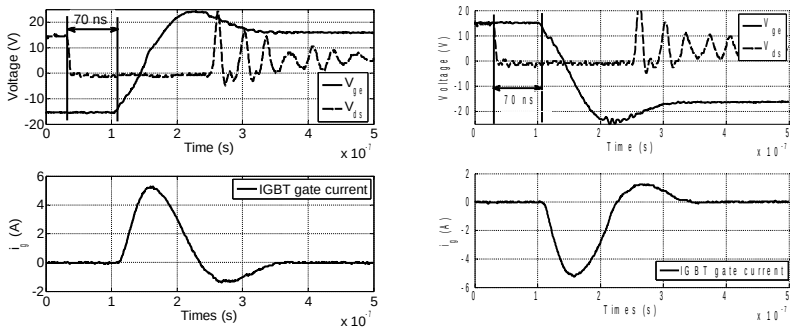


FIGURE V.20: Résultats expérimentaux de la fonction de transmission d'ordre. Mise en évidence du temps de propagation de 70ns pour une distance d'isolation de 2mm et un diamètre de transformateur de 13mm.

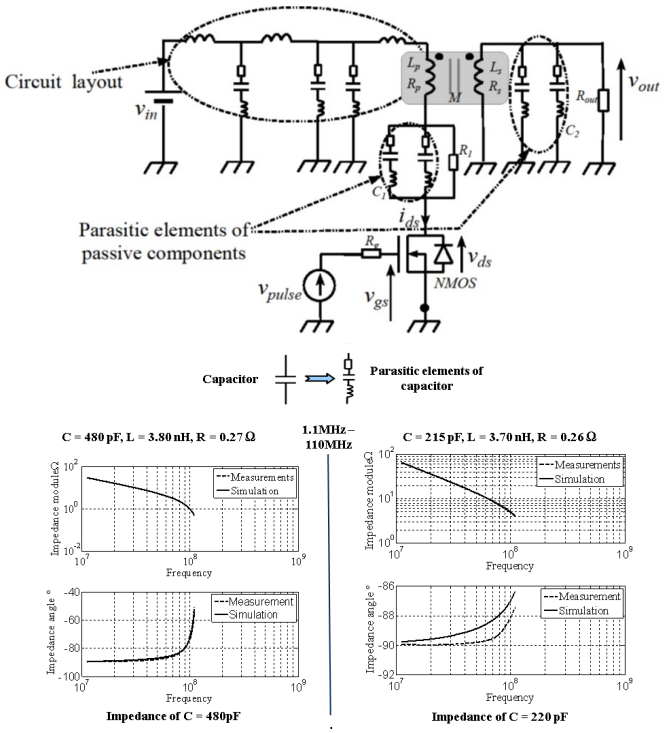


FIGURE V.21: Prise en compte des éléments parasites pour la modélisation circuit du système de transmission d'ordres. Identifications des résistance et inductance série des condensateur des résonances.

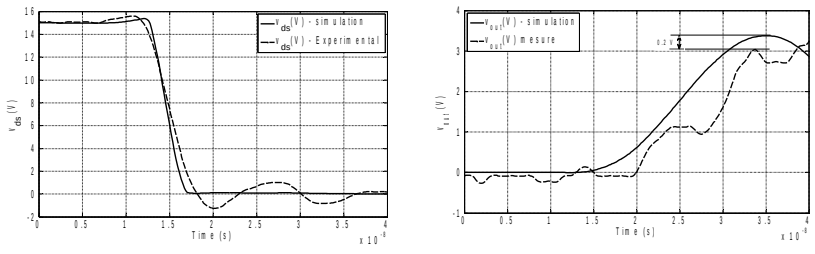


FIGURE V.22: Comparaison entre résultats de simulation et mesures expérimentales.

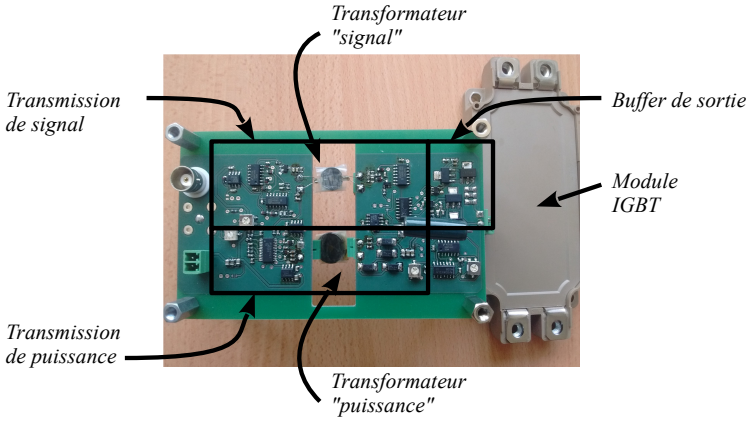


FIGURE V.23: Driver à haute isolation galvanique.

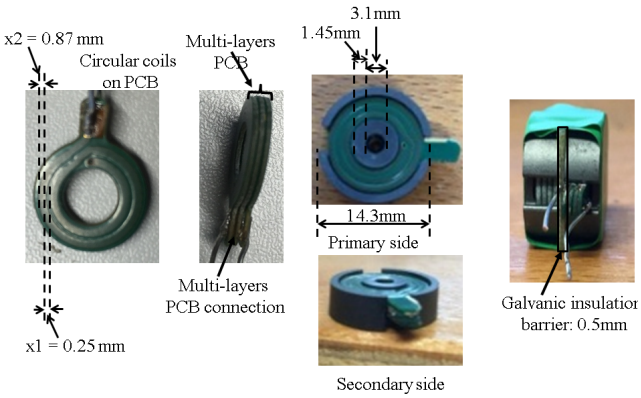


FIGURE V.24: Détails de réalisation des transformateurs à haute isolation galvanique.

V.3.d Vers un driver à isolation galvanique pour la moyenne tension

Dans les travaux de doctorat de AM Sokchea, nous avons démontré la potentialité de réaliser un driver d'IGBT pour une barrière d'isolation de 0.5mm puis de 1mm. Sur la Figure V.23 nous pouvons voir le premier prototype fonctionnel d'un driver d'IGBT (transmission de signal + transmission de puissance). Sur la Figure V.24 nous pouvons voir les détails de réalisation de transformateurs magnétiques (diamètre 9mm pour le signal et 14mm pour la puissance). Sur la Figure V.25, nous pouvons voir les formes d'ondes et les performances en terme de temps de propagation pour les distances d'isolation de 0.5mm et sur le Figure V.26 pour 1mm. Nous obtenons un temps de propagation de 140ns pour 0.5mm puis 180ns pour 1mm.

De plus, au cours des travaux de doctorat de AM Sokchea [76] [77] [78], j'ai initié une collaboration avec Rachelle HANNA de l'équipe MDE (Matériaux Diélectriques et Electrostatiques) afin d'étudier les matériaux isolants permettant d'assurer une

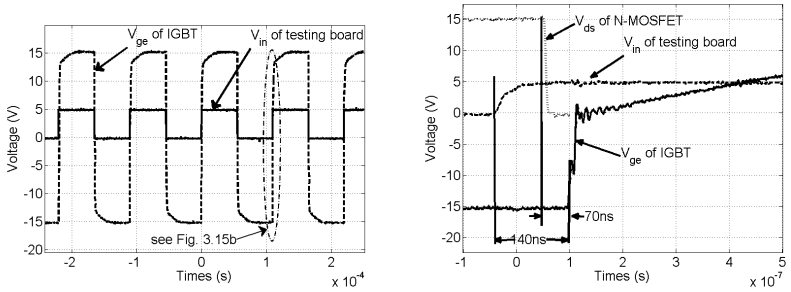


FIGURE V.25: Résultats expérimentaux d'un driver à haute isolation galvanique pour une distance d'isolation de 0.5mm.

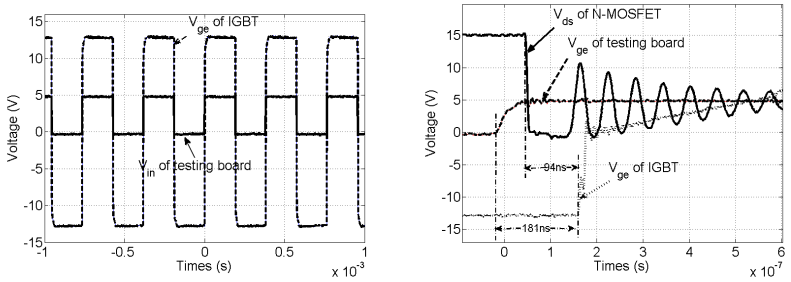


FIGURE V.26: Résultats expérimentaux d'un driver à haute isolation galvanique pour une distance d'isolation de 1mm.

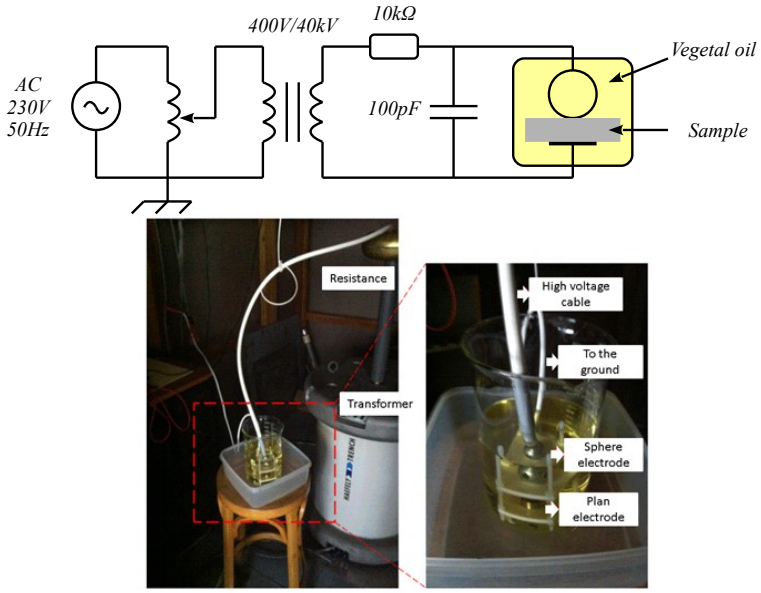


FIGURE V.27: Dispositif expérimental pour tests de tenue en tension de matériaux isolants.

isolation galvanique de plusieurs dizaines de kilo-Volt pour une barrière d'isolation de 0.5mm à 3mm.

Lors d'études préliminaires, les matériaux polymères du type polysterimide ont montré qu'ils sont de bons candidats pour une tenue en tension de plusieurs dizaines de kilo-Volts. Un dispositif expérimental a permis de tester plusieurs matériaux : Figure V.27. Ces résultats préliminaires ont montré que pour un disque de diamètre 40mm, d'épaisseur 1mm, le polymère polysterimide n'a pas présenté de claquage en épaisseur sous une tension de 30kV (tension appliquée pendant 2 heures) pour une géométrie "sphère/plan".

Des travaux sont en cours pour continuer les investigations sur les tenues en tension des polymères en fonction des diamètres des disques, des épaisseurs mais également en fonction des géométries des transformateurs à bases de matériaux magnétiques. A l'issue de ces recherche, nous pourrons déterminer quelles sont les tenues en tension quasi-statiques de nos drivers.

V.3.e Drivers pour composants à commutations rapides

Les composants disponibles actuellement comme les MOSFET en SiC ou les HEMT en GaN permettent des commutations en tension avec des *dv/dt* de l'ordre de 100V/ns [63]. Dans ce nouveau contexte de fortes dynamiques en tension, un nouveau challenge de mise en oeuvre nous pousse à repenser les façons de concevoir les circuits de commande rapprochée dans cet environnement. A la forte vitesse de commutation en tension peut venir s'ajouter une température de fonctionnement élevée (jusqu'à 250°C) puis une tenue en tension élevée (plusieurs kV).

Dans le cadre du projet MEGaN (Module Electronique en GaN), nous avons été confronté au couplage de fortes vitesses de commutation et de température de fonctionnement

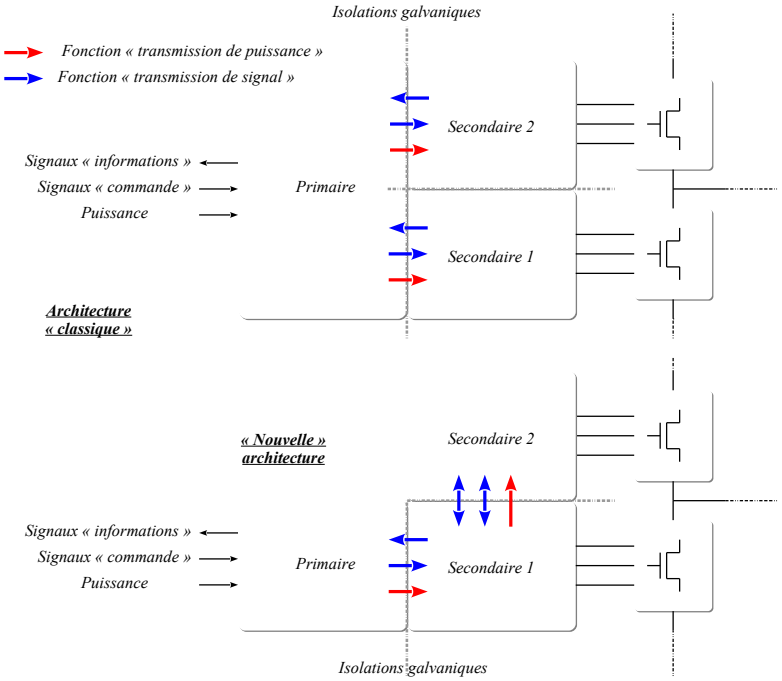


FIGURE V.28: Architectures de driver pour bras d'onduleur

élevée (250°C). Dans les travaux de doctorat de Van-Sang NGUYEN, nous avons proposé une nouvelle architecture de driver permettant de réduire les courants de circulation engendrés par les fronts de commutation puis d'envisager une intégration monolithique des fonctions électroniques du driver dans une technologie CMOS sur SOI pour espérer faire fonctionner le convertisseur à 250°C. Sur la Figure V.28 sont représentées l'architecture conventionnelle de driver de bras d'onduleur puis la nouvelle architecture proposée. La nouvelle architecture met en cascade le secondaire 1 par rapport au secondaire 2. Ceci confère à la cellule de commutation la propriété de *recycler* les courants de circulation (dus aux forts dv/dt) au sein de la cellule de puissance et d'en transmettre le moins possible au niveau du primaire du driver. Sur la Figure V.29 nous pouvons voir un prototype mettant en oeuvre l'architecture classique puis les formes d'ondes du point milieu (dv/dt de 40V/ns environ) et le courant de circulation entre la masse du primaire et la masse du secondaire. Ce courant a une valeur crête-à-crête de 4.22A. Pour la nouvelle architecture proposée (Figure V.30), le courant de circulation a une valeur crête-à-crête de 0.42A, soit une atténuation d'un facteur 10 par rapport à la solution classique.

Cette nouvelle architecture de drivers pour composants à commutations rapides peut être extrapolée à la mise en série de ces mêmes composants. Dans [79] [63], nous avons montré l'intérêt de mettre en cascade les alimentations des différents étages de commande rapprochée vis à vis des courants de circulation.

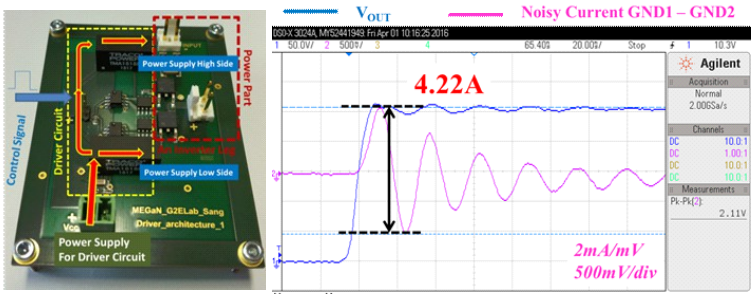


FIGURE V.29: Résultats expérimentaux, courant de circulation dû à un fort *dv/dt* (40V/ns) sur un bras d'onduleur, architecture classique

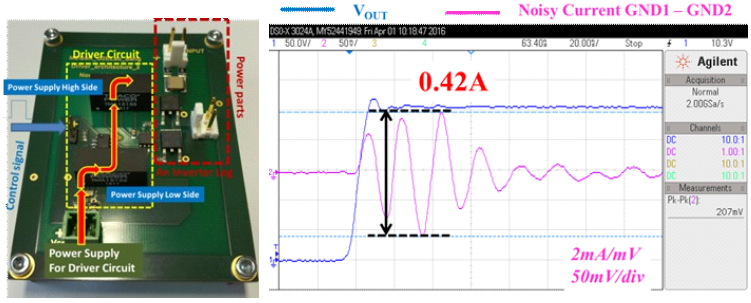


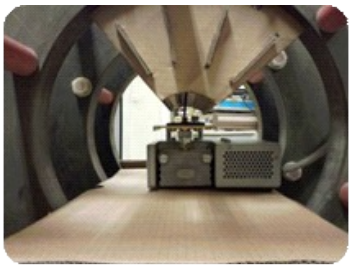
FIGURE V.30: Résultats expérimentaux, courant de circulation dû à un fort *dv/dt* (40V/ns) sur un bras d'onduleur, nouvelle architecture

V.3.f Mise en oeuvre de matériaux à effets GMI pour une fonction de transmission d'ordres

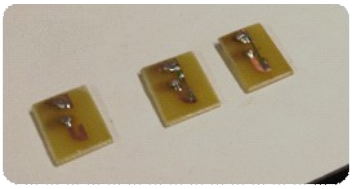
L'effet GMI (Giant Magneto Impedance) a été mis en évidence dans les années 1990 [80] [81]. Sous l'effet d'un champ magnétique, l'impédance du matériau est affectée. Cet effet est alors initialement utilisé pour réaliser des capteurs magnétiques et des mesures de courant [82] par exemple. Dans le cadre d'une collaboration avec l'équipe MADEA du G2Elab et plus particulièrement Aktham ASFOUR et Jean-Paul YONNET, nous (Pierre-Olivier JEANNIN et moi-même) avons initié des travaux de recherche sur la potentialité de l'utilisation des matériaux à effet GMI pour réaliser des fonctions de transmission d'ordres à haute isolation galvanique pour drivers d'interrupteurs de puissance. L'idée initiale est d'utiliser des matériaux à effet GMI sous forme de fil (diamètre d'environ 100μm) pour avoir un couplage capacitif le plus faible possible entre le primaire du driver (bobine émettrice) et le secondaire (fil à effet GMI). Pour ce faire, nous avons co-encadré un stagiaire de Master 2 Recherche : Yohan WANDEROILD (Fev. 2015 – Juin 2015).

Dans un premier temps, un outil de caractérisation a été mis au point afin de connaitre au mieux l'impédance des fils à effets GMI (30μm et 100μm) en fonction de la fréquence et du champ quasi-statique appliqué sur ceux-ci : Figure V.31. Les premières caractérisations ont confirmé les effets fortement non-linéaires du champ magnétique : Figure V.32.

Double bobine d'Helmholtz



Impédance mètre à l'intérieur de la double bobine d'Helmholtz



Echantillons de matériaux GMI et supports en cuivre

FIGURE V.31: Mise en oeuvre expérimentale pour la caractérisation de l'impédance des fils à effet GMI en fonction d'un champ quasi-statique.

Les travaux préliminaires sur la caractérisation des matériaux à effets GMI nous ont permis de concevoir un premier dispositif de transmission de signaux PWM (Figure V.33) avec des temps de propagation de 500ns (état haut vers état bas) pour

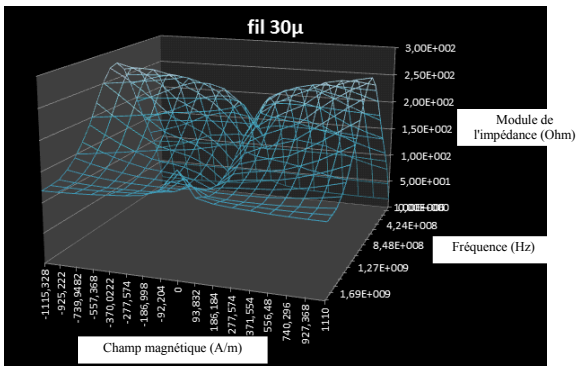


FIGURE V.32: Exemple de caractérisation du module de l'impédance d'un fil à effet GMI de 30μm de diamètre.

une distance d'isolation de 1mm (Figure V.34).

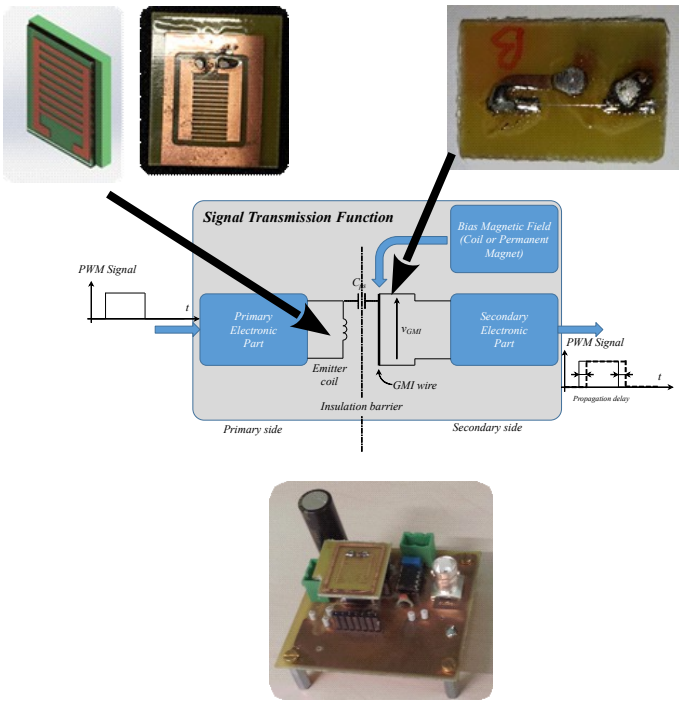


FIGURE V.33: Premier dispositif de transmission de sgnaux PWM à base de matériaux GMI.

Ces premiers résultats préliminaires ont abouti à une publication dans IEEE Transactions on Power Electronics Letters [83]. De plus amples travaux devraient être faits pour pousser au maximum les potentialité de cette idée : augmenter la barrière d'isolation pour aller vers un driver à très fort isolation galvanique. Cette solution pourrait, peut-être, être un concurrent aux solutions plus classiques de transformateurs magnétiques et pourquoi pas aux solutions optiques ?

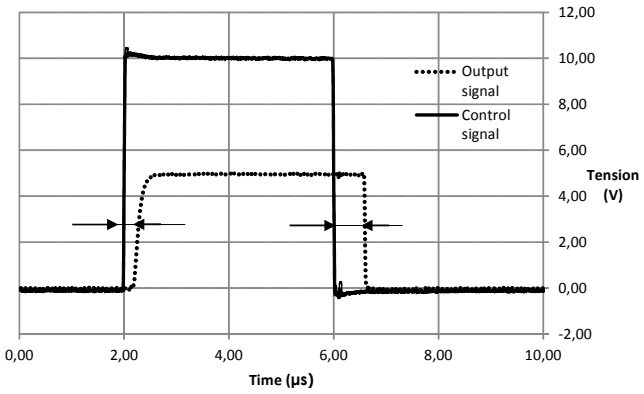


FIGURE V.34: Mise en évidence des temps de propagation du driver à base de matériaux GMI.

V.3.g Commande rapprochée des interrupteurs en diamant

La matériau diamant permet actuellement de réaliser des diodes Schottky [84]. Cependant, la fonction "interrupteur" est en cours de développement avec notamment les travaux de recherche de l'équipe "Semi-conducteurs à large bande interdite - SC2G" de l'Institut Néel (Grenoble) : Etienne Gheeraert, Julien Pernot, David Eon.

Dans le cadre du projet européen GreenDiamond, nous travaillons sur la caractérisation de premiers échantillons de diodes Schottky en diamant fournis par l'Institut Néel [85] : Figure V.35. Ce dispositif de type diode a également ses paramètres qui dépendent de la température. Sur le même substrat comme le montre la Figure V.35, une diode de puissance est associée à des diodes de plus petits calibres qui peuvent servir de capteurs de température comme le montre la Figure V.36.

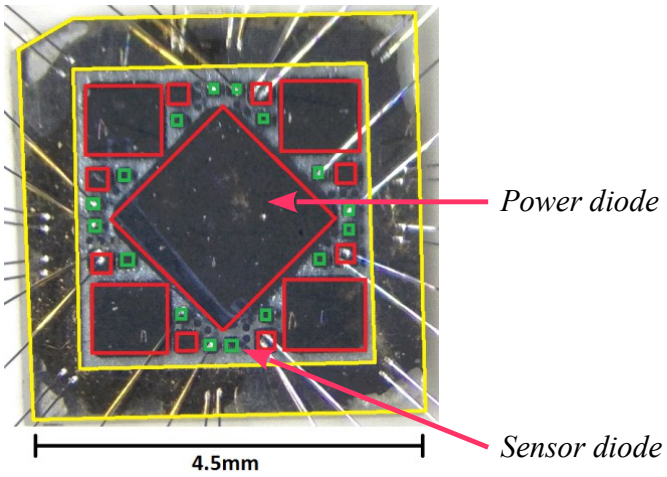


FIGURE V.35: Diodes Schottky en diamant réalisées à l'Institut Néel.

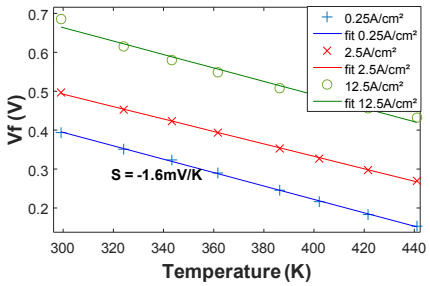


FIGURE V.36: Evolution de la chute de tension à l'état passant en fonction de la température et de la densité de courant.

L'objectif à moyen (et long terme) est de mettre en oeuvre les composants MOSFET en diamant qui sont en cours de conception et réalisation à l'Institut Néel. La difficulté actuelle (2017) est d'anticiper les propriétés de ces composants à long terme : quel

niveau de tension pour la commande de grille ? quelle charge de grille ? quelles protections ? quelles vitesses de commutation ? quelle tension de claquage ? etc.

V.4 Conclusion sur la thématique de commande rapprochée des interrupteurs de puissance

Lors de mon doctorat (2002-2005), j'ai travaillé sur la commande rapprochée des interrupteurs de puissance. Cette base m'a permis de dégager un projet de recherche qui m'a mené à explorer des outils et méthodes d'optimisation toujours dans le but d'optimiser et de concevoir des dispositifs permettant de commander des interrupteurs de puissance.

Depuis 2013, je travaille d'une part sur l'isolation galvanique pour la montée en tension des drivers (doctorat AM Sokchea) ; puis d'autre part sur les architectures de drivers pour les composants rapides (doctorat Van-Sang NGUYEN). Ces deux approches se rejoignent dans le cadre de la montée en tension des convertisseurs de puissance (par exemple pour les réseaux de distribution MVDC) et l'utilisation de composants rapides (HEMT-GaN et/ou MOSFET-SiC) dans des structures modulaires (MMC - Multilevel Modular Converter).

Toujours dans l'optique de trouver des solutions innovantes pour la montée en tension des interrupteurs de puissance, j'ai proposé l'utilisation de matériaux GMI pour le transfert d'ordres isolés (stage de master recherche de Yohan WANDEROILD). Ces travaux exploratoires ont montré que l'idée de base est pertinente mais nécessite encore beaucoup d'investigations (scientifiques et technologiques) pour arriver à un dispositif compétitif par rapport aux transformateurs magnétiques.

Nous avons vu également que les composants en diamant sont de bons candidats pour l'électronique de puissance. Comme ces composants sont en cours de développement, il est difficile d'anticiper quels seront les drivers du futurs pour les composants en diamant. De ce fait, cette problématique est très encourageante pour des perspectives et des innovations à long terme.

Dans le Chapitre VI, je reviendrai sur les perspectives de cette thématique de commande rapprochée des interrupteurs.

Chapitre VI

Projet scientifique & Perspectives – Commande rapprochée des interrupteurs de puissance

VI.1 Choix & Positionnement scientifiques

Bref historique ———

Pendant mes travaux de doctorat sur les drivers d'IGBT de forte puissance pour la société ARCEL et au sein du laboratoire AMPERE de Lyon, je me suis investi sur la thématique de la commande rapprochée des interrupteurs de puissance (octobre 2002 - novembre 2005).

A mon arrivée à Supélec en février 2006, afin d'élargir mes domaines de compétences et les thématiques de mes activités de recherche, je me suis orienté vers l'optimisation des convertisseurs d'électronique de puissance (doctorats de K.Ejjabraoui et C.Ledoux principalement).

En parallèle, j'ai également initié des collaborations étroites avec le Département d'Automatique de Supélec (E.Godoy et P.Rodriguez) sur la modélisation et la commande des convertisseurs d'électronique de puissance (doctorats de A.Jaafar et C.Vlad principalement).

Ces deux principales activités représentent la totalité de mes encadrements de doctorants, post-doctorants et stagiaires M2R au sein de Supélec sur la période 2006-2012.

Cependant, sur la période 2009-2012, j'ai repris une activité de recherche sur la commande rapprochée des interrupteurs de puissance et plus particulièrement sur la problématique de l'isolation galvanique des ordres de commande et de puissance pour des applications haute tension (quelques kV à quelques dizaines de kV). Cette activité a été motivée par le souhait de mener à bien un projet de recherche beaucoup plus personnel sans encadrer d'étudiants dans un premier temps. Cette démarche personnelle a mené à la publication d'un premier article dans IET Power Electronics en 2012 [31]. Elle conduira également à un deuxième article en 2015 sur cette thématique

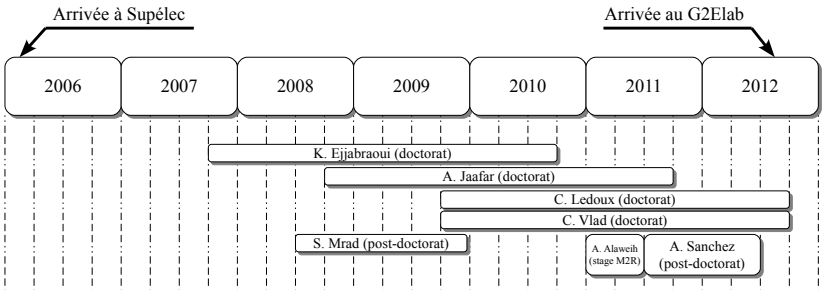


FIGURE VI.1: Bilan des encadrements sur la période 2006-2012 (Supélec).

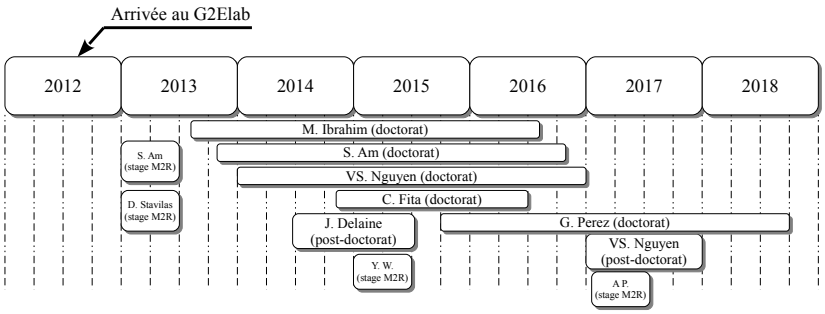


FIGURE VI.2: Bilan des encadrements depuis septembre 2012 (G2Elab).

mais dans le cadre d'un stage de M2R au sein du G2Elab [75].

A mon arrivée dans l'équipe Electronique de Puissance (EP) du G2Elab, j'ai poursuivi mes activités de recherche sur l'optimisation des convertisseurs (doctorats de M.Ibrahim et S.Am) et sur la commande rapprochée des interrupteurs de puissance (doctorats de S.Am, V.S.Nguyen et C.Fita). Depuis 2015, je travaille également sur la mise en oeuvre de composants en diamant par l'encadrement du doctorant G.Perez.

Les Figures VI.1 et VI.2 résument les principaux encadrements d'étudiants à Supélec et au G2Elab respectivement.

Ligne directrice ———

Aujourd'hui, je consacre mon temps de recherche à la commande rapprochée des interrupteurs de puissance (IGBT, MOSFET, HEMT-GaN, composants diamant, etc.) : cependant, cette thématique de recherche adresse également des problématiques d'optimisation (optimisation d'un système de transmission d'ordres à base de transformateur magnétique par exemple) et de packaging (mise en oeuvre de composants HEMT-GaN à commutations rapides par exemple). La Figure VI.3 donne un aperçu de ma vision actuelle de la thématique de la commande rapprochée des interrupteurs de puissance et met en lumière les thématiques et problématiques qui gravitent autour.

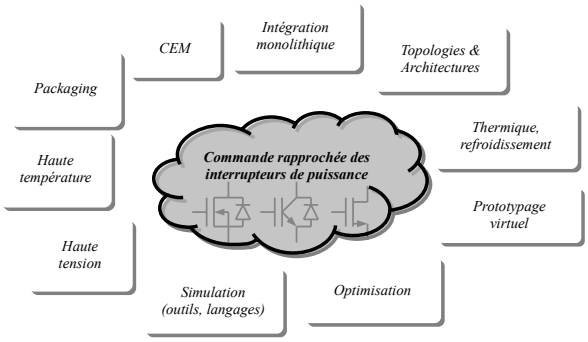


FIGURE VI.3: Thématique de la Commande rapprochée des interrupteurs de puissance et problématiques connexes

VI.2 Problématique & Etude bibliographique générales

Sans chercher à être exhaustif, je propose une brève analyse de la problématique de la commande rapprochée des interrupteurs de puissance afin de justifier mon projet de recherche.

Sur la base de la représentation de la Figure VI.4, je montre les deux grandes familles de topologies de drivers : driver "simple" et driver "double". Je fais apparaitre les fonctions de transmissions de "signal" et de "puissance".

Dans ce contexte général, il faut imaginer les solutions technologiques pour les fonctions de transmissions de signal puis de transmission de puissance. Pour la fonction de transmission de signal avec isolation galvanique, on peut dégager actuellement des solutions à base de transformateurs magnétiques avec [75] et sans matériaux magnétiques (transformateur dit coreless) [72] [70] ; des solutions basées sur de la transmission optique [86]. Pour la fonction de transmission de puissance, on peut également faire apparaître principalement des solutions à base de transformateurs magnétiques avec [78] et sans matériaux magnétiques [73] [70].

Dans des contextes applicatifs classiques, des produits commerciaux existent et ont fait leurs preuves depuis plusieurs années : Power Integration [87], Semikron [88], Infineon [89], etc. Pour des architectures de convertisseurs classiques (onduleur, hacheur, redresseur synchrone, etc.) associées à des interrupteurs de puissance bien connus (Si-IGBT, Si-MOSFET), les performances actuelles permettent de répondre aux cahiers des charges des applications.

Cependant, dans de nouveaux contextes industriels plus "sévères" (haute tension et/ou haute température et/ou haute fréquence), les circuits de commande rapprochée doivent être adaptés (par rapport aux applications plus classiques) : donnons par exemple le cas des composants HEMT-GaN qui peuvent commuter en quelques nano-secondes avec un driver et un packaging adaptés [7]. Dans le contexte des applications moyenne (quelques kV → quelques 10kV) et forte tension (quelques 10kV → quelques 100kV), les circuits de commande des interrupteurs de puissance doivent proposer une isolation galvanique adaptée et qui malheureusement actuellement sort des sentiers battus des drivers du commerce. Donnons par exemple le cas des onduleurs MMC (Multilevel Modular Converter) qui actuellement sont de très bons candidats pour les applications de type MVDC (Medium Voltage Direct Current)

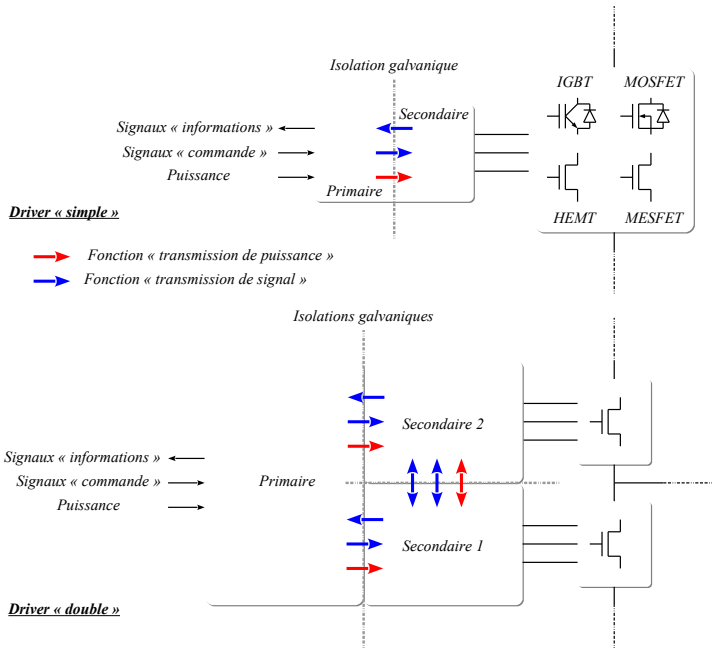


FIGURE VI.4: Topologies de drivers : simple & double

[90] [91] [92] [93] ou des applications pour les réseaux électriques au sans large [2] [3] : comment faire pour proposer des drivers d'IGBT avec une isolation galvanique de plusieurs dizaines de kilo-Volts aussi bien sur la puissance que les ordres de commande? Dans le contexte de la haute température, pour des composants en diamant par exemple [94], comment faire fonctionner l'interrupteur de puissance à 300°C avec le circuit de commande rapprochée au plus près, donc à haute température, tout en garantissant des commutations rapides et sans perturber le reste du circuit de commande?

VI.3 Haute isolation galvanique, haute vitesse de commutation, haute température, couplages

Dans le cas de composants dits "haute tension", comme l'illustre la Figure VI.5, la structure du convertisseur est souvent simple (onduleur 2-niveaux), et la problématique de la haute isolation galvanique est imposée par le tenue en tension des interrupteurs de puissance. Ce contexte peut être rencontré pour les composants en SiC (JFET, MOSFET, IGBT) [4] [5] [6] et prochainement pour les composants en diamant [94].

Dans le cas où les interrupteurs de puissance sont à plus basse tension de claquage (inférieure à quelques kilo-Volts), c'est la topologie du convertisseur de puissance qui va nécessiter l'utilisation de driver à haute isolation galvanique. La Figure VI.6 illustre cette problématique dans le cas d'onduleur multiniveaux de type MMC [90] [91] [92] [93].

D'un point de vue plus générale, les trois problématiques suivantes peuvent être

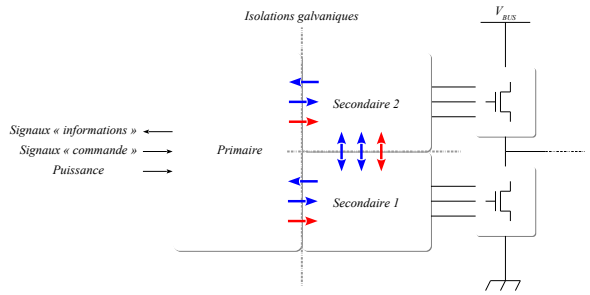


FIGURE VI.5: Driver double pour bras d'onduleur à 2-niveaux avec tension de bus (V_{BUS}) élevée

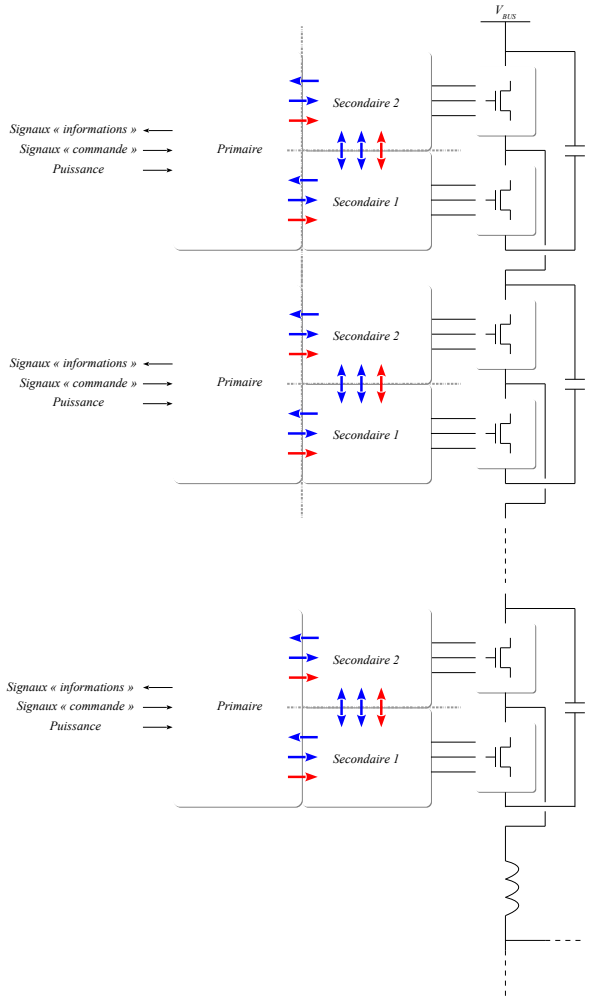


FIGURE VI.6: Driver double pour bras d'onduleur de type MMC

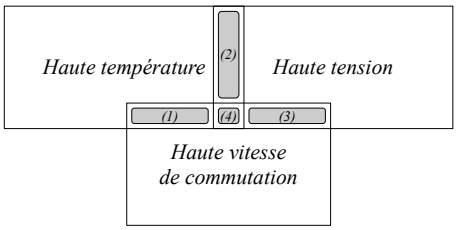


FIGURE VI.7: Synthèse des problématiques, tenue en tension, vitesse de commutation, température de fonctionnement et interactions potentielles.

adressées séparément ou conjointement comme le montre la Figure VI.7 :

— Haute tension
— Haute température de fonctionnement
— Forte vitesse de commutation

Deux de ces contraintes spécifiques peuvent être présentes en même temps sur la même application : forte vitesse de commutation et haute température de fonctionnement pour les transistors HEMT-GaN ou alors forte tension et forte vitesse de commutation pour les transistors MOSFET-SiC ; ou bien les trois contraintes en même temps comme le laisse présager les prédictions à long terme des transistors en diamant.

Mon projet de recherche s'articule pour la considération globale de ces trois contraintes pour la commande rapprochée des interrupteurs de puissance.

Tout d'abord, il s'agit de finaliser les travaux engagés sur l'isolation galvanique pour des applications MVDC ; les travaux à forte vitesse de commutation pour les HEMT-GaN dans un environnement à haute température. A moyen terme, mon projet va s'articuler autour de l'utilisation des composants permettant une montée en tension et ayant une forte vitesse de commutation (MOSFET SiC, IGBT SiC, mise en série de composants HEMT-GaN). A plus long terme, j'envisage la mise en oeuvre de composants en diamants qui je l'espère pourront nous permettre d'imager des cellules de commutation à haute tension ayant des vitesses de commutation rapides tout en fonctionnant à haute température.

Conclusion générale

"Conclure" ce manuscrit signifierait le *"terminer"*. Cependant, après avoir ressenti une énorme satisfaction à la fin de l'épreuve de rédaction de ce manuscrit et donc de l'avoir *"terminé"* ; apparaît désormais une volonté de *"commencer"* un nouveau projet.

En effet, ce manuscrit est terminé : il m'a permis de proposer un bilan, une photographie du temps passé sur différentes actions de recherche et d'enseignement. Mais il m'a permis, au delà de l'action narcissique de se regarder dans la glace, de tenter de me projeter sur des idées de recherche (et d'enseignement au passage) sur le plan *scientifique* mais aussi sur le plan *humain*. En effet, notre métier d'enseignant-chercheur se repose en partie sur notre capacité à encadrer et former (donc d'acquérir des compétences, de l'autonomie, de la confiance mais aussi des doutes constructifs) des jeunes chercheurs qui pourront à leurs tours se projeter dans leur vie professionnelle aussi bien académique que industrielle.

Au delà de la mission de formation, nous devons réfléchir aux sujets de recherche en fonction d'un écosystème scientifique, financier, industriel, académique, stratégique, etc., pour y dégager une ou des actions pertinentes et valorisables (ayant de la valeur ajoutée au sens large). De ce fait, aujourd'hui (2017), et en fonction de mon historique, j'ai proposé comme projet de recherche de continuer à investiguer la *commande rapprochée des interrupteurs de puissance* dans un contexte de montée en tension / en vitesse de commutation / en température de fonctionnement. Ce sujet reste néanmoins avec des objectifs très concrets et tournés vers l'applicatif pour nourrir si possible l'industrie de l'électronique de puissance de demain.

Annexe A

Quelques projets exploratoires

A.1 Projet GANEX

Le laboratoire d'excellence GANEX propose des appels à projets. Au G2Elab, nous (Pierre-Olivier Jeannin, Nicolas Rouger et moi-même) avons proposé un projet exploratoire en collaboration avec le CEA-Leti et le laboratoire Ampère : *Imaginer l'environnement physique et électronique des composants GaN de puissance*. Nous avons proposé de mettre en oeuvre des puces HEMT-GaN provenant du CEA-Leti dans une cellule de commutation dans un convertisseur de type boost. Deux puces HEMT-GaN sont mises en parallèle dans une structure cascode comme illustrée sur la Figure A.1.

Nous avons réalisé un prototype sur technologie PCB : le report des puces HEMT-GaN a été réalisé à l'aide d'une colle pour la fixer sur le PCB puis des fils de bonding ont été connecté entre les puces HEMT-GaN et le PCB. La Figure A.2 montre les détails de conception et de fabrication du prototype.

Sur la Figure A.3 nous pouvons voir le prototype final avec le driver de MOSFET basse tension, le MOSFET, les deux composants HEMT-GaN et la diode du convertisseur boost.

Nous avons réaliser quelques tests électriques sur ce premier prototype. La tension d'entrée du boost a été montée jusqu'à 30V afin de valider le fonctionnement global du convertisseur et surtout de la mise en parallèle de transistors HEMT-GaN dans une structure cascode. Sur la Figure A.4 nous pouvons voir les commutations en

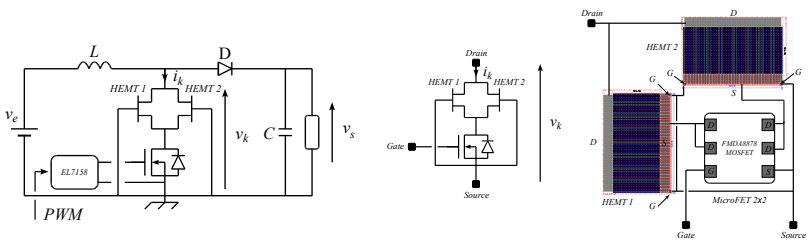


FIGURE A.1: Schéma de principe du convertisseur boost avec mise en oeuvre de puces HEMT-GaN en parallèle en structure cascode.

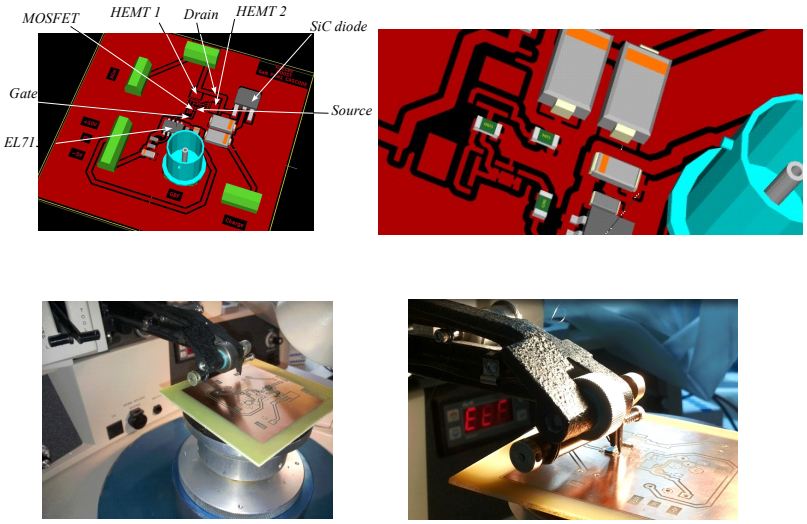


FIGURE A.2: Détails de fabrication du prototype pour le projet exploratoire GANEX

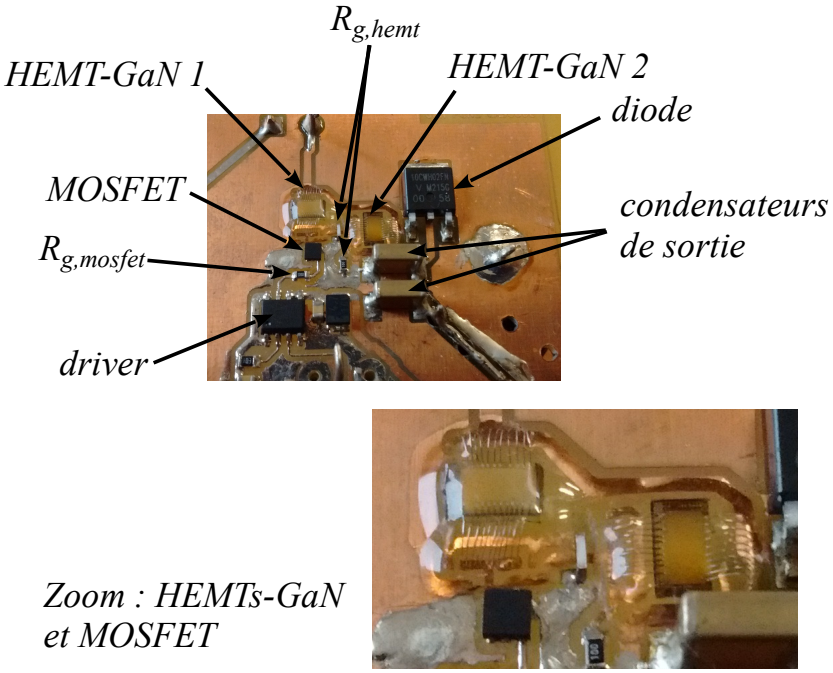


FIGURE A.3: Prototype final

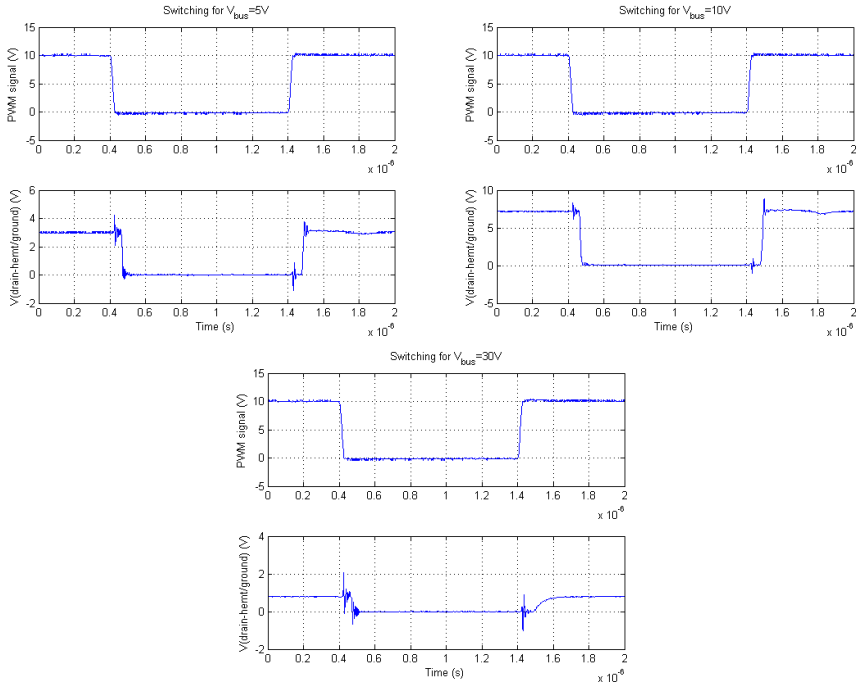


FIGURE A.4: Commutations en tension des transistors HEMT-GaN (V_{bus}=5V, 10V, 30V)

tension des transistors HEMT-GaN (tensions de commande et tension *drain/masse* des transistors HEMT-GaN).

Malheureusement, ce convertisseur n'a pas permis d'aller plus loin dans la démarche de mise en parallèle de transistors HEMT-GaN dans une structure cascode car une des puces GaN a cassé en fonctionnement. En effet, ces puces sont issues de premiers lots de fabrication du CEA-Leti (2013) et étaient à l'époque assez sensibles lors de leur mise en oeuvre et des fonctionnements en commutation.

Cependant, cette thématique de mise en parallèle reste d'actualité et présente un potentiel intéressant pour pouvoir monter en capacité en courant sur des modules de puissance pour aller au delà de quelques dizaines d'Ampère.

A.2 Fonction de transmission d'impulsions à base de transformateur coreless monolithique en technologie GaN

Dans le cadre le l'équipe de recherche commune entre le G2Elab et le CEA-Leti, nous (Nicolas Rouger et moi-même) avons proposé d'intégrer une fonction de transmission d'ordres isolés sur la technologie GaN développée par le CEA-Leti (2013-2014). Il s'agit de reprendre le principe développé dans [75] et de l'adapter à une technologie monolithique en GaN. Sur la Figure A.5 est rappelé le schéma de principe de la fonction : circuit d'excitation au primaire avec une résonance série, résonance parallèle au secondaire, un transformateur coreless, un transistor HEMT-GaN en montage cascode avec une MOSFET basse tension.

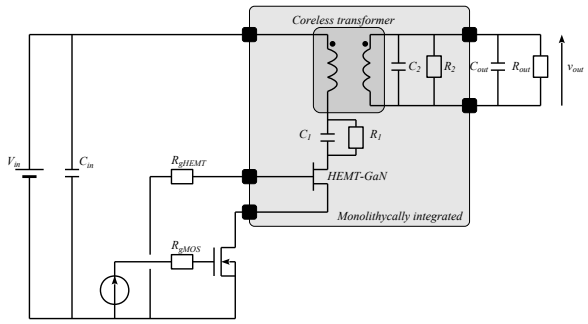


FIGURE A.5: Schéma de principe de la fonction de transmission d'impulsions isolées.

Sur la Figure A.6 nous pouvons voir le dispositif intégré puis sur la Figure A.7 le dispositif complet intégré sur un PCB. La capacité parasite entre primaire et secondaire a été estimée à 550fF et la tension de claquage à 800V (par mesure avec tests sous pointes). Sur la Figure A.8 nous montrons des résultats préliminaires sur le temps de propagation de l'information et les niveaux de tensions disponibles au secondaire en fonction de la capacité de résonance au secondaire.

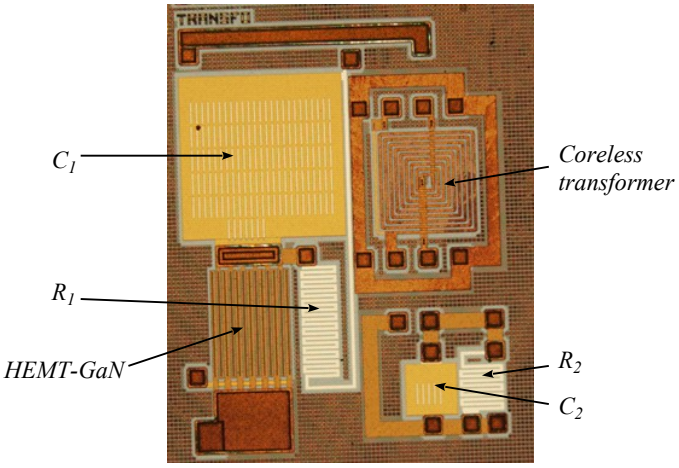


FIGURE A.6: Photographie du dispositif intégré (transistor HEMT-GaN, condensateurs de résonances, résistance de sortie, transformateur coreless).

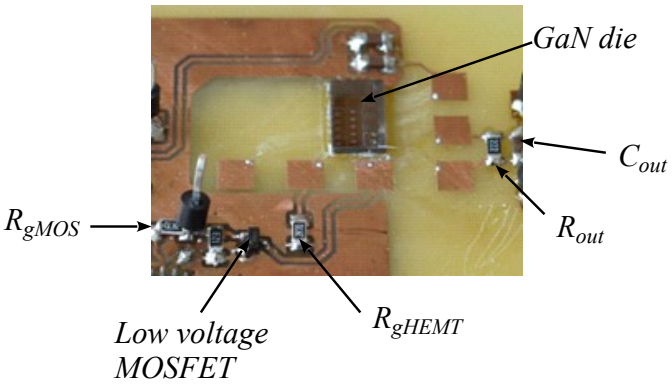


FIGURE A.7: Photographie de la mise en oeuvre du circuit intégré.

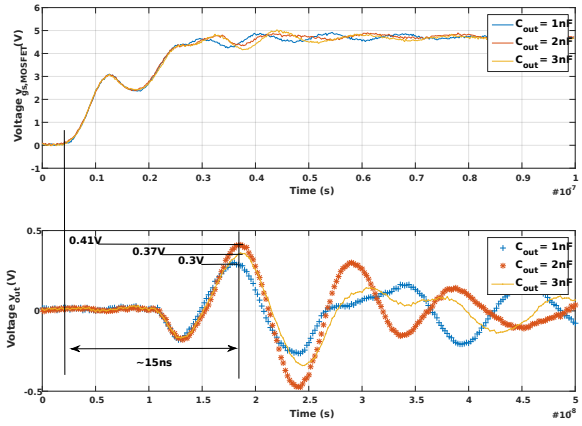


FIGURE A.8: Résultats expérimentaux de la fonction de transmissions d'impulsions intégrée sur technologie GaN du CEA-Leti.

A.3 Convertisseur classe E à haute fréquence pour composants HEMT-GaN

Dans le cadre d'un projet de recherche d'un étudiant en 3eme année à l'ENSE3 (Julien Baron), nous (Pierre-Olivier Jeannin et moi-même) avons proposé l'étude et la réalisation d'un convertisseur isolé basé sur les classes E^2 (Figure A.9) et Φ^2. L'objectif à moyen terme aurait été de proposer une fonction de transmission de puissance pour drivers à haute isolation galvanique.

Dans le cadre de ce projet étudiant, Julien Baron a développé un convertisseur DC-AC non isolé de classe E en mettant en oeuvre un transistor HEMT-GaN de EPC : Figure A.10. Ce convertisseur a pu fonctionner jusqu'à 3MHz.

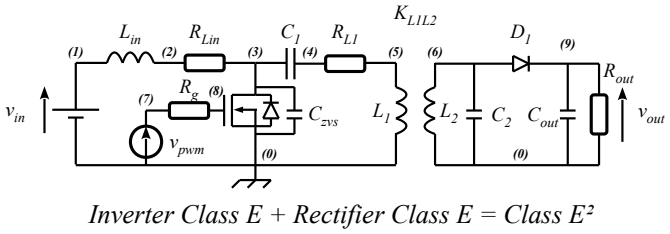
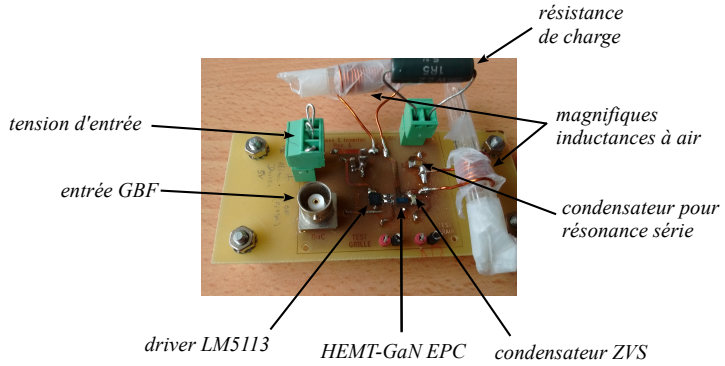


FIGURE A.9: Schéma de principe du convertisseur DC-DC isolé de classe E^2.



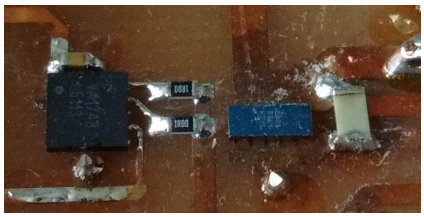


FIGURE A.10: Prototype du convertisseur DC-AC de classe E.

En perspectives à moyens termes, nous pourrions envisager de continuer sur cette basse pour y intégrer un transformateur à fort entrefer et un redresseur à commutations

douces afin de proposer un premier convertisseur DC-DC à forte isolation galvanique à haute fréquence.

Bibliographie

[1] Thi Yen Mai Nguyen, *Ferrite-based micro-inductors for power systems on chip : from material elaboration to inductor optimisation*, PhD thesis, Université Paul Sabatier de Toulouse, Décembre 2014. xii, 65

[2] Rik W. De Doncker, "Power electronic technologies for flexible dc distribution grids", in *International Power Electronics Conference (IPEC-Hiroshima 2014 - ECCE ASIA)*, 2014, pp. 736 – 743. 1, 108

[3] Nils Soltau; Murat Kaymak; Shenghui Cui; Rik W. De Doncker, "Materials, devices and components for flexible electrical networks of the future", in *International ETG Congress*, 2015. 1, 108

[4] Arun Kadavelugu; Subhashish Bhattacharya; Sei-Hyung Ryu; David Grider; Scott Leslie; Kamalesh Hatua, "Understanding dv/dt of 15 kv sic n-igbt and its control using active gate driver", in *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2014, pp. 2213 – 2220. 1, 108

[5] Arun Kadavelugu; Krishna Mainali; Dhaval Patel; Sachin Madhusoodhanan; Awneesh Tripathi; Kamalesh Hatua; Subhashish Bhattacharya; Sei-Hyung Ryu; David Grider; Scott Leslie, "Medium voltage power converter design and demonstration using 15 kv sic n-igbts", in *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 2015, pp. 1396 – 1403. 1, 108

[6] Kenji Fukuda; Dai Okamoto; Mitsuo Okamoto; Tadayoshi Deguchi; Tomonori Mizushima; Kensuke Takenaka; Hiroyuki Fujisawa; Shinsuke Harada; Yasunori Tanaka; Yoshiyuki Yonezawa; Tomohisa Kato; Shuji Katakami; Manabu Arai; Manabu Takei; Shinichiro Matsunaga; Kazuto Takao; Takashi Shinohe; Toru Izumi; Toshihiko Hayashi; Syuuji Ogata; Katsunori Asano; Hajime Okumura; Tsunenobu Kimoto, "Development of ultrahigh-voltage sic devices", *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 62, no. 2, pp. 396 – 404, 2015. 1, 108

[7] J. Kolar; E. Hoene, "Power electronics in challenging little boxes and more", in *IEEE CIPS Conference*, March 2016. 1, 107

[8] R. Middlebrook and Slobodan Cuk, "A general unified approach to modelling switching-converter power stages", in *Power Electronics Specialists Conference, 1976 IEEE*, June 1976. 40

[9] Slobodan Cuk and R. Middlebrook, "A general unified approach to modelling switching dc-to-dc converters in discontinuous conduction mode", in *Power Electronics Specialists Conference, 1977 IEEE*, 14-16 June 1977. 40

[10] M. Usman Iftikhar; E. Godoy; P. Lefranc; D. Sadarnac; C. Karimi, "A control strategy to stabilize pwm dc-dc converters with input filters using state-feedback and pole-placement", in *IEEE 30th International Telecommunications Energy Conference, INTELEC*, 2008. 40, 41

[11] Ali Jaafar; Emmanuel Godoy; Pierre Lefranc; Xuefang Lin Shi; Akram Fayaz; Nan Li, "Nonlinear sliding mode observer and control of high order dc-dc converters", in *36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, IECON*, 2010. 40, 43

[12] Ali Jaafar; Aya Alawieh; R. Ortega; Emmanuel Godoy; Pierre Lefranc, "Pi stabilization of power converters with partial state measurements", *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 21, no. 2, pp. 560 – 568, 2013. 40, 43

[13] Ali Jaafar, *Contribution à la modélisation, l'analyse et l'optimisation de lois de commande pour convertisseurs DC-DC de puissance*, PhD thesis, Ecole Doctorale « Sciences et Technologies de l'Information des Télécommunications et des Systèmes », Novembre 2011. 40

[14] M. Usman Iftikhar; A. Bilal; D. Sadarnac; P. Lefranc; C. Karimi, "Analysis of input filter interactions in cascade buck converters", in *IEEE International Conference on Industrial Technology, ICIT*, 21 – 24 April 2008. 41

[15] M. Usman Iftikhar; P. Lefranc; D. Sadarnac; C. Karimi, "Theoretical and experimental investigation of averaged modeling of non-ideal pwm dc-dc converters operating in dcm", in *IEEE Power Electronics Specialists Conference, PESC*, 15 – 19 June 2008. 41

[16] M. Usman Iftikhar; P. Lefranc; D. Sadarnac; C. Karimi, "Efficiencey investigation of dc-dc converters with passively damped input filter circuit", *International Journal of Electronics*, vol. 96, no. 9, pp. 961 – 976, September 2009. 41

[17] M. Usman Iftikhar; P. Lefranc; E. Godoy; D. Sadarnac; C. Karimi, "Theoretical and experimental investigation of averaged modeling of non-ideal pwm dc–dc converters operating in dcm", *MAUSAM Journal of Basic and Applied Sciences*, vol. 1, no. 1, August 2009. 41

[18] A. Jaafar; P. Lefranc; E. Godoy; X. Lin-Shi; A. Fayaz; L. Nan, "Experimental validation with a control point of view analysis of the sepic converter", in *Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON*, November 2009. 42

[19] C. Vlad; P. Rodriguez; E. Godoy; P. Lefranc, "Explicit model predictive control of buck converter", in *International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition, EPE-PEMC, ECCE Europe*, September 2012. 43

[20] C. Vlad; P. Rodriguez; E. Godoy; P. Lefranc, "A hybrid model for buck converter operating in continuous and discontinuous conduction modes", in *Annaual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, November 2010. 43

[21] C. Vlad; P. Rodriguez; E. Godoy; P. Lefranc, "Modélisation affine par morceaux et commande par retour d'état linéaire par morceaux d'un convertisseur flyback avec filtre d'entrée", in *Conférence Internationale Francophone d'Automatique*, Juillet 2012. 43

[22] C. Vlad; P. Rodriguez; E. Godoy; P. Lefranc, "Advanced control laws of dc–dc converters based on pwa modelling. application to a step-down converter.", *IET Power Electronics*, vol. 7, no. 6, pp. 1482 – 1498, June 2014. 44

[23] J. Biela; U. Badstuebner; J.W. Kolar, "Impact of power density maximization on efficiency of dc–dc converter systems", *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2009. 44

[24] J. W. Kolar; J. Biela; J. Minibock, "Exploring the pareto front of multi-objective single-phase pfc rectifier design optimization - 99.2density", in *IEEE 6th International Power Electronics and Motion Control Conference, IPEMC*, 2009. 44

[25] R.M. Bass C. Gezgin, B.S. Heck, "Simultaneaous design of power stage and controller for switching power supplies", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 12, no. 3, pp. 558 – 566, May 1997. 44

[26] J. Zhang; H.S-H. Chung; W-L. Lo; S.Y. Hui; A.K-M. Wu, "Implementation of a decoupled optimization technique for design of switching regulators using genetic algorithms", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 16, no. 6, pp. 752 – 763, November 2001. 44

[27] C. Larouci; K. Ejjabraoui; P. Lefranc; C. Marchand, "Impact of control constraint on a multi-objective buck converter design", *International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS)*, vol. 2, no. 3, pp. 257 – 266, September 2012. 45, 51, 60

[28] J. W. Kolar; J. Biela; S. Waffler; T. Friedli; U. Badstuebner, "Performance trends and limitations of power electronic systems", in *6th International Conference on Integrated Power Electronics Systems, CIPS*, March 2010. 47

[29] J. Biela; J.W. Kolar; A. Stupar; U. Drofenik; A. Muesing, "Towards virtual prototyping and comprehensive multi-objective optimisation in power electronics", in *Power Conversion and Intelligent Motion Conference Europe, PCIM*, May 2010. 47, 48

[30] P. Lefranc; X. Jannot; P. Dessante, "Virtual prototyping and pre-sizing methodology for buck dc-dc converters using genetic algorithms", *IET Power Electronics*, vol. 5, no. 1, pp. 41 – 52, January 2012. 49, 60

[31] P. Lefranc; X. Jannot; P. Dessante, "Optimised design of a transformer and an electronic circuit for igbtdrivers signal impulse transmission function based on a virtual prototyping tool", *IET Power Electronics*, vol. 6, no. 4, pp. 625 – 633, April 2012. 50, 86, 89, 90, 105

[32] K. Ejjabraoui; C. Larouci; P. Lefranc; C. Marchand, "Pre-sizing methodology of dc-dc converters using optimization under multi-physic constraints; application to a buck converter", *IEEE Transactions on Power Electronics, Special Issue on Optimization*, vol. 59, no. 7, pp. 2781 – 2790, July 2012. 50

[33] C. Larouci; K. Ejjabraoui; P. Lefranc; C. Marchand, "Placement optimization of power components in static converters under spacial and thermal constraints", *Journal of Power Electronics*, vol. 21, no. 2, pp. 368 – 376, March 2012. 51

[34] C. Ledoux; P. Lefranc; C. Larouci; J-L. Thomas, "State of the art of monoconverter multiload applications and associated power electronics

devices", in *IEEE International Symposium on Industrial Electronics, ISIE*, July 2010. 53

[35] C. Ledoux; P. Lefranc; J. Cathelin; C. Larouci; D. Diallo; J.L. Thomas, "Modeling and fault modes investigation of a power sharing ac drive", in *Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON*, November 2010. 54

[36] C. Ledoux; P. Lefranc; C. Larouci, "Pre-sizing methology of embedded static converters using optimization under constraints; comparison of two power sharing topologies", *IET Electrical Systems in Transportation*, vol. 3, no. 1, pp. 1 – 9, March 2013. 54

[37] C. Ledoux; P. Lefranc; C. Larouci, "Pre-sizing methodology for dc-ac converters using a virtual prototyping tool applied to sequential multi-load systems", *IET Power Electronics*, vol. 6, no. 1, pp. 244 – 250, February 2013. 54

[38] C. Ledoux; P. Lefranc; C. Larouci, "Optimisation du placement-routage de semiconducteurs de puissance. application à un hacheur abaisseur.", in *Electronique de Puissance du Futur, EPF*, Juillet 2012. 57

[39] K. Deb; A. Pratap; S. Agarwal; T. Meyarivan, "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm : Nsga-ii", *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 6, no. 2, pp. 182 – 197, April 2002. 60, 87

[40] Y.M. Nguyen; P. Lefranc; J.P. Laur; M. Brunet, "Modeling and design optimization of micro-inductor using genetic algorithm", in *Power Supply on Chip Workshp, PwSoC*, October 2014. 65

[41] P. Lefranc; E. Odic; M. Kirkpatrick, "Optimization and characterization of a planar transformer with a high voltage ratio and high output voltage for plasma reactors", *IET Power Electronics*, vol. 8, no. 6, pp. 929 – 937, June 2015. 67

[42] M. Ibrahim; P. Lefranc; D. Frey; J.P. Ferrieux; L. Gonnet; S. Am, "Design optimisation od signle-phase pfc rectifier using pareto-front analysis and including electro-thermal modelling", in *IEEE IECON*, November 2015. 72

[43] M. Ibrahim; L. Gonnet; P. Lefranc; D. Frey; J.P. Ferrieux; S. Am, "Effectiveness of pareto-front analysis applied to the design of a single-phase pfc rectifier", in *IEEE APEC Conference*, March 2016. 72

[44] S. Am; P. Lefranc; D. Frey; M. Ibrahim, "A generic virtual prototyping tool for multilevel modular converters (mmc)", in *IEEE IECON Conference*, November 2015. 74

[45] Pierre Aloïsi, *Les semiconducteurs de puissance*, Ellipses, 2001. 77

[46] B. Jayant Baliga, *Fundamentals of Power Semiconductor Devices*, Springer, 2008. 77, 82

[47] B. Jayant Baliga, *Silicon Carbide Power Devices*, World Scientific Publishing, 2005. 77

[48] B. Jayant Baliga, "Trends in power semiconductor devices", *IEEE Trans. On Electron Devices*, vol. 43, no. 10, pp. 1717–1731, Oct. 1996. 77

[49] B. Jayant Baliga, *Advanced Power MOSFET Concepts*, Springer, 2010. 77

[50] Pierre Lefranc, *Etude, conception et réalisation de circuits de commande d'IGBT de forte puissance*, PhD thesis, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Nov. 2005. 78

[51] David Frey, *Convertisseurs haute tension : contribution à l'intégration de la fonction interrupteur*, PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2003. 78

[52] Igor Baraya Zubriaurre, *Series connection of power semiconductors for medium voltage applications*, PhD thesis, Escuela Politecnica Superior Mandragon, Dec. 2009. 78

[53] V.S. Nguyen ; T.L. Te ; F. Sarrafin ; N.D. To ; D. Collin ; N. Rouger ; P. Lefranc ; B. Allard ; Y. Lembeye ; J.D. Arnould ; J.C. Crebier, "Contributions to dedicated gate driver circuitry for very high switching speed and high temperature power devices", in *IEEE ISPSD Conference*, June 2016. 78

[54] J. Rabkowski ; D. Peftitisis ; H.P. Nee, "Silicon carbide power transistors. a new area in power electronis is initiated", *IEEE Industrial Electronics Magazine*, June 2012 2012. 78

[55] D. Peftitisis ; J. Rabkowski ; H.P. Nee, "Gate and basedrivers for silicon carbide power transistors : an overview", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 31, no. 10, October 2016. 78

[56] W. Brewer, D. Povh, D. Retzmann, E. Teltsch, and W. Lei, "Role of HVDC and FACTS in future power systems", in *CEPSI 2004*, Shangai, China, 2004. 78

[57] Wilfried Breuer, Mario Lemes, and Dietmar Retzman, "Perspectives of HVDC and FACTS for system interconnection and grid enhancement", in *Brazil-India Summit Meeting on HVDC and Hybrid Systems : Planning and Engineering Issues*, Rio de Janeiro, Brazil, July 16–18, 2006. 78

[58] Michael P. Bahrman and Brian K. Johnshon, "The ABCs of HVDC transmission technologies", *IEEE Power & Energy Magazine*, March/April 2007. 78

[59] W. Long and S. Nilsson, "HVDC transmission : Yesterday and today", *IEEE Power & Energy Magazine*, march/april 2007. 78

[60] Cuiqing Du, M.H.J. Bollen, Even Agneholm, and Ambra Sannino, "A new control strategy of a VSC-HVDC system for high-quality supply of industrial plants", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 22, no. 4, pp. 2386–2394, Oct. 2007. 78

[61] Nicolas Flourentzou, Vassilios G. Agelidis, and Georgios D. Demetriades, "VSC-based HVDC power transmission systems : An overview", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 24, no. 3, pp. 592–602, July 2009. 78

[62] C. Marxgut ; J. Biela ; J.W. Kolar, "Dc-dc converter for gate power supplies with an optimal air transformer", in *Proceedings of the Applied Power Electronics Conference and exposition (APEC)*, 21–25 february 2010. 78

[63] V.S. Nguyen ; L. Kerachev ; P. Lefranc ; J.C. Crebier, "Characterization and analysis of an innovative gate driver and power supplies architectures for hf power devices", *IEEE Transaction on Power Electronics*, 2016. 79, 97, 98

[64] P. Lefranc, "Clamping actif d'igbt : diode transil remplacées par des condensateurs", in *Conférence des Jeunes Chercheurs en Génie Electrique, JCGE*, 2003. 79

[65] P. Lefranc ; D. Bergogne, "Clamping actif ou coupure douce de l'igbt : comment bien protéger l'igbt en ouverture de court-circuit ?", in *Conférence Electronique de Puissance du Futur ; EPF*, 2004. 79

[66] P. Lefranc ; D. Bergogne ; D. PLanson ; B. Allard ; H. Morel ; J.F. Roche, "Active clamping of igbt : capacitor replaces transil diodes", in *European Power Electronics Conference, EPE*, 2003. 79

[67] P. Lefranc ; D. Bergogne ; B. Allard ; H. Morel ; J.F. Roche, "Fast over-current protection of high power igbt modules", in *European Power Electronics Conference, EPE*, 2005. 79

[68] P. Lefranc ; D. Planson ; H. Morel ; D. Bergogne, "Analysis of the dynamic avalanche of punch through insulated gate bipolar transistor (pt-igbt)", *Elsevier Solid State Electronics*, vol. 53, no. 9, pp. 944 – 954, 2009. 79

[69] S.C Tang, S.Y Hui, and H.S.C Chung, "Coreless planar printed-circuit-board (pcb) transformers - a fundamental concept for signal and energy transfer", *IEEE Transactions On Power Electronics*, vol. 15, no. 5, pp. 931–941, Sept. 2000. 79

[70] S.C Tang, S.Y Hui, and H.S.C Chung, "A low-profile low-power converter with coreless pcb isolation transformer", *IEEE Transactions On Power Electronics*, vol. 16, no. 3, pp. 311–315, May 2001. 79, 107

[71] S.C Tang, S.Y Hui, and H.S.C Chung, "Coreless printed circuit board (pcb) transformers with multiple secondary windings for complementary gate drive circuits", *IEEE Transactions On Power Electronics*, vol. 14, no. 3, pp. 431–437, May 1999. 79

[72] S.Y Hui, S.C Tang, and H.S.C Chung, "Optimal operation of coreless pcb transformer-isolated gate driver circuits with wide switching frequency range", *IEEE Transactions On Power Electronics*, vol. 14, no. 3, pp. 506–514, May 1999. 79, 107

[73] S.Y Hui, H.S.C Chung, and S.C Tang, "Coreless printed circuit board (pcb) transformers for power mosfet/igbt gate drive circuits", *IEEE Transactions On Power Electronics*, vol. 14, no. 3, pp. 422–430, May 1999. 79, 107

[74] S.Y.R Hui, H.S.H Chung, and S.C Tang, "Coreless pcb-based transformer for power mosfet/igbt gate drive circuits", pp. 1171–1176. 79

[75] S. Am ; P. Lefranc ; D. Frey, "Design methodology for optimization of a high insulation voltage igbt gate driver signal transmission function", *IET Power Electronics*, vol. 8, no. 6, pp. 1035 – 1042, June 2015. 90, 106, 107, 3

[76] S. Am ; P. Lefranc ; D. Frey, "A virtual prototyping tool of a power transmission function for igbt gate drivers with high insulation voltage capabilities", in *IEEE CIPS Conference*, March 2016. 95

[77] S. Am ; P. Lefranc ; D. Frey ; M. Ibrahim, "Design methodology for a high insulation voltage power transmission function for igbt gate driver", in *IEEE APEC Conference*, March 2016. 95

[78] S. Am ; P. Lefranc ; D. Frey ; R. Hanna, "Design methodology for very high insulation voltage capabilities power transmission function for igbt gate drivers based on a virtual prototyping tool", *IET Power Electronics*, To be published 2017. 95, 107

[79] Van Sang Nguyen, *Conception, caractérisation et mise en oeuvre d'un circuit intégré de type driver CMOS pour composants GaN*, PhD thesis, Université Grenoble Aples, Decembre 2016. 98

[80] L. V. Panina; K. Mohri, "Magneto-impedance effect in amorphous wires", *Applied Physics Letters*, vol. 65, no. 9, pp. 1189 – 1191, 1994. 100

[81] L. V. Panina; K. Mohri; T. Uchiyama; M. Noda, "Giant magneto-impedance in co-rich amorphous wires and films", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 31, no. 2, pp. 1249 – 1260, 1995. 100

[82] A. Asfour; J.P. Yonnet; M. Zidi, "A high dynamic range gmi current sensor", *Journal of Sensor Technology*, vol. 2, no. 4, 2012. 100

[83] Y. Wanderoild; A. Asfour; P. Lefranc; P.O. Jeannin; J.P. Yonnet, "Giant magneto-impedance sensor for gate driver insulated signal transmission functions", *IEEE Transaction on Power Electronics Letters*, vol. 32, no. 4, pp. 2493 – 2497, 2017. 101

[84] S. Am; P. Lefranc; D. Frey; M. Ibrahim. Rouger, "La diode sochottky en diamant : le présent et le futur", in *Symposium de Génie Electrique, SGE*, Juin 2016. 103

[85] G. Perez; N. Rouger; P.O. Jeannin; Y. Avenas; G. Chicot; D. Eon, "Integrated temperature sensor with diamond schottky diodes using thermosensitive parameter", in *International Conference on Diamond and Carbon Materials*, September 2016. 103

[86] Nicolas Rouger, *Intégration monolithique des fonctions d'interface au sein de composants de puissance à structure verticale*, PhD thesis, Institut Polytechnique de Grenoble, Juillet 2008. 107

[87] Power Integration, "https ://igbt-driver.power.com/products/scale-2-driver-cores/". 107

[88] Semikron, "https ://www.semikron.com/products/product-classes/igbt-driver.html". 107

[89] Infineon, "http ://www.infineon.com/cms/en/product/power/motor-control-and-gate-driver-ics/isolated-gate-driver-ics/channel.html?channel=db3a304344ae06150144b10ec0f70082". 107

[90] Ruturaj Soman; Michael Mischa Steurer; Tanvir Ahmed Toshon; M. Omar Faruque; Robert M. Cuzner, "Size and weight computation of mvdc power equipment in architectures developed using the smart ship systems design environment", *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 5, no. 1, pp. 40 – 50, March 2017. 108

[91] Yu Chen; Shanshan Zhao; Zuoyu Li; Xiaoguang Wei; Yong Kang, "Modeling and control of the isolated dc–dc modular multilevel converter for electric ship medium voltage direct current power system", *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 5, no. 1, pp. 124 – 139, March 2017. 108

[92] Michael Mischa Steurer; Karl Schoder; Omar Faruque; Dionne Soto; Matthew Bosworth; Michael Sloderbeck; Ferenc Bogdan; John Hauer; Manfred Winkelnkemper; Lukas Schwager; Pawel Blaszczyk, "Multifunctional megawatt-scale medium voltage dc test bed based on modular multilevel

converter technology", *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 2, no. 4, pp. 597 – 606, December 2016. 108

[93] Alexandre Christe; Drazen Dujic, "Galvanically isolated modular converter", *IET Power Electronics*, vol. 9, no. 12, pp. 2318 – 2328, 2016. 108

[94] Hitoshi Umezawa; Takeshi Matsumoto; Shin-Ichi Shikata, "Diamond metal–semiconductor field-effect transistor with breakdown voltage over 1.5 kv", *IEEE Electron Device Letters*, vol. 35, no. 11, pp. 1112 – 1114, 2014. 108

COMMANDES RAPPROCHEES POUR INTERRUPTEURS DE PUISSANCE

Résumé

Ce manuscrit présente mes activités de recherche concernant les thématiques de la commande rapprochée des interrupteurs de puissance, de l'optimisation en électronique de puissance et la commande des convertisseurs d'électronique de puissance. Un projet de recherche est proposé sur la commande rapprochée des interrupteurs de puissance dans un contexte de montée en tension / vitesse de commutation / température de fonctionnement.

Mots clés : *électronique de puissance, interrupteurs de puissance, gate drivers*

GATE DRIVERS FOR POWER ELECTRONICS SWITCHES

Resume

This manuscrit presents my research activities about the gate drivers technics, optimization for power electronics and control law for power converters. A project is proposed for gate drivers in a context of increase of voltage / switching speed / operating temperature.

Keywords : *power electronics, power electronics switches, gate drivers*