



Contributions à l'optimisation fonctionnelle en électronique de puissance

Paul-Etienne Vidal

► To cite this version:

Paul-Etienne Vidal. Contributions à l'optimisation fonctionnelle en électronique de puissance. Electronique. Institut National Polytechnique de Toulouse, 2017. <tel-04412670>

HAL Id: tel-04412670

<https://hal.science/tel-04412670v1>

Submitted on 23 Jan 2024

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.



HAL Authorization



MÉMOIRE

En vue de l'obtention de

L'Habilitation à Diriger des Recherches

Délivrée par : *l'Institut National Polytechnique de Toulouse (INP Toulouse)*

Présentée et soutenue le 27 novembre 2017 par :

PAUL-ETIENNE VIDAL

**Contributions à l'optimisation fonctionnelle en électronique
de puissance**

Rapporteurs :

Bruno ALLARD	Professeur des universités	INSA Lyon
François COSTA	Professeur des universités	Université Paris Est Créteil
Geneviève DUCHAMP	Professeur des universités	Université de Bordeaux

Examineurs :

Alain BOUSCAYROL	Professeur des universités	Université Lille 1
Maurice FADEL	Professeur des universités	ENSEEIH Toulouse
Jean-Yves FOURQUET	Professeur des universités	ENI Tarbes
Frédéric ROTELLA	Professeur des universités	ENI Tarbes
Éric WOIRGARD	Professeur des universités,	IUT de Bordeaux, Université de Bordeaux

École doctorale et spécialité :

GEET : Génie Electrique

Unité de Recherche :

Laboratoire Génie de Production (EA 1905)

Correspondant :

Jean-Yves FOURQUET, Professeur des universités, directeur de l'ENIT.

Table des matières

1	Introduction générale	1
1.1	Avant-propos	1
1.2	Introduction au positionnement thématique	2
1.3	Contexte	3
1.3.1	Le laboratoire de recherche	3
1.3.2	Éléments de contexte du génie électrique à l'ENIT	4
2	Contexte de la recherche	7
2.1	Les composantes de l'électronique de puissance	7
2.1.1	Quelques éléments au sujet de la conversion statique de l'énergie électrique	7
2.1.2	Quelques exemples de problématiques de recherche autour d'un système de conversion électromécanique	8
2.1.3	Liste des problématiques traitées au sein du LGP au moment de mon intégration	8
2.1.3.1	Positionnement de l'équipe Interfaces et Matériaux Fonctionnels (IMF)	9
2.1.3.2	Positionnement de l'équipe Conception Mécanique Assistée par Ordinateur (CMAO)	10
2.1.3.3	Positionnement de l'équipe Production Automatisée (PA)	11
2.1.4	Conclusions sur le contexte de recherche du LGP en vue du développement d'un thème de recherche spécifique	12
2.2	Vers une démarche originale de recherche	13
2.2.1	Description de la proposition	13
2.2.2	Verrous scientifiques et technologiques associés	14
2.2.2.1	Intégration et interactions en électronique de puissance	14
2.2.2.2	Caractérisation expérimentale	17
2.2.2.3	Pilotage et mesures pour l'électronique de puissance	18
2.3	Conclusions	21
3	Analyses et études pour une optimisation fonctionnelle en électronique de puissance	23
3.1	Intégration et interactions en électronique de puissance	23
3.1.1	Contexte	23
3.1.2	Analyse des interactions	26

3.1.2.1	Analyse pour un système complexe mettant en œuvre une électronique de puissance	26
3.1.2.2	Approche croisée pour des systèmes élémentaires	29
3.1.2.3	Synthèse sur l'analyse des interactions	32
3.1.3	Modélisation multiphysique, multi-échelle de temps et simulation comportementale	33
3.1.3.1	Des modèles multiphysiques et dynamiques	34
3.1.3.2	Mise en œuvre de plusieurs méthodes de modélisation	39
3.1.3.3	Des modèles qui permettent la mise en évidence des liens en vue d'une optimisation dès la phase de spécification et de conception	43
3.1.4	Synthèse de la démarche d'intégration et de modélisation des interactions	48
3.2	Caractérisation expérimentale	49
3.2.1	Objectif des expériences	49
3.2.2	Évaluation expérimentale de la durée de vie des composants et modules en électronique de puissance	49
3.2.2.1	Prédiction de la durée de vie	50
3.2.2.2	Sollicitations multicontraintes	54
3.2.3	Synthèse	56
3.3	Pilotage et mesures pour l'électronique de puissance	57
3.3.1	Stratégie de modulation pour la conversion statique de l'énergie	57
3.3.1.1	Onduleur de tension à 2 niveaux	57
3.3.1.2	Généralisation pour des structures à cellules imbriquées à N niveaux	63
3.3.1.3	Autres structures d'onduleurs	67
3.3.1.4	Généralisation à d'autres schémas de modulation	67
3.3.2	Mesures pour l'électronique de puissance	71
3.3.2.1	Généralités sur le contexte de la recherche	71
3.3.2.2	Étude de la mesure de champ électromagnétique	72
3.4	Conclusions	79

4 Coordination d'actions pour le développement d'activités en électronique de puissance 81

4.1	Description des activités complémentaires	81
4.2	Actions relatives à la pédagogie	81
4.2.1	Responsabilités pédagogiques	81
4.2.1.1	Parcours orienté métier	81
4.2.1.2	Création d'un semestre d'apprentissage par projet, en langue anglaise	82
4.2.1.3	Co-concepteur d'une option	82
4.2.1.4	Participation à l'évolution des enseignements de génie Électrique dans le tronc commun de l'ENIT	82
4.2.1.5	Synthèse des missions	83
4.2.2	Encadrement de projets étudiants	83
4.2.3	Encadrement d'un projet d'évolution de carrière - formation continue	84
4.2.4	Synthèse	84

4.3	Actions relatives aux partenariats	84
4.3.1	Plateforme expérimentale PRIMES	85
4.3.1.1	Comités de pilotage et comités de pilotage scientifique et stratégique	85
4.3.1.2	Comités techniques et Atelier Ciblé sur une Thématique	85
4.3.1.3	Suivi des investissements	86
4.3.1.4	Synthèse	86
4.3.2	Montage et coordination de programme collaboratifs	86
4.3.2.1	Programme CEPIA	87
4.3.2.2	Programme GENOME	87
4.3.2.3	Programme IRT Double And Bump	87
4.3.2.4	Programme ANR CAPTIF	88
4.3.2.5	Programme CLE Conversion'99	89
4.3.2.6	Programmes refusés	90
4.3.3	Relation avec l'école doctorale	90
4.4	Actions liées à la communication	91
4.4.1	Stratégie de communication	91
4.4.2	Participation au GDR SEEDS	91
4.4.3	Participation au comité scientifique DECIELEC 2015	91
4.4.4	Participation au DAS SOCLE pôle AESE	91
4.4.5	Synthèse	92
4.5	Conclusions	92
5	Perspectives de recherches	93
5.1	Sur les différents axes de recherche	93
5.1.1	Méthodes de modélisation pour la représentation et simulation des systèmes et composants mécatroniques	93
5.1.1.1	Modèles multiphysiques	93
5.1.1.2	Méthodes pour l'identification des modèles	94
5.1.2	Pilotage et observation des systèmes et composants mécatroniques	94
5.1.2.1	Exploitation des modèles génériques de modulation	94
5.1.2.2	Mise en œuvre d'observateurs pour les systèmes de conversion d'énergie.	95
5.1.2.3	Commande par platitude des systèmes de conversion d'énergie	95
5.1.3	Méthodes de caractérisation expérimentale	96
5.1.4	Analyses, conception, intégration et procédés pour les systèmes et composants mécatroniques	97
5.1.4.1	L'intégration de passifs	97
5.1.4.2	Les procédés d'intégration et les nouveaux matériaux	97
5.1.5	Analyse des interactions électromagnétiques en électronique de puissance	98
5.2	Avec une ambition commune : l'éco-conception	99
5.3	Dans les autres missions en support de l'activité recherche	99
5.3.1	Activités pédagogiques et de formations	99
5.3.2	Activités partenariales	100

5.3.3	Activités de valorisation et de diffusion de la connaissance	101
5.4	Conclusions	101
6	Conclusion	103
A	Curriculum Vitae	105
A.1	Thème de recherche	105
A.2	Encadrement doctoral	106
A.3	Encadrement de post-doctorants	109
A.4	Encadrement scientifique	110
A.5	Autres encadrements	112
A.6	Programmes de recherche	113
A.7	Activités pédagogiques	115
A.8	Rayonnement	116
B	Bibliographie personnelle	119
B.1	Revue internationale (comité de lecture)	119
B.2	Revue nationale (comité de lecture)	120
B.3	Congrès internationaux (comité de lecture et actes)	120
B.4	Congrès nationaux (comité de lecture et actes)	122
B.5	Soumissions et valorisations en attente d'acceptation	123
	Bibliographie générale	125

Chapitre 1

Introduction générale

1.1 Avant-propos

Ayant suivi une formation d'ingénieur en Génie Électrique-Automatique de l'École Nationale Supérieure d'Électrotechnique, Électronique, Informatique et Hydraulique de Toulouse (ENSEEIH), j'ai été pour la première fois confronté au monde de la recherche en réalisant ma thèse au sein du Laboratoire d'Électrotechnique et d'Électronique Industrielle (LEEI) de l'Institut National Polytechnique. Ce laboratoire étant adossé à l'ENSEEIH, j'ai eu la chance d'enseigner l'informatique industrielle et l'automatique pendant ces années de recherche.

Les trois années de doctorat m'ont permis de mettre en œuvre des théories originales de l'automatique, appliquées à des systèmes multimachines multiconvertisseurs, et plus particulièrement à un système monomachine biconvertisseur. Dans cette étude, la comparaison entre des méthodes linéaires classiques du contrôle commande des machines électriques et des méthodes non linéaires, devait permettre d'envisager une optimisation du dimensionnement des convertisseurs associés à la machine à double alimentation qui avait été mise en œuvre.

C'est au cours de la mise en œuvre expérimentale que mes compétences en Génie Électrique ont été sollicitées. C'est aussi à cette occasion que j'ai compris la nécessité de la validation par l'expérience. La réalisation d'un schéma électrique de l'ensemble du système, la rédaction du cahier des charges de l'ensemble des sous-systèmes et la spécification technique avec certains fournisseurs m'ont confronté aux problématiques d'une réalisation matérielle. Cette réalisation a conduit au dimensionnement des sous-systèmes tels que les convertisseurs de puissance (fonction de conversion, définition de la structure, choix des composants etc.), les actionneurs électriques (dimensionnement et choix des machines en fonction de critères électrotechniques et/ou mécaniques, accouplement, support mécanique, etc.) ou le système de contrôle-commande (technologie, choix de la structure, mise en œuvre des lois de commande, etc.). Sans véritablement mettre de mots sur ces activités, je venais de dimensionner mon premier "système" mettant en œuvre de l'électronique de puissance.

Lors de l'année 2004, sous contrat d'Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche (ATER) à temps partiel, j'ai finalisé ma soutenance de thèse ainsi que l'exploitation des résultats expérimentaux de ma thèse. J'ai mis à profit cette année pour accentuer certaines pistes, dans la continuité des travaux de recherche précédents. Ainsi, j'ai participé au recrutement d'un stagiaire Master Recherche,

qui a travaillé sur la mise en œuvre d'un contrôle direct du couple appliqué aux machines à double alimentation. Cette volonté de participer à l'affirmation d'une thématique de recherche sur les stratégies de commande de la machine asynchrone à double alimentation, en vue d'une optimisation des domaines d'applications ou du dimensionnement des sous-systèmes de cette configuration, m'a permis de valoriser mes travaux de recherche par des publications en conférences et des soumissions dans des revues internationales. Du point de vue de l'enseignement, l'augmentation du volume horaire effectué m'a permis d'intervenir sur un public et des thématiques plus variés que précédemment.

Au cours de l'année universitaire suivante, j'ai bénéficié d'un contrat d'ATER à temps plein. En collaborant avec un jeune doctorant en première année de thèse, la capacité de démonstration de la maquette expérimentale a été augmentée de façon à pouvoir couvrir plusieurs modes de pilotage (commande linéaire ou non linéaire, possibilité d'hybridation etc.). Les nouveaux modes de fonctionnement permettaient également d'envisager une reconfiguration en cours de fonctionnement (certains bras du convertisseur pouvaient alors être pilotés indépendamment). Dès lors la maquette a pu produire plusieurs fonctionnements moteurs / générateurs tels que :

- machine asynchrone à rotor court-circuité ;
- machine à double alimentation avec un seul onduleur (au stator ou au rotor, l'autre enroulement étant alors relié au réseau !) ;
- machine à double alimentation avec deux onduleurs.

L'ensemble des composantes ainsi disponibles (armoire de puissance, machines électriques, système d'informatique industrielle, appareils de mesures) permettait d'envisager beaucoup de validations que ce soit sur le plan :

- des mesures électrotechniques ;
- d'un fonctionnement dans une configuration particulière ;
- du test d'algorithmes de commande, d'observation de variable ou de diagnostic de défauts.

Dans la continuité de ces recherches, une collaboration industrielle avec la société *Alstom Power Conversion* de Belfort a porté sur la définition et la simulation d'un convertisseur statique de forte puissance et haute tension, pour des applications utilisant une machine à double alimentation. Cela a été l'occasion de développer des architectures d'électronique de puissance de type multiniveaux et de s'intéresser aux lois de modulation associées.

J'ai complété ma formation en réalisant des enseignements pour chacune des trois années du cursus ingénieur ainsi que pour les MASTERS Recherche et Professionnel, du département Génie Électrique et Automatique de l'ENSEEIH, sur les thématiques de l'électrotechnique, de l'informatique et du contrôle-commande des machines.

1.2 Introduction au positionnement thématique

Au cours de l'année 2006, j'ai fait acte de candidature au poste de Maître de Conférence à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes (ENIT), poste n°0085 en 63^{ème} section. Le profil de poste exprimait trois besoins :

- le renforcement des collaborations scientifiques entre deux laboratoires, le *LGP - Laboratoire Génie de Production* et *PEARL - Power Electronic As-*

sociated Research Laboratory ;

- la nécessité de développement de compétence en génie électrique et électronique de puissance au sein du laboratoire ;
- le développement d’une problématique de recherche concernant l’intégration en électronique de puissance.

Par conséquent, les activités de recherche développées ci-après l’ont été dans un contexte de reconversion thématique, suite à l’adaptation de mon profil initial aux exigences du profil de ce poste. De plus, ces travaux doivent être vus comme la construction d’une démarche, et l’affirmation d’une stratégie de recherche au sein d’un laboratoire qui ne compte au moment de mon recrutement aucun enseignant chercheur en 63^{ème} section. Depuis, le développement de nombreuses activités de recherche ayant pour objet applicatif les systèmes mécatroniques mettant en œuvre une électronique de puissance, a favorisé la demande de rattachement au laboratoire d’un professeur des universités (avril 2012-janvier 2017), puis d’un maître de conférences (chercheur associé depuis février 2015). Enfin, le recrutement d’un maître de conférences en septembre 2013 a été réalisé. Au sein de cette équipe de travail, les activités de recherche ont concerné **le développement, la mise en œuvre et l’application de méthodes** pour l’analyse, la modélisation, la simulation et le pilotage de systèmes mécatroniques. L’objectif recherché était **l’optimisation fonctionnelle de ces systèmes**, et notamment de l’électronique de puissance. Les études répondaient aux problématiques rencontrées en :

- modélisation comportementale ;
- pilotage et mesures ;
- interactions multiphysiques ;
- caractérisations expérimentales.

Ces problématiques concernent les systèmes mettant en œuvre des dispositifs d’électronique de puissance. Le socle méthodologique s’est appuyé sur :

- la mise en œuvre de modèles analytiques ;
- la modélisation numérique ;
- l’intégration en électronique de puissance ;
- les mathématiques et l’automatique appliquées ;
- les procédés de mise en œuvre ;
- le développement de bancs expérimentaux de caractérisation.

Ainsi nous avons pu répondre aux questions de prédiction du comportement, d’optimisation des architectures et des choix technologiques, de validation du comportement lors du vieillissement, ainsi que du pilotage optimal du dispositif.

1.3 Contexte

1.3.1 Le laboratoire de recherche

En septembre 2006, 3 équipes de recherche existaient au sein du LGP :

- l’équipe Conception Mécanique Assistée par Ordinateur - CMAO (30% environ des effectifs) ;
- l’équipe Interfaces et Matériaux Fonctionnels - IMF (20% environ des effectifs) ;
- l’équipe Production Automatisée - PA, regroupant les composantes automatique et productique (50% des effectifs).

C'est en établissant, avec la direction du laboratoire, la cartographie des intersections potentielles entre les différents thèmes de recherche des équipes, que nous avons défini le contour des recherches menées aujourd'hui : c'était la naissance d'une action structurante au sein du LGP, autour de l'électronique de puissance, dans le cadre de la continuité des projets PEARL1 (Power Electronic Research Laboratory), puis PEARL2, ainsi que l'avènement de la plateforme PRIMES. Ce sont les travaux et les initiatives qui en découlent qui seront détaillés aux chapitres suivants.

1.3.2 Éléments de contexte du génie électrique à l'ENIT

Depuis mon intégration au sein de l'ENIT, l'organigramme et la structure de la recherche au LGP ont considérablement changé. Rappelons quelques éléments du contexte initial :

- lors de mon recrutement, il n'y avait pas de professeur des universités 63^{ème} section sur site. Ce qui posait notamment les problèmes de l'encadrement des thèses et du positionnement thématique initial. Pour conclure il n'y avait, à cette époque, aucune activité scientifique existante qui relevait du domaine de la 63^{ème} section ;
- il n'y avait pas de positionnement, ni de reconnaissance nationale ou internationale du laboratoire LGP dans la communauté scientifique de la 63^{ème} section : il n'y avait pas de participation active au Groupe de Recherche Systèmes d'Énergie Électrique dans leur Dimension Sociétale, GdR SEEDS 2994 du CNRS, par exemple, ni de doctorants ou MASTERS inscrits dans l'école doctorale Génie Électrique, Électronique, Télécommunications : du système au nanosystème, GEET, ED323 de l'université de Toulouse ;
- il n'existait pas de plateformes, ou d'espaces dédiés à la recherche en électronique de puissance dans l'enceinte de l'école ;
- il n'y avait pas de cours de niveaux suffisamment avancés pour que des projets pour les étudiants existent et puissent être fédérés autour d'actions à dimension recherche. Il n'y avait pas de filière MASTER génie électrique ;
- il existait un contexte régional universitaire encourageant les rapprochements entre structures et la naissance de grandes unités de recherche multidisciplinaires (naissance du LAPLACE en janvier 2007).

Cependant, certains éléments laissaient déjà apparaître qu'une activité de recherche reconnue pouvait exister :

- il y avait une équipe d'enseignants chercheurs à l'Institut Universitaire de Technologie de Tarbes, département Génie Électrique Informatique Industrielle¹. Le label équipe d'accueil (EA) sera perdu cette même année ;
- il y avait des recherches déjà existantes au LGP autour de l'électronique de puissance, mais dont les objectifs principaux portaient sur ses disciplines historiques : matériau, mécanique, thermique, etc. ;
- il existait un contexte local de soutien à la recherche particulièrement à l'écoute de nos attentes et soucieux de maintenir une dynamique d'innovation locale ;

1. L'IUT de Tarbes est un institut universitaire de technologie interne à l'Université Toulouse III.

- il y avait la volonté de la société locale ALSTOM de faire vivre une plateforme de recherche collaborative, centrée sur les problématiques de l'électronique de puissance ;
- il y avait l'envie de la direction de l'ENIT de faire naître et perdurer cette thématique.

C'est en connaissance de ce contexte que des activités de recherche originales en électronique de puissance ont été définies.

Chapitre 2

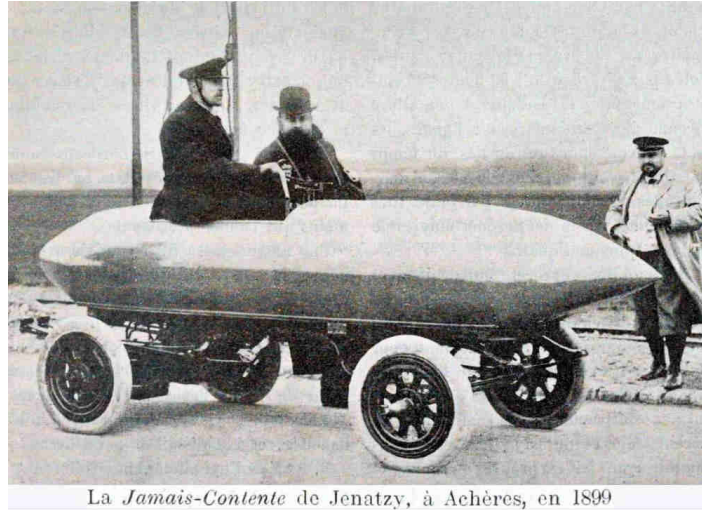
Contexte de la recherche

2.1 Les composantes de l'électronique de puissance

2.1.1 Quelques éléments au sujet de la conversion statique de l'énergie électrique

Afin de définir les domaines d'applications mais aussi l'utilité d'un convertisseur statique, il est intéressant de rappeler quelques faits. Suite à la disparition de la traction à vapeur dans la plupart des pays, la traction ferroviaire a vu l'apparition des moteurs électriques, par l'association des moteurs à courant continu avec les convertisseurs statiques (plus précisément les redresseurs). Ces derniers ont été dimensionnés afin d'assurer le transfert d'énergie entre la source et les moteurs, autorisant ces derniers à fonctionner à vitesse variable. Par la suite, dans les années 1980, les moteurs à courant continu ont laissé place aux moteurs asynchrones associés aux onduleurs de puissance, eux-mêmes pilotés par des micro-contrôleurs. Depuis, la traction électrique ne cesse d'évoluer et progresse dans d'autres domaines de traction, tels que l'automobile ou l'aéronautique. Cependant, dans le domaine automobile quelques tentatives, par certains côté réussies, auraient du permettre un développement plus précoce d'une solution de transport utilisant l'énergie électrique. Effectivement, dès 1890, la "Jamais-Contente" illustrée sur la figure 2.1, aurait dû ouvrir la voie à l'électrification des véhicules, suite à son record de vitesse.

Un convertisseur se définit comme un appareillage électrique permettant de transférer et mettre en forme l'énergie électrique entre une source électrique et un récepteur. Ce dernier peut transformer cette énergie électrique (machine électromécanique), la dissiper (chaleur) ou la stocker (batteries). Le convertisseur peut être piloté, et nécessite dans ce cas un organe de contrôle ou de pilotage. Il permet la transformation de l'énergie si la source et le récepteur n'utilisent pas l'énergie électrique sous la même forme (alternative ou continue), s'ils ne sont pas de même nature (tension ou courant), ou si les valeurs caractéristiques (amplitudes - fréquences) entre la source et le récepteur sont différentes.



La *Jamais-Contente* de Jenatzy, à Achères, en 1899

FIGURE 2.1: La "Jamais-Contente", premier véhicule électrique à franchir les 100 km/h , conservée au Palais de Compiègne [15].

2.1.2 Quelques exemples de problématiques de recherche autour d'un système de conversion électromécanique

Un système de conversion électromécanique peut susciter plusieurs activités de recherche. Parmi celles-ci, certaines permettent la conception de convertisseurs aux performances améliorées. La conception des convertisseurs nécessite de nombreuses études et pose des nouvelles problématiques auxquelles tentent de répondre les fabricants de semi-conducteurs. Les concepteurs de systèmes bénéficient de ces avancées et proposent des développements d'applications qui, à leur tour, suscitent d'autres interrogations. Par exemple, la disponibilité de composants en carbure de silicium comme composant commandé permet d'envisager des convertisseurs pour la vitesse variable dans des environnements à plus haute température. Par conséquent, il devient envisageable de positionner le convertisseur dans une zone, où la température ambiante est plus élevée ou pour laquelle le système de refroidissement sera moins performant. Cela peut avoir comme répercussions de définir de nouveaux matériaux qui combinés au composant actif à grand gap rendront possibles la mise en œuvre de convertisseurs pour ces zones. La figure 2.2 illustre quelques unes des problématiques qui peuvent être abordées lors du dimensionnement d'un tel dispositif. Bien que cela n'apparaisse pas dans cette figure, l'environnement d'opération de cet ensemble ou d'une partie, conditionne, oriente, ou pose, des problématiques complexes issues des sollicitations climatiques. L'une d'entre elles est la maîtrise de la robustesse du dispositif et de sa mesure.

Nous verrons dans le paragraphe suivant quels étaient les liens entre les recherches menées dans les équipes du laboratoire au moment de mon intégration et ces problématiques de recherche.

2.1.3 Liste des problématiques traitées au sein du LGP au moment de mon intégration

Du fait de son implication dans le programme PEARL, le LGP avait déjà abordé quelques unes de activités de recherche illustrées figure 2.2. Ces activités avaient

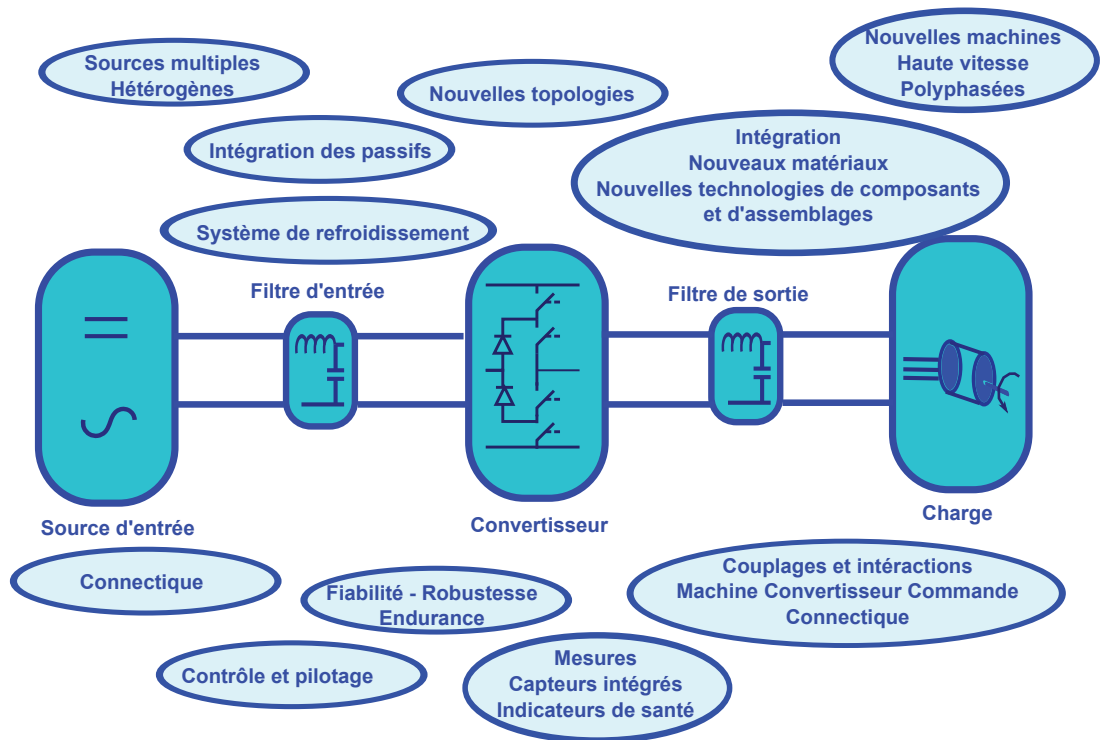


FIGURE 2.2: Les composantes de l'électronique de puissance

pour cadre le laboratoire PEARL et s'appuyaient sur le socle de compétence de l'équipe.

2.1.3.1 Positionnement de l'équipe Interfaces et Matériaux Fonctionnels (IMF)

Travaux de l'équipe. L'équipe *Interfaces et Matériaux Fonctionnels* s'intéressait de manière générale aux problèmes de surface des matériaux. En particulier, l'équipe regardait plus spécifiquement au niveau des interfaces comment s'effectuent les transferts d'énergie, que ceux-ci soient thermiques ou mécaniques. Elle avait développé des compétences en ce qui concerne la durabilité et le vieillissement des matériaux. Ces compétences ont été acquises suite à une forte demande industrielle dans ce domaine. Effectivement, leurs études concernaient les problématiques :

- des assemblages par liaisons collées ;
- des assemblages par soudage ;
- des revêtements ;
- des contacts céramiques, des frottements et usures liés à l'emploi des céramiques. En effet, cette équipe a tissé des liens privilégiés avec les acteurs industriels locaux, la Société des Céramiques Techniques et Mersen-Boostec, à travers des études sur les systèmes embarqués pour les secteurs de l'aéronautique, de l'automobile et du ferroviaire.

Partenariat avec PEARL. Dans le cadre de sa collaboration avec la société Mersen-Boostec, l'équipe IMF avait travaillé avec PEARL sur le packaging des

modules de puissance, utilisant des céramiques pour leurs propriétés diélectrique et de bonne conduction thermique. C'est également avec cette thématique qu'une thèse, commencée avec ALSTOM, a traité des problèmes de collage des céramiques sur les refroidisseurs des convertisseurs. Cette thèse a conduit à un champ thématique portant sur le vieillissement et la durabilité des matériaux à coller, puis sur les adhésifs adaptés à l'électronique de puissance. C'est dans ce cadre que l'équipe s'est intéressée au problème des assemblages collés soumis à une large amplitude de variation de la température, et a développé une solution consistant à mélanger dans le même joint deux adhésifs aux propriétés thermiques complémentaires. Un autre axe de recherche portait sur la définition et la caractérisation de nouveaux matériaux et packaging pour des applications haute température. Dans ce cadre, l'équipe s'est particulièrement intéressée au dissipateur thermique. Au cours de ces travaux, elle a caractérisé une semelle dissipatrice formée d'une couche de Nitrure d'Aluminium associée au caloporteur (SiC polychristallin), et une seconde semelle formée d'une céramique massique obtenue par procédé PECVD, dépôt chimique en phase vapeur assisté par plasma - Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition. Cette dernière technique permettait de s'abstraire des effets des ajouts de frittage qui dégradent les propriétés électriques des composants [18]. Ainsi, les activités de cette équipe au sein du laboratoire PEARL, ont concerné :

- les problèmes de vieillissement et de durabilité des matériaux utilisés dans le packaging des interrupteurs de puissance ;
- les problèmes de collage des adhésifs utilisés dans les packs et soumis à de fortes amplitudes de température ;
- l'élaboration et la caractérisation de matériaux.

Ces activités correspondaient à deux onglets Intégration, Nouveaux matériaux et Fiabilité, Robustesse de la figure 2.2.

2.1.3.2 Positionnement de l'équipe Conception Mécanique Assistée par Ordinateur (CMAO)

Travaux de l'équipe. L'équipe CMAO avait structuré sa recherche en 4 thèmes :

1. Grandes transformations thermomécaniques rapides ;
2. Mécanique des matériaux et des structures ;
3. Stratégie et comportement dynamique en usinage à grande vitesse ;
4. Fiabilité en mécanique.

C'est dans le cadre de l'un de ces partenariats que l'équipe CMAO collaborait avec le laboratoire commun PEARL. Le pôle de compétence en fiabilité mécanique a ainsi développé. De plus, l'équipe a contribué au développement de la plateforme logicielle de PEARL grâce à ses compétences en développement de code de calcul.

Partenariat avec PEARL.

Fiabilité mécanique. Le partenariat portait sur 3 thèses et un projet européen, *PORTES*. Le pôle fiabilité s'intéressait à l'interaction entre calcul stochastique et lois déterministes. A l'origine, la compétence historique du LGP était l'élaboration de modèles de comportement des matériaux, à partir de données issues de processus de tests d'identification. Ce pôle de travail s'orientait vers l'utilisation de

lois probabilistes pour compléter ce modèle. La fiabilité mécanique était appliquée suivant trois approches (correspondant à chaque thèse) aux domaines ferroviaire et aéronautique.

La première thèse concernait la fiabilité expérimentale d'un module IGBT. À partir de plans d'expériences, les paramètres qui intervenaient avec une importance considérable dans la défaillance d'un IGBT étaient identifiés. Dans cette étude, les phénomènes thermiques, mécaniques, électriques et le couplage thermomécanique étaient considérés.

La deuxième thèse contribuait à établir un modèle de comportement thermomécanique de la brasure de l'IGBT (SnAg). Il s'agit alors de fiabilité prédictive. L'objectif était de tendre à l'établissement d'un modèle de comportement thermomécanique couplé de la brasure.

Dans la troisième thèse, l'équipe a collaboré à l'étude de mise en œuvre de l'avion plus électrique, en collaboration avec Hispano-Suiza. Ce projet concernait à la fois la fiabilité prédictive et opérationnelle.

Mécanique des matériaux et structures. Dans cet axe de recherche, les chercheurs travaillaient à l'identification des lois de comportement thermomécanique des alliages de brasure, que ces lois soient définies localement ou globalement. Effectivement, on constate que les défaillances interviennent majoritairement dans les liaisons entre les matériaux. Ces lois de comportement tiennent compte de la plasticité des liaisons entre la connectique et la puce. Dans ces études, les lois de comportement étaient déduites de mesures expérimentales et permettaient d'établir des lois de probabilité de défaillances. Afin de réaliser ces essais, ils utilisaient les bancs de cyclage du laboratoire PEARL :

- cyclage actif : comportement en conduction et observation des endommagements, par exemple variation de la température interne ;
- cyclage passif : comportement thermique et thermomécanique par variation de la température externe.

Transformations thermomécaniques rapides. Dans ces activités, l'équipe participait au développement d'outils de conception pour le laboratoire PEARL. Ces outils de simulation se devaient d'être pluridisciplinaires, et étaient spécifiques au laboratoire commun. Cela a permis la conception et la mise à disposition d'un logiciel de résolution de problèmes multiphysique, multidomaine, avec prise en compte de plusieurs pas de simulation : "MulPhyDo".

Synthèse. Ces activités correspondaient à un onglet Fiabilité, Robustesse de la figure 2.2. L'autre activité a concerné la mise en œuvre d'un outil de simulation multiphysique dont l'utilisation aurait pu aider à la conception de modules de puissance.

2.1.3.3 Positionnement de l'équipe Production Automatisée (PA)

Travaux de l'équipe. Dans l'équipe PA du LGP, un thème de recherche concernait le Mouvement Robotique et la Réalité Virtuelle (MRRV). Les personnes liées à ce thème travaillaient sur les aspects de la modélisation et de l'optimisation du mouvement humain, de la commande pour le déplacement des robots, de stratégies

de coopération homme-machine. Les problématiques concernaient, pour le mouvement humain, la simulation de mouvements d'opérateurs humains sur postes de travail, et pour la réalité virtuelle et augmentée, les étapes pour le montage ou démontage d'un convertisseur en vue de sa maintenance.

Collaborations engagées avec PEARL. Cette équipe travaillait dans le domaine de la réalité virtuelle sur la mise en œuvre d'outils pour l'aide à la conception virtuelle pour la manipulation d'un module de puissance dans un environnement de réalité virtuelle. Cet axe de recherche prenait forme à partir de deux voies complémentaires de recherche :

1. La gestion de l'assemblage des composants d'électronique de puissance pour,
 - gérer leurs caractéristiques géométriques ;
 - optimiser l'agencement des composants lors de la phase de prototypage.
2. L'aide au prototypage en proposant une simulation dégradée des caractéristiques physiques des composants.

Cette deuxième voie paraissait particulièrement prometteuse. Elle pouvait permettre de considérer différentes technologies, pour les interrupteurs, pour le système de refroidissement, et vérifier si pour une première estimation, le produit final présentait des incompatibilités majeures.

Ces activités ne sont pas rattachées aux activités potentielles illustrées figure 2.2.

2.1.4 Conclusions sur le contexte de recherche du LGP en vue du développement d'un thème de recherche spécifique

En premier lieu, les activités menées par le LGP autour de l'électronique de puissance concernaient, l'Intégration et plus particulièrement la caractérisation des matériaux, la simulation thermomécanique des matériaux et des modules et la Fiabilité et l'analyse de Robustesse essentiellement par cyclage passif. Compte tenu de ces éléments et de mes compétences, en concertation avec le directeur du laboratoire et les responsables des activités de recherche, un rapport détaillant les possibilités de recherche a été établi [67]. En premier lieu, cette proposition initiale concernait la poursuite des actions débutées dans la période précédente du contrat quadriennal du laboratoire. Ces actions ont été présentées de façon synthétique ci-dessus et peuvent être retrouvées dans le rapport quadriennal du LGP pour la période 2003-2007, [19]. En deuxième lieu, cette proposition permettait d'élargir le spectre des activités de recherche du LGP à d'autres thèmes de la figure 2.2. C'est ainsi qu'une thématique transversale autour des Systèmes Mécatroniques de Puissance (SMP), dans laquelle je pouvais intégrer des recherches en cours au LGP, a été proposée, figure 2.3.

Les différentes possibilités de travail ont fait apparaître un besoin pour le développement d'une approche multiphysique, appliquée aux problématiques de l'intégration de puissance et de l'analyse de fiabilité des assemblages. Notons que les compétences du LGP ne pouvaient pas permettre d'aborder les problématiques liées au développement de composants en silicium et, par conséquent, les recherches se limiteraient à l'assemblage. Par ailleurs, relativement à mes activités de recherche

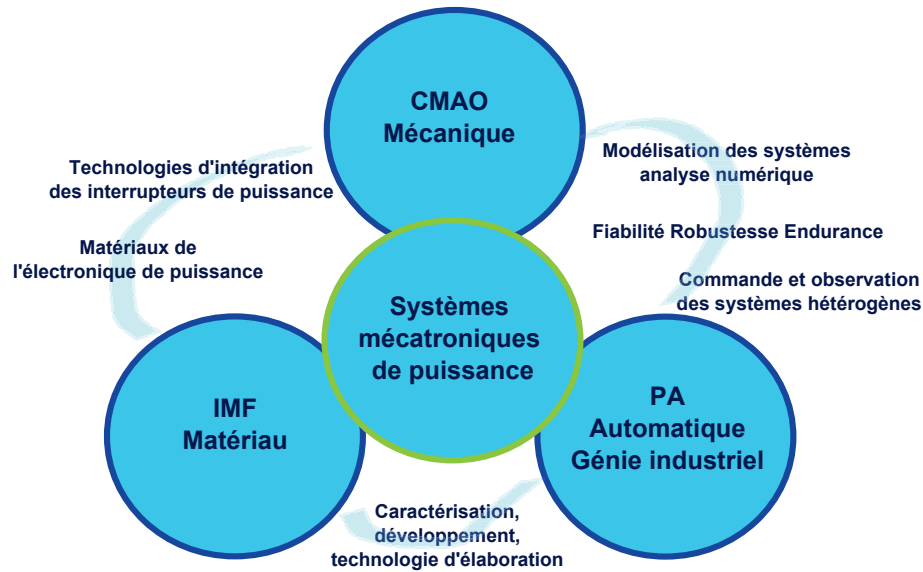


FIGURE 2.3: Formalisation du concept SMP

passées, le développement d'un thème de recherche en contrôle-commande des machines électriques était possible, mais pouvait nuire à court terme à mon investissement sur les thématiques définies dans le profil de ce poste. Nous avons donc décidé de ne pas inclure dans le projet SMP les activités de contrôle commande des machines électriques.

2.2 Vers une démarche originale de recherche

2.2.1 Description de la proposition

Compte tenu du potentiel de collaboration en terme de propositions de travail, j'ai proposé une recherche pluridisciplinaire portée par un socle de méthodes et d'outils permettant d'aborder,

- d'une part des problématiques telles que :
 - la modélisation comportementale ;
 - le pilotage et la mesure ;
 - les interactions multiphysiques ;
 - les caractérisations expérimentales ;
- et d'autre part les applications diverses des systèmes mécatroniques, que ceux-ci soient embarqués ou non, qu'ils fonctionnent en environnement critique ou non.

Comme illustré par la figure 2.4, les méthodes mises en œuvre sont :

- les méthodes de modélisation ;
- l'analyse et la mise en œuvre des modèles pour une simulation comportementale ;
- l'intégration en électronique de puissance et les procédés de mise en œuvre ;
- les mathématiques et l'automatique appliquées ;
- le développement de bancs expérimentaux de caractérisation.

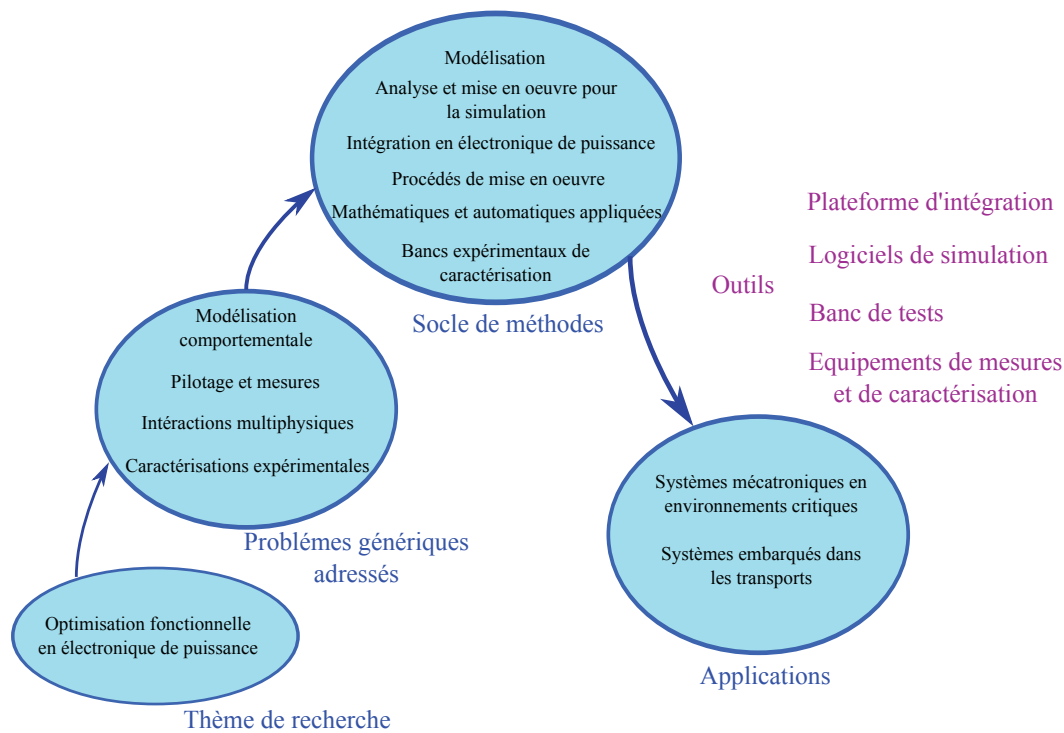


FIGURE 2.4: Synthèse des problématiques de recherche proposées et du socle de méthodologique.

Au cours de cette période, l'équipe Production Automatisée s'est scindée en deux. La nouvelle équipe Décision, Interopérabilité pour la Dynamique des Systèmes (DIDS), dans laquelle j'ai été affecté, a ainsi accueilli mes propositions et a aidé à l'émergence de propositions qui s'affinaient. Ce nouveau travail de réflexion a favorisé l'éclosion de recherches collaboratives intra-équipe autour des thèmes de l'automatique, du diagnostic et de la surveillance, appliqués aux domaines de l'électronique de puissance. Ces nouvelles propositions de recherche sont illustrées figure 2.5. C'est sur la base de la combinaison du schéma initial et des nouvelles réflexions, que sont présentés ci-après, les 3 axes de recherche et les verrous scientifiques associés que j'ai choisi d'aborder. Ainsi, la multiplicité des collaborations sollicitées et possibles grâce à cette approche, et les encadrements scientifiques variés, me permettent de revendiquer une activité de recherche dont les objets applicatifs sont les **systèmes mécatroniques de puissance**, et dont l'objectif global porte sur l'**optimisation fonctionnelle**.

2.2.2 Verrous scientifiques et technologiques associés

2.2.2.1 Intégration et interactions en électronique de puissance

Quelques problématiques liées à l'intégration. Comme illustré sur la figure 2.2, les problématiques et les thématiques d'intérêt sont multiples. En effet, alors que le premier réflexe en électronique de puissance a été de penser l'architecture (topologie de convertisseur) comme une réponse à la densification de puissance, des voies nouvelles autorisées par l'avènement des composants grand gap sont créées. Il est d'ailleurs remarquable de constater que la technologie, en évoluant, appelle de nouveaux développements sur des problématiques plus classiques. L'intégration

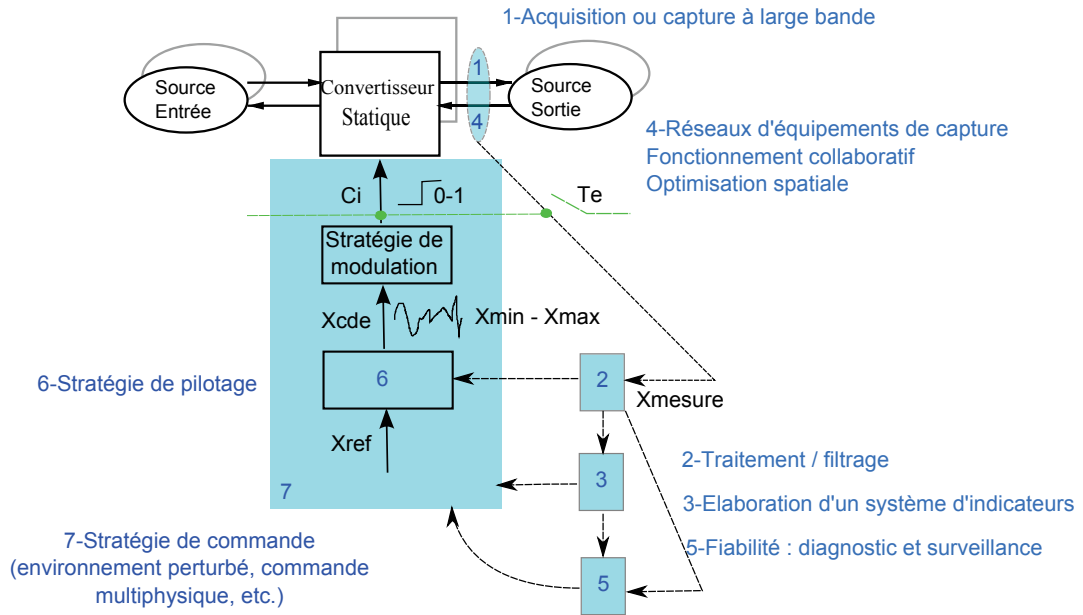


FIGURE 2.5: Positionnement thématique de l'équipe DIDS

de composants grand gap est en ce sens intéressante. Effectivement, leur capacité à fonctionner à plus haute température oblige à reconsidérer les alliages de brasure traditionnels, dont la fiabilité est parfaitement éprouvée [57]. Ces mêmes composants sont à l'origine des développements en cours concernant les matériaux isolants [74] et les substrats. Ce sont eux qui, parce qu'ils fonctionnent à plus haute fréquence, vont impacter le dimensionnement des filtres passifs. Et ce sont encore eux qui obligeront à réaliser des études des interactions électromagnétiques plus pointues [37]. Le champ des problématiques est vaste et il est difficile de les hiérarchiser. Les problématiques sont relatives aux choix des matériaux, à la conception d'architectures à fort rendement, aux procédés d'assemblage des briques technologiques et à l'évaluation de leur robustesse ou durée de vie. Il est cependant évident que ces problématiques ont des exigences communes. Elles doivent conduire à des modules miniaturisés, à très haut rendement, et dont la fiabilité ou la robustesse a été vérifiée. Ces exigences sont à corrélérer directement avec l'environnement d'utilisation des modules. La réponse faite ne sera pas identique quand il s'agira de mettre en œuvre une structure multicellulaire imbriquée haute tension à IGBT, si possible *SiC*, en environnement maritime, ou un hacheur moyenne tension à structure entrelacée, pour un environnement moteur en aéronautique.

Quelques problématiques liées aux phénomènes d'interactions. Afin de répondre aux questions liées à l'augmentation de la densité de puissance des appareillages et des applications, le concepteur réalisera des simulations, comparera des résultats ou des expériences pour valider ses procédés et propositions d'architectures [62]. Aujourd'hui, le LGP travaille sur les étapes de modélisation et de simulation comportementale. Il s'agit d'être en capacité de prédire le comportement du module (et plus généralement d'un système) face à un ensemble de sollicitations, ces dernières incluant l'environnement. Ainsi, le système est décrit par un modèle qui cherche à établir les équations de la physique, qui vont représenter au plus juste le comportement à surveiller. La stratégie de recherche du LGP consiste à prendre

en compte l'ensemble des domaines de la physique, et à développer des modèles qui doivent interagir entre eux, afin de rendre compte des couplages multiphysiques réels. L'accent est souvent porté, quand cela est possible, sur le développement de modèles qui laissent apparaître les paramètres géométriques, afin de discuter leur influence sur tel ou tel phénomène. Cette démarche implique la mise au point de plusieurs méthodes de modélisation et l'utilisation de plusieurs outils de simulation, ce qui constitue des problématiques majeures de recherche.

Verrous et outils associés.

Travaux en intégration. Les verrous associés en intégration en électronique de puissance sont :

- quels nouveaux matériaux et nouvelles technologies peuvent permettre l'amélioration :
 - de la durée de vie, (ou de la robustesse) ?
 - du rendement ?
 - de la compacité ?
 - du ratio, puissance électrique convertie sur poids ?
- quelles nouvelles architectures de modules répondent aux mêmes questions ?
- quelles autres fonctions peuvent aussi être intégrées lors de la fabrication d'un module de puissance (dissipateur thermique, éléments passifs, drivers, protections, etc.) ?

Les outils que nous mettrons en œuvre pour aborder ces problématiques impliquent les procédés d'intégration. Cela concerne, tous les appareillages nécessaires à la conception d'un module ou composant de puissance. Que ceux-ci soient, théoriques, dimensionnement-choix-vérification des propriétés des matériaux ; numériques, conception virtuelle des modules ou simulation thermomécanique des assemblages ; ou expérimentaux, définition et mise en œuvre des procédés et leurs qualifications.

Modélisation et simulation des interactions. Les verrous associés lorsqu'on veut prendre en compte les interactions notamment en électronique de puissance sont :

- quelle est l'échelle, la dimension et le niveau de description des modèles de natures multiphysiques à considérer ?
- quels sont les paramètres et variables d'intérêt, et comment prendre en compte les relations entre les domaines de la physique, dans le cas de modèles multiphysiques ?
- quels simulateurs utiliser pour obtenir ces comportements ?

Les outils utilisés pour traiter cette problématique concerneront les méthodes de modélisation. La notion de validité du modèle sera discutée par comparaison des résultats de simulations et de relevés expérimentaux. Les modèles seront analytiques et issus des lois de la physique, et exprimés sous forme de modèle d'état ou de circuit électrique équivalent. Des travaux menés afin de répondre à ces problématiques seront détaillés au paragraphe 3.1.3.

2.2.2.2 Caractérisation expérimentale

Quelques problématiques de la caractérisation expérimentale. La vérification de la durée de vie ou de la robustesse d'un assemblage, en électronique de puissance, fait partie des évaluations que les utilisateurs finaux souhaitent avoir. Ceci est attesté par les nombreuses études sur ce sujet, par exemple [5] ou [47]. L'analyse des normes permet de décrire les types de tests auxquels les assemblages doivent être soumis et les indicateurs à relever pour établir des modèles de durée de vie pertinents. Une fois décrits les environnements et les sollicitations de tests, se posent les problématiques de caractérisation de ces assemblages. Il est courant de procéder à des analyses thermomécaniques des assemblages par des contrôles non destructif et destructif. Nous avons choisi de compléter ces analyses par des mesures électriques, pour surveiller l'évolution de paramètres sensibles. Parmi les problématiques qui se posent alors, certaines nécessitent le développement de solutions spécifiques :

- adéquation entre appareillage de mesure électrique et environnement de sollicitation climatique (passage de câbles, si environnement dépressurisé, par exemple) ;
- préparation des échantillons pour des contrôles de type optique ou microscopie à balayage, avec des échantillons extrêmement durs de type Si_3N_4 pour les substrats, ou SiC pour les composants.

Outre les problématiques et verrous techniques, une analyse de la durée de vie d'un système appelle des verrous scientifiques liés aux plans d'expériences et à l'exploitation de données statistiques.

L'utilisateur de modèles trouvera aussi un intérêt à procéder au développement de bancs de caractérisation, qui lui permettront de garantir ainsi la pertinence de ses hypothèses de modélisation. Dans ce contexte, la multiplicité des domaines de la physique en jeu, pose alors des questions liées à l'adéquation des sollicitations et des appareillages de mesures. Citons quelques exemples rencontrés dans nos recherches :

- comment rendre compte du déplacement de fils de bonding, sous l'influence conjointe de forces électromagnétiques et des dilatations thermiques, sous sollicitation de courant de type MLI ?
- comment mettre en œuvre une mesure très fine des interactions conduites et rayonnées, à fonctionnement nominal d'un module de puissance embarqué relié à un moteur électrique ?

Verrous et outils associés. Les verrous associés sont :

- le développement de banc de sollicitation et les techniques de caractérisation pour des grandes campagnes de test (grand nombre de systèmes testés, longue durées, etc.) ;
- le développement de bancs et techniques de caractérisation spécifiques.

Ces problématiques ont été abordées au cours de nos travaux de recherche. Ces travaux seront possibles par la mise en œuvre de bancs de vieillissement et de caractérisation, spécifiques. Leur mise au point nécessite la connaissance des propriétés matériaux, du fonctionnement de l'objet en test, et de l'environnement applicatif. Ces développements seront associés aux méthodes de détermination et de caractérisation de distributions statistiques. Les travaux effectués afin d'aborder le premier verrou feront l'objet du paragraphe 3.2.2.

2.2.2.3 Pilotage et mesures pour l'électronique de puissance

Quelques problématiques liées aux stratégies de modulation. Certaines applications telles que le ferroviaire, l'aéronautique ou l'automobile, nécessitent des convertisseurs continu - alternatif, *DC-AC*, appelés onduleurs. Plus spécifiquement, pour les besoins de la conversion d'énergie à réaliser, ces convertisseurs permettent de raccorder des sources de tension continues à des charges ou récepteurs, se comportant comme des sources de courant alternatives. Dans de nombreuses applications, ces dernières sont des machines électriques fonctionnant en moteur. Si l'application nécessite de faire varier la vitesse de rotation du moteur par la maîtrise de l'énergie transférée entre la source et le récepteur, alors on est en présence d'un variateur électronique de vitesse. Ce type de convertisseur permet d'obtenir, par une commande adaptée, des valeurs moyennes de tension et des fréquences de signaux de sortie variables [27], [26]. Tous ces domaines d'application ont engendré et suscitent encore une multitude d'études qui développent, testent et proposent différentes structures de conversion des onduleurs de tension [40] ou différents algorithmes pour les piloter [73]. Compte tenu des acteurs et du contexte de recherche du LGP, nous avons choisi de travailler sur la conception de modèles et de méthode de pilotage des convertisseurs. Effectivement, à notre connaissance, l'élaboration de stratégie de modulation ne précisait pas de manière explicite l'ensemble des solutions admissibles pour la modulation et ce à partir de l'équation initiale du modèle de convertisseur mis en œuvre. De plus, il nous paraissait pertinent de démontrer comment explorer cet ensemble par un paramètre mathématique afin d'optimiser le fonctionnement du système complet.

Afin de travailler dans un cadre où des modélisations linéaires des convertisseurs était valables, nous avons choisis les hypothèses suivantes :

- durant la période de commutation, la variation des courants dans la charge est constante. Par conséquent, on peut ne s'intéresser qu'à la valeur moyenne du signal de tension de sortie ;
- pendant la transition de tension le courant est inchangé ;
- à chaque période de commutation l'interrupteur change d'état ;
- le signal de sortie vaut 1 si la modulante est plus grande que la porteuse, sinon il vaut 0.

Il est à noter que le fonctionnement en sur-modulation n'était pas pris en compte dans les premiers modèles établis. Ce qui restreignait le fonctionnement du convertisseur dans sa zone de linéarité. Implémenter une stratégie de modulation revient à combiner des références (généralement issues d'un système de régulation en boucle fermée), qui représentent, soit un jeu de séquences d'état des interrupteurs, c'est le cas des modulations vectorielles de type Space Vector Modulation (SVM), soit des rapports cycliques pour un bras d'onduleur (ratio du temps de fermeture d'un interrupteur sur la période de commutation), dans le cas des Modulations de Largeur d'Impulsions (MLI). Le modèle récepteur considéré est régi par une équation dans l'espace d'état telle que :

$$\dot{I} = AI + BV \quad (2.1)$$

où I le courant, et V la tension sont des vecteurs colonnes. A et B sont des matrices contenant les paramètres résistifs et inductifs, lorsque la charge est assimilée à un réseau d'impédance inductif. Le modèle adopté pour le convertisseur est un modèle moyen. Avec les hypothèses ci-dessus, et pour un schéma de modulation de type

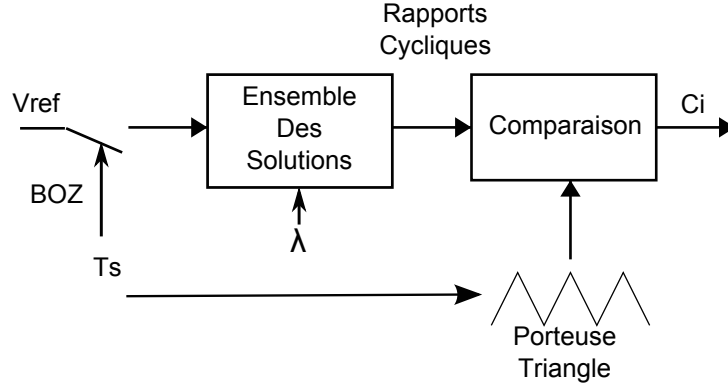


FIGURE 2.6: Schéma d'une Modulation de Largeur d'Impulsion.

MLI, la relation liant les rapports cycliques à la tension de sortie de l'onduleur est du type :

$$V = kM\alpha . \quad (2.2)$$

Avec k un coefficient lié à la structure du convertisseur utilisé, ainsi qu'à la tension du bus continu E . V est la tension moyenne de sortie de l'onduleur appliquée à la charge. α est le vecteur des rapports cycliques et M une matrice de dimension adaptée. Il est évident que l'expression 2.2 est un système linéaire. Dans la configuration d'un onduleur triphasé à 2 niveaux (structure que nous qualifierons de base dans la suite du mémoire), la matrice M trouvée est très connue :

$$M = \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} . \quad (2.3)$$

Il est donc tentant d'inverser cette relation pour l'insérer dans le cadre d'une boucle de réaction d'un système asservi. Cette volonté nous a conduit à analyser le déterminant de la matrice M . Or celui-ci est nul. D'où la conclusion que l'inverse de M n'existe pas.

Cependant, ce système est déjà mis en œuvre et utilisé très largement. Effectivement, la relation

$$\text{rang}[M] = \text{rang}[MV] = 2, \quad (2.4)$$

traduit le fait que le système est compatible, donc admet des solutions, et comme $\text{rang}[M] < \text{nombre de lignes de } V$, il en existe une infinité. Ce qui explique l'intérêt de comparer les modulations les unes par rapport aux autres, comme par exemple dans [11], car les rapports cycliques obtenus permettent de générer différents schémas de modulation de largeur d'impulsion. Cela consiste à combiner l'information de 2 signaux (la porteuse et la modulante) en un seul, comme illustré par la figure 2.6. Dans notre configuration, les ordres de commande sont obtenus et envoyés aux ports de commande des interrupteurs. Ces ordres de commande sont porteurs des informations nécessaires au fonctionnement de l'onduleur :

- l'instant d'amorçage $t_{\text{amorçage}}$ et l'instant de blocage t_{blocage} de chaque interrupteur ;
- la période de commutation T_s .

Par combinaison, le rapport cyclique $\frac{t_{ON}}{T_s}$ est obtenu, où $t_{ON} = t_{blocage} - t_{amorçage}$. Il représente la grandeur que l'on cherche à appliquer à la tension de sortie de l'onduleur.

Dans ces solutions empiriques, les erreurs entre variables mesurées I et variables de référence I_{ref} sont corrigées pour donner les tensions de références V_{ref} (boucle de réaction).

A l'intérieur du schéma de modulation, les tensions de références sont adaptées (par le biais de coefficients) et corrigées par l'addition de valeurs, notées ici λ . Cela permet d'obtenir des solutions particulières pour les rapports cycliques de références α . Démontrer rigoureusement qu'il existe une infinité de solutions pour le choix de λ , a fait l'objet d'une première publication sur le sujet [69]. Notre démarche a consisté à mettre en place une méthode mathématique qui permette de générer l'ensemble des solutions pour les rapports cycliques, puis de guider l'utilisateur vers une solution optimale, par le choix d'un λ .

Quelques problématiques liées à la mesure pour la décision. Lorsque le thème des modèles de comportement est abordé, il est légitime de se questionner quant à la pertinence des résultats de simulations issus de l'étape de modélisation. Bien souvent, le terme monitoring est employé pour décrire comment, à partir d'une mesure, on peut reconstruire et vérifier la dynamique d'une variable ou d'un paramètre d'intérêt. Pour la température ou l'enclenchement d'un mécanisme de défaillance interne des modules d'électronique de puissance, cela passe souvent par la surveillance de l'évolution, d'un courant de fuite, d'une tension, ou de la mesure indirecte de la résistance à l'état passant, des composants de puissance. A des fins de surveillance, il serait intéressant de connaître avec un nombre minime de mesures, la répartition de la température en tout point du module ou sa déformation. Se pose alors le problème de comment implémenter des capteurs et comment traiter leurs données. C'est l'objectif de travail du programme CAPTIF¹. Effectivement, il est fait le constat que de rares capteurs instrumentent les modules de puissance. Ces derniers sont essentiellement des capteurs de température de type thermocouples ou des capteurs de courant de phase. Nous excluons de notre propos tous les capteurs rapportés sur le silicium du composant, pour ne parler que de capteurs rajoutés lors des étapes de packaging. Une analyse de l'état de l'art pointe rapidement l'intérêt d'avoir une connaissance accrue et plus fine de certaines variables au sein du volume d'un module. Ce même état de l'art fait apparaître que les capteurs mécaniques les plus intéressants sont les composants Si eux-mêmes (paramètres électriques sensibles à la déformation), et que des capteurs de courant plus intégrés pourraient être faits à base de matériaux magnéto-résistifs. Dans le premier cas, la problématique revient à comment interrompre le fonctionnement normal de l'interrupteur pour en faire une caractérisation, et dans le second cas, les capteurs ne sont pas disposés sur l'ensemble du module et ne concernent que le courant de phase, et pas la répartition en densité de courant. Nous avons donc choisi de disposer un réseau de capteurs et de traiter les données, afin d'en extraire des informations pertinentes pour *in fine* construire un indicateur de santé.

Verrous et outils associés.

1. Des informations complémentaires seront trouvée § 4.3.2.4

Stratégies de modulation. Les verrous associés dans le cadre des stratégies de modulation des convertisseurs statiques sont :

- comment obtenir un ensemble mathématique de solution pour les stratégies de modulation ?
- comment révéler les degrés de liberté et définir leurs expressions en vue d'un pilotage optimal, ou de la mise au point de nouvelles stratégies ou schémas de modulation ?

Les outils sur lesquels s'appuieront nos développements sont essentiellement théoriques. Nous avons développé une méthode pour répondre à ces problématiques sur la base d'outils mathématiques. Ces outils sont l'inverse généralisée, le produit tensoriel et plus généralement tous les outils de l'algèbre linéaire. Ces verrous et outils feront l'objet des travaux décrits au paragraphe 3.3.1.

Mise en œuvre d'une mesure. Les verrous associés pour la mise en place d'une mesure pour la décision sont :

- quels types et nouvelles technologies de capteurs intégrer au cœur d'un module de puissance ?
- comment acquérir une grande quantité d'informations et la traiter pour en extraire des macro-indicateurs pertinents sur l'état de santé d'un module ou d'un convertisseur de puissance ?

La première problématique nécessite la mise en œuvre de modèles par circuit électrique équivalent adaptés à une large bande de fréquence. Afin de valider ces représentations, nous utiliserons des méthodes de caractérisations issues du domaine de la compatibilité électromagnétique : représentation de la variation des impédances en fonction de la fréquence, paramètres S. Plus généralement, il s'agira d'employer tous les outils permettant un passage entre représentations temporelles et représentations fréquentielles. Afin de concevoir et intégrer les capteurs électromagnétiques au sein de modules de puissance, les technologies et procédés d'intégration de la plateforme PRIMES seront sollicités. La conception de bancs de mesure pour la caractérisation et l'extraction des mesures sera également abordée. Ces aspects feront l'objet des développements du paragraphe 3.3.2.

2.3 Conclusions

Les études amorcées au sein du LGP avant mon arrivée et les possibles collaborations déterminées lors des premiers mois de mon intégration au sein du laboratoire, ont démontré qu'il existait une opportunité de création d'un thème de recherche au sein du LGP. Il s'agissait donc de poursuivre et développer des thématiques de recherche, avec pour objectif la caractérisation de l'état de santé d'un assemblage de puissance et de son efficacité, tout en tenant compte de son insertion dans une architecture matérielle de conversion de l'énergie électrique. Ces recherches ont pour finalité l'optimisation fonctionnelle du système.

C'est donc dans le cadre de la reconversion thématique que j'opérai, que 3 axes de recherche ont été inclus au sein du thème Surveillance identification et accommodation aux modes de défaillance, de l'équipe DIDS. Ces axes ont été notamment affichés lors du précédent contrat quinquennal. Les trois axes ainsi définis sont :

- les défis de l'intégration et les interactions entre phénomènes physiques au sein des modules et composants de puissance ;
- la caractérisation expérimentale ;
- le pilotage et les mesures en électronique de puissance.

Au regard des problématiques déjà traitées au sein du LGP, la première proposition est une suite évidente aux travaux menés au préalable. Notons, cependant, que mon arrivée permettait de prendre en compte les effets électriques ou les sollicitations réelles rencontrées par les différents éléments de l'assemblage. Le second axe a été en grande partie nouveau, dans le sens où les procédures d'expérimentation ne concernaient à mon arrivée que les caractérisations thermomécaniques. Les tests de vieillissement effectués à ce moment là n'étaient que passifs. La dernière proposition, appuyée par des compétences en automatique très reconnues, est originale dans le sens où elle a pour ambition d'appliquer des méthodes nouvelles au champ de l'électronique de puissance.

La mise en œuvre des 3 axes est justifiée, car après avoir réalisé un composant intégré et éprouvé sa robustesse, il est naturel de vouloir le piloter et le caractériser en fonctionnement dans une architecture de conversion. Avoir la possibilité de travailler simultanément sur ces trois axes a été une réelle opportunité. Ainsi, j'ai pu mieux cerner les contraintes qu'une décision dans un axe faisait porter aux autres axes. Par cette transversalité, la recherche en électronique de puissance du LGP a pu trouver un positionnement thématique. Ce positionnement est confortable pour la mise en œuvre de collaborations, notamment internes, et complémentaire du positionnement des grands laboratoires des régions voisines. En outre, par son caractère applicatif, il s'inscrit dans la politique de partenariat industriel du laboratoire.

Chapitre 3

Analyses et études pour une optimisation fonctionnelle en électronique de puissance

3.1 Intégration et interactions en électronique de puissance

3.1.1 Contexte

Lorsqu'on aborde les problématiques de l'intégration en électronique de puissance, un mode de description de l'assemblage est plus ou moins explicitement adopté. Une approche simpliste, mais évidente, consisterait à analyser et lister les différents matériaux présents, ou ceux qui vont être mis en œuvre dans un assemblage de puissance, comme illustré sur la figure 3.1.

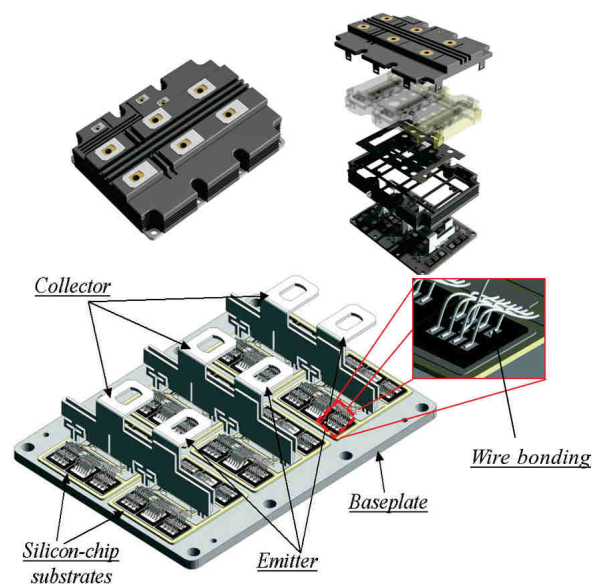


FIGURE 3.1: Vue éclatée d'un module de puissance pour application ferroviaire [23].

A chaque élément de l'assemblage décrit, on fait correspondre un matériau.

La liste de ces éléments permet d'établir les limites d'utilisation des différents matériaux, leurs interfaces ainsi que les compatibilités entre matériaux. Le mode de description retenu dans ce mémoire, consiste à avoir une approche plus globale, qui liste les fonctions attendues par les différents agencements ou couches, puis établit les contraintes subies par ces éléments avant de regarder l'adéquation des matériaux associés, d'une part, et des procédés de mise en œuvre, d'autre part. Ainsi, une représentation schématique d'un module de puissance conduit à considérer quatre fonctions principales des structures en œuvre au sein d'un module de puissance :

- la fonction de conducteur électrique ;
- la fonction de tenue mécanique, pour maintenir les structures ;
- la fonction d'isolant, dont le rôle est de protéger contre le milieu environnant (humidité, poussières, ou isolant électrique) ;
- la fonction d'évacuation des calories.

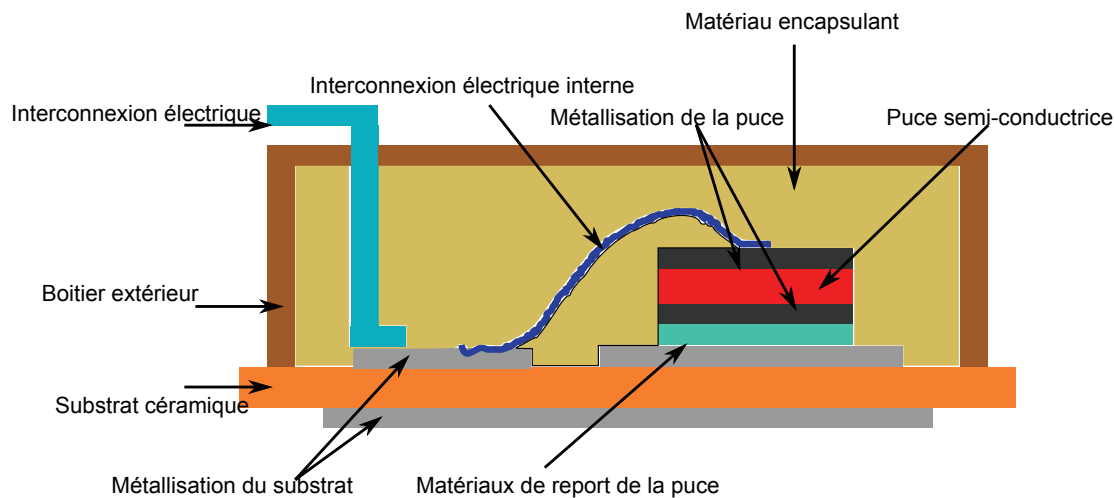


FIGURE 3.2: Schéma de principe d'un assemblage de puissance.

L'analyse d'un schéma simplifié, mais représentatif des éléments qui constituent un module d'électronique de puissance, permet de lier ces fonctions aux éléments puis plus tard au choix des matériaux et aux géométries, figure 3.2. Il est alors constaté que certains éléments jouent un rôle dans plusieurs fonctions. C'est notamment le cas des matériaux de report de la puce, qui maintiennent cette dernière sur son substrat et doivent conduire l'électricité, ainsi que le flux de chaleur, figure 3.3. Chacune de ces fonctions peut trouver des déclinaisons différentes selon la nature de la physique concernée. Effectivement, un conducteur concerne le passage du courant électrique, il doit avoir en général une résistance très faible lors du fonctionnement. La fonction de conducteur peut aussi être employée dans le cas d'un conducteur thermique (ou dissipateur), dont le rôle est d'évacuer les calories libérées lors du fonctionnement. La tenue mécanique peut concerner tout autant les modes de liaison des modules aux systèmes de refroidissement, ou les alliages de matériaux mis en œuvre pour maintenir la puce semi-conductrice sur un substrat. Enfin, la fonction d'isolant nomme autant l'isolation électrique, lorsqu'il est nécessaire de garantir une tenue en tension entre deux conducteurs portés à des potentiels différents, que l'isolation à l'air ambiant, afin d'éviter la possible oxydation des surfaces lorsqu'il y a présence d'oxygène, que la barrière formée contre l'intrusion de poussières au sein d'un module.

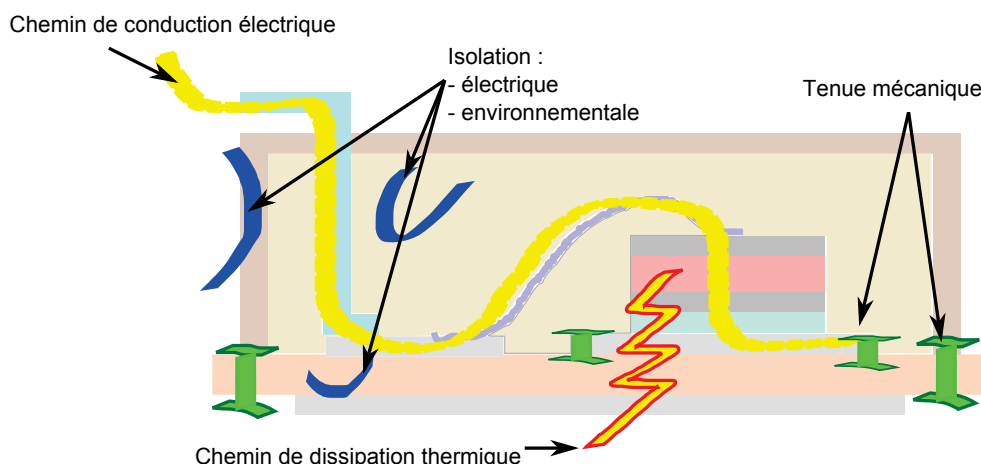


FIGURE 3.3: Illustration des fonctions réalisées par les éléments d'un module.

Pendant quelques temps, l'approche de conception des assemblages de puissance a été réalisée en confiant l'étude des différentes fonctions à des spécialistes d'un domaine particulier. Ainsi, des champs disciplinaires tels que la thermique, la mécanique et l'électrique pouvaient être abordés de manières quasi-indépendantes. Cependant, la densification des appareillages électriques a entraîné des problématiques nouvelles et pluridisciplinaires, dues, à l'hybridation des systèmes, et à l'augmentation de la puissance électrique embarquée. Ceci est particulièrement remarquable dans les applications du domaine des transports, initialement dans les domaines ferroviaire puis aéronautique. Ceci a engendré une réflexion plus globale et le besoin de procéder à une optimisation simultanée des fonctions. A titre d'illustration, il est aujourd'hui évident que, dans le cas d'un assemblage en électronique de puissance, le choix d'une puissance et d'une fréquence de fonctionnement détermine la technologie de semi-conducteur retenu, ce qui impacte directement le dimensionnement des systèmes de refroidissement puis la température de fonctionnement et donc, le choix des matériaux et les contraintes thermomécaniques subies. De plus, au-delà des contraintes internes engendrées par le fonctionnement, il faut aussi considérer que cet assemblage est soumis à un environnement extérieur qui peut être sévère. Ces contraintes externes peuvent également avoir une influence sur la conception et le dimensionnement d'un module (par exemple, quel choix de matériau pour éviter un changement d'état ou de phase si la température de fonctionnement est élevée). Quand cette démarche est employée, elle permet des réalisations aux performances caractéristiques, [70]. Par conséquent, à l'image de ce qui peut être fait en micro-électronique [32], les développements de modules d'électronique de puissance proposent des approches, multi-outils et multiphysiques, qui nécessitent de prendre en considération simultanément plusieurs champs de la physique, notamment les trois disciplines précédemment nommées.

C'est sur ce principe, illustré sur la figure 3.4, que la démarche d'analyse et d'étude pour une intégration optimale en électronique de puissance est adoptée. Cela conduit à structurer les études autour de l'analyse des interactions, de la modélisation multiphysique et de la simulation comportementale. Enfin, l'ultime étape consiste à rassembler ces résultats afin de les exploiter.

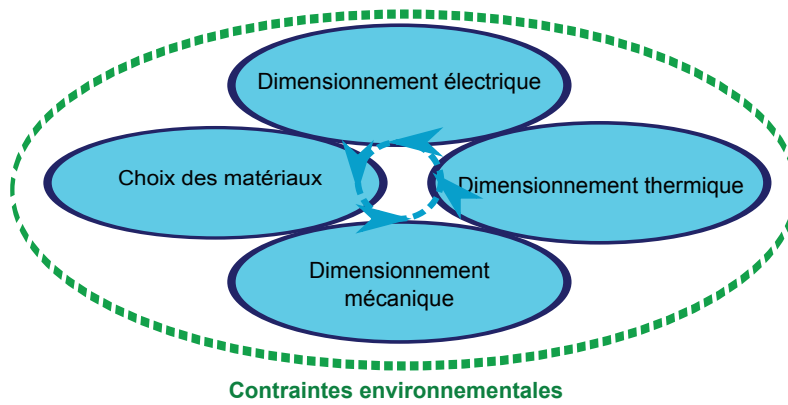


FIGURE 3.4: Illustration des liaisons entre contraintes - dimensionnement - choix, pour la réalisation optimale d'un module de puissance.

3.1.2 Analyse des interactions

En préalable de toute démarche d'investigation d'une meilleure solution, un bilan des spécifications et des attentes, ainsi qu'un état de l'art de l'existant doit être établi. Cette pré-étude constitue, pour qui veut aborder les approches multiphysiques, une étape cruciale pour la structuration du travail de recherche. Dans cette partie, le lecteur trouvera une illustration de propositions d'analyse des interactions. Deux exemples seront abordés : un système complexe, puis un système plus élémentaire.

3.1.2.1 Analyse pour un système complexe mettant en œuvre une électronique de puissance

Dans le cadre de la thèse CIFRE de José Ioav Ramos-Chavez (annexe A.2), intitulée "Conception d'ensembles mécatroniques à haute fréquence de fonctionnement : optimisation des conditions d'interactions électromagnétiques et multiphysiques entre la machine et le convertisseur", nous avons été amenés à réfléchir aux interactions potentielles entre les ensembles électronique de puissance, électronique de commande, connexions de puissance et un moteur à haute vitesse de rotation. Dans cette étude, les spécifications du système à étudier laissaient apparaître les futures problématiques, traduisant les tendances de conception en la matière :

- actionneurs électromécaniques en rotation au-delà de $50\,000\text{ tr/min}$;
- électronique de commande avec des pics de courant de 40 A , associés à des temps de montée ou de descente de quelques centaines de nanosecondes ;
- des architectures embarquées compactes.

Rappelons que dans une architecture type pour la variation de vitesse par électronique de puissance d'un actionneur électromécanique, différents composants sont à dimensionner, figure 3.5¹. Il s'agit notamment, de la structure d'électronique de puissance et de l'actionneur électromécanique, mais aussi des câbles de puissance, du choix du système de commande, des carters de protection et de maintien, des systèmes de refroidissement, etc. Ainsi, chaque choix effectué dans la chaîne de dimensionnement des composants du système, impacte les composants auxquels il est relié, mais plus généralement le système dans son ensemble. Dans l'exemple ci-

1. Certaines images sont issues des sites : [31] [30] [61] [34].

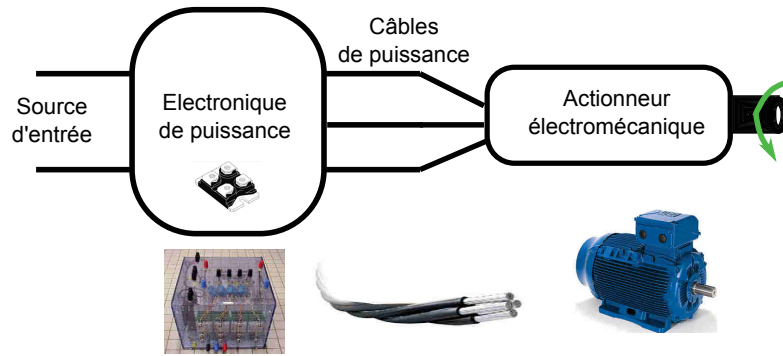


FIGURE 3.5: Illustration d'une architecture de conversion électromécanique.

dessus, compte tenu des fréquences de rotation, et donc des fréquences de signaux électriques d'alimentation, les capacités et inductances parasites étaient préjudiciables. Ces dernières étaient les conséquences des choix effectués lors de la phase de bobinage du moteur électrique, du choix de matériaux, de la structure de l'actionneur électromécanique, etc. Ces éléments parasites faisaient apparaître des surtensions et surintensités potentiellement détériorantes, du fait de leurs combinaisons à des commutations importantes de la tension et des courants au sein de la structure d'électronique de puissance. Ceci est illustré par la figure 3.6, où la tension générée en sortie de l'onduleur est un signal créneau sans oscillation apparente (noté $V_{convert.}$), alors que la tension mesurée aux bornes de l'actionneur électromécanique présente des surtensions et des oscillations (signal noté $V_{machine}$). Entre les 2 points de mesure, un câble de puissance d'une longueur de 50 m était présent.

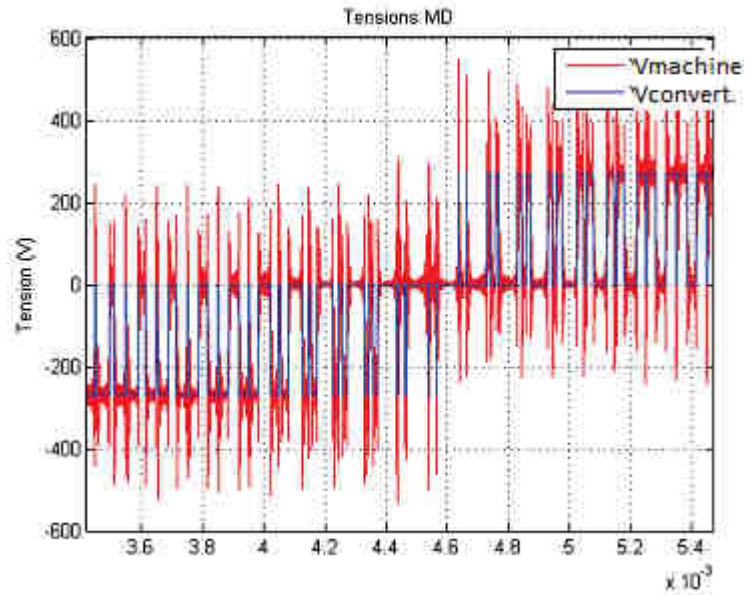


FIGURE 3.6: Illustration des surtensions mesurées.

Ces amplitudes peuvent être aggravées ou améliorées selon que les longueurs de câbles de puissance sont importantes ou réduites. Compte tenu des contraintes spécifiées pour cette étude, nous avons décidé de nous concentrer sur les interac-

tions électromagnétiques par la caractérisation des modes conduits et rayonnés, communs et différentiels, des variables électriques.

Effectivement, l'état de l'art mentionne les plages de fréquences couvertes par chaque composante de notre système, figure 3.7, [17]. L'utilisation de composants

Bandes	0-9kHz	9-150kHz	150kHz-30MHz	30-300MHz	300MHz-3GHz	3GHz-30GHz
Mode de couplage	-Conduit, très basse fréquence	-Conduit basse fréquence	-Conduit haute fréquence -Rayonné proche	- Rayonné proche - Rayonné lointain (HF->RF)	- Rayonné lointain (RF, <u>μwaves</u>)	-Rayonné hyperfréquences
Zones d'émission par sous système	Actionneurs électromagnétiques		Électronique de puissance		Électronique de contrôle	
			Analogique	Numérique (CMOS)		

FIGURE 3.7: Zones d'émissions estimées dans la littérature.

grands gaps pour l'électronique de puissance, avec des fonctionnements à plus hautes fréquences de commutations, couplée à des actionneurs électromagnétiques à haute vitesse de rotation, risque de conduire à une superposition plus grande des 3 zones d'émission. On pourrait penser que les dimensions des objets concernés les rendent transparents vis-à-vis de ces fréquences. Cependant, le processus de miniaturisation et d'intégration de l'électronique de puissance à haute fréquence, et des actionneurs à haute vitesse, rapprochent leurs tailles des longueurs d'ondes des signaux transmis et environnant. Des études, dans le domaine de la Compatibilité Électromagnétique, ont démontré qu'un conducteur devient une antenne "efficace"

dès que sa longueur maximale dépasse $\frac{\lambda}{4}$, avec λ la longueur d'onde, [14]. En combinant ces informations, la gamme de fréquence maximale visée pour l'étude a été établie entre 30 et 300 MHz. Ce qui revient à dire que tout objet dont la dimension est proche de $\frac{\lambda}{4} = 25\text{ cm}$ devient une antenne. C'est-à-dire qu'il émettra des ondes, mais qu'il recevra aussi d'autant mieux des ondes aux fréquences précitées. Or, si le fonctionnement normal du système produisait des signaux dans ces plages de fréquence, un conflit ou un dysfonctionnement en cours de fonctionnement pouvait survenir. Dans le cadre de cette étude, l'analyse de l'état de l'art sur le sujet a laissé apparaître que les modèles et les couplages entre machines électriques, éléments de connexions et électronique de puissance ne prenaient pas tous en compte cette zone de fréquence. Effectivement, la plupart des études limitaient les domaines de validité de leurs modèles à quelques dizaines de MHz pour les moteurs, [75] [71] [58], et les convertisseurs, [9]. Or la démarche d'intégration en œuvre aujourd'hui dans les applications embarquées conduit à la conception de systèmes multifonctionnels très compacts, et donc susceptibles aux fréquences plus élevées.

En début de thèse, l'étape d'analyse préalable a permis de structurer la démarche de recherche autour de la modélisation des interactions entre architecture électromécanique et électronique de puissance, et de la simulation des signaux conduits ou rayonnés sur une architecture-type. L'étude a été structurée en trois parties :

- partie 1 : état de l’art et revue des différents phénomènes physiques concernés et des moyens de les évaluer (caractérisation et modélisation) ;
- partie 2 : synthèse et développements des outils et méthodes à appliquer ;
- partie 3 : mise en œuvre et validations sur des applications industrielles innovantes.

Cette étape a eu pour conséquence l’expression des problématiques à traiter : la modélisation des éléments parasites d’une chaîne de conversion électromécanique pour une gamme de fréquence donnée ; la conception de prototypes élémentaires représentatifs pour les validations partielles ; l’énumération des méthodes et outils pour y parvenir. La description de certains modèles sera présentée au paragraphe 3.1.3.2.

3.1.2.2 Approche croisée pour des systèmes élémentaires

Dans le second exemple, nous proposons d’aborder l’analyse d’un système élémentaire. Il s’agit du matériau encapsulant utilisé au sein des modules de puissance. Le contexte de l’étude est le programme GENOME PREMICES². Pour le laboratoire, les travaux concernés par ce programme visaient :

- à l’étude des mécanismes d’adhésion et de durabilité aux interfaces des couches multifonctionnelles des différentes structures utilisées dans la fonction de packaging, tant d’un point de vue mécanique que physico-chimique ;
- au développement d’outils de simulation multiphysique permettant de prendre en compte, lors de la phase de prototypage, les interactions électromécaniques auxquelles sont soumis les assemblages de puissance.

Les équipes du laboratoire ont accompagné le partenaire ICGM, dont les compétences ont permis la synthèse de nouveaux matériaux. Effectivement, le donneur d’ordre souhaitait obtenir des matériaux autorisant un fonctionnement de l’assemblage sur la plage -70°C à $+300^{\circ}\text{C}$. Ces valeurs de spécification des contraintes limites ont conduit à la synthèse de nouveaux matériaux adaptés aux modules non hermétiques, de l’application de puissance visée. Ce travail s’est inscrit dans une démarche globale de compréhension des phénomènes physiques et chimiques des polymères massifs et aux interfaces. La prise en compte des interactions existantes entre les valeurs des paramètres d’un matériau et leur influence sur son comportement, lorsqu’il est en présence d’autres matériaux (puces semi-conductrices, fils de bonding, substrat de report, etc.) a été envisagé. Ainsi, le travail effectué dans le cadre des recherches en électronique de puissance a été défini et a porté sur la modélisation multiphysique du matériau de type polymère. Effectivement, lors de la conception d’un module de puissance, les phases de dimensionnement et de conception des matériaux, ainsi que de l’architecture interne au module, sont des phases coûteuses en temps. De plus, la prise en compte dès la phase de conception de la fiabilité d’une technologie en fonction de l’environnement auquel elle sera soumise, permet de mieux justifier et aiguiller les bons choix technologiques. Ces phases sont généralement suivies d’une phase de prototypage et d’expérimentation, permettant de s’assurer du bon fonctionnement global du module par rapport à un cahier de spécification. Entre ces étapes existe la phase de simulation. Pourtant, dans de nombreux cas, les modèles comportementaux de certains nouveaux matériaux ne sont pas disponibles et ne permettent pas une validation numérique. A la manière de ce qui a été éprouvé pour un semi-conducteur [44], l’idée était de développer des

2. Des renseignements complémentaires sur ce programme pourront être trouvés § 4.3.2.2.

lois comportementales, sous forme analytique et qui soient adaptées à ces nouveaux matériaux pour autoriser une phase de prototypage virtuel proche de l'application réelle. Cela afin de permettre au concepteur de compléter le panel de modèles de comportements et d'être capable, dès la phase de conception, de reproduire au plus près un comportement réel dans un environnement représentatif.

L'originalité des recherches qui ont été menées réside tant dans l'objet décrit que dans la démarche mise en œuvre pour y aboutir. En effet, il convient de noter que l'encapsulant, un gel visco-élastique et pégueux, est un matériau singulier. Cette modélisation a été suivie d'une simulation comportementale, dans un premier temps 1D, avec prise en compte des effets transitoires. Une autre simulation comportementale 3D a été établie à l'aide de logiciel de calcul éléments finis. La modélisation et la simulation 1D, ont permis de déterminer en premier lieu le niveau de simulation à envisager et le modèle associé à considérer. La simulation numérique 3D, a permis de visualiser champs thermiques et mécaniques ainsi que les contraintes mécaniques maximales. Cette simulation a été obtenue par des lois comportementales déjà connues et représentatives du comportement visco-élastique du gel encapsulant. Les lois et les modèles ont été paramétrés à l'aide des propriétés matériaux déterminées expérimentalement. Au cours de la première étape de ces travaux, un protocole complet de préparation et de caractérisation des gels siliconés commerciaux a été défini afin d'en extraire les paramètres essentiels aux modélisations multiphysiques et simulations numériques. Une étude bibliographique a permis de préciser le choix d'un matériau pour l'application visée. Une étude physique des gels siliconés a été menée. Elle a décrit et analysé les protocoles de mise en œuvre et de caractérisation de ces matériaux. Des méthodes de modélisation et de simulation thermiques ont également été décrites, et validées expérimentalement. Au cours de la deuxième étape, un modèle thermomécanique dynamique a été proposé. Ce modèle a été obtenu à l'issue des 3 périodes d'activité suivantes :

- période 1 : mise en place de la théorie des éléments compacts appliqué au comportement thermique permanent ;
- période 2 : prise en compte du comportement dynamique des phénomènes thermiques ;
- période 3 : mise en œuvre des liens pour une modélisation thermomécanique.

Au cours de ces périodes, tirant parti à la fois des essais de modélisation numérique par éléments fini sur logiciel commercial et des essais de caractérisation, une nouvelle approche a été proposée. Cette approche de modélisation visait à donner un cadre et une procédure générique pour la modélisation multiphysique des modules d'électronique de puissance. Il s'agissait de mettre en place une modélisation de type circuit électrique équivalent. Cela consistait à représenter sous forme d'un circuit électrique équivalent le système (ici le gel encapsulant) et de simuler son comportement soit thermique soit thermomécanique. L'intérêt de ce type de modélisation est l'obtention d'un formalisme de représentation (système d'état) faisant apparaître un système d'équations différentielles couplées relativement simple, qui permettent la simulation en régime transitoire et permanent du système. Le modèle visé s'appuie sur le principe de discrétisation du volume à considérer. L'intérêt d'un modèle compact réside dans la manipulation de termes équivalents aux paramètres résistifs, inductifs et capacitifs des circuits électriques. Plus spécifiquement, au cours des travaux GENOME, le comportement thermomécanique d'un volume élémentaire illustré sur la figure 3.8, a été modélisé. La température du volume

élémentaire est donnée en son centre lui même connecté par des impédances thermiques Z aux interfaces du volume. Les modèles élémentaires ainsi obtenus ont ensuite été interconnectés pour former le modèle du système complet. La simula-

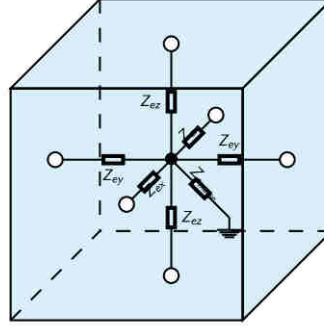


FIGURE 3.8: Volume élémentaire modèle de type compact.

tion a permis d'obtenir les réponses thermiques qui ont été validées par des mesures expérimentales, en régime permanent figure 3.9, et en transitoire. Le principe de

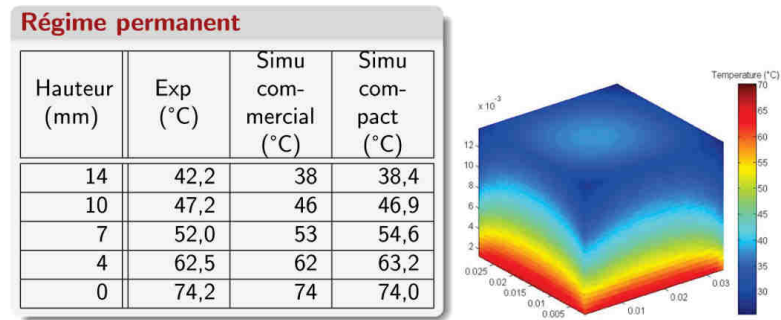


FIGURE 3.9: Résultats de simulation du gradient de température en régime permanent dans le volume total considéré.

modélisation a été conservé pour étendre le modèle au couplage thermomécanique. Ainsi la répartition des contraintes ou la dilatation du matériau sous différents types de contraintes mécaniques a pu être simulée.

Le travail qui a été effectué, modélise les phénomènes de couplages électriques, thermiques et mécaniques vues par l'encapsulation et a, comme variables de sortie, les réactions électro-thermomécaniques du milieu encapsulant à ces sollicitations. Une représentation sous forme d'un modèle d'état du système considéré a été décrit. Ce modèle a permis l'utilisation d'outils de simulation thermomécaniques, de type simulation circuit, ou simulateur de fonction de transfert, pour obtenir des réponses comportementales.

A l'avenir, les travaux futurs pourront viser un objectif supplémentaire. Une optimisation des caractéristiques intrinsèques du matériau pourrait être pensée en fonction de la géométrie du milieu et des sollicitations (électrique, thermique et mécanique) vues par l'encapsulant, et ce dès la phase de prototypage virtuel.

3.1.2.3 Synthèse sur l'analyse des interactions

L'étape préalable d'analyse des interactions a produit deux résultats majeurs. Le premier est la définition d'un principe de modélisation. Le second est la nécessité de formaliser cette étape par une méthode d'application qui puisse notamment inclure le cadre de modélisation défini et l'utilisation des outils de simulation.

Le premier résultat de l'étape d'analyse est qu'elle permet de structurer le travail de modélisation et de simulation comportementale multiphysique. La démarche que nous proposons est l'expression du modèle sous la forme d'un système d'état, peu importe le domaine physique concerné :

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + BU \\ Y = CX + DU \end{cases} \quad (3.1)$$

où X est le vecteur d'état, U le vecteur des entrées et Y le vecteur des observations. A et B les matrices régissant l'évolution de l'état et C et D les matrices permettant de reconstruire les grandeurs observées. Ce modèle peut ensuite être représenté sous la forme d'un circuit électrique équivalent. Relativement à la simulation, les études ont montré la faisabilité de la mise en place d'outils alternatifs aux méthodes par éléments finis. Finalement, les outils et modèles proposés offrent la possibilité de simulations rapides en régimes transitoire et permanent.

Sur un autre point de vue, le fait d'employer cette étape d'analyse à chacune de nos activités nous a interpellé sur comment la formaliser. Notre volonté a été de rendre systématique cette démarche, pour qu'elle soit indépendante de la complexité de l'objet de l'étude, ou du niveau de description à atteindre. C'est ainsi qu'a été proposé le projet Ingénierie SYstème optimisée pour les Convertisseurs d'Energie (ISYCE). Ce programme a fait l'objet d'une demande de financement auprès de la région dans le cadre de l'appel à projet Contrat Laboratoire Entreprise en 2012 avec un partenaire académique, l'IRIT UMR 5505 et deux entreprises : Safran et Eliorys. Il a finalement été rejeté en deuxième lecture en 2013. L'objectif principal était de contribuer à un socle méthodologique d'analyse pour la conception en électronique de puissance. L'approche proposée était basée sur l'approche d'ingénierie système qui permet, dès la phase d'analyse, de prendre en compte les problématiques de conception ainsi que les exigences de durabilité et de recyclabilité. L'objectif final était d'aboutir à des systèmes répondant au juste besoin et de haute qualité environnementale. L'optimisation de l'architecture et de la gestion des flux d'énergie pour ces systèmes, de part leur complexité, nécessitent plusieurs langages de modélisation avec une sémantique adaptée permettant la simulation, la vérification et la validation lors de phases amont. Ces langages sont souvent indépendants et ne permettent pas d'assurer la cohérence d'une vue à l'autre du système. Par conséquent, l'objectif proposé concernait une hybridation de ces différents langages, ainsi que d'y adjoindre un mécanisme permettant d'assurer la cohérence entre les différentes étapes de conception pour faciliter la simulation, la vérification et la validation lors des phases descendantes du cycle de développement du convertisseur d'énergie. Cette étude devait nous permettre d'aboutir à une démarche de Lean System Engineering et participer ainsi à la compétitivité de la filière de l'énergie. La démarche était scindée en trois étapes :

- recueil du besoin : car l'approche Ingénierie Système (IS) débute par la mise en place de processus permettant de tracer les besoins (ingénierie des

besoins) et les exigences (ingénierie des exigences) tout au long du cycle de développement ;

- continuité des représentations : par un ensemble de représentations visuelles instrumentées (langages ou modèles) qui sont utilisées dans une démarche de Model Based System Engineering (MBSE) ;
- retour d'expérience : car la capitalisation du savoir-faire et sa réutilisation est un enjeu majeur pour les entreprises.

Cette proposition aurait pu être comparée ou complétée par l'étude menée dans [49], et dont l'objectif est de définir un algorithme qui permettent l'optimisation globale des éléments du packaging.

3.1.3 Modélisation multiphysique, multi-échelle de temps et simulation comportementale

Tout en tenant comptant des objectifs et contraintes des recherches effectuées, nous avons souhaité que notre démarche de modélisation s'articule autour de grands principes :

- des modèles multiphysiques et dynamiques ;
- une validation par la comparaison des résultats ;
- la mise en évidence des liens permettant une optimisation dès la phase de spécification et de conception.

Les modèles multiphysiques et dynamiques, doivent permettre d'exprimer les relations entre physiques, géométries, variables et paramètres d'intérêts. Ils devraient idéalement être analytiques et tridimensionnels. Compte tenu des difficultés pour simuler des géométries autres qu'élémentaires avec ces modèles, il est usuel d'avoir recours à des logiciels à éléments finis. il est également possible de combiner des outils de résolution à éléments finis par des méthodes de réduction de modèle, [52]. Malheureusement, au moment des résolutions, quand il y a une interdépendance des phénomènes physiques, l'utilisateur perd souvent le lien entre constat ou résultat numérique et paramètre géométrique à optimiser. De plus, lorsque les phénomènes électriques rentrent en jeu avec notamment la prise en compte de tensions ou courants issus de la modulation, les constantes de temps rendent les procédures de résolution lentes ou difficilement convergentes, quand celles-ci aboutissent. Il n'est pas rare de devoir utiliser des géométries simplifiées, mais cela pose la question de la confiance que l'on peut avoir dans le résultat, relativement à la géométrie réelle visée.

L'exploitation et la comparaison critique des résultats découlent du constat établi ci-dessus. Nous avons pris le parti de comparer nos résultats par plusieurs types de modélisations et simulations. Pour cela nous proposons de mettre en œuvre des modèles $3D$, mais aussi des modèles analytiques monodimensionnels qui nous donnent accès aux paramètres géométriques, et qui autorisent une prise en compte des phénomènes dynamiques temporels. Leur comparaison doit aider l'utilisateur à optimiser ou réaliser des choix lors des phases de conception. La comparaison doit aussi être possible suite à une mesure.

Finalement, cette démarche de validation de modèles doit nous conduire à mettre en évidence des liens permettant une optimisation, dès la phase de spécification et de conception. Effectivement, les modèles et les simulations doivent servir les intérêts de l'utilisateur en lui donnant accès à des informations, qui concernent

des valeurs ou variations trop importantes, non désirées ou anormales des variables d'intérêt, ou bien la dérive de paramètres, etc. L'utilisateur, par le maniement de ces différents modèles, doit être en capacité de compléter ses connaissances et mettre à jour les liens entre causes et effets.

Pour servir cette ambition de manipuler plusieurs modèles et simulateurs, nous avons utilisé plusieurs outils :

- Abaqus, [2], pour des modèles et des simulations numériques 3D et essentiellement thermomécaniques ;
- Ansoft Maxwell, [4], pour des modèles et simulations numériques 3D électromagnétiques ;
- PSIM et LTSPICE, [50] et [39], pour des modèles et des simulations de types circuit électriques, parfois équivalents, simulant ainsi les phénomènes transitoires électriques ;
- Scilab [60], pour la programmation et la simulation de modèles analytiques discrétisés mono-dimensionnels. C'est essentiellement ce logiciel qui permet une réelle prise en compte de tous les phénomènes physiques de manière simultanée.

La figure 3.10 illustre cette démarche. Il s'agit des outils mis en œuvre dans la thèse de Hassen Medjahed (annexe A.2), intitulée "Contribution à la simulation électro-thermomécanique numérique 3D appliquée à l'étude de la fiabilité des interrupteurs à semi-conducteurs packagés, utilisés en traction ferroviaire". Cette figure fait aussi apparaître les liens utilisés entre les différents outils avec au centre la préoccupation principale de l'étude. Plusieurs domaines de la physique sont ainsi

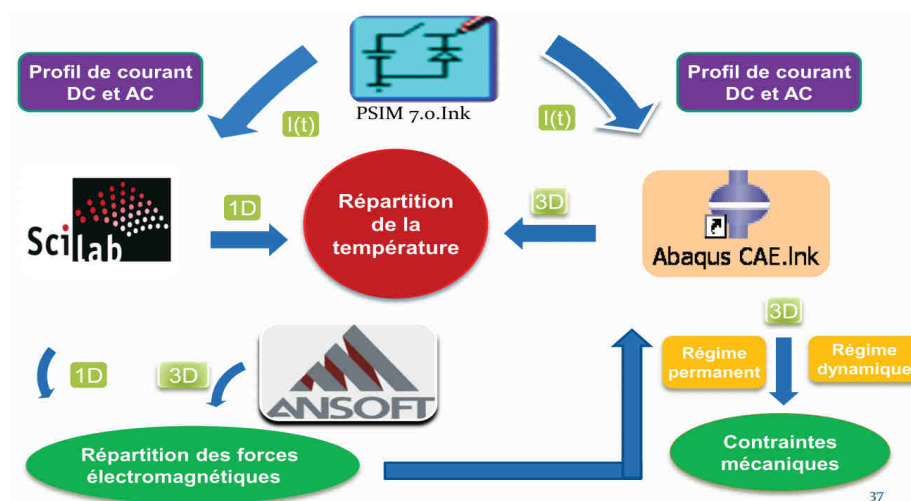


FIGURE 3.10: Illustration des outils associés à la démarche de modélisation.

à l'œuvre puisqu'une sollicitation de nature électrique entraîne des interactions thermomécaniques pouvant induire des modes de défaillances. Cette étude est plus particulièrement concentrée sur le comportement des fils de bonding au sein d'un module de puissance.

3.1.3.1 Des modèles multiphysiques et dynamiques

Chronologiquement, la première utilisation de la modélisation et de la simulation multiphysique s'est faite lorsque nous avons cherché à savoir si les forces

électromagnétiques pouvaient avoir une influence sur la fatigue des fils de bonding des modules de puissance ferroviaire [41]. L'objectif final était d'obtenir un modèle et une simulation qui exprimaient les contraintes mécaniques subies par le fil de bonding. Nous avons adopté une démarche en deux parties :

- établir un modèle thermomécanique du comportement du fil de bonding ;
- établir un modèle mécanique avec sollicitation électromagnétique du fil de bonding.

Pour chacune des étapes, plusieurs types de modèles ont été utilisés et comparés. Leurs résultats ont aussi été confrontés à des vérifications expérimentales.

Sollicitation électrique. La première étape consistait à caractériser le courant traversant un fil de bonding. Ainsi, la température simulée du fil de bonding était obtenue en cumulant l'apport de l'échauffement de la puce et de son propre échauffement suite à l'effet Joule. Dans le cas d'un courant continu (DC), le courant maximal vu par un fil $I_{DC_{fil}}$ était déterminé après l'analyse de construction du module et l'analyse des données techniques. Dans la configuration qui nous intéressait le module était constitué de 24 IGBT en parallèles N_{IGBT} , reliés à 8 fils de bonding N_{wires} , le tout autorisant un courant maximal $I_{IGBT_{max}}$ de 1500 A :

$$I_{DC_{fil}} = \frac{I_{IGBT_{max}}}{N_{IGBT} \cdot N_{wires}} = \frac{1500}{24 * 8} = 7.8 \text{ A} . \quad (3.2)$$

Pour un module utilisé en alternatif (AC) et associé à une stratégie de modulation de largeur d'impulsion, la même méthode a conduit à considérer un profil de courant vu par le fil avec des phases où le courant était positif et d'autres où il était nul, figure 3.11. Nous avons injecté ce dernier profil directement dans notre simula-

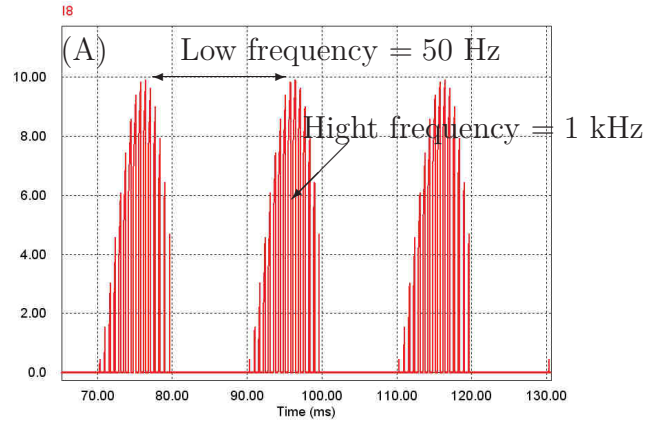


FIGURE 3.11: Profil de courant alternatif subi par un fil de bonding, $I_{AC_{fil}}$.

teur. Une autre possibilité consistait à en extraire la valeur efficace. Cette dernière possibilité était intéressante car elle permettait de ramener l'étude au cas continu précité. Ainsi, un courant constant de valeur 10 A était finalement considéré pour la suite du travail.

Modèle thermomécanique. Connaissant l'amplitude de la sollicitation électrique, les modèles électrothermiques ont été développés. Selon les principes de modélisation décrits au paragraphe 3.1.3, plusieurs types de modèles électrothermiques ont été établis et comparés.

- un modèle analytique thermique unidimensionnel ;
- un modèle numérique 3D.

Le modèle analytique unidimensionnel qui a été décrit, en considérant que le courant variable est homogène dans chaque volume élémentaire du fil (dont la géométrie est cylindrique), est

$$\lambda \left(\frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} \right) + \rho_e \left(\frac{I(t)}{S} \right)^2 - \frac{h p}{S} (T(x,t) - T_a) = \rho C_p \frac{\partial T(x,t)}{\partial t}, \quad (3.3)$$

où le terme $\lambda \left(\frac{d^2 T(x,t)}{dx^2} \right)$ correspond à la variation du flux par conduction. $\rho_e \left(\frac{I}{S} \right)^2$ est la puissance interne générée par le courant électrique (dont la valeur dépend du temps) ; $\frac{h p}{S} (T(x,t) - T_a)$ correspond à l'évacuation de la chaleur par convection ; et le terme $\rho C_p \frac{\partial T(x,t)}{\partial t}$ est l'élévation de la température d'un point situé à la position x du fil, en fonction du temps. La résolution de cette équation nous a permis d'obtenir l'expression de la température dans le conducteur. Pour la résolution, la méthode des différences finies a été utilisée. Le codage de cette méthode de résolution était inséré dans Scilab, et les résultats de simulation ont été obtenus. Le modèle numérique 3D était mis en œuvre grâce au logiciel Abaqus. Ensuite, le dessin du prototype utilisé était programmé, les matériaux et leurs propriétés attribués aux éléments du modèle, puis finalement la discrétisation du schéma, figure 3.12, était réalisée.

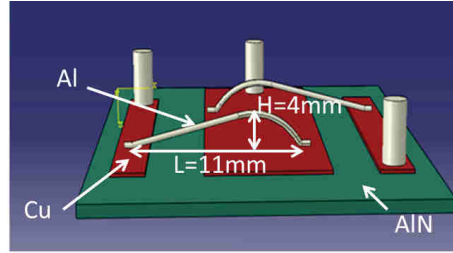


FIGURE 3.12: Modèle numérique mis en œuvre.

Les résultats de simulation de deux modèles ont ensuite été comparés à des mesures expérimentales, figure 3.13. L'intérêt des modèles analytiques est de pouvoir

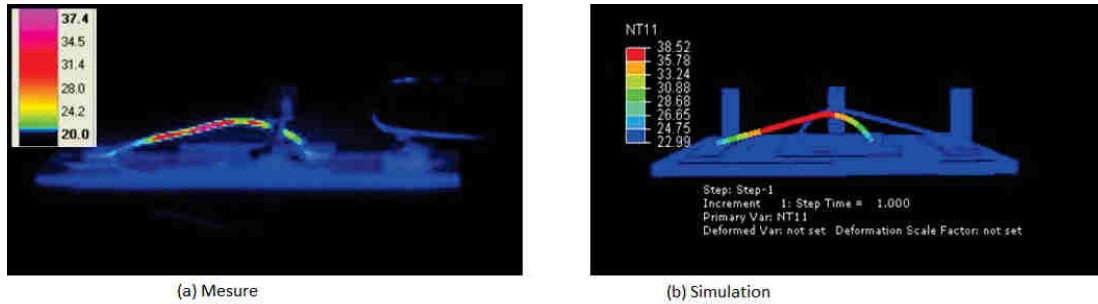


FIGURE 3.13: Comparaison des résultats de distribution de température entre mesure et simulation.

les programmer dans des d'outils de simulation plus rapides qu'une simulation numérique 3D, et de pouvoir déterminer l'influence d'un paramètre sur la répartition

de température, que le paramètre soit géométrique ou constitutif du matériau (par exemple, influence de la longueur ou de la conductivité).

Par la suite, le logiciel élément fini était utilisé pour déterminer les contraintes de Von-Mises [12] dans les différents volumes élémentaires, contraintes qui sont ici d'origine purement électrique.

Modèle mécanique avec sollicitation électromagnétique. Dans cette étape de travail, nous avons uniquement raisonné sur la base d'un courant DC. Chaque fil a été considéré comme la juxtaposition de segments traversés par un courant $I = I_{DC_{fil}}$, figure 3.14. Pour chaque point d'un segment, par exemple le point

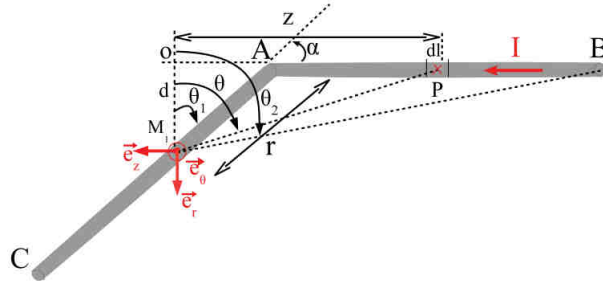


FIGURE 3.14: Segments de fil.

M_1 du segment compris entre A et C, le champ magnétique élémentaire \vec{dB}_1 était déterminé analytiquement sur la base de la loi de Biot et Savart. Par exemple pour le point M_1 :

$$\vec{dB}_1(M_1) = \frac{\mu_0}{4\pi} I_{DC_{fil}} \frac{d}{(d^2 + z^2)^{3/2}} dz \vec{e}_\theta. \quad (3.4)$$

μ_0 est la perméabilité du vide, d et z des longueurs associées à la géométrie du fil. Ensuite, le champ magnétique global était obtenu par intégration sur la longueur du segment source AB :

$$\vec{B}_1(M_1) = \frac{\mu_0}{4\pi d} I_{DC_{fil}} (\sin(\theta_2) - \sin(\theta_1)) \vec{e}_\theta. \quad (3.5)$$

La même démarche était entreprise pour l'autre segment. Enfin, le fait que les fils de bonding soient en parallèle sur un module réel de puissance, était pris en compte en rajoutant un deuxième fil en parallèle du premier, et en tenant compte du champ magnétique imposé par le deuxième fil à proximité du premier (en utilisant la propriété de superposition du champ magnétique). En utilisant un code permettant la simulation du champ magnétique sous Scilab, nous avons constaté que le champ magnétique était maximal à proximité du coude, figure 3.15a. Résultat confirmé par ailleurs avec le logiciel Maxwell, comme illustré sur la figure 3.15b. Cette figure a été obtenue pour un courant constant et un angle d'inclinaison de deux segments de fils donnés.

Ainsi, en concentrant notre étude aux alentours de cette zone, nous avons considéré que les segments de fils étaient infiniment longs de part et d'autre de cette zone. Ce qui permettait une simplification de l'expression (3.5). Ensuite, pour les points de chaque segment, la loi de Laplace était appliquée :

$$\vec{df} = I_{DC_{fil}} \vec{dl} \times \vec{B}. \quad (3.6)$$

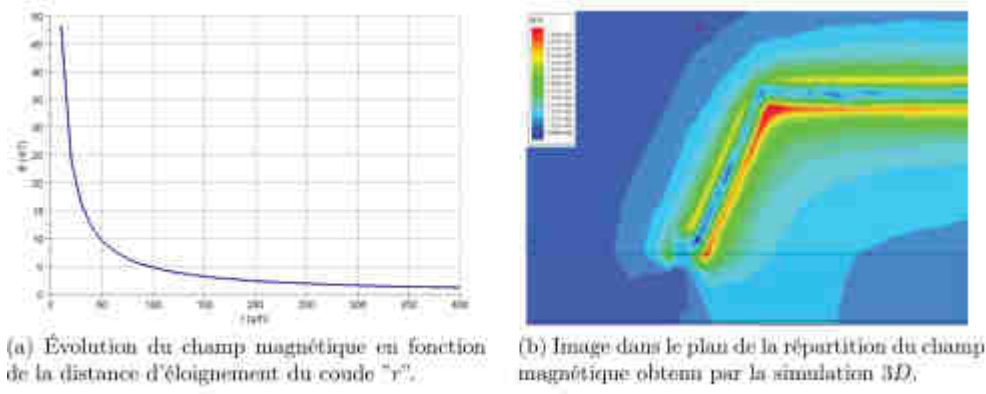


FIGURE 3.15: Comparaison de la simulation de distribution du champ magnétique.

\vec{df} est la force élémentaire obtenue sur une longueur élémentaire \vec{dl} plongée dans un champ magnétique uniforme \vec{B} . L'hypothèse retenue était que les fils avaient des géométries linéiques, c'est-à-dire que leur section était faible devant leur longueur. Par conséquent, un élément de volume $d\tau$ traversé par une densité de courant \vec{j} , était équivalent, à une longueur élémentaire dl de section S traversée par un courant $I_{DC_{fil}}$, tel que :

$$\vec{j}d\tau = I_{DC_{fil}}\vec{dl}. \quad (3.7)$$

Ainsi, des forces par élément de longueur étaient obtenues pour un fil donné, figure 3.16. \vec{df}_1 étant la force exercée par le segment droit sur le segment incliné, \vec{df}_2 la

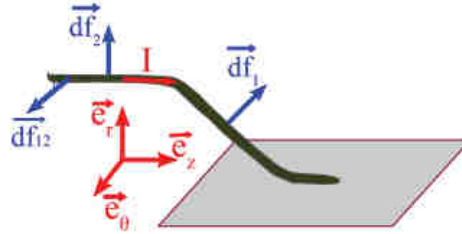


FIGURE 3.16: Répartition des forces de Laplace élémentaires sur un fil de bonding parcouru par un courant constant $I_{DC_{fil}}$.

force exercée par le segment incliné sur le segment droit, et \vec{df}_{12} la force d'attraction entre 2 segments de fils éloignés d'une distance donnée. Ces forces ont été insérées en tant que forces volumiques au sein d'un simulateur numérique, comme étant les sollicitations induisant les contraintes et les déplacements mécaniques, figure 3.17. Enfin, les contraintes étaient extraites. Dans cette configuration, elles étaient également maximales au pied du fil de bonding, confirmant un peu plus la localisation des défaillances constatées expérimentalement. Cependant, leurs valeurs sont trop faibles par rapport à celles produites par les phénomènes thermomécaniques, pour qu'on puisse les considérer comme déterminantes dans le mécanisme de fatigue.

Synthèse de ces travaux. Dans ces travaux, des modèles électrothermiques analytiques ont été établis, appliqués à des fils d'interconnexion de modules de puissance et validés par confrontation avec des mesures. Des modèles thermomécaniques ont été développés et ont permis de quantifier les contraintes subies par les

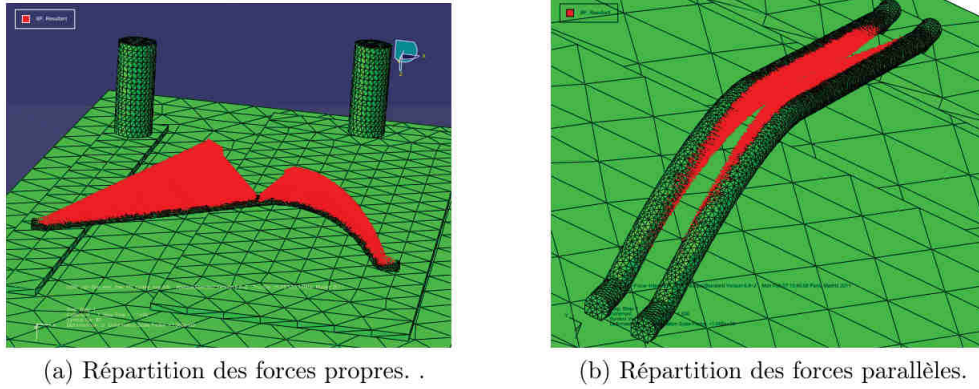


FIGURE 3.17: Forces volumiques insérés dans Abaqus.

fil d'interconnexion du fait des forces électromagnétiques. Dans le cas de courant continu, l'amplitude des contraintes ne pouvaient pas expliquer le décollement des fils par ce phénomène. Une mesure de déplacement des fils a été mise en œuvre et a permis de constater un déplacement vertical des fils de plusieurs dizaines de micromètres en régime nominal continu et alternatif de courant. Un phénomène d'attraction entre deux fils adjacents a aussi été constaté en régime continu de courant.

Au delà de ces résultats, il est intéressant de noter que les fondations de l'approche de modélisation qui sera utilisée par la suite ont été posées, et ont également démontré toute leur utilité :

- une approche analytique (même simple) est indispensable à la maîtrise des interactions et de l'influence des paramètres, en vue de la compréhension des phénomènes ;
- une approche pluridisciplinaire qui tente de ne masquer aucun phénomène (par exemple l'auto-échauffement du fil) ;
- la critique des méthodes de modélisation par la comparaison entre résultats de simulation et mesures ;
- la critique des résultats de simulation par la mise en œuvre de plusieurs outils de simulation.

Ces travaux ont été valorisés dans les publications listées dans l'annexe bibliographique personnelle (annexe B) : [ACL6], [ACTI8], [ACTI10], [ACTN4], [ACTN5], [ACTN6].

3.1.3.2 Mise en œuvre de plusieurs méthodes de modélisation

Dans le cadre de la thèse de José-Ioav RAMOS CHAVEZ, des méthodes de modélisation ont été employées puis comparées à des mesures issues de démonstrateurs réalisés spécifiquement pour l'étude. Plusieurs façons de modéliser un même objet ont été comparées. Cette analyse comparative a permis de valider ou non les modèles proposés. Différentes approches de modélisation, associées à leurs outils de simulation, peuvent être employées selon les objectifs recherchés. Par exemple, ces derniers peuvent être :

- rapidité de prototypage ;
- influence de la variation d'un paramètre ;
- précision ;

— accès à des variables intermédiaires ou des paramètres particuliers.

Dans cette étude, un des objectifs a été de se doter d'outils de modélisation qui permettaient de caractériser le comportement électrique des bobinages de machines électriques sur une large bande de fréquences. Ces modèles devaient rendre compte de l'influence de choix géométriques ou de matériaux, sur les caractéristiques des tensions et courants mesurés. A cette fin, une coupe d'un enroulement typique de bobine de machine électrique a été considéré, figure 3.18. La démarche adoptée a

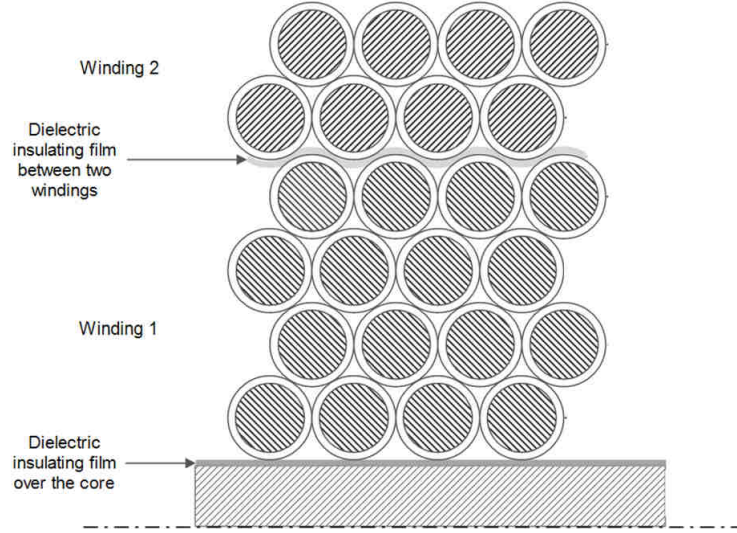


FIGURE 3.18: Définition de l'enroulement considéré.

consisté dans un premier temps à développer un modèle détaillé des effets capacitifs avant de procéder dans un second temps au développement d'un modèle inductif. Finalement ils ont été liés au sein d'un modèle global. Dans la première étape, le modèle capacitif établi découlait des expressions analytiques des équations de l'électromagnétisme. Ensuite, les valeurs des capacités parasites obtenues sont été comparées aux résultats déterminés, suite à une extraction des valeurs des capacités par la méthode des éléments finis.

Modèle analytique des capacités parasites. Le choix a été fait de développer une modélisation de machines électriques qui soit capable de prendre en compte, pour les éléments constitutifs, leur nature et leur structure. Ainsi, ce modèle permettait d'exprimer, la nature du matériau conducteur et du matériau isolant enveloppant, la façon de bobiner, le matériau d'imprégnation, l'épaisseur d'un éventuel film de séparation entre bobinages ou le matériau du noyau. A titre d'illustration, l'expression de la capacité parasite entre deux spires adjacentes a été obtenu sur la base de la structure élémentaire, présentée figure 3.19. Dans cette configuration, la capacité élémentaire entre deux spires adjacentes dC_c s'exprime ainsi :

$$dC_c = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{dS}{dx} \quad (3.8)$$

où dS représente les surfaces élémentaires conductrices face à face, dx la longueur élémentaire. ϵ_r est la permittivité du matériau, ϵ_0 celle du vide. En intégrant cette

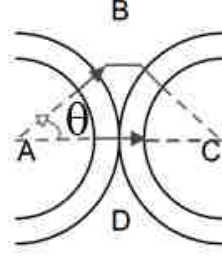


FIGURE 3.19: Enroulement "type" considéré entre 2 spires.

expression sur la longueur de la spire elle expression devient :

$$dC_c(\theta) = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{L_s}{\ln\left(\frac{r_0}{r_c}\right)} d\theta \quad (3.9)$$

où L_s est la longueur totale d'un tour de bobine, r_0 le rayon du centre du fil à sa couche superficielle, r_c le rayon de l'âme du fil et θ l'angle formé entre deux spires. Lorsque le chemin considéré passe par une zone où il n'y a pas de matériau conducteur mais de l'air, ou un matériau d'imprégnation, en considérant que les lignes de champ sont orthogonales aux surfaces, la longueur moyenne pour retrouver le prochain conducteur peut être modélisée par :

$$x(\theta) = D_0 (1 - \cos(\theta)) . \quad (3.10)$$

Par conséquent, en absence de matériau d'imprégnation, la capacité élémentaire dC_g dans cette zone s'exprime alors par :

$$dC_g(\theta) = \epsilon_0 \frac{L_s}{2(1 - \cos(\theta))} d\theta . \quad (3.11)$$

Enfin, les symétries autour d'un conducteur limitent la région d'intégration [13]. Les deux expressions des capacités parasites élémentaires précitées ont alors été utilisées pour déterminer les capacités parasites entre deux spires conductrices, tout en tenant compte des volumes où le conducteur est absent. Ces volumes sont alors comblés (ou pas) par des matériaux d'imprégnation. Après avoir obtenu les capacités pour un tour de bobinage, C_g et C_c , il a été possible de déterminer la capacité totale en constatant qu'il s'agissait d'une mise en série des capacités précédentes, ainsi C_{tt} est

$$C_{tt} = \frac{C_c C_g}{2C_g + C_c} . \quad (3.12)$$

Une démarche similaire a été mise en œuvre pour caractériser les capacités parasites entre deux bobinages à travers un film d'isolation, ou entre les spires et le noyau de bobinage. Ainsi, un modèle analytique paramétrique pour la structure de bobinage considéré a été établi. Il contenait des informations sur :

- les caractéristiques des matériaux ;
- les géométries envisagées.

L'intérêt de cette démarche de modélisation étant que l'influence de la variation d'un paramètre sur la valeur de capacité parasite totale peut être déterminée. Cela constitue les perspectives de ce travail. Le modèle permettra de simuler et comparer

rapidement l'influence d'une variation, d'épaisseur de film d'isolation, de valeur de permittivité, d'éloignement entre spires etc. Plus précisément, la capacité interne impactée par cette variation pourra être trouvée.

Modèle numérique des capacités parasites. L'autre démarche de modélisation développe une géométrie numérique de l'enroulement type considéré. Ce modèle numérique est paramétré en terme de matériaux. Le système est ensuite discrétisé. Les résultats de la simulation de type éléments finis sont analysés et utilisés pour calculer la capacité parasite entre spires C_s ³. Ainsi,

$$C_s = \frac{2W_s}{(\Delta V)^2} \quad (3.13)$$

est la capacité parasite, avec W_s l'énergie électrostatique calculée au sein d'une région, et ΔV la différence de potentiel⁴.

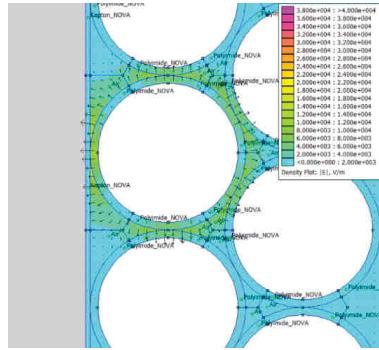


FIGURE 3.20: Calcul de l'énergie électrostatique et lignes de champ pour un enroulement type.

Comme illustré par la figure 3.20, l'intérêt de ce type de modélisation réside dans l'illustration de la répartition des variables, champ électrique et énergie, qu'il permet. Malheureusement, si le rayon des conducteurs devait être modifié, rien ne permettrait de prédire à l'avance quelle capacité parasite et de quelle manière elle serait impactée.

Comparaison des modélisations. Dans cet exemple précis, les résultats entre les deux modèles ont été très proches dans la plupart des cas considérés. Cependant, les deux modèles ne permettent pas de réaliser le même type de conclusion. Le premier met en évidence les liens entre paramètres et éléments parasites, alors que le second permet une illustration en 2 ou 3 dimensions des variables associées. Dans les deux cas cependant, l'obtention des valeurs de capacités parasites à l'échelle d'un tour de spire permet de reconstruire un modèle de type R, L, C équivalent par spire, puis après mise en série et parallélisation, par bobine. Il s'agit ainsi d'une démarche de modélisation bottom-up qui débute par l'expression des phénomènes physiques et se termine par une simulation comportementale macroscopique. Ceci est à opposer aux démarches descendantes, qui s'appuient sur l'analyse d'un comportement expérimental, en vue d'une identification des paramètres d'un modèle déterminé a priori, [43], comme illustré figure 3.21.

3. qui est C_c ou C_g selon les régions considérées.

4. Cela correspond à l'excitation du modèle numérique.

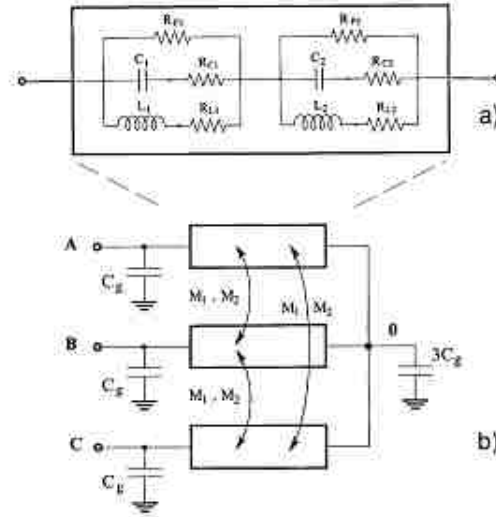


FIGURE 3.21: Modèle en vue d'une identification par approche fréquentielle.

Synthèse des activités. Au cours de ce travail, plusieurs résultats remarquables ont été produits. Il a été démontré que l'expression élémentaire des capacités et inductances parasites internes à un bobinage, pouvait être finalement exprimées sous la forme d'un réseau électrique équivalent. La méthode de modélisation a pu également être appliquée au convertisseur. La simulation du réseau global, correspondant à la chaîne de conversion complète, a permis de retrouver, d'une part les formes d'ondes temporelles caractéristiques mesurées, mais également des diagrammes fréquentiels plus caractéristiques du domaine des hautes fréquences. L'exploitation de ces diagrammes a mis à jour les limites atteintes par les modèles. Cependant, les modèles de bobinages proposés était très précis jusqu'à quelques MHz. Au delà de cette résonance, il a été intéressant de constater que les résultats n'étaient plus assez précis pour témoigner d'un comportement réel, mais que l'alternance entre les résonances était retrouvée. De fait, la simulation permettait de prédire si le comportement à venir était de type inductif ou capacitif.

Bilan des valorisations. Ces travaux ont été valorisés dans les publications listées dans l'annexe bibliographique personnelle (annexe B) : [ACTI13], [ACTI14], [ACTI22].

3.1.3.3 Des modèles qui permettent la mise en évidence des liens en vue d'une optimisation dès la phase de spécification et de conception

Bien que les exemples précédents aient pu servir cet objectif, nous développerons ici un troisième exemple de modélisation. Par cette approche, notre objectif est de se doter d'outils, qui permettent de déterminer, dès la phase de conception, les paramètres influents sur le comportement global du système considéré. Les travaux de MASTER 1 et 2 de Julien Viven (annexe A.4), ont eu pour sujet la "Modélisation multiphysique d'un système d'électronique de puissance". L'objectif était d'étudier le comportement électro-thermique d'un hacheur de type buck. Le modèle devait être établi sous la forme d'un circuit électrique équivalent. L'évalua-

tion de la qualité de représentation du modèle a été faite en comparant les résultats de simulation à une mesure par thermographie infrarouge. Le modèle intégrait les pertes en fonctionnement du hacheur. Pour cela, il était nécessaire de connaître la structure du hacheur et son conditionnement. Les paramètres qui ont eu un impact sur les pertes ont été déterminés, les courants dans les différentes pistes calculés. A partir de ces pertes, vues comme des sources de chaleur, un deuxième modèle était superposé. Il liait les grandeurs thermiques aux sources de chaleur d'origine électrique. Ainsi, la répartition de températures du système lors de son fonctionnement était déterminée. Ce modèle était simulé par un logiciel de type circuit électrique.

Le modèle a été établi sur la base d'un convertisseur de type hacheur, constitué d'un MOSFET Si associé à une diode SiC en série, assemblés sur un substrat céramique de type Si_3N_4 avec pistes en cuivre. Les fils de bonding en aluminium permettaient de connecter les bornes supérieures des composants aux pistes de cuivre. Les brasures constituées d'argent, d'étain et de cuivre permettaient de braser les interrupteurs aux pistes. Il n'y avait pas d'encapsulant, ni de boîtier, afin de permettre une étude thermique du système sans prendre en compte les phénomènes de conduction et diffusion de l'encapsulant, figure 3.22.

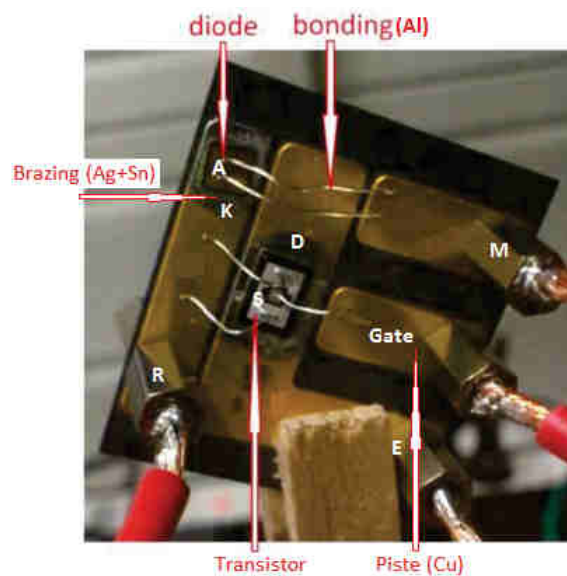


FIGURE 3.22: Structure du hacheur étudié.

Le principe de modélisation consistait à développer un modèle thermique de type circuit électrique équivalent, où les sources de courant étaient remplacées par des sources de chaleur, représentant notamment les pertes engendrées par le composant semi-conducteur. Le modèle de perte établi était calculé à chaque période de commutation en quatre étapes :

- commutation à l'amorçage du transistor et au blocage de la diode ;
- conduction du transistor, fonctionnement en transfert de puissance ;
- commutation au blocage du transistor et à l'amorçage de la diode ;
- conduction de la diode, fonctionnement en roue libre.

Enfin, selon la partie concernée par la circulation du courant et le moment au sein de la période de commutation, les pertes étaient évaluées selon leur nature :

- pertes par commutation : sur la diode et le transistor, à l'amorçage et au blocage ;
- pertes par conduction : sur la diode et le transistor ;
- pertes résistives : sur les pistes, les brasures et les fils de bonding.

Par exemple, au cours du blocage du transistor illustré sur la figure 3.23, les pertes

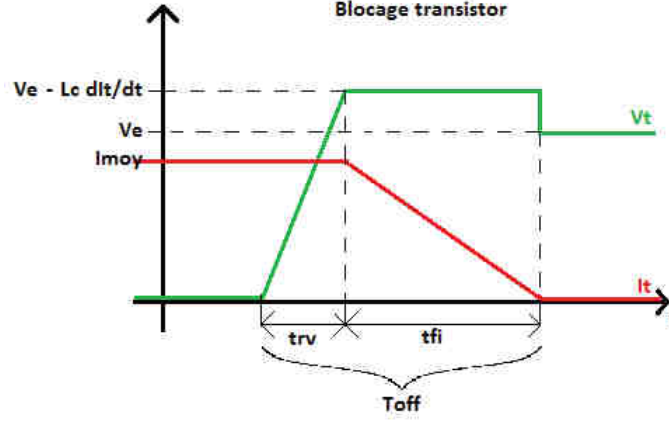


FIGURE 3.23: Profil temporel du courant et de la tension aux bornes d'un transistor lors de son blocage.

W_{TOFF} sont :

$$W_{TOFF} = \frac{1}{2} V_e I_{moy} T_{OFF} + \frac{1}{2} L_c I_{moy}^2, \quad (3.14)$$

où T_{OFF} est le temps de commutation au blocage, L_c l'inductance parasite de la boucle, V_e la tension de la source, I_{moy} le courant moyen dans la charge. Cette première formule a été complétée en tenant compte des charges et décharges des capacités parasites associées aux composants semi-conducteurs. Certains des paramètres ont été issus des spécifications des fabricants, d'autres déterminés par identification suite à la mesure des caractéristiques statiques de chacun des interrupteurs. Les pertes résistives $P_{conduction}$ associées à chaque élément de conduction électrique, fil de bonding, piste en cuivre, etc., étaient déterminées par la formule suivante :

$$P_{conduction} = R_{conduction} I_{EFF}^2, \quad (3.15)$$

où $R_{conduction} = \rho \frac{l}{S}$, avec ρ résistivité du matériau, l et S longueur et surface concernées, et I_{EFF} courant efficace. Par la suite, ce modèle de perte était inclus en tant que source de chaleur dans un modèle thermique décrivant la surface supérieure du convertisseur. Le modèle thermique utilisé était également une représentation par circuit électrique équivalent de la propagation du flux de chaleur dans le plan, figure 3.24. Ainsi, la chaleur était insérée en tant que point chaud et était reliée par les résistances thermiques, qui traduisaient les effets de conduction aux autres mailles du système. Effectivement, le module initial était discrétisé en surface, de façon à tenir compte dans chaque maille des matériaux et des chemins du courant, figure 3.25. Un autre maillage, mais volumique cette fois, permettait de rendre compte des effets thermiques dans le volume des matériaux situés entre la surface représentée figure 3.26(a), et la semelle de dissipation, figure 3.26(b).

Dans cette approche, le schéma élémentaire de maille a été couplé à d'autres ou à des sources de potentiels, qui peuvent être les températures aux limites par

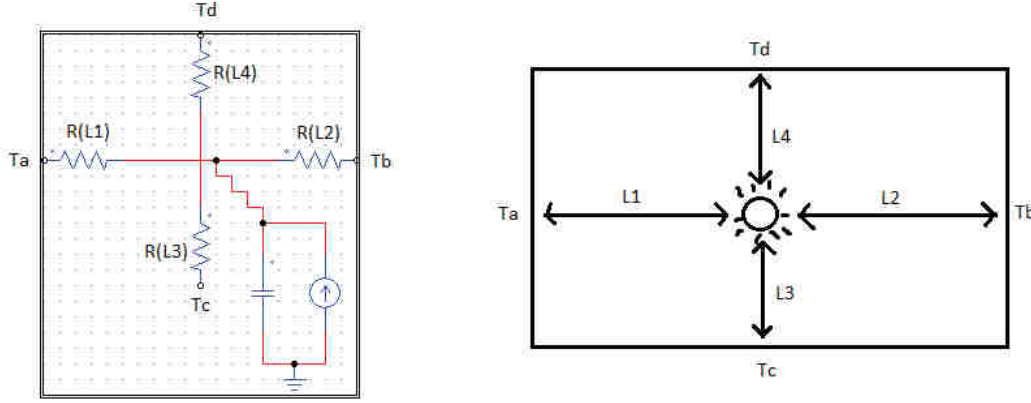


FIGURE 3.24: Modèle thermique bi-dimensionnel.

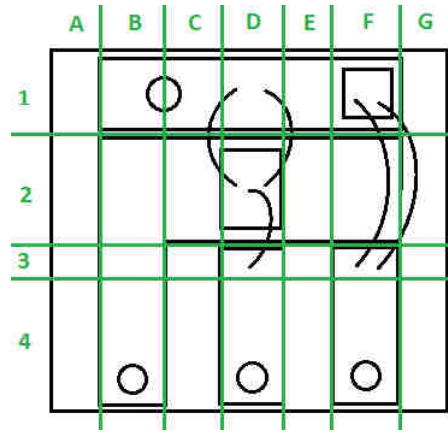


FIGURE 3.25: Maillage de la surface du convertisseur.

exemple, par des relations définies sur la figure 3.26(b). Ainsi, C_v traduisait le fait que la relation de couplage était de type convection, C_d que la relation de couplage était de type conduction et, enfin, R de type rayonnement. Finalement, le convertisseur global a pu être représenté par un schéma R, L, C équivalent, illustré sur la figure 3.27.

Pour chaque source de puissance, un calcul était effectué à chaque période de commutation, selon les formules définies ci-dessus, et permettait d'injecter, en fonction du point de fonctionnement du hacheur, les pertes à évacuer. Les résultats de simulation ont été comparés à des mesures effectuées par caméra infrarouge. La figure 3.28 illustre les résultats obtenus. Le point de fonctionnement choisi était un courant $I_{EFF} = 8 \text{ A}$. Pour y parvenir, la tension a été ajustée en fonction du rapport cyclique. Il faut constater que les valeurs sont différentes et que, de ce point de vue, le modèle ne donne pas satisfaction. Cependant, les tendances sont bien retrouvées. Des explications, quant aux différences, ont été proposées dans les différentes valorisations associées à ces travaux, par exemple [66].

Synthèse. Afin de conclure sur les travaux menés pour donner un modèle électro-thermique d'un convertisseur, mettons en avant un résultat. Les modèles usuels de pertes des semi-conducteurs ont été reliés à des circuits électriques équivalents élémentaires, modélisant le comportement électro-thermique d'une maille du

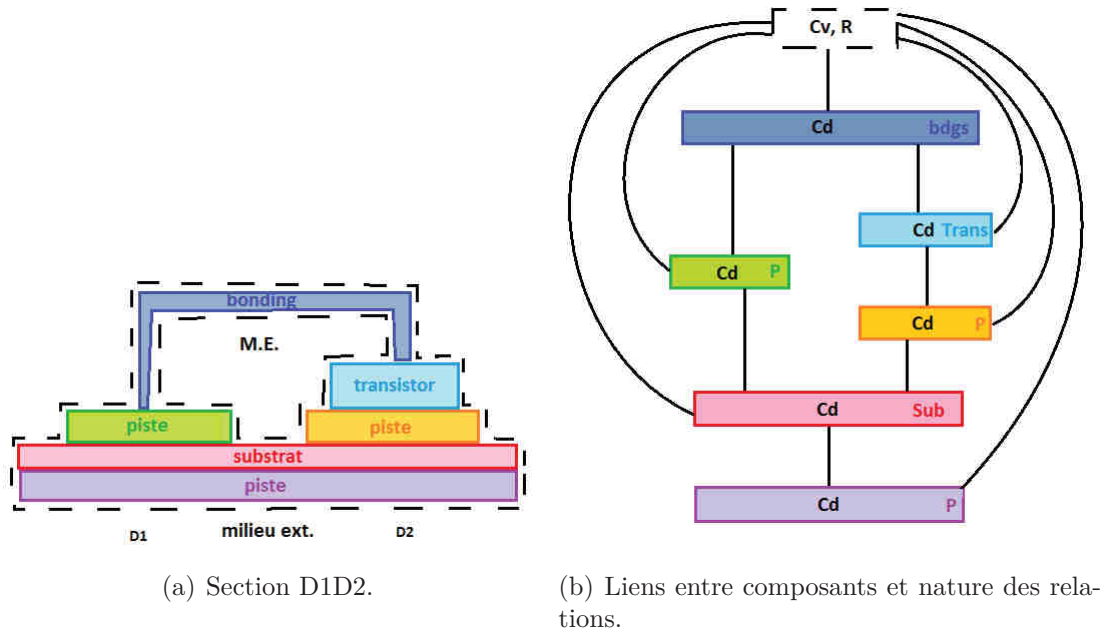


FIGURE 3.26: Mise en évidence des liens dans le volume des matériaux entre les composants d'une maille.

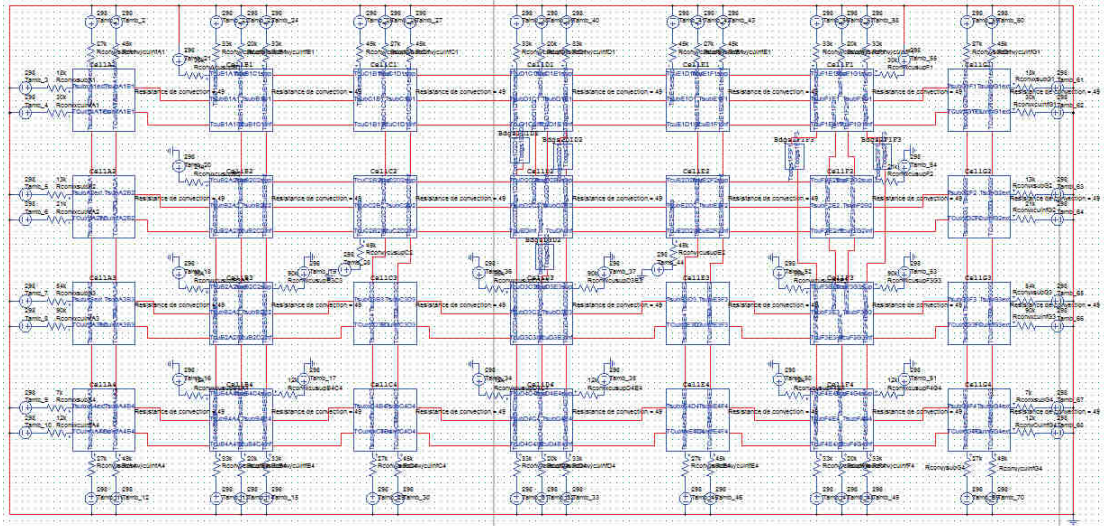


FIGURE 3.27: Illustration du schéma équivalent électrique global du convertisseur.

convertisseur. Les modèles de pertes des semi-conducteurs ont été complétés par des modèles de pertes associés aux géométries et matériaux internes à la structure de conversion. Les résultats obtenus permettent de valider le comportement électriques de l'ensemble, mais doivent être améliorés relativement au comportement thermique.

Il nous paraît intéressant de mettre en lumière trois avantages de cette approche :

1. La modélisation permet de déterminer les liens d'une géométrie ou d'un choix matériau sur un comportement global. Elle permet aussi de discriminer l'intérêt d'une nouvelle technologie. Par exemple, l'impact de l'insertion d'un transistor MOSFET SiC à la place de l'IGBT aurait pu être évalué sur

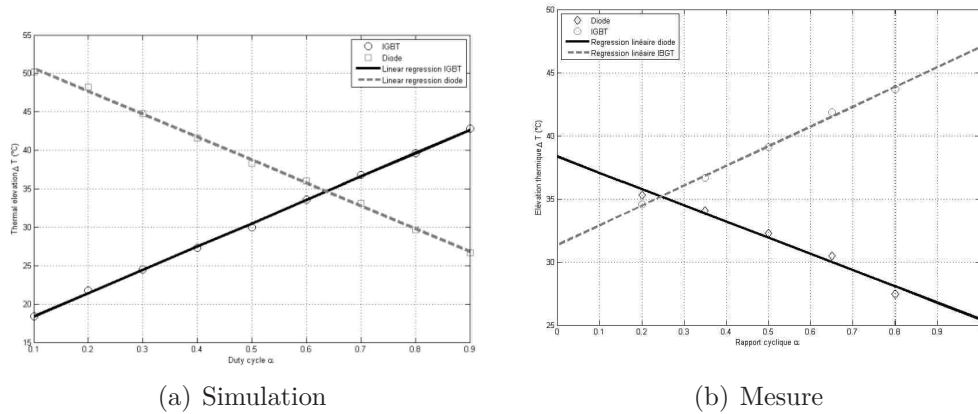


FIGURE 3.28: Température de la surface des semi-conducteurs.

la base de ses caractéristiques statiques ;

2. La modélisation permet de modéliser les liens entre comportement électrique et thermique ;
3. La modélisation permet d'utiliser un seul outil logiciel pour simuler le comportement électro-thermique d'un convertisseur, dans l'exemple précédent PSIM.

De façon identique, nous pouvons également mentionner deux inconvénients de cette méthode :

1. Les valeurs de température obtenues après simulation ne sont pas concluantes relativement aux résultats obtenus par la mesure ;
2. La détermination du coefficient de convection est très difficile à établir. Ceci provient des géométries complexes manipulées. Notons que sa valeur a eu une grande incidence sur les résultats.

Ainsi, les deux inconvénients majeurs révélés seront à l'origine de propositions dans le cadre des perspectives de recherches énoncées au chapitre 5. Effectivement, nous avons traduit ces conclusions en problématiques et nous proposons de travailler sur celles-ci dans le futur. Ces travaux ont été valorisés dans les publications listées dans l'annexe bibliographique personnelle (annexe B) : [ACTI17], [ACTN9].

3.1.4 Synthèse de la démarche d'intégration et de modélisation des interactions

Dans nos travaux, nous avons considéré que vouloir aborder des recherches en intégration s'accompagnait d'une démarche de modélisation des interactions. Les travaux réalisés jusqu'à aujourd'hui ayant surtout trait à ce deuxième point, la démarche de modélisation a été présentée dans le cadre de quatre exemples d'applications. Dans chaque exemple, le principe de modélisation adopté a été similaire. Il s'agissait de construire des modèles multiphysiques et dynamiques, qui soient validés par comparaison à des expériences et qui permettent la mise en évidence de l'influence de paramètres internes. A chaque fois que cela a été possible, nous avons exprimé ces modèles sous la forme de modèle d'état ou d'un circuit électrique équivalent.

Cette démarche a donné des résultats très satisfaisants notamment sur la modélisation des éléments parasites d'un bobinage et de son association avec un convertisseur au sein d'une chaîne de conversion électromécanique. Pour les autres applications cette démarche doit être poursuivie. Ceci fait l'objet de certaines perspectives proposées.

Enfin, dans l'objectif de proposer des études plus spécifiques aux nouveaux procédés d'intégration, cette démarche nous a permis de bâtir notre expertise sur les phénomènes en jeux au sein d'un module de puissance, lors de son fonctionnement nominal ou lors de son vieillissement. Nous avons donc aujourd'hui une meilleure connaissance de ce qui peut être amélioré ou modifié au sein d'un module de puissance. Compte tenu de cette expertise, nous décrirons dans les perspectives quelques propositions de recherche portant sur la mise au point de procédé ou l'intégration d'éléments additionnels au sein du packaging.

3.2 Caractérisation expérimentale

3.2.1 Objectif des expériences

Il est évident que pour tous les modèles décrits précédemment, une validation expérimentale est à envisager. Cela permet de vérifier que les hypothèses retenues dans le cadre de la mise en équation du modèle sont justifiées, et de procéder, si besoin, à un recalage de modèle.

Lorsque l'axe de recherche concerne le pilotage ou les techniques d'observation, le banc de test permet alors de vérifier que le comportement, en boucle ouverte ou fermée, du système considéré correspond bien au comportement désiré, que cela soit pour la réponse du système à une sollicitation de référence ou pour l'évolution d'une variable estimée, [59].

Lorsque l'intégration de matériaux et de nouvelles technologies est étudiée, le développement expérimental, ou la mise en œuvre d'un démonstrateur, permet, de définir les procédés de mise en œuvre associés, d'évaluer la qualité et la maîtrise de procédé, [72], ou de caractériser les performances d'un assemblage, [6].

Enfin, les caractérisations expérimentales peuvent également servir de qualification quant à la robustesse, et sont indispensables à l'évaluation et à la prédiction de la durée de vie des assemblages, [28] [56]. C'est ce dernier point qui sera présenté en détail, bien que tous les autres aient été abordés au cours de ces années de recherche.

3.2.2 Évaluation expérimentale de la durée de vie des composants et modules en électronique de puissance

Cette approche, qui consiste à vouloir prédire par l'expérience la durée de vie ou la robustesse d'un assemblage, a été abordée par deux démarches complémentaires. La première, dont le support a été la thèse de Guillaume Parent (annexe A.2), a concerné des composants dont le boîtier ne présentait qu'un seul composant à semi-conducteur. Cette étude cherchait à déterminer le mécanisme de défaillance le plus critique, relativement aux normes de sollicitations aéronautiques. L'objectif ultime était de déterminer, par les expériences, les coefficients associés à une loi de probabilité de défaillance, puis la durée de vie. Dans la seconde approche, l'objectif était

de déterminer l'activation d'un mécanisme de défaillance, puis d'un défaut, suite à une combinaison de sollicitations. Cette deuxième problématique a été étudiée dans le cadre du programme CEPIA : Convertisseur Électronique de Puissance à Intégration Avancée⁵.

3.2.2.1 Prédiction de la durée de vie

La méthode usuelle pour estimer la fiabilité de dispositifs électroniques est synthétisée dans la figure 3.29. Cette méthode débute par l'analyse des technologies qui constituent les dispositifs électroniques, puis par les environnements rencontrés par ces dispositifs dans l'application. Ensuite, en lien avec l'état de l'art, une analyse des risques de défaillance est réalisée en associant les analyses technologiques et les environnements, pour définir les potentiels modes et mécanismes de défaillance. Enfin, des tests de vieillissement sont mis en place pour tenter de reproduire les modes et mécanismes précédemment identifiés.

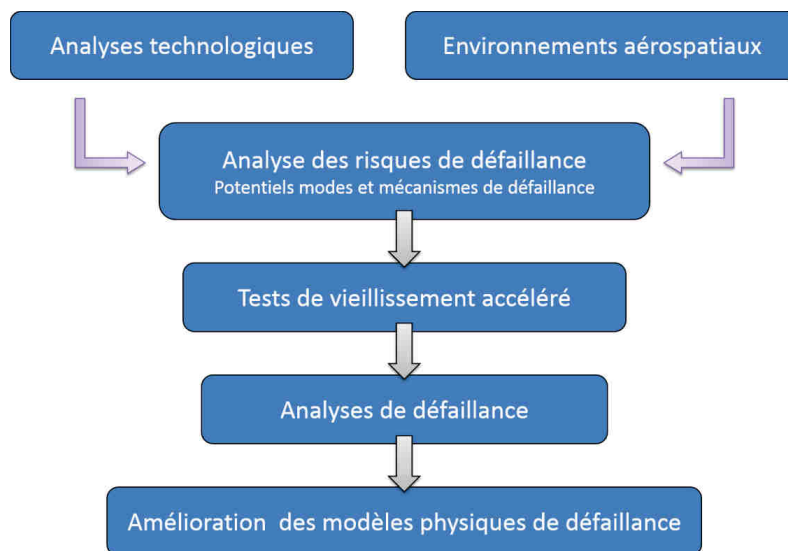


FIGURE 3.29: Méthode d'analyse pour l'étude de la fiabilité des composants en électronique de puissance.

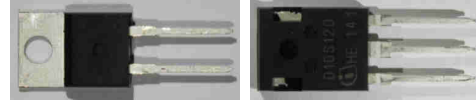
Analyses technologiques et environnements aérospatiaux. Au cours de cette étape de la thèse, un récapitulatif des besoins applicatifs a été mené. Cela a débouché sur la sélection d'un groupe de composants commerciaux⁶ répondant à des contraintes environnementales très diverses. Ces dernières découlaient de différents environnements rencontrés. Deux étapes de sélection supplémentaires ont ensuite été nécessaires pour choisir deux références de composants. Celles-ci satisfaisaient les mêmes critères qui sont résumés dans le tableau 3.30(a). $T_{storage}$ est la température de stockage maximale, T_j est la température maximale de jonction, $U_{B_{max}}$ est la tension maximale inverse et $I_{average}$ le courant nominal. Une référence présentait un boîtier TO-220, figure 3.30(b), alors que l'autre un boîtier TO-247, figure 3.30(c).

5. des détails complémentaires sur ce programme seront également trouvés § 4.3.2.1.

6. COTS - Components Off The Shelf.

$T_{storage}$	$-55\text{ }^{\circ}\text{C} / +175\text{ }^{\circ}\text{C}$
T_j	$-55\text{ }^{\circ}\text{C} / +175\text{ }^{\circ}\text{C}$
$U_{B_{max}}$	1200 V
$I_{average}$	10 A

(a) Caractéristiques principales des composants sélectionnés



(b) Boitier TO-220. (c) Boitier TO-247.

FIGURE 3.30: Caractéristiques des composants et boitiers associés.

L'analyse des matériaux internes aux références a fait apparaître des points communs (par exemple, la nature de la puce : diode de type SiC, la nature des fils d'interconnexion : *Al*, la nature de la métallisation supérieure de la puce : *Al/Ti*), et des différences (les métallisations inférieures et le matériau de scellement), Tab. 3.1.

TABLE 3.1: Analyses technologiques.

Référence n°	1	2
Grille de connexion	<i>Cu</i>	<i>Cu</i>
Fils d'interconnexion	<i>Al</i>	<i>Al</i>
Métallisation supérieure	<i>Al/Ti</i>	<i>Al/Ti</i>
Métallisation inférieure	<i>Cu/Ni/Ti</i>	<i>Ag/Ni/Ti</i>
Matériau de scellement	<i>PbSnAg</i>	<i>SnAgSb</i>
Matériau d'encapsulation	Epoxyde	Epoxyde

Mise en œuvre des expériences. Afin de prendre en compte et de reproduire toutes les sollicitations expérimentées par les assemblages et issues de la description des applications, plusieurs bancs de tests ont été développés, avec pour objectif de parvenir à des mécanismes, puis finalement à des modes de défaillance établis au préalable. Les tests de vieillissement sont regroupés en deux familles : les tests passifs et les tests actifs. Ces tests de vieillissement accéléré sont : le H3TRB (High Humidity, High Temperature Reverse Bias), le HPET (Humidity Popcorn Effect Test), le HTRB (High Temperature Reverse Bias), le RCT (Rapid Change of Temperature), le HTFB (High Temperature Forward Bias) et le PC (Power Cycling). Chaque test a été relié à une norme qui décrit le type, l'amplitude et la durée des sollicitations, ainsi que les indicateurs de fin de test, Tab. 3.2, pour une application donnée.

Une campagne de prélèvement et d'analyse des composants était prévue afin de suivre une évolution potentielle de l'assemblage au cours du vieillissement. Les analyses ont été regroupées en deux catégories, les analyses destructives (DT) et les analyses non destructives (NDT).

1. les analyses non destructives était :
 - des Caractérisations Électriques (CE) ;
 - des observations optiques ;
 - de la radiographie ou imagerie aux rayons X (analyses RX) ;
 - de la microscopie acoustique à balayage : SAM (Scanning Acoustic Microscopy) ;

TABLE 3.2: Synthèse des tests de vieillissement accéléré.

Tests passifs	Normes
H3TRB	CEI 60749-5 :2003
HPET	CEI 60749-5 :2003
HTRB	CEI 60749-23 :2004
RCT	CEI 60068-2-14 :2009
Tests actifs	Normes
HTFB	CEI 60749-23 :2004
PC	CEI 60749-34 :2010

- de la spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier FTIR (Fourier Transformed InfraRed).
- 2. les analyses destructives étaient :
 - des coupes micrographiques ;
 - de la microscopie électronique à balayage SEM (Scanning Electron Microscopy) ;
 - de la spectroscopie à dispersion d'énergie des rayons X EDX (Energy Dispersive X-ray).

Sur l'ensemble des tests menés, les évolutions significatives de l'assemblage ont été constatées pour les tests de cyclage actif de type PC. Ce qui nous a conduit à centrer l'étude sur ce type de test. Nous avons également conclu que pour les autres tests, les sollicitations appliquées n'étaient pas suffisamment contraignantes et ne permettaient pas de révéler des mécanismes et modes de défaillance.

Analyse des expériences. Concernant les tests actifs PC, trois séries de sollicitations ont été appliquées, selon les combinaisons de valeurs de T_{jmax} température de jonction maximale, ΔT_j variation de température de jonction et T_{ref} température de la plaque thermorégulée, Tab. 3.3 :

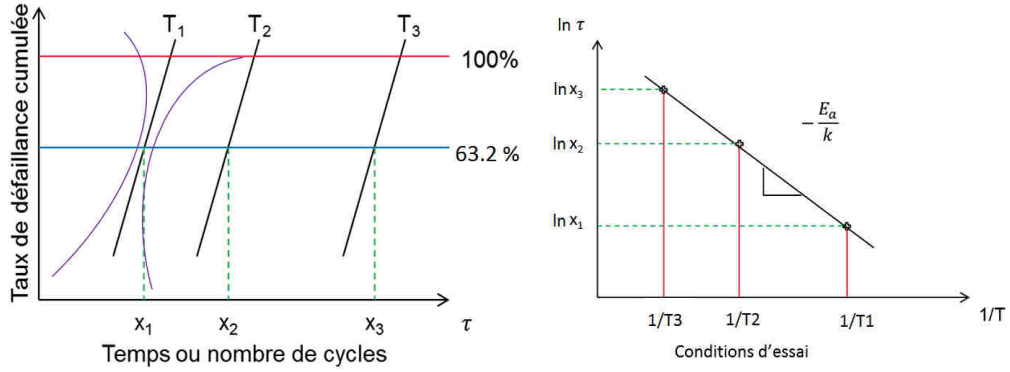
TABLE 3.3: Sollicitations appliquées.

	T_{jmax}	ΔT_j	T_{ref}
Série 1	175 °C	40 °C	135 °C
Série 2	175 °C	90 °C	85 °C
Série 3	110 °C	90 °C	20 °C

Ces valeurs ont été choisies de façon à solliciter les composants relativement à leur température maximale de jonction, ou relativement à une amplitude de variation de la température de jonction très importante. Dans le dernier test, l'objectif était de discriminer la vitesse d'occurrence du mécanisme de défaillance vis-à-vis de la valeur de température. Un paramètre thermosensible était utilisé pour suivre la variation de la température de jonction. Pendant les phases de relaxation des contraintes, un courant très faible de 100 mA a été injecté, la mesure de la chute de tension associée était ensuite reliée à la température de jonction. Cette loi était issue d'une courbe d'étalonnage linéarisée en anticipation de toute expérience.

Au cours des tests, dès qu'un échantillon voyait son indicateur de défaillance dépasser le seuil prévu, il était considéré comme défaillant. Le cumul des échantillons

défaillants au cours du cycle de sollicitation, pour chacune des séries d'expériences, a permis d'obtenir le tracé de la droite de distribution. Les trois tests donnaient des temps de défaillance correspondant à une loi de Weibull, dont les droites de distributions sont représentées figure 3.31(a). Par une méthode statistique (intervalle de confiance appliqué à la distribution), l'enveloppe (ou courbes en fuseau violettes sur la figure) a été déterminée et délimite la plage admissible pour toutes les droites pouvant être associées à cette distribution.



(a) Droites de distribution des temps de défaillance. (b) Droite de détermination de l'énergie d'activation.

FIGURE 3.31: Droites de distribution des temps de défaillance.

Le taux de défaillance à 63.2% correspond à la distribution statistique la plus étroite de cette enveloppe. Le temps de défaillance correspondant à 63.2% des échantillons défaillants a été reporté sur un diagramme d'Arrhenius, figure 3.31(b), pour déduire les inconnues du modèle phénoménologique décrit par une équation du type loi d'Arrhenius :

$$\tau = A \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right), \quad (3.16)$$

où τ est la durée de vie, A est un coefficient, E_a l'énergie d'activation, k la constante de Boltzmann et T la température. L'alignement de plusieurs points permet d'une part de remonter à la pente $\frac{E_a}{kT}$, et d'autre part de vérifier qu'une régression linéaire de cette distribution est possible sous la forme :

$$\ln(\tau) = \ln(A) - \frac{E_a}{kT}. \quad (3.17)$$

Enfin, l'identification du paramètre $-\frac{E_a}{k}$ permet de déduire le facteur d'accélération AF défini comme :

$$AF = \frac{\tau_j}{\tau_i} = \exp\left(-\frac{E_a}{kT_j} + \frac{E_a}{kT_i}\right). \quad (3.18)$$

τ_j est la durée de vie des échantillons sollicités à la température T_j , connaissant la durée de vie τ_i des échantillons à la température T_i . Finalement, c'est la connaissance de ce facteur d'accélération qui peut permettre l'estimation de la durée de vie en application.

Synthèse préliminaire. Les résultats des travaux de cette thèse ont été liés aux conditions d'expérimentation et à leur bon déroulement. Tous les résultats attendus initialement n'ont pas pu être exploités. Cependant, certaines problématiques sont apparues et peuvent donner lieu à des études complémentaires. Les outils développés dans ces travaux ont concerné le développement et la mise en œuvre de bancs de sollicitation et de caractérisation de composants. Une étape initiale d'utilisation des outils statistiques a été accomplie, permettant d'envisager une poursuite des études.

Tout d'abord, concernant les bancs de tests eux-mêmes et les méthodes associées de mesure des indicateurs, des propositions peuvent être formulées. Lors de l'utilisation d'un paramètre thermosensible, il apparaît important de calibrer au cours du cycle de fonctionnement ce paramètre. De plus, la précision de l'information délivrée dépend également de la maîtrise de la chaîne d'acquisition, notamment dans le délai et le temps d'application du courant injecté. Enfin, ce paramètre n'est pas insensible aux évolutions de l'assemblage. Ce sujet d'étude est une piste de recherche tout à fait pertinente. En effet, un indicateur de température de jonction est important à double titre. Tout d'abord il donne une information qui peut être utilisé dans les algorithmes de surveillance. Ensuite, son évolution peut également traduire une détérioration interne de l'assemblage il est donc porteur d'une information de l'évolution de l'état de santé.

Concernant les résultats des tests de vieillissement, il a été démontré dans ces travaux, une relation entre l'évolution d'une partie de l'assemblage, et l'arrivée d'un mécanisme de défaillance sur une autre partie de l'assemblage. Ces mécanismes, bien que décrits par la bibliographie, n'avaient pas été déterminés dans des assemblages d'électronique de puissance. Ce qui tend à confirmer tout l'intérêt à poursuivre ce type d'investigation.

Enfin, il est intéressant de prendre en compte dans de futures études la compétition entre les mécanismes de défaillance lorsque plusieurs types de sollicitations co-existent. Ces travaux ont été valorisés dans les publications listées dans l'annexe bibliographique personnelle (annexe B) : [ACTI12], [ACTI19].

3.2.2.2 Sollicitations multicontraintes

Le projet CEPIA (Convertisseur Électronique de Puissance à Intégration Avancée) avait pour ambition de définir une démarche complète d'approche de la problématique de la fiabilité, allant de la définition des essais de qualification, à la réalisation de ces derniers sur un banc de test de contraintes combinées. Le LGP/ENIT a participé à la spécification du banc de contraintes combinées et à la livraison de ce dernier.

Étape de spécification du banc. Les travaux préliminaires ont permis de définir la démarche pour recueillir l'ensemble des données nécessaires à l'étude de la fiabilité des électroniques de puissance, en particulier sur les composants de puissance. Cela a été traduit par des valeurs minimales et maximales concernant la température, la pression et l'humidité ambiante. Les valeurs électriques et d'auto-échauffement des composants ont également été prises en compte. Ces données ont été extraites pour l'aéronautique de l'ISA (International Standard of Atmosphere) puis adaptée en fonction des altitudes atteintes par le système, et par les normes

EN50163 et IEC61373 pour les systèmes ferroviaires. Lorsque ces données ont été superposées aux cycles de fonctionnement des équipements, toutes les contraintes subies par ces derniers ont été listées :

- contraintes électriques : les sollicitations en tension et courants ;
- contraintes mécaniques vibratoires ;
- contraintes thermiques : elles résultent à la fois des profils de températures environnementaux (journaliers, saisonniers, en fonction de la région du monde où l'équipement est exploité), et opérationnels (injection de puissance lors de l'enchaînement des cycles accélération - freinage).

Finalement, la déclinaison du profil de mission, du système au composant, a été décrit par un tableau. Pour une application ferroviaire par exemple, chaque ligne correspond à un mois de l'année, avec un nombre de jours d'utilisation. Les colonnes contiennent le nombre de cycles décrit par jour. Ainsi, dans chaque case, un profil d'injection de puissance a été renseigné. Puis, pour chaque case de ce type de tableau un profil environnemental et un profil opérationnel ont été pris en compte. Ceci a permis d'établir un graphe de répartition de sollicitation en température par mission.

La spécification de ces contraintes a conduit à la définition d'un banc de sollicitations multicontraintes, illustré figure 3.32, et dont les capacités sont décrites ci-après. Ce banc, autour d'une enceinte de 1 m^3 de volume utile, permet une

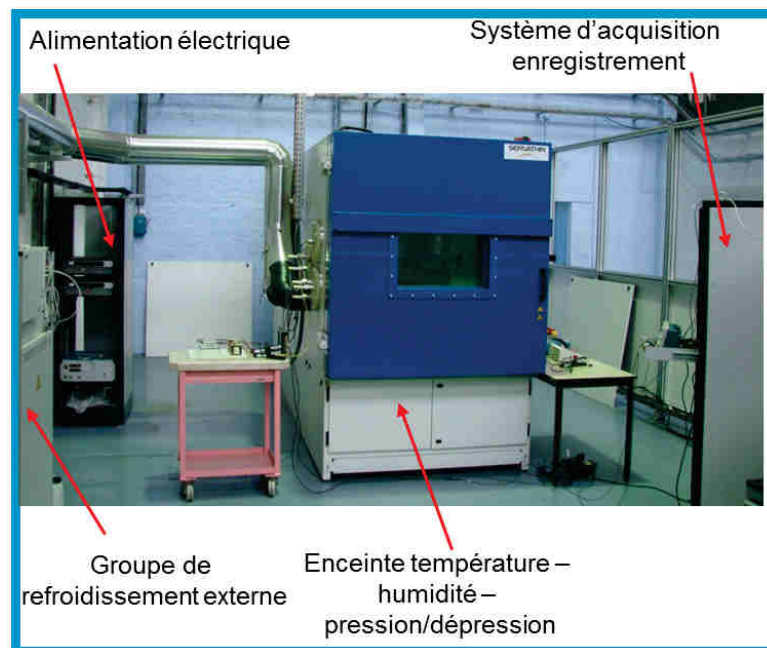


FIGURE 3.32: Banc de contrainte CEPIA.

combinaison de contraintes de différentes natures : électriques, thermiques, en humidité, en dépression, de manières simultanées selon la gamme :

- température : gamme $-70^{\circ}\text{C}/+200^{\circ}\text{C}$, Gradient $+10/-10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ de -35°C à $+175^{\circ}\text{C}$;
- humidité relative : gamme 20 % à 98 % ;
- pression du milieu entourant le système en test : pression atmosphérique à 90 mbar (altitude 0 à 55000 pieds) ;
- électriques :

- tension de 270 V à 6500 V DC,
- courant : 0 à plusieurs kA.

Le pilotage global des éléments opérationnels du banc et des chaînes d'acquisition des données, est réalisé par un système de supervision général ayant les caractéristiques suivantes :

- développé sur la base du logiciel LabView, cartes National Instruments, pilotage synchrone ou asynchrone pour chaque équipement ;
- associé à un système d'acquisition et enregistrement haute vitesse HBM (NI-COLET), 8 voies 25 MS/s (pour enregistrement des phénomènes électriques) 16 voies 200 kS/s (pour enregistrement des phénomènes climatiques), stockage dans BdD MySQL : 10 To (ce qui correspond à 20 000 mesures /s pendant 8 ans).

Exploitation et résultats du banc. Pendant la durée du projet CEPIA, l'objectif était de solliciter les équipements par plusieurs types de contraintes, afin d'obtenir des défaillances. Un banc de sollicitations multicontraintes permettant de reproduire les sollicitations de l'aéronautique et du ferroviaire a été conçu et mis en œuvre. Les travaux réalisés ont révélé l'importance des tests multicontraintes. Effectivement, au cours des campagnes de test, il a été constaté que plusieurs mécanismes de défaillance pouvaient apparaître dans des intervalles de cycles de sollicitation courts.

Les travaux futurs qui peuvent être imaginés sont nombreux. Ainsi, par analyse des expériences, les mécanismes de défaillance pourraient être identifiés et reliés à une sollicitation. Ensuite, l'objectif serait de construire une loi d'accélération prenant en compte plusieurs contraintes et dont les coefficients seraient identifiés suite aux résultats des temps de défaillance. Ces propositions constituent une des perspectives de développement. Les travaux associés au programme CEPIA ont été valorisés dans les publications listées dans l'annexe bibliographique personnelle (annexe B) : [ACTN3].

3.2.3 Synthèse

Au cours des travaux d'étude de la caractérisation des mécanismes de défaillance de composants commerciaux, deux diodes Schottky de puissance, provenant de deux fabricants différents, ont été soumises à une campagne de tests, dont les sollicitations reproduisaient les environnements rencontrés au cours de la vie de ces composants. Ces différents tests ont provoqué la défaillance de plusieurs échantillons pouvant survenir dans des phases des systèmes actifs, ainsi que dans celles des applications dormantes. Il faut ici retenir que les tests passifs ont surtout révélé les défauts initiaux des composants et leur sensibilité à une variation environnementale, sans que cela puisse permettre de calculer une durée de vie. Au contraire, les simulations de régime On-Off par l'injection de courant ont provoqué la défaillance des composants, par l'initiation et la propagation de fissures dans la soudure des fils d'interconnexion, mécanisme communément appelé lift-off, qui correspond au soulèvement du pied des fils. L'exploitation des tests a révélé que ce mécanisme est lié à l'amplitude des variations de la température de jonction et à la température maximale atteinte. Les conclusions de cette étude permettent d'affirmer qu'un plus grand nombre de composants électroniques doit être concerné par les tests, mais

aussi que la chaîne d'estimation de la température de jonction, tant dans son calcul que dans sa mise en œuvre matérielle, est un paramètre clé de la qualité des résultats obtenus. Ces deux points seront discutés dans les perspectives.

Par ailleurs, la définition de campagnes de tests multicontraîntes a démontré toute sa pertinence. Cependant, elle constitue toujours un objectif de recherche à développer. Effectivement, les outils sont disponibles, mais leur emploi devrait être d'avantage lié aux outils de l'inférence statistique, tant pour la spécification des plans d'expérience que pour leur exploitation.

3.3 Pilotage et mesures pour l'électronique de puissance

3.3.1 Stratégie de modulation pour la conversion statique de l'énergie

Les travaux présentés dans cette partie visent à définir une nouvelle approche pour la modélisation et la génération des stratégies de modulation des convertisseurs statiques, la Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI). Débuté en septembre 2010 au cours du stage de Simon Caillhol (annexe A.4), un premier modèle pour les onduleurs de tension à 2 niveaux a été développé. Le travail a permis l'expression des solutions mathématiques liant les rapports cycliques aux tensions de référence. Cette approche s'appuie sur l'utilisation de l'inverse généralisée qui permet de résoudre un système linéaire compatible.

Ensuite, la génération des stratégies associées aux onduleurs de tension multiniveaux, a été développée pour partie dans la thèse de Karima Berkoune (annexe A.2). Le travail a notamment permis la formulation des limites des domaines de validité des solutions. Suite à ces travaux, un modèle générique à trois structures d'onduleurs multiniveaux, et adapté à un nombre indéfini de niveaux, a été possible [68].

Initialement appliqué à des modulations intersectives, le modèle générique proposé peut être étendu aux modulations vectorielles, comme cela sera décrit au paragraphe 3.3.1.4. C'est l'ensemble de ces travaux qui est présenté ci-après.

3.3.1.1 Onduleur de tension à 2 niveaux

Modèle moyen. L'architecture considérée est un onduleur triphasé à 2 niveaux, relié à une source de tension continue E , et à une charge R, L assimilée à une source de courant triphasée, figure 3.33. Nous considérons des interrupteurs idéaux commandables $K_j, K'_j, j \in \{1, 2, 3\}$. Rappelons également que le fonctionnement de cette architecture n'est possible que si :

$$\begin{cases} c_j = \bar{c}'_j = 1 \Rightarrow K_j \text{ est amorcé, } K'_j \text{ est bloqué,} \\ c_j = \bar{c}'_j = 0 \Rightarrow K_j \text{ est bloqué, } K'_j \text{ est amorcé.} \end{cases} \quad (3.19)$$

$c_j, \in \{0, 1\}$, est l'ordre de commande envoyé à l'interrupteur K_j . L'ensemble K_j, K'_j constitue une cellule élémentaire de commutation. Une période de commutation est

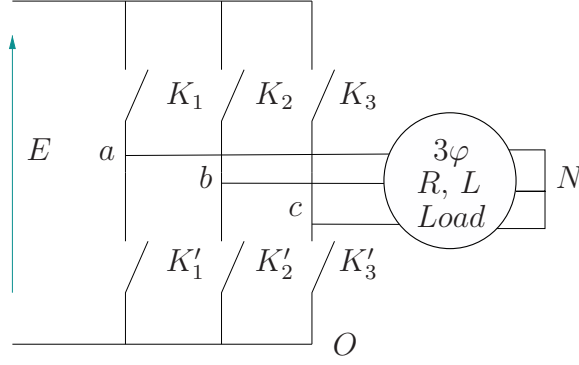


FIGURE 3.33: Onduleur triphasé à 2 niveaux.

définie et notée T_s . Pour chaque bras, et dans cette configuration chaque cellule élémentaire, la définition du rapport cyclique est :

$$\alpha_i = \frac{t_{iON}}{T_s} \quad \text{avec} \quad i \in \{a, b, c\}, \quad (3.20)$$

où t_{iON} représente le temps à l'état amorcé de K_i . Comme illustré sur la figure 3.34, les tensions V_{aO} , V_{bO} , V_{cO} ⁷, expriment sur une période de commutation les valeurs moyennes des tensions de bras $v_{aO}(t)$, $v_{bO}(t)$, $v_{cO}(t)$, et sont définies telles que :

$$\langle v_{iO}(t) \rangle_{T_s} = V_{iO} = \frac{1}{T_s} \int_t^{t+T_s} v_{iO}(t) dt = \alpha_i E. \quad (3.21)$$

En considérant une charge équilibrée, $Z = Z_1 = Z_2 = Z_3$, avec Z l'impédance

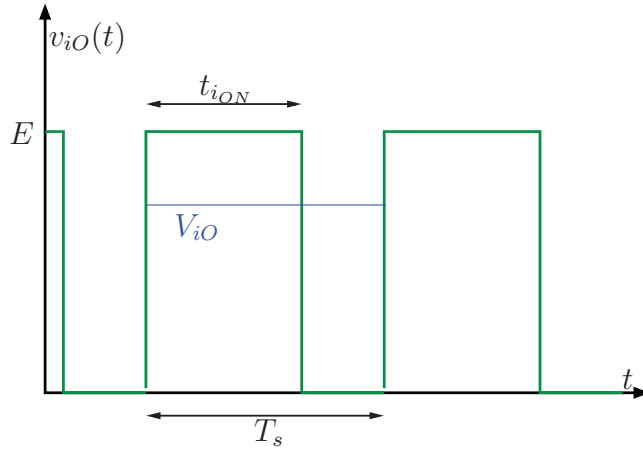


FIGURE 3.34: Tension v_{iO} aux bornes d'un interrupteur K_i , $i \in \{1; 2; 3\}$.

complexe, et en prenant en compte les autres bras de l'onduleur, les tensions simples aux bornes de la charge sont exprimées sous la forme :

$$V_{lN} = \frac{E}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \alpha. \quad (3.22)$$

7. Nous simplifions les notations en considérant dorénavant que les valeurs moyennes de tensions sur une période de commutation sont notées V_{iO} ou V_{iN} au lieu de $\langle v_{iO}(t) \rangle_{T_s}$ et $\langle v_{iN}(t) \rangle_{T_s}$ respectivement. Toujours par souci de simplification des écritures les vecteurs ne seront pas soulignés.

Ce qui peut être simplifié, si

$$M = \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix}, \quad (3.23)$$

alors,

$$V_{lN} = \frac{E}{3} M \alpha. \quad (3.24)$$

V_{lN} est le vecteur colonne qui rassemble les tensions simples et α le vecteur des rapports cycliques, tels que :

$$\alpha = [\alpha_1 \quad \alpha_2 \quad \alpha_3]^T. \quad (3.25)$$

et

$$V_{lN} = [V_{aN} \quad V_{bN} \quad V_{cN}]^T. \quad (3.26)$$

Dans les charges équilibrées considérées, la somme des tensions est nulle,

$$V_{aN} + V_{bN} + V_{cN} = 0, \quad (3.27)$$

ce qui est directement retrouvé dans l'analyse du rang de la matrice M , effectivement,

$$\text{rang}[M] = 2. \quad (3.28)$$

Le système linéaire (3.22) est compatible, $\text{rang}[M] = \text{rang}[M V_{lN}]$, par conséquent on peut se ramener à l'étude d'un système linéaire réduit. Seules 2 tensions V_{aN} et V_{bN} sont exprimées telles que :

$$W = N \alpha, \quad (3.29)$$

avec $W = \begin{bmatrix} V_{aN} \\ V_{bN} \end{bmatrix}$ et $N = \frac{E}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \end{bmatrix}$. Comme pour l'équation (3.22), cette équation est compatible et possède une infinité de solutions, $\text{rang}[M] <$ nombre de lignes de V_{lN} .

Ensemble des solutions. Par l'utilisation de l'inverse généralisée de N , notée $N^{\{1\}}$, les solutions pour les rapports cycliques sont générées. L'ensemble des solutions est :

$$\alpha = N^{\{1\}} W + (I_3 - N^{\{1\}} N) z. \quad (3.30)$$

$W = [V_{ref_{aN}} \quad V_{ref_{bN}}]^T$ sont les tensions de références, normalement issues de correcteurs dans un schéma d'asservissement. $N^{\{1\}}$ est une inverse généralisée de N telle que $NN^{\{1\}}N = N$. Dans un premier temps, z est arbitraire, et est tel que $z = [z_1 \ z_2 \ z_3]^T$. Parce que N est de rang plein en ligne, la pseudo-inverse de N , notée N^\dagger qui est une inverse généralisée particulière de N [7], est obtenue par :

$$N^\dagger = N^T (N N^T)^{-1} = \frac{3}{E} \begin{bmatrix} \frac{1}{3} & 0 \\ 0 & \frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \end{bmatrix}.$$

L'ensemble des solutions est donc exprimée par :

$$\alpha = N^\dagger W + (I_3 - N^\dagger N)z . \quad (3.31)$$

La pseudo-inverse présente l'avantage d'être unique et de pouvoir être obtenue facilement, notamment par décomposition en valeurs singulières. Ce qui permet d'exprimer les 3 rapports cycliques α_i :

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ref_{aN}} \\ V_{ref_{bN}} \end{bmatrix} + \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{bmatrix} \\ &= \frac{1}{E} \begin{bmatrix} V_{ref_{aN}} \\ V_{ref_{bN}} \\ V_{ref_{cN}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \lambda , \end{aligned} \quad (3.32)$$

où

$$\lambda = \frac{z_1 + z_2 + z_3}{3} \quad (3.33)$$

est le degré de liberté à fixer. Soit, avec $U = [1 \ 1 \ 1]^T$,

$$\alpha = \frac{V_{ref}}{E} + \lambda U. \quad (3.34)$$

Dans cette expression λU est la partie libre qui doit être exprimée en tenant compte de l'équation de compatibilité : $0 \leq \alpha_i \leq 1$. Cet encadrement correspond à une limite physique. Effectivement, on considère que le rapport cyclique ne peut pas être plus important que la période de commutation. Ce qui implique un encadrement de λ ,

$$-\frac{\min(V_{ref})}{E} \leq \lambda \leq 1 - \frac{\max(V_{ref})}{E}. \quad (3.35)$$

Avec les hypothèses considérées, toutes les solutions de modulation seront générées à partir des valeurs admissibles de λ . Notons également que dans cette configuration et quel que soit le choix de λ , le degré de liberté est appliqué de façon identique aux trois bras de l'onduleur.

Expression des marges pour les degrés de liberté. Notre première démarche a été de retrouver les stratégies de modulation MLI appliquées à ce type d'onduleurs. Il convient donc de procéder, tout d'abord, à une translation du degré de liberté : 2 nouvelles variables sont introduites, il s'agit de μ et λ_b . Elles sont liées au degré de liberté λ par :

$$\lambda = \lambda_b + \mu. \quad (3.36)$$

Ce qui permet une nouvelle formulation de l'ensemble des solutions :

$$\alpha = \frac{V_{ref}}{E} + \lambda_b U + \mu U = \alpha_{base} + \mu U \quad (3.37)$$

avec α_{base} solution de base et définie par :

$$\alpha_{base} = \frac{V_{ref}}{E} + \lambda_b U. \quad (3.38)$$

Pour garantir une évolution du rapport cyclique dans l'intervalle $0, 1$, $\lambda_b = \frac{1}{2}$. Les marges pour le choix de μ sont aussi redéfinies et deviennent :

$$-\frac{\min(V_{ref,k})}{E} - \frac{1}{2} \leq \mu \leq \frac{1}{2} - \frac{\max(V_{ref,k})}{E} \quad (3.39)$$

avec μ_{high} , μ_{low} qui sont, respectivement, les marges supérieures et inférieures. Si μ respecte cet encadrement, alors il existe des rapports cycliques dans leur intervalle de définition et nous pouvons déterminer une solution sans surmodulation⁸.

Remarquons également que si

$$\mu_{low} \leq \mu_{high} \quad \Leftrightarrow \quad \max(V_{ref,k}) - \min(V_{ref,k}) \leq E, \quad (3.40)$$

alors la valeur maximale des tensions de références à appliquer, V_{max} , pour rester dans de telles conditions, peut être déterminée par :

$$\max(V_{ref,k}) - \min(V_{ref,k}) = \max(V_{ll}) = \sqrt{3}V_{max}, \quad (3.41)$$

avec $V_{ll} = [V_{ab} V_{bc} V_{ca}]^T$. La conclusion est que pour l'onduleur illustré figure 3.33, lorsque μ respecte (3.39), le maximum de la zone de linéarité sera obtenu pour une tension simple maximale V_{max} , que l'on peut générer sans surmodulation, telle que

$$V_{max} \leq \frac{E}{\sqrt{3}}. \quad (3.42)$$

Expression des degrés de liberté. Le premier choix d'expression pour μ devient alors évident. Prenons μ tel qu'il soit toujours centré dans l'intervalle $[\mu_{low}; \mu_{high}]$, par exemple,

$$\mu = \frac{\mu_{high} + \mu_{low}}{2}. \quad (3.43)$$

Ce qui en remplaçant les expressions des marges peut être développé par :

$$\mu = -\frac{1}{2E} (\max(V_{ref,k}) + \min(V_{ref,k})). \quad (3.44)$$

Il est tout à fait remarquable que cette démonstration prouve que le choix classique pour une MLI de lier μ à l'expression $\frac{V_{NO}}{E}$, revient à placer le degré de liberté au milieu de son intervalle de définition. Ainsi, une zone de linéarité maximale est garantie.

Sur cette base de réflexion d'autres solutions pour l'expression des rapports cycliques peuvent être choisies. Par exemple, en garantissant une zone de linéarité maximale, Eq. (3.39), il peut être intéressant de maintenir un interrupteur fermé ou ouvert, c'est à dire de clamber son rapport cyclique à 1 ou à 0, pour plus d'une période de commutation. C'est ce qui est fait lorsque le choix pour μ devient

$$\mu = \mu_{high}. \quad (3.45)$$

Les résultats de ce choix seront illustrés dans la section suivante.

8. Dans le sens où les α_i ne seront jamais strictement supérieurs à 1.

Résultats. Pour illustrer nos démonstrations, des simulations sont effectuées en utilisant le logiciel de calcul numérique Scilab. Une charge triphasée équilibrée RL est utilisée avec $R = 15\Omega$ and $L = 1\text{ mH}$. La réponse en courant est calculée par intégration de la tension de sortie d'onduleur appliquée. Cette tension est de type créneau et peut prendre 2 valeurs, suivant l'information des ordres de commande c_i :

$$\begin{cases} V_{iO} = E & \text{si } c_i = 1 \\ V_{iO} = 0 & \text{si } c_i = 0 . \end{cases} \quad (3.46)$$

Les ordres de commande sont issus d'un schéma classique de MLI (comparaison modulante porteuse après échantillonnage de la modulante, figure 2.6) en considérant une référence de tension telle que :

$$V_{ref}(t) = \begin{bmatrix} V_{max} \cos(2\pi f.t) \\ V_{max} \cos\left(2\pi f.t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ V_{max} \cos\left(2\pi f.t - \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix} , \quad (3.47)$$

avec, $f = 50\text{ Hz}$, $E = 562\text{ V}$. La valeur maximale prendra plusieurs valeurs dans l'intervalle $V_{max} \in [0 ; 325]\text{ V}$. La fréquence de la porteuse triangle est 10 kHz . Selon ce principe, les valeurs des rapports cycliques sont constantes pendant une période de commutation $T_s = 0.1\text{ ms}$.

Les résultats de simulation sont obtenus, dans un premier temps, dans 2 configurations :

1.

$$\lambda_b = \frac{1}{2} \quad \text{et} \quad \mu_S = 0 ; \quad (3.48)$$

2.

$$\lambda_b = \frac{1}{2} \quad \text{et} \quad \mu_{ZSS} = -\frac{1}{2E} (\max(V_{ref,k}) + \min(V_{ref,k})) . \quad (3.49)$$

Les valeurs de tension maximales désirées sont variables selon :

$$V_{max} = \begin{cases} \frac{E}{3} & \text{si } 0 \leq \text{Temps} < 0.03\text{ s} , \\ \frac{2E}{3} & \text{si } 0.03\text{ s} \leq \text{Temps} < 0.06\text{ s} , \\ \frac{E}{\sqrt{3}} & \text{si } 0.06\text{ s} \leq \text{Temps} \leq 0.1\text{ s} . \end{cases} \quad (3.50)$$

Dans ce contexte de simulation les résultats suivants sont obtenus. Sur la figure 3.35 sont représentées les marges pour μ , ainsi que les 2 valeurs choisies : μ_S et μ_{ZSS} . Les marges varient lorsque V_{max} évolue. Au-delà de $V_{max} > \frac{E}{2}$, μ_S ne vérifie plus la relation (3.39), alors que μ_{ZSS} la respecte tout le temps. C'est ce qui est décrit comme zone de linéarité. Sur la figure 3.36, cette analyse est confortée lorsque le rapport cyclique obtenu avec μ_S franchit la valeur limite supérieure 1. Au contraire, la déformation de α_{ZSS} lui permet de respecter l'encadrement sur une plus grande plage de V_{max} .

Si on analyse maintenant la proposition visant à réduire les pertes par commutations grâce à :

$$\mu = \mu_{high} . \quad (3.51)$$

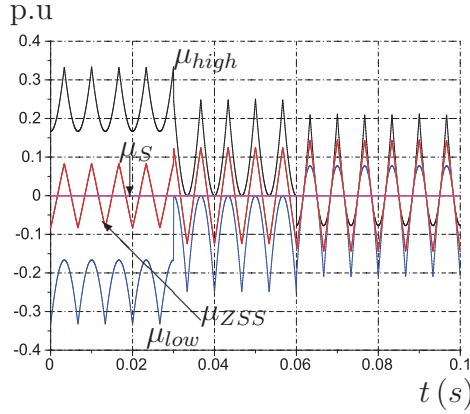


FIGURE 3.35: Marges pour μ et tracé de μ pour une MLI de type sinusoidale - μ_S lors d'une "Zero Sequence Signal PWM" - μ_{ZSS} .

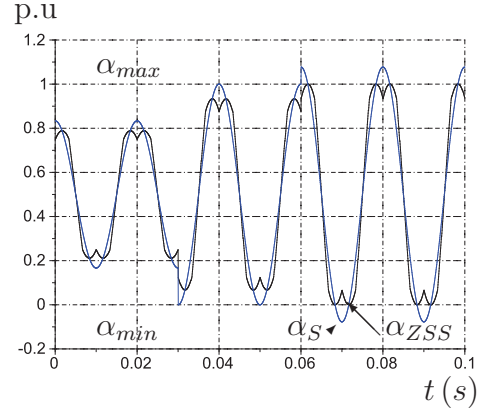


FIGURE 3.36: Rapport cyclique d'un bras lorsqu'une mLI sinusoidale est appliquée - α_S et lorsqu'une "Zero Sequence Signal PWM" - α_{ZSS} est appliquée.

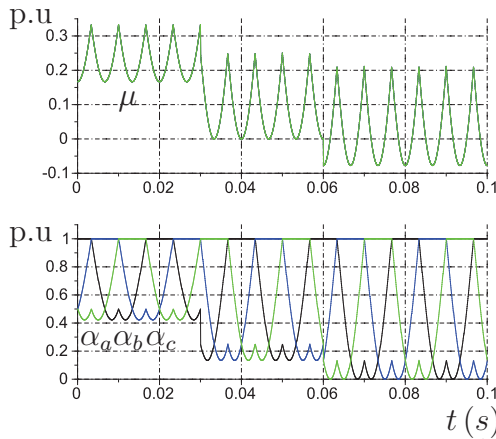


FIGURE 3.37: μ et rapports cycliques pour minimiser les pertes par commutations.

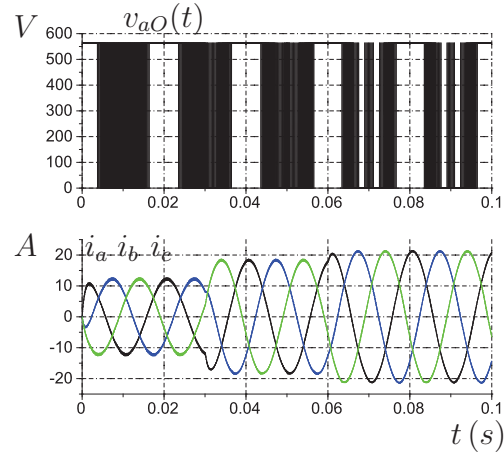


FIGURE 3.38: Tension de bras et courants triphasés pour μ minimisant les pertes par commutations.

les rapports cycliques appliqués sont illustrés sur la figure 3.37. La figure 3.37 atteste que les rapports cycliques sont bornés et respectent la plage de variation $[0; 1]$. Le fait que moins de commutations soient produites, est illustré sur la tension d'un bras, ici $v_{aO}(t)$, qui se retrouve régulièrement fixé à la valeur E , sans que les courants soient affectés.

3.3.1.2 Généralisation pour des structures à cellules imbriquées à N niveaux

Modèles génériques. Quand on a établi le modèle précédent, il est tentant de l'appliquer à des structures multiniveaux qui présentent une imbrication de la cellule élémentaire dans leur architecture. Ainsi, pour des structures à N cellules imbriquées permettant des tensions de bras de sortie d'onduleur à N niveaux de tension (par exemple la structure à capacité flottante, figure 3.39), la tension de

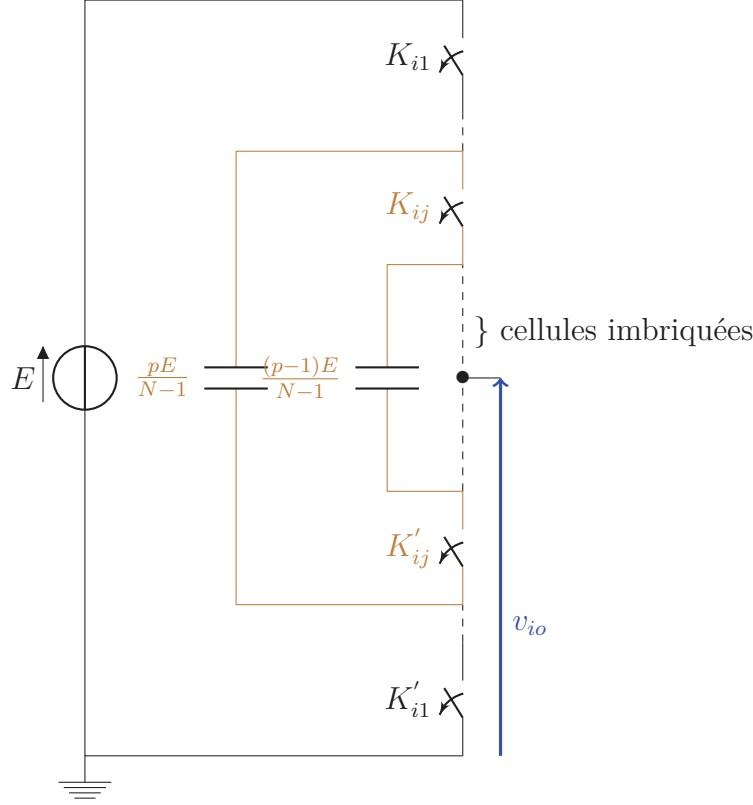


FIGURE 3.39: Bras isolé d'un onduleur à N-niveaux à capacité flottante.

bras V_{iO} peut-être exprimée.

De cette figure est déduite la valeur moyenne de la tension d'un bras i , composée elle-même de toutes les tensions $V_{K'_{ij}}$ des interrupteurs K'_{ij} en série :

$$V_{iO} = \sum_{j=1}^{N-1} V_{K'_{ij}} \quad (3.52)$$

Pour les mêmes raisons de simplification que précédemment, nous notons plus simplement les valeurs moyennes par V_{iO} et $V_{K_{ij}}$, $V_{K'_{ij}}$. Or, pour chaque cellule de commutation, constituée de 2 interrupteurs complémentaires K_{ij} et K'_{ij} , il est démontré que

$$V_{K'_{ij}} = \frac{E}{N-1} \alpha_{ij}. \quad (3.53)$$

Enfin, en considérant une charge équilibrée et un onduleur à N niveaux triphasé, les 3 tensions simples appliquées à la charge sont trouvées :

$$V_{lN} = \frac{E}{3(N-1)} M(I_3 \otimes L) \alpha. \quad (3.54)$$

Avec \otimes , le produit de Kronecker, et M la matrice définie à l'expression (3.23). La matrice I_3 est la matrice identité et $L = [1 \ 1 \dots \ 1]$ un vecteur ligne de dimension $N-1$. L'utilisation des propriétés du produit de Kronecker [33], [38] permet ainsi de simplifier l'expression et d'obtenir :

$$V_{lN} = \frac{E}{3(N-1)} (M \otimes L) \alpha. \quad (3.55)$$

Remarquons que V_{lN} et α sont des vecteurs colonnes de dimension $3(N-1)$.

Expression des ensembles de solutions. L'ensemble des solutions est obtenu par utilisation des propriétés du produit de Kronecker et des inverses généralisées :

$$\alpha = \frac{3(N-1)}{E}(M^\dagger \otimes L^\dagger)V_{ref} + (I_{3(N-1)} - (M \otimes L)^\dagger(M \otimes L))z \quad (3.56)$$

En définissant un coefficient propre à la structure, ici $k_{FC} = \frac{3(N-1)}{E}$, l'expression se simplifie par :

$$\alpha = k_{FC}(M^\dagger \otimes L^\dagger)V_{ref} + (I_{3(N-1)} - \frac{1}{3}M \otimes L^\dagger L)z \quad (3.57)$$

Il est intéressant de constater que $L^\dagger L$ revient à considérer une matrice carrée pleine, dont les composantes sont 1, et de dimension $N-1$.

Il est difficile d'aller plus loin avec ces expressions. Cependant, nous savons que l'expression des degrés de liberté se situe dans la partie "libre" de (3.57), soit $(I_{3(N-1)} - \frac{1}{3}M \otimes L^\dagger L)z$. En utilisant les propriétés du produit de Kronecker vis-à-vis du *rang*, le nombre de degrés de liberté à exprimer est donné par :

$$\text{Nombre de degrés de liberté} = 3(N-1) - 2 \quad (3.58)$$

Par conséquent, le nombre de degrés de liberté dépend de la structure utilisée mais aussi du modèle retenu, ici un modèle mettant en œuvre les rapports cycliques. Vouloir exprimer et fixer les degrés de liberté, et non pas un vecteur arbitraire z , veut donc dire qu'il faut relier les degrés de liberté, qui seront contenus dans un vecteur λ , à cette partie libre.

Un exemple de choix pour un degré de liberté. Les structures d'onduleurs à capacités flottantes, notées *FC* dans ce mémoire, sont des structures à cellules imbriquées. Prenons un exemple plus concret en choisissant un onduleur triphasé à 3 niveaux, $N = 3$, soit $N-1 = 2$ cellules imbriquées. Basé sur (3.55), le modèle à considérer est :

$$V_{lN} = \frac{E}{6}M \otimes L\alpha = \frac{E}{6} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \otimes [1 \ 1] \alpha. \quad (3.59)$$

Si la matrice A est définie telle que $A = M \otimes L$, alors le modèle devient :

$$V_{lN} = \frac{E}{6}A\alpha = \frac{E}{6} \begin{bmatrix} 2 & 2 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & 2 & 2 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & 2 & 2 \end{bmatrix} \alpha \quad (3.60)$$

Or, $\text{rang}[A] = 2$, ce qui revient à pouvoir considérer un système réduit en introduisant $F = \begin{bmatrix} 2 & 2 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & 2 & 2 & -1 & -1 \end{bmatrix}$:

$$V_{lN} = \frac{E}{6}F\alpha = \frac{E}{6} \begin{bmatrix} 2 & 2 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & 2 & 2 & -1 & -1 \end{bmatrix} \alpha. \quad (3.61)$$

Enfin, les solutions sont, selon (3.57) :

$$\begin{aligned}
\alpha &= \frac{1}{E} F^\dagger + (I_6 - F^\dagger F) z, \\
&= \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 1 \\ -1 & -1 \\ -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ref_{aN}} \\ V_{ref_{bN}} \end{bmatrix} \\
&\quad + \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & 1/2 & 1/2 & 1/2 & 1/2 \\ -1 & 2 & 1/2 & 1/2 & 1/2 & 1/2 \\ 1/2 & 1/2 & 2 & -1 & 1/2 & 1/2 \\ 1/2 & 1/2 & -1 & 2 & 1/2 & 1/2 \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 & 1/2 & 2 & -1 \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 & 1/2 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ z_4 \\ z_5 \\ z_6 \end{bmatrix}.
\end{aligned} \tag{3.62}$$

L'analyse du nombre de degrés de liberté montre que $\text{rang}[I_6 - F^\dagger F] = 4$. Un vecteur λ à 4 composantes est défini, il contiendra les expressions désirées des degrés de liberté :

$$\lambda = [\lambda_1 \quad \lambda_2 \quad \lambda_3 \quad \lambda_4]^T. \tag{3.63}$$

Dans l'expression des rapports cycliques α , la mise en évidence du vecteur λ , fait apparaître une nouvelle matrice. Ceci est obtenu par factorisation de rang maximal de la partie libre de (3.57). La mise en équation ci-après résulte d'un choix particulier pour la factorisation de rang maximal, ce qui a été détaillé dans [8] et [68] :

$$\begin{aligned}
\alpha &= \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 1 \\ -1 & -1 \\ -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ref_{aN}} \\ V_{ref_{bN}} \end{bmatrix} \\
&\quad + \frac{1}{3} \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \\ \lambda_4 \end{bmatrix}.
\end{aligned} \tag{3.64}$$

Cette nouvelle mise en équation, rend évident que de manière similaire à l'onduleur 2 niveaux et triphasé, λ_4 est commun à tous les bras. Il sera choisi de façon à être une image de la tension de mode commun V_{NO} , tel que :

$$\lambda_4 = \frac{3}{2} + \frac{3V_{NO}}{E}. \tag{3.65}$$

Le facteur de translation est ici différent du cas précédent, mais cela est dû à la structure multiniveaux de l'onduleur (2 cellules imbriquées par bras). Les autres

$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ sont ajustés pour compenser la variation de la tension des condensateurs au cours du fonctionnement, par exemple :

$$\lambda_i = \frac{3}{2} \frac{C_i}{T_s} \frac{\Delta U_{ci}}{I_i}. \quad (3.66)$$

Avec C_i la capacité du condensateur d'entrée d'une cellule, ΔU_{ci} la variation de tension mesurée à ses bornes, et I_i , le courant de la phase correspondant au bras considéré.

3.3.1.3 Autres structures d'onduleurs

Cette méthode de modélisation a été appliquée avec succès à d'autres structures d'onduleurs multiniveaux :

- l'onduleur à diode clampée, dit NPC (Neutral Point Clamped) ;
- l'onduleur à ponts en H imbriqués, noté ci-après H-bridge ;
- l'onduleur multiniveaux modulaire, dit MMC (Modular Multilevel Converter).

3.3.1.4 Généralisation à d'autres schémas de modulation

Constat préliminaire. Quand on fait le bilan des structures de conversion, l'état de l'art fait également apparaître une multitude de stratégies de modulation. 2 grandes tendances peuvent être dégagées :

- les stratégies de type MLI ;
- les stratégies de placement des instants de commutation, qui permettent notamment d'exprimer les stratégies de types SVM.

Or, il est intéressant de constater que notre relation entre les tensions des phases et les rapports cycliques, peut être étendue aux stratégies de placement des instants de commutation. Considérons que t_k est l'instant où l'interrupteur doit s'amorcer, et t_{k+1} l'instant où il se bloque. Comme illustré sur la figure 3.40, une relation entre rapports cycliques et instants de commutation peut-être déduite :

$$\alpha_i = \frac{t_{iON}}{T_s} = \frac{t_{k+1} - t_k}{T_s}. \quad (3.67)$$

Elle peut être exprimée sous une forme matricielle :

$$\alpha_i = \frac{1}{T_s} \begin{bmatrix} 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_{k+1} \\ t_k \end{bmatrix}, \quad (3.68)$$

avec la relation de contrainte :

$$T_s = t_{k+1} + t_k. \quad (3.69)$$

Ce constat peut être généralisé à chaque bras d'un onduleur triphasé. Il faut considérer que, pour chaque bras de l'onduleur les interrupteurs peuvent se voir appliquer un temps de fermeture ou d'ouverture par les valeurs de t_k et t_{k+1} , figure 3.41. Ainsi, chaque bras d'onduleur génère une tension de bras V_{io} liée aux temps d'ouverture et de fermeture des interrupteurs le constituant,

$$V_{iO} = \begin{pmatrix} V_{aO} \\ V_{bO} \\ V_{cO} \end{pmatrix} = \frac{E}{3} \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} t_K, \quad (3.70)$$

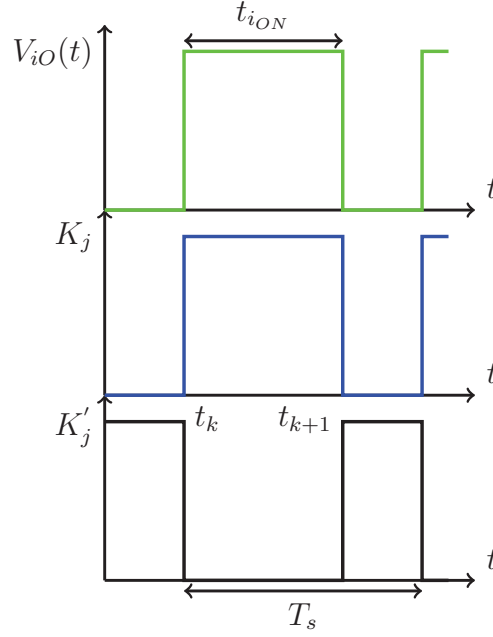


FIGURE 3.40: Expression de la tension de bras et des états des interrupteurs.

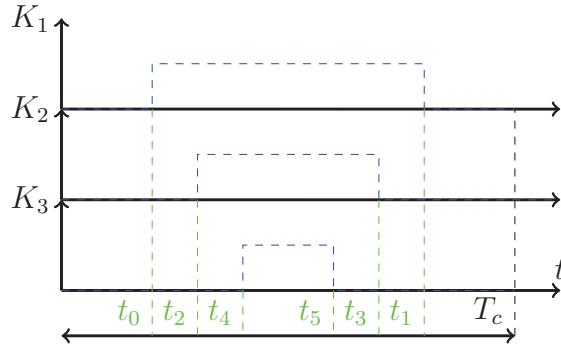


FIGURE 3.41: Temps de fermeture et d'ouverture des interrupteurs supérieurs des bras d'un onduleur triphasé.

avec $t_K = [t_0 \ t_1 \ t_2 \ t_3 \ t_4 \ t_5]^T$. En utilisant les relations liant V_{IN} , V_{IO} et V_{NO} on établit :

$$V_{IN} = \frac{E}{3T_c} \begin{bmatrix} -2 & 2 & 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & -2 & 2 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & -2 & 2 \end{bmatrix} t_K .$$

Il s'agit de l'expression d'un système linéaire compatible ayant une infinité de solutions.

Quelques généralités sur la SVM. Sur la base de cette idée, il faut analyser comment appliquer notre modélisation et sa résolution à la mise en œuvre d'une SVM. Effectivement, lors d'une SVM, les tensions de références issues de la régulation sont exprimées dans un référentiel diphasé (par utilisation de la transformation de Concordia), puis selon le secteur d'appartenance du vecteur tension résultant V_{ref} , des temps d'application de séquences d'ouverture et de fermeture des interrupteurs sont obtenus. Comme présenté sur la figure 3.42, les secteurs sont

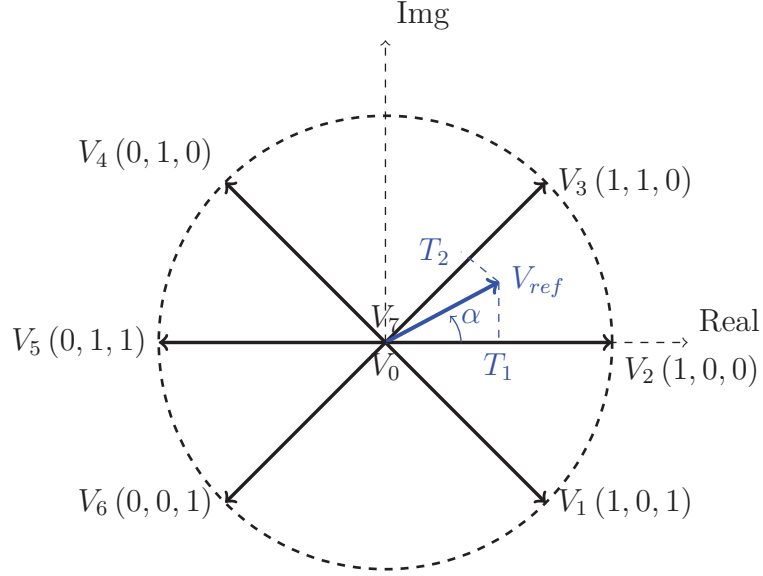


FIGURE 3.42: Expression des secteurs et du vecteur de référence dans une stratégie SVM.

délimités par des vecteurs de base $V_K \in \{V_0; V_1; V_2; V_3; V_4; V_5; V_6; V_7\}$, correspondant aux séquences possibles pour un onduleur triphasé, et repérés par un triplet de valeurs qui traduisent l'état des trois interrupteurs supérieurs, [76]. Les vecteurs V_0 et V_7 , sont des vecteurs possibles, mais ne permettent pas de transfert d'énergie. Ils correspondent à la fermeture de tous les interrupteurs du haut (V_0), ou de tous les interrupteurs du bas (V_7). Dans ces configurations, le récepteur et la source de tension sont isolés l'un de l'autre. Le secteur 1 est, par exemple, délimité par V_2 et V_3 . Lorsque V_{ref} franchit V_3 dans le sens anti-horaire, il se retrouve dans le secteur suivant délimité par V_3 et V_4 , etc. Ensuite, pour chaque secteur, un temps d'application des 2 vecteurs de base est calculé, par projection de V_{ref} sur les 2 vecteurs délimitant le secteur, [48]. Par exemple, si $V_{ref} = [V_\alpha \ V_\beta]^T$, dans le secteur 1 :

$$\begin{aligned} T_1 &= \frac{3T_s}{2E} (V_\alpha - \frac{1}{\sqrt{3}} V_\beta) \\ T_2 &= \frac{\sqrt{3}T_s}{E} V_\beta \end{aligned} \quad (3.71)$$

Une fois calculées, les valeurs de T_1 et T_2 sont utilisées pour exprimer le temps T_0 pendant lequel les séquences V_0 ou V_7 seront appliquées. Cela peut être vu comme un fonctionnement en roue libre de l'onduleur.

$$T_0 = T_s - T_1 - T_2. \quad (3.72)$$

Application de la modélisation générique et de l'inverse généralisée à la SVM. Partons du postulat que les 3 tensions de références ont été établies : $V_{aN} \ V_{bN} \ V_{cN}$ sont donc connues. Des tensions exprimées dans le repère diphasé sous la forme d'un vecteur $V_{\alpha\beta} = [V_\alpha \ V_\beta \ V_{ho}]^T$, sont obtenues après utilisation d'une matrice de transformation dite de "Concordia". Cette expression est complétée par

la relation liant V_{LN} à α :

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \\ V_{ho} \end{bmatrix} = \frac{2E}{9} \begin{bmatrix} 1 & -0.5 & -0.5 \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \alpha . \quad (3.73)$$

Puis, pour chaque secteur, il existe une relation entre les rapports cycliques et les temps de commutation, qui peut être définie suite à une analyse graphique. Par exemple, pour le premier secteur, la figure 3.43 peut être établie.

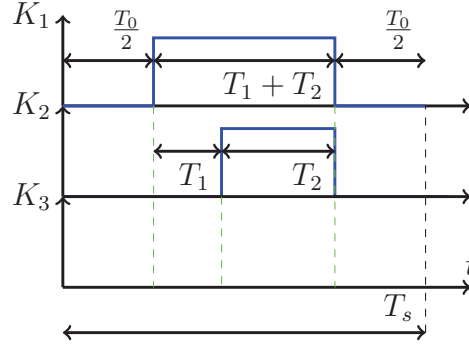


FIGURE 3.43: Chronogrammes permettant de lier les rapports cycliques aux instants de commutation, dans le secteur 1.

Ainsi, les relations entre les rapports cycliques et les instants de commutation sont déduites :

$$\begin{cases} \alpha_1 = \frac{T_1+T_2}{T_s} , \\ \alpha_2 = \frac{T_2}{T_s} , \\ \alpha_3 = 0 , \end{cases} \quad (3.74)$$

puis résumées sous la forme :

$$\alpha = \frac{1}{T_s} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_0 \end{bmatrix} . \quad (3.75)$$

La relation globale entre tensions exprimées en diphasées, et instants de commutation dans le secteur 1, est finalement déduite :

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \\ V_{ho} \end{bmatrix} = \frac{2E}{9} \begin{bmatrix} 3 & -\frac{3}{2} & -\frac{3}{2} \\ 0 & \frac{3\sqrt{3}}{2} & -\frac{3\sqrt{3}}{2} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \frac{1}{T_s} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_0 \end{bmatrix} . \quad (3.76)$$

Soit

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \\ V_{ho} \end{bmatrix} = \frac{2E}{9T_s} \begin{bmatrix} 3 & \frac{3}{2} & 0 \\ 0 & \frac{3\sqrt{3}}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_0 \end{bmatrix} . \quad (3.77)$$

Ce qui peut être ramené au système réduit :

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \frac{2E}{9T_s} \begin{bmatrix} 3 & \frac{3}{2} & 0 \\ 0 & \frac{3\sqrt{3}}{2} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_0 \end{bmatrix} = \frac{2E}{9T_s} D_{SVM} T_i . \quad (3.78)$$

L'utilisation de l'inverse généralisée et de la factorisation de rang maximal permet d'exprimer les solutions, qui dépendent du degré de liberté, λ . La démarche de factorisation de rang maximal a conduit à définir $F = [0 \ 0 \ 1]^T$, soit

$$T_i = \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_0 \end{bmatrix} = \frac{9T_s}{2E} D_{SVM}^\dagger \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} + F\lambda \quad (3.79)$$

$$\begin{cases} T_1 = \frac{9T_s}{2E} \left(\frac{1}{3}V_\alpha - \frac{1}{3\sqrt{3}}V_\beta \right) \\ T_2 = \frac{9T_s}{2E} \frac{2}{3\sqrt{3}}V_\beta \\ T_0 = \lambda \end{cases} .$$

Ce qui est égal aux relations (3.71) et (3.72) quand $\lambda = T_s - T_1 - T_2$. Ce travail effectué dans le secteur 1 peut être fait pour chaque secteur de manière identique.

Synthèse. Ces travaux ont pu démontrer qu'une approche mathématique pouvait être développée pour lier les structures d'onduleurs de tension et leur modèle moyen à des ensembles de solutions pour la modulation. Selon les configurations, un (ou plusieurs) degré de liberté est explicitement mis à jour, et les valeurs de ce degré, permettent d'expliquer les choix réalisés lors de l'application d'un schéma de modulation, que celui-ci soit de type MLI ou SVM. Cette résolution mathématique permet de déterminer les limites de l'ensemble des solutions. Ces travaux ont été valorisés dans les publications listées dans l'annexe bibliographique personnelle (annexe B) : [ACTI16], [ACTN10], [ACTN11], [ACTI20], [ACTI24]. Les limites de cette approche et les perspectives associées seront explicitées dans la partie perspective. Effectivement, alors que le cadre de modélisation et d'obtention des solutions est rigoureux d'autres questions demeurent :

- cette généralisation est-elle aussi valable en dehors des hypothèses retenues ?
- cette généralisation est-elle applicable à d'autres structures de conversion ?
- cette démarche est-elle valable pour d'autres types de modulation ?

3.3.2 Mesures pour l'électronique de puissance

3.3.2.1 Généralités sur le contexte de la recherche

Afin de pouvoir valider les modèles ou compléter l'équipement des bancs expérimentaux, il est nécessaire de réaliser des mesures. Le programme CAPTIF (ANR-14-CE05-0044-01) a pour objectif l'implémentation de différents capteurs au sein d'une architecture d'électronique de puissance, à des fins de diagnostic et d'optimisation des géométries, ou des choix technologiques. L'émergence conjointe de matériaux grand gap (SiC, GaN, C) et des techniques d'intégration hybride de nouvelle génération, améliorent considérablement les performances des modules

d'électronique de puissance. Ces derniers doivent fonctionner en environnement sévère sous fortes contraintes : forte densité de puissance à haute température, commutations à fréquences élevées, etc., avec comme objectifs constants un rendement électrique optimisé et une amélioration de la fiabilité du système. Un défi pour la mise au point de ces nouveaux modules porte sur le développement, l'intégration et le traitement de plusieurs types de capteurs. Dans ce projet, les industriels et les partenaires universitaires ont proposé de mutualiser leurs compétences et expériences dans les domaines technologiques et scientifiques suivants : capteurs multiphysiques, traitement du signal, intégration et fiabilité en électronique de puissance. Des jauges de contraintes et des capteurs de température, tous deux à base de nanoparticules, ainsi que des capteurs électromagnétiques ont été validés, puis intégrés dans un dispositif d'électronique de puissance. L'intérêt principal de ces capteurs est leur faible consommation, leur miniaturisation, leur possibilité d'intégration, ainsi que leur précision de mesure. Un modèle multiphysique spécifique a été développé afin de spécifier les emplacements d'intérêts au sein du dispositif de puissance. Les capteurs électromagnétiques ont été adaptés d'études précédentes, et optimisés pour les dispositifs spécifiés. Ils permettent d'améliorer la connaissance en temps réel de la distribution du champ magnétique. Ainsi, les informations sur les sources de champ électromagnétique seront obtenues par localisation des points chauds et par l'analyse de courants en temporel et en fréquentiel. Pour tous ces capteurs, la mise en forme des données ainsi que leur utilisation sera un point-clé. Enfin, des techniques avancées de traitement de données (estimation et filtrage du signal) seront adaptées au traitement approprié des mesures. Un processus d'intégration des capteurs en salle blanche a été mis en place pour garantir une phase de prototype proche d'une pré-industrialisation. Les partenaires industriels sont les garants d'une intégration des résultats pour une finalité produit industriel. L'analyse des données multiphysiques a donné des informations pertinentes pour la modélisation, le contrôle et les règles de fiabilité pour de nouveaux dispositifs de puissance optimisés.

Dans ce mémoire décrivons la synthèse de la conception de capteurs électromagnétiques intégrés.

3.3.2.2 Étude de la mesure de champ électromagnétique

L'objectif de ce sujet de recherche concerne la maîtrise des acquisitions du champ magnétique/électrique, lors du fonctionnement des circuits de puissance, afin d'avoir un indicateur le plus réaliste possible d'une évolution, ou dégradation potentielle, au cours du cycle de fonctionnement. Le sujet porte donc sur l'étude, le développement, la caractérisation, puis l'intégration de capteurs élémentaires de champs, magnétique \vec{H} ou électrique \vec{E} , insérés dans un système de puissance. Les performances attendues seront au niveau de la résolution spatiale du champ EM, sur la couverture fréquentielle large-bande de ces capteurs ou matrice de capteurs et sur l'intégration et l'interaction de ces capteurs avec d'une part, le système source d'émission, le cœur de puissance, et, d'autre part, avec le système de conditionnement et de traitement des mesures.

Contexte de l'étude. Cette étude est liée à la thèse commencée en février 2015 par Guillaume Viné (annexe A.2), qui aborde 3 grandes thématiques :

- une première partie du sujet a concerné l'état de l'art des mesures en champ proches des champs électromagnétiques. A partir des cas idéaux d'antennes élémentaires (dipôle magnétique, monopole ou dipôle électrique), les différentes formulations analytiques qui permettent de formaliser les liens entre mesure obtenue et champ électromagnétique ont été analysées. Les principaux facteurs (caractéristiques et performances), des sondes élémentaires ont été formellement définis. Les modélisations électriques numériques associées pour leurs évaluations ont été mises en œuvre. Une étude bibliographique comparative a permis de connaître l'état actuel de la maîtrise des mesures EM en champ proche, notamment au niveau des PCB et composants électroniques ;
- une deuxième partie consistait, à définir l'ensemble des spécifications attendues de ces antennes vis-à-vis de l'électronique de puissance, puis de proposer des premiers développements (avec la conception de démonstrateurs) et calculs associés. Ces études ont été menées en complémentarité à la fois avec des outils temporels (formes d'ondes, circuits) et fréquentiels (bande passante, facteur d'antenne, sensibilité) ;
- la troisième et dernière partie du sujet concerne la réalisation des sondes et leur intégration. La technologie doit-être compatible avec la partie émettrice (module de puissance) et ses contraintes de fabrication et de fonctionnement. Les validations de l'ensemble sont à la fois théoriques (simulations circuits et numériques de l'ensemble), et expérimentales, par obtention de valeurs mesurées cohérentes. Cette partie est toujours en cours de développement aujourd'hui.

Première étape. Nous sommes partis du postulat établi par plusieurs auteurs, par exemple [17], que la bande de fréquence retrouvée dans les analyses des signaux d'un circuit commutant de puissance se situe dans la plage 1 kHz à 100 MHz. Lorsque le circuit étudié est proche de la source de perturbation, les champs magnétiques et électriques sont découplés et un de ces champs est prépondérant, le champ magnétique pour les circulations de courant et le champ électrique pour les variations de potentiel. Cela correspond à la zone de champ proche. En s'éloignant, le champ complémentaire croît, jusqu'à ce que l'impédance d'onde $Z = \frac{\vec{E}}{\vec{H}}$ devienne constante. On est alors en champ lointain. Par conséquent, la nature du champ électromagnétique dépend de la distance à la source d'émission. La distance D du champ proche est définie pour une source rayonnant à la fréquence f lorsque :

$$D < \frac{\lambda}{2\pi} = \frac{c}{2\pi f} , \quad (3.80)$$

où c est la célérité de la lumière et λ la longueur d'onde. Les faibles dimensions des modules étudiés < 50 cm permettent d'y considérer les interactions électromagnétiques uniquement en champ proche, c'est-à-dire des couplages capacitifs pour le champ électrique ou inductifs pour le champ magnétique. Du fait de travaux antérieurs réalisés par l'équipe d'encadrement, le choix s'est porté vers l'intégration d'antennes magnétiques en champ proche, [20].

Au cours des premiers mois, le travail de modélisation de cas idéaux a été entamé, comme par exemple le travail spécifique mené sur l'antenne magnétique simple illustrée sur la figure 3.44. Effectivement, l'antenne idéale a été modélisée,

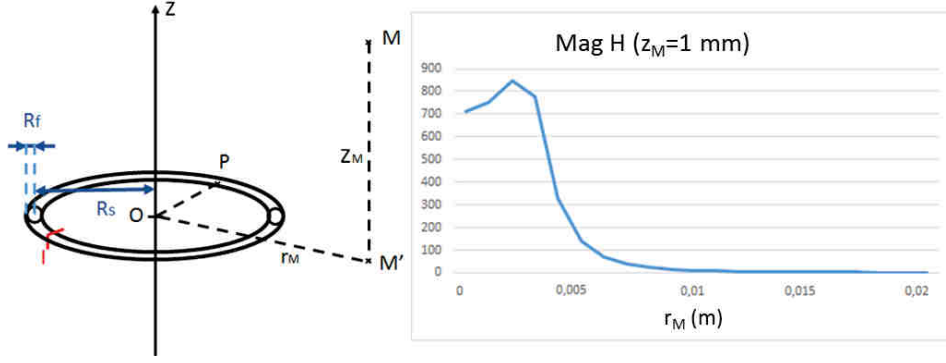


FIGURE 3.44: Simulation de l'amplitude du champ magnétique rayonné pour une antenne idéale en fonction de la distance et de la hauteur.

puis son comportement rayonnant en champ d'excitation a été obtenu par codage de l'équation de Biot et Savart. La réponse a été comparée à des résultats de simulations, issus d'un modèle 3D d'un logiciel commercial. Les courbes superposées montrent l'influence du nombre d'itérations de convergence dans l'outil numérique 3D, relativement au comportement obtenu par codage du modèle analytique. Une fois les premières études sur les liens entre géométrie d'antennes magnétiques et capacité de détection du champ obtenues, un premier modèle de type circuit électrique équivalent a été proposé. Il se compose simplement d'un circuit R_a , L_a série associé à une impédance Z_0 de mesure, constante. L'extraction des valeurs caractéristiques de l'antenne est faite par un outil numérique de calcul fréquentiel. Il est évident que la géométrie d'antenne conditionne les valeurs obtenues pour ces paramètres. C'est ainsi que la fréquence caractéristique de l'antenne f_c peut être déduite :

$$f_c = \frac{Z_0 + R_a}{2\pi L_a} \quad (3.81)$$

Le choix d'une géométrie pour une antenne large bande, doit alors conduire à l'obtention de valeurs de la résistance et de l'inductance équivalentes, telles que f_c soit toujours supérieure à la fréquence maximale des signaux. Dans le cas d'étude considéré, cette fréquence maximale est 100 MHz. Le choix d'une géométrie se fait lorsqu'on souhaite respecter les contraintes suivantes :

- le courant doit être constant dans l'antenne ;
- le champ détecté doit être homogène dans l'antenne ;
- la section de fil d'antenne doit être petite.

L'équation de Lenz, qui traduit la relation entre la force électromotrice e , et la variation du flux du champ magnétique traversant une surface (caractérisée par son vecteur surface normal élémentaire \vec{dS}), s'exprime ainsi :

$$e = -\frac{d\varphi}{dt} = -\frac{d}{dt} \left(\iint \mu \vec{H} \cdot d\vec{S} \right) , \quad (3.82)$$

où μ est la perméabilité du matériau. Cette équation peut être simplifiée en considérant son expression dans le domaine fréquentiel. L'expression de e et \vec{H} est alors prise en compte : $\{\mathbf{e}; \vec{\mathbf{H}}\} \in \mathbb{C}$. De plus, en considérant que le champ est homogène sur toute sa surface de détection, l'expression devient :

$$\mathbf{e}(j\omega) = -j\omega\mu \iint_S \vec{\mathbf{H}}(j\omega) \cdot d\vec{S} \approx -j\omega\mu S \mathbf{H}_n(j\omega) , \quad (3.83)$$

où \mathbf{H}_n est la composante normale du champ à la surface S de l'antenne magnétique et ω la pulsation du signal. Enfin, dans la zone de champ proche on considère que le champ magnétique d'excitation rayonné est issu de la circulation de courants notés \mathbf{I}_i au sein du module de puissance. L'indice i sert à décrire les i chemins de conceptions considérés. Ce lien entre tension et courant est traduit par le couplage inductif mutuel défini par les termes $\mathbf{M}_i(j\omega)$. L'application de la loi de Faraday conduit à

$$\mathbf{e}(j\omega) = j\omega \sum_{i=1}^N \mathbf{M}_i(j\omega) \mathbf{I}_i(j\omega). \quad (3.84)$$

Afin de vérifier le domaine de validité de cette expression, des analyses de réjection du champ $\vec{\mathbf{E}}$ ont également été menées. Dans l'expression (3.84), les termes $\mathbf{M}_i(j\omega)$ sont les valeurs des mutuelles inductances entre chaque chemin de conduction et l'antenne, comme illustré sur la figure 3.45. Lorsque le dimensionnement de l'an-

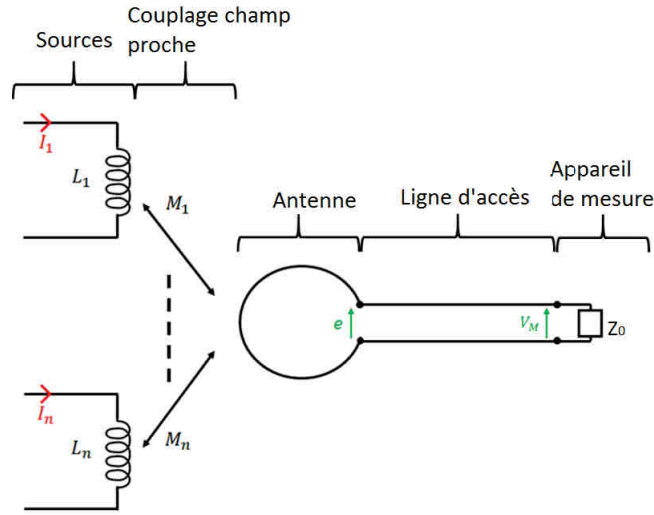


FIGURE 3.45: Couplages entre antenne et modèle équivalent du module.

tenne est judicieux, cela conduit à obtenir une fréquence de coupure de l'antenne grande, devant la bande de fréquence analysée. Des analyses ont été réalisées pour caractériser les performances de l'antenne. Par exemple, les mesures issues d'un analyseur de réseaux sont comparées aux simulations faites à partir du modèle d'antenne. La figure 3.46 présente l'impédance de l'antenne Z , lorsque celle-ci est isolée de tout système de perturbation. Ce graphique nous permet de considérer que le modèle défini est acceptable. Sur la base de ce modèle, et en arrangeant le circuit électrique équivalent pour simuler l'antenne en réception, nous pouvons alors tracer le facteur d'antenne sur toute la bande de fréquence d'intérêt, figure 3.47. La baisse de -20 dB de la valeur du facteur d'antenne marque le début de la zone, $f = 230$ MHz, où la réjection du champ électrique est considéré comme n'étant plus assurée.

Ces caractérisations nous ont permis d'obtenir un modèle d'antenne et de bien connaître son comportement sur une large bande fréquentielle. En choisissant certaines valeurs de l'impédance de mesure Z_0 , une relation d'égalité a été établie entre la tension aux bornes de l'impédance \mathbf{V}_M , et la force électromotrice décrite

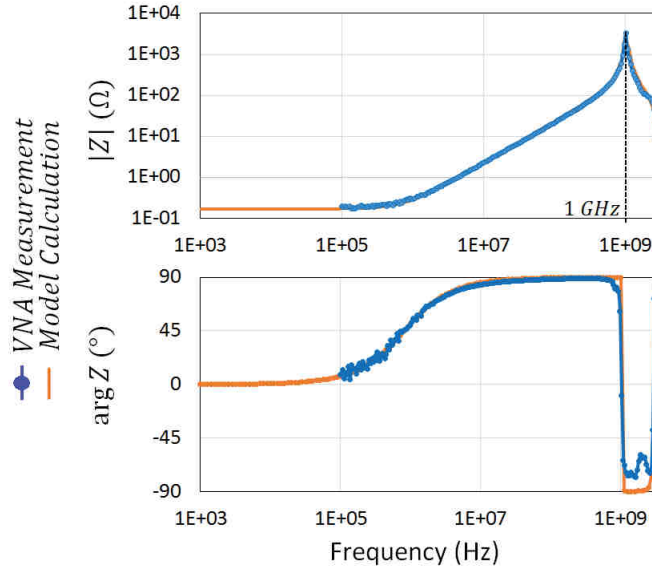


FIGURE 3.46: Tracé de la courbe d'impédance de l'antenne mesurée et simulée.

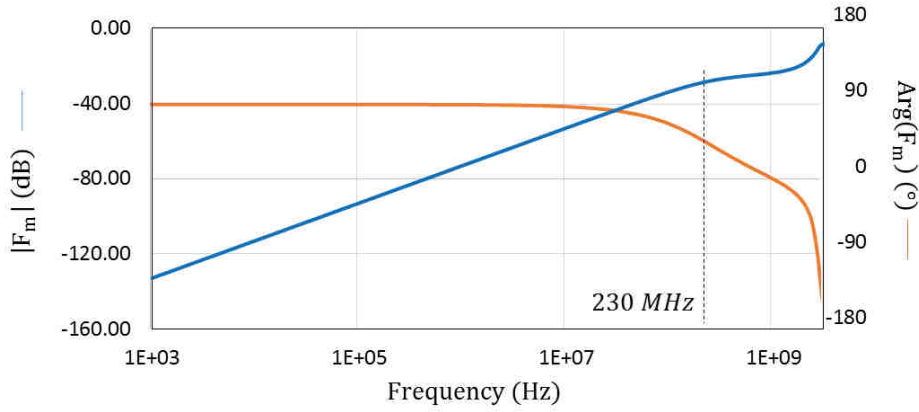


FIGURE 3.47: Tracé du facteur d'antenne.

dans l'équation (3.84), telle que

$$\mathbf{V}_M(j\omega) \approx \mathbf{e}(j\omega). \quad (3.85)$$

Ainsi, il a été possible de passer à la deuxième étape, qui consiste à modéliser les courants $\mathbf{I}_i(j\omega)$, ainsi que les éléments de couplages $\mathbf{M}_i(j\omega)$.

Deuxième étape. Au cours de cette étape, l'objectif a été d'établir un modèle équivalent du module de puissance et des éléments de couplage avec l'antenne positionnée. Les sources de perturbations électromagnétiques conduites ont été identifiées comme la commutation des composants de puissance. Du fait de la nature des interrupteurs, la commutation est différente selon que le transistor s'active ou la diode. Rappelons que, conformément au principe de mesure utilisé (3.82), il existe un lien entre phénomène conduit et phénomène rayonné.

En se basant sur une méthode de représentation de module de puissance issue de l'état de l'art [46], nous avons distingué les séquences de fonctionnement

selon l'état des interrupteurs des cellules de commutations. Ainsi, chaque chemin de courant conduit a été pris en compte. Ensuite, chaque interrupteur passant a été modélisé par une source de courant, dont les formes d'ondes peuvent être plus ou moins complexes [16] [42]. Couplés à cette première distinction, les 2 modes de propagation de perturbations - modes communs et différentiels - ont été distingués. Ils sont considérés comme étant découplés et issus, respectivement, de la variation de courant en entrée du convertisseur et de la variation de tension aux bornes des semi-conducteurs. Selon l'architecture de puissance de référence, nous avons finalement établi 2 schémas équivalents, couplant les modes de perturbations, mais distinguant les états des interrupteurs, figure 3.48, [54]. Chaque source de tension

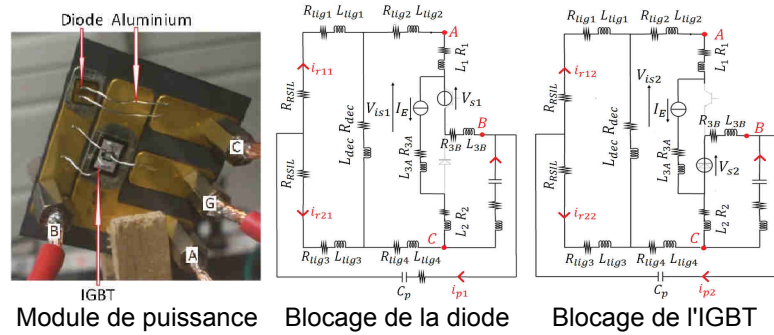


FIGURE 3.48: Module de puissance étudié et modèles associés pour les 2 états liés à la commutation des interrupteurs.

ou de courant a été modélisée sur la base d'une représentation issue de la bibliographie, [46], ou déterminée expérimentalement. Les valeurs des éléments parasites ont été extraites par la paramétrage du logiciel *Q3DExtractorTM*, à partir d'un modèle en 3 dimensions de l'architecture de référence. Ainsi, à chaque chemin de courant et inductance propre traversés correspondait une mutuelle inductance avec l'antenne, dont la valeur dépend également de la position de cette dernière relativement au module, comme illustré figure 3.49. Ensuite, pour chaque mode de

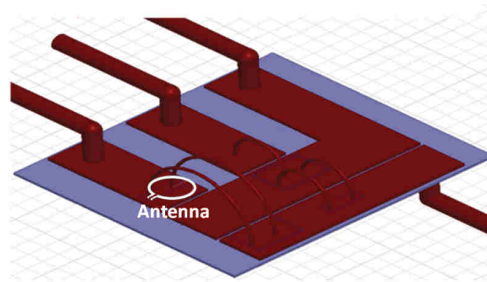


FIGURE 3.49: Exemple de positionnement de l'antenne, 1 mm au-dessus du module.

commutation et pour chaque maille indépendante, un système linéaire d'équation a été écrit sous la forme :

$$S = H.I_{inc} , \quad (3.86)$$

où S est le vecteur d'excitation homogène à une tension, H la matrice d'impédance et I_{inc} le vecteur contenant les courants circulant dans chacune des branches. Ainsi, pour un courant donné, par exemple le courant de mode commun I_p , la résolution

du système linéaire permet d'établir les expressions de ce courant pour chacune des transitions. Le courant total, dans le domaine temporel, est ensuite obtenu en multipliant les transformées de Fourier discrète inverses I_{p1-iff} pour l'amorçage, I_{p1-iff} pour le blocage, à un signal carré $C(t)$ tel que

$$I_p : t \mapsto I_{p1-iff}(t) * C(t) + I_{p2-iff}(t) * C(t + \alpha T) , \quad (3.87)$$

où αT permet de prendre en compte le rapport cyclique réellement appliqué. Ceci permet de simuler les réponses fréquentielles pour le courant de mode commun, dont on a extrait des caractéristiques particulières, par exemple la fréquence de résonance f_p , figure 3.50.

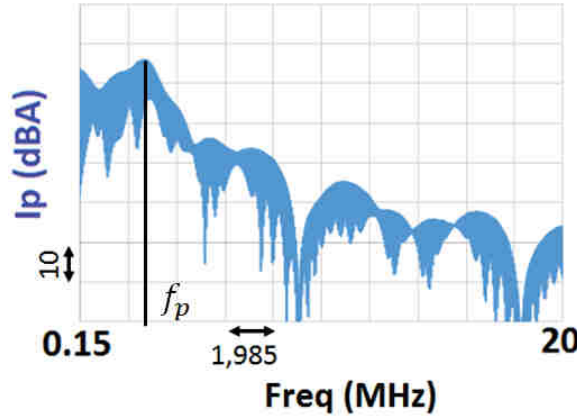
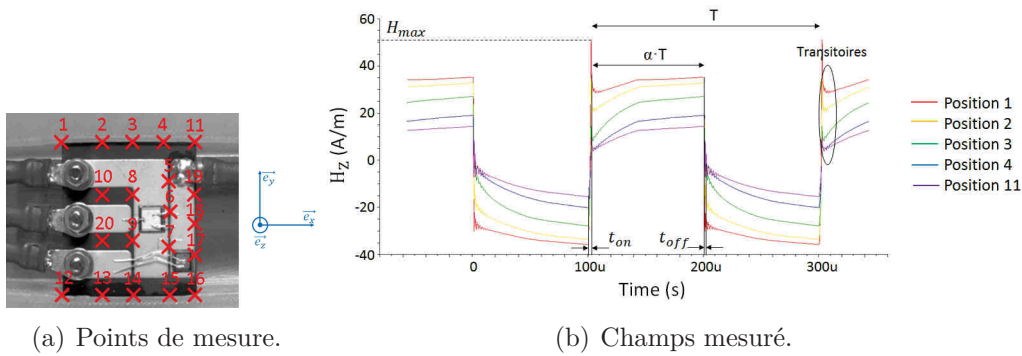


FIGURE 3.50: Courant de mode commun simulé.

Troisième étape. Une fois les antennes réalisées et caractérisées, les premières mesures en rayonné ont été possibles, figure 3.51(a). L'antenne est positionnée



(a) Points de mesure.

(b) Champs mesuré.

FIGURE 3.51: Positionnement de l'antenne et mesures associées.

en divers points au-dessus de l'architecture de référence et, pour chaque point, le champ normal détecté est reconstruit, figure 3.51(b), en utilisant le facteur d'antenne, figure (3.47). Plusieurs données sont ainsi retrouvées ou constatées : la période de commutation 10 ms ; le rapport cyclique 50% ; les temps de montée $t_{ON} = 1.1 \mu s$ et de descente $t_{OFF} = 0.38 \mu s$. En particulier, des pseudo-oscillations qui font suite aux commutations, ont été révélées. A l'avenir, une analyse plus avancée des valeurs spécifiques de ces phénomènes transitoires, ainsi que de la position de l'antenne lors de la mesure, pourra amener à des conclusions sur les valeurs des paramètres parasites.

Synthèse et bilan des valorisations. Au cours de ces travaux, une antenne de type boucle magnétique a été définie et réalisée afin d'être intégrée au sein de modules d'électronique de puissance. Son modèle, et sa validation, qui a fait suite à des analyses et des caractérisation expérimentales, a permis de déterminer la plage fréquentielle de fonctionnement optimal de l'antenne. Lorsqu'elle a été mise en œuvre et couplée à un démonstrateur de type hacheur série, des mesures caractéristiques ont été obtenues.

Les modèles établis sont basés sur des modèles de type circuit électrique équivalent, adaptés à une large bande de fréquence. Le développement des antennes et leur intégration a été possible suite à une démarche de conception puis par la mise en œuvre des outils matériels de plateformes techniques. La caractérisation des capteurs a été faite par mesure d'impédance par le biais d'un analyseur de réseaux. Afin de prendre en compte les paramètres de couplage de l'antenne, des mesures ont été réalisées avec deux antennes, une utilisée en émission et l'autre en réception, et par utilisation de l'analyseur de réseau configuré pour tracer les paramètres S. A chaque étape de caractérisation, les résultats expérimentaux ont été confrontés à des résultats issus de simulations. Ces travaux ont été valorisés dans les publications listées dans l'annexe bibliographique personnelle (annexe B) : [ACTI25], [ACTI26], [ACTN13] et [ACLsoumise1].

La poursuite de ces travaux concernent d'une part, l'optimisation des antennes, et d'autre part l'exploitation des données issues de la mesure lorsque les capteurs sont couplées à un dispositif de conversion. Effectivement, il nous faut explorer différents outils pour mieux caractériser les signaux mesurés. Ainsi, les travaux futurs porteront sur l'utilisation des paramètres S ainsi que sur l'utilisation des méthodes temps-fréquence.

Finalement, c'est pour faire suite à des résultats prometteurs en matière de caractérisation de l'état de santé d'un dispositif qu'une activité nouvelle de recherche sera proposée.

3.4 Conclusions

Pour chacun des axes de recherche menés au cours de ces années de recherche :

1. intégration et interaction ;
2. caractérisation expérimentale ;
3. pilotage et mesures pour l'électronique de puissance,

un exposé des principaux résultats a été mené. Certaines problématiques rencontrées ont été explicitement révélées et feront, pour la plupart, l'objet de propositions de perspectives de recherche. Certaines de ces perspectives sont, au moment de la rédaction de ce mémoire, des travaux en cours de développement. D'autres problèmes, ou questions, ont permis l'émergence de nouvelles idées, qui seront proposées en tant que nouvelles activités de recherche.

Sur l'ensemble des points précédents, il est intéressant de noter que les compétences développées sont partagées entre plusieurs activités. Ainsi, pour chaque axe de recherche, les compétences identifiées sont :

- méthodes de modélisation pour la représentation et simulation des systèmes et composants mécatroniques ;
- multiphysiques (electro-thermomécaniques, électromagnétiques) ;

- éléments finis (3D) ;
- analytiques (représentation du comportement) ;
- par représentation équivalente ;
- méthode d'estimation de la fiabilité de la robustesse,
- pilotage et observation des systèmes et composants mécatroniques :
 - stratégie de modulation ;
 - pilotage des convertisseurs,
- développement de bancs expérimentaux :
 - test des algorithmes de contrôle et d'observation ;
 - test de fiabilité et de robustesse ;
 - test de caractérisation (électrique, thermique, etc.),
- analyses, conception, intégration et procédés pour les systèmes et composants mécatroniques :
 - méthode d'analyse ;
 - démarche pour l'intégration associée à la mise en œuvre des procédés.

Ces activités ont contribué à un support de connaissances et de compétences résumé en 6 points : physique appliquée ; modélisation ; intégration en électronique de puissance ; automatique et mathématiques appliquées ; programmation et logiciels ; caractérisation.

Chapitre 4

Coordination d'actions pour le développement d'activités en électronique de puissance

4.1 Description des activités complémentaires

Afin de favoriser le développement d'activités scientifiques en électronique de puissance au sein du LGP, nous avons jugé utile de coordonner d'autres actions. Elles participent au soutien des activités scientifiques exposées dans le chapitre précédent. Elles seront développées en trois points : les actions relatives à la pédagogie, les actions relatives aux partenariats et, enfin, les actions liées à la communication. Bien qu'elles apparaissent par la suite de manières séparées, nombre de tâches effectuées pourraient être développées dans plusieurs des points précités.

4.2 Actions relatives à la pédagogie

Dans cette partie seront exposées des activités liées à l'enseignement et à la formation. Nous détaillerons les responsabilités exercées au sein de plusieurs parcours de formation, ainsi que les activités liées à l'encadrement de projets et à la formation continue.

4.2.1 Responsabilités pédagogiques

4.2.1.1 Parcours orienté métier

En 2006, l'ENIT venait de créer une nouvelle offre de formation pour les étudiants débutant leur troisième année. Celle-ci, structurée sous la forme d'un tronc commun (350 heures), d'un parcours orientés métier (70 heures) et de compléments de cours optionnels (30 heures) était accessible aux étudiants à travers le choix de 6 parcours. J'ai participé à la conception puis occupé la fonction de gestionnaire de septembre 2008 à juillet 2012 du parcours orienté métier : Ingénierie des Systèmes Électriques, Électronique de Puissance (ISEEP puis S2EP). Ce parcours a été construit pour permettre à 12 étudiants par semestre, de venir compléter leur formation de base, par le biais de cours spécifiques sur les thématiques liées au Génie Électrique. Les étudiants étaient répartis sur 5 semestres de cours et

2 semestres de stage, soit 84 étudiants au maximum. 30 ECTS étaient attribués aux cours spécifiques du parcours, soit 360h de cours, répartis sur 5 emplois du temps différents. Des interventions de partenaires industriels, des visites de site, des conférences thématiques ou des participations à des salons professionnels étaient également planifiées. Mon investissement à la gestion de ce parcours orienté métier a pris fin en juillet 2012. Depuis, et à la suite d'une réforme pédagogique du cursus ENIT, ce parcours n'est plus proposé aux étudiants.

4.2.1.2 Création d'un semestre d'apprentissage par projet, en langue anglaise

Du fait de son ouverture à l'international, l'ENIT accueille 10 à 15 étudiants étrangers sur un nouveau semestre dit European Project Semester (EPS). Je suis à l'origine de la proposition puis de la conception de ce semestre. Encore aujourd'hui, il s'agit toujours du seul partenaire du réseau européen EPS en France. De son début officiel en mars 2010, jusqu'en janvier 2015, j'étais en charge de ce semestre entièrement réalisé en langue anglaise. Les étudiants étrangers candidaient sur des sujets proposés par des partenaires industriels de l'ENIT. Ce semestre fait l'objet d'un article de valorisation dans l'INP Communiqué [1], et est toujours proposé à nos universités et écoles partenaires.

4.2.1.3 Co-concepteur d'une option

En janvier 2015, la direction de l'école a missionné plusieurs enseignants-chercheurs avec pour l'objectif de faire évoluer l'offre de formation des semestres 7 à 9 de l'ENIT, sous la forme d'un tronc commun et de 5 options (au lieu de 13 parcours possibles). C'est ainsi que j'ai été associé à Xavier Desforges, dans l'optique de créer une option Conception des Systèmes Intégrés, qui permette l'illustration des concepts de recherche de l'équipe DIDS. Les enseignements à créer ont été ventilés en 5 pôles de formation, associés à 5 thématiques de recherche de l'équipe :

- actionneurs et énergie embarquée ;
- systèmes autonomes et robotisés ;
- mesure et traitement du signal et des données ;
- informatique, et systèmes intégrés ;
- ingénierie d'intégration des systèmes.

Ainsi, les étudiants voient leur formation de base complétée en vue de : caractériser les interactions de plusieurs technologies ; prédire les comportements et les interactions multiphysiques entre composants ; développer et implémenter des stratégies d'autonomie des systèmes ; gérer des flux (énergie, matière, information) ; valider et vérifier.

4.2.1.4 Participation à l'évolution des enseignements de génie Électrique dans le tronc commun de l'ENIT

De manière parallèle à l'évolution de l'offre de formation des semestres supérieurs, le tronc commun des étudiants de l'ENIT dans l'ensemble du cursus, a aussi été repensé. Un des objectifs était de mieux répartir les enseignements, relativement à, la charge constatée des enseignants-chercheurs, et à leurs thématiques de recherche. A la faveur de cette réforme, la dynamique positive autour des activités

pédagogiques et de recherche du Génie Électrique a permis une augmentation significative de son volume horaire dans le cursus de formation. Plus particulièrement, les enseignements associés à l'électronique de puissance ont aussi significativement augmenté. Ainsi, alors que les étudiants bénéficiaient de 12 heures d'enseignement en électronique de puissance¹, suite à l'aboutissement de cette réforme de la maquette pédagogique et à la mise en place d'une nouvelle approche pédagogique du Génie Électrique, ils ont aujourd'hui 32 heures², réparties du premier semestre de formation au dernier. Il faut aussi y ajouter les 22 heures³ dispensées dans l'option.

4.2.1.5 Synthèse des missions

Dans le cadre de ces responsabilités et activités pédagogiques, les missions que j'ai eu à effectuer sont :

- création de semestre de formation ;
- pour l'EPS : affiliation et participation au réseau européen de partenaires, l'EPS Provider meeting, congrès annuel des écoles et universités développant un EPS ;
- interface entre les intervenants et les étudiants du parcours ;
- gestion des étudiants (notes, jury, admissibilité, stages, départs à l'étranger, etc.) ;
- gestion du parcours (planification, réflexion pédagogique, management des budgets des parcours, opération de communication externe, représentation du parcours dans les différents conseils de l'école, etc.).

4.2.2 Encadrement de projets étudiants

Sur ce point, la principale action a été de proposer et d'encadrer des projets étudiants en vue de, l'utilisation, l'extension, ou la modification des équipements de notre plateforme d'expérimentation. Ainsi dans le cadre de l'European Project Semester plusieurs projets ont été proposés et choisis :

1. Mars 2012 - juin 2012 : Design of a multilevel inverter ;
2. Mars 2012 - juin 2012 : Static Characteristic Probe : Improvement of a DC characteristic testing arrangement ;
3. Octobre 2012 - janvier 2013 : Development of a test-bench to test power electronics ;
4. Mars 2013 - juin 2013 : New cutting tool for Solder join ;
5. Mars 2014 - juin 2014 : Medium voltage - High integrated chopper converter, projet encadré par B. Trajin ;
6. Octobre 2014 - janvier 2015 : Prototyping and test of an integrated 3-D rectifier ;
7. Mars 2016 - juin 2016 : Experimental test bench for integrated electromechanical conversion chains.

1. réparties en 4 heures de cours et 8 heures de TP.

2. 14 heures de cours et 18 heures de TD/TP.

3. 9 heures de cours et 13 heures de TD/TP.

4.2.3 Encadrement d'un projet d'évolution de carrière - formation continue

Dans le cadre de la formation continue ou Validation des Acquis de l'Expérience (VAE) proposée par l'ENIT, j'ai été sollicité pour accompagner la démarche de Laurent Azemard, responsable d'études au département Recherche, Technologie & Développement de SAFRAN ENGINEERING SERVICES (groupe SAFRAN), à obtenir un diplôme d'ingénieur. Ma mission consistait à le superviser pour l'aider à prouver, par des apports théoriques, qu'il avait bien le niveau de connaissances suffisant. Ainsi de par mon domaine de compétence, proche de son périmètre d'activité, je l'ai aidé à formaliser son savoir. Son sujet portait notamment sur les problématiques de câblage électrique dans les structures aéronautiques, et les caractérisations associées.

4.2.4 Synthèse

Je considère que ces activités et ces quelques exemples sont tout à fait en lien avec la démarche d'affirmation d'une activité scientifique de recherche en électronique de puissance. Effectivement, la création et l'animation des parcours, l'encadrement de projets et le renforcement des heures spécifiques d'enseignement, contribuent, d'une part, au transfert de nos connaissances vers des futurs ingénieurs et potentiellement futurs partenaires, et d'autre part, au complément de formation des étudiants en vue de leur candidature sur nos activités de recherche dans le cadre de doctorat ou de stages de MASTER. Ce dernier point permet de pallier partiellement l'absence d'un parcours de MASTER spécifique au Génie Électrique sur le site de Tarbes.

4.3 Actions relatives aux partenariats

Il est évident que mener à bien des activités scientifiques ne peut avoir lieu sans support financier, matériel et parfois en ressources humaines. Les parties suivantes décrivent les actions entreprises pour créer et gérer les conditions d'un bon environnement. Ainsi, ces activités ont principalement consisté à mettre en œuvre, ou entretenir, des partenariats. Ceci a pour ambition de satisfaire plusieurs objectifs. Le premier est la mise à disposition d'outils pour la réalisation des expériences. Le second est de fournir un contexte applicatif et un appui financier aux thèmes de recherche. Enfin, le dernier est implicite et consiste à la construction et l'entretien d'un réseau professionnel. Ces relations partenariales permettent de mettre en perspective nos méthodes par rapport aux besoins industriels nationaux et à des problématiques plus globales.

Afin d'illustrer ces activités et les objectifs recherchés, la présentation suivante est adoptée. Dans un premier temps, la participation à la mise en œuvre de la plateforme expérimentale PRIMES est présentée. Ensuite, le montage et la coordination de programmes collaboratifs sont présentés. Enfin, le lien avec l'école doctorale sera abordé.

4.3.1 Plateforme expérimentale PRIMES

Depuis 2001 et l'existence sur Tarbes d'un laboratoire mixte de recherche académique - industriel, Power Electronics Associated Research Laboratory, PEARL, puis PEARL II, et maintenant PRIMES, le LGP a participé à des études sur la fiabilité, la durabilité et le vieillissement des composants de puissance, et leur packaging sous environnement sévère.

La mise en œuvre opérationnelle de la plateforme PRIMES a débuté en 2012 avec l'investissement de nouveaux locaux et a adopté un nouveau mode de gouvernance en janvier 2014. Dès lors, l'ENIT s'est retrouvé en position de leader sur l'investissement, ainsi que sur l'organisation et mode de fonctionnement de la plateforme. Ainsi, le LGP a pu proposer une plus grande variété de thématiques de recherche. Cette ouverture thématique est possible par la réalisation d'actions ayant pour objectifs l'animation, la coordination et la reconnaissance, de la plateforme. Elles ont pour cadre :

- les comités de pilotage scientifique et stratégique ;
- les comités techniques ;
- le suivi des investissements.

4.3.1.1 Comités de pilotage et comités de pilotage scientifique et stratégique

Je participe au titre de conseiller du directeur du laboratoire, aux deux Comités de Pilotage Scientifique et Stratégique (COPSS) bisannuels, depuis octobre 2013. Ma participation consiste essentiellement à présenter les activités du LGP en cours, ayant pour cadre la plateforme.

4.3.1.2 Comités techniques et Atelier Ciblé sur une Thématique

Tant que l'installation de la plateforme dans son nouveau bâtiment n'était pas effective, des groupes de travail ou comité techniques se réunissaient régulièrement⁴. Je participais aux groupes :

- simulation ;
- thermique ;
- fiabilité,

parfois avec d'autres acteurs du LGP⁵. L'objectif était de favoriser l'émergence de programmes de recherche collaboratifs⁶. Actuellement, la nouvelle gouvernance a favorisé l'organisation de journées sous la forme d'ateliers ciblés sur une thématique. Au cours de ces ateliers, des présentations se succèdent et une synthèse est faite par l'assemblée. Des axes d'intérêt prioritaire sont recensés et doivent faire l'objet de réunions plus particulières, dans l'idée de faire émerger des propositions de travaux collaboratifs. Le premier atelier a réuni 50 personnes et j'ai été sollicité pour faire une présentation intitulée "Méthode de détermination expérimentale de

4. en moyenne une fois par an pour chaque groupe

5. pour la période 2010 - 2015.

6. Plus particulièrement pour le groupe fiabilité un programme intitulé CEPIA 2 a été entièrement défini et déposé pour demande de financement au Fond Unique Interministériel. Ce programme n'a pas eu la labellisation et le soutien financier demandé et n'a jamais pu être relancé malgré un travail conséquent fourni.

la durée de vie et des mécanismes de défaillance. Mise en œuvre et contraintes associées".

4.3.1.3 Suivi des investissements

C'est en lien très étroit avec mes collègues en charge des investissements, que j'ai participé aux différentes réunions faisant état de l'avancement de la définition des investissements et des rédactions des Cahiers des Clauses Techniques et Particulières (CCTP). Ainsi, outre les consultations et relectures classiques mon action a mené très concrètement à :

- participer à la réflexion concernant un équipement en lien avec la technologie d'impression 3D, ainsi qu'à la mise en relation avec les acteurs LGP intéressés de l'équipe IMF ;
- définir et rédiger le cahier des charges pour un analyseur d'impédance. Plus globalement, cette demande a été couplée à la volonté de faire croître les possibilités en expérimentation et caractérisation des phénomènes électromagnétiques hautes fréquences (chambre semi-anéchoïque, analyseur de réseaux, sondes hautes fréquences adaptées) ;
- définir et rédiger le cahier des clauses techniques particulières pour un banc de mesure pilotage et traitement temps réel sur base de matériel compatible avec la librairie Simulink de Matlab⁷ ;
- définir et rédiger une fiche d'intérêt pour une charge-source électronique AC/DC, dite source quatre quadrants.

4.3.1.4 Synthèse

Avoir mené cette activité permet aux acteurs du LGP, et plus spécifiquement aux acteurs de l'électronique de puissance, d'avoir une plateforme expérimentale à laquelle ils peuvent accéder, tout en ayant une bonne connaissance des moyens proposés et de son fonctionnement.

4.3.2 Montage et coordination de programme collaboratifs

L'activité détaillée ci-après illustre l'investissement nécessaire pour proposer un contexte applicatif industriel aux démarches scientifiques développées, et assurer un support financier qui permette la réalisation des expériences et le recrutement de jeunes chercheurs. Dans la plupart des situations, j'ai participé de manière très active à la définition, à l'écriture et au dépôt des programmes. Dans de rares cas, j'ai été sollicité et j'ai contribué à la définition d'une partie des travaux. Pour d'autres, j'ai participé aux réunions initiales avant de transmettre les informations à des collègues dont les thématiques de recherche étaient plus en adéquation avec l'objectif global du projet. Les programmes de recherche financés seront d'abord présentés. Une énumération rapide des programmes de recherche refusés sera faite et complétée par une liste des programmes qui ont été transférés aux collègues. Une synthèse sur les différents programmes et sur mon implication pourra être trouvée en annexe A.6.

7. avec le support de B. Trajin.

4.3.2.1 Programme CEPIA

Ce programme a eu lieu sur la période octobre 2007 - décembre 2010. Le projet CEPIA (Convertisseur Électronique de Puissance à Intégration Avancée), labellisé par le pôle de compétitivité Aerospace Valley de Midi-Pyrénées et Aquitaine le 24 janvier 2006 a bénéficié d'un financement du Fond Unique Interministériel. Il concernait 6 partenaires industriels du monde ferroviaire et aéronautique et 2 partenaires académiques dont l'ENIT. Il avait pour ambition de définir une démarche complète d'approche de la problématique de la fiabilité allant de la définition des essais de qualification à la réalisation de ces essais sur un banc de test combiné. Il s'agissait d'un projet portant sur une durée de 36 mois de 4,8 MEuros. Le LGP/ENIT était positionné en tant que "leader" sur 2 WorkPackage (WP). Il y en avait 10 au total.

Ainsi, au cours de la première tâche j'ai participé à la spécification d'un banc de contraintes combinées. Le livrable de ce premier WP était un banc de test climatique pour les équipements électriques associé à une supervision de l'ensemble des équipements du banc, ainsi qu'à l'acquisition et la sauvegarde de données. Dans le second WP j'ai participé de manière globale à la coordination des essais ainsi qu'à la définition et au déroulement des essais plus spécifiques aux thématiques de recherche du LGP.

4.3.2.2 Programme GENOME

Nos activités dans ce programme ont eu lieu sur la période octobre 2013 - octobre 2016. Ce projet s'est inscrit dans les activités de recherche menées conjointement entre l'équipe DIDS et l'équipe IMF du LGP sur l'intégration de polymères encapsulants innovants au sein des assemblages d'électronique de puissance. Effectivement, les équipes du LGP ont effectués en partenariat le LAPLACE UMR 5213 et l'Institut Charles Gerhardt de Montpellier (ICGM) UMR 5253, une proposition dans le cadre du Programme d'Investissements d'Avenir (PIA), et de la Charte des plateformes de Démonstration Technologique proposée par le secteur aéronautique. Cette proposition s'est inscrite au sein du programme national GENOME (Gestion OptiMisée de l'Energie). Dans sa première phase (PREMICES), ce programme visait à travers 49 partenaires et 8 Work-Packages de démontrer la maturité et la possible intégration d'appareillages plus électriques et optimisés au sein de systèmes aéronautiques. Au sein d'un lot de travail, le LGP a été impliqué et supervisé par Labinal Power System, devenu Safran Electrical and Power.

4.3.2.3 Programme IRT Double And Bump

Ce programme a eu lieu sur la période novembre 2014 - novembre 2015. Dans le cadre des études amont menées par la société aPsi3D, nous avons participé à l'écriture d'une collaboration entre cette société, l'IMS de Bordeaux et le LGP. Cette opération a eu pour cadre la mise en place des programme de recherche au sein de l'IRT Saint-Exupéry. Ce programme a été défini comme un programme propre de recherche, dans lequel le LGP a réalisé l'encadrement d'un post-doctorant de 12 mois, financé par l'IRT. Un autre support de financement de post-doctorant a été mis à disposition de l'IMS. La proposition d'étude a été rédigée conjointement par le LGP et l'IMS et a porté sur l'intégration en électronique de puissance. Effecti-

vement, dans la continuité de leurs axes d'intérêts scientifiques, le LGP et l'IMS souhaitaient s'associer afin d'aborder ensemble l'intégration avancée des modules et composants, basée sur des technologies d'interconnexion 3D innovantes.

Cette étude a permis le développement d'un module d'une fonction de conversion. Ce module, suivant les exigences de puissance désirées, a deux formes, soit la fonction de conversion complète, soit seulement une cellule élémentaire. Cette étude comportait deux phases :

1. Faisabilité, conception et caractérisation d'une intégration 3D par joints frittés d'un module de puissance.
2. Qualification et évaluation des robustesses, fiabilités et durée de vie des modules.

Suite à notre investissement dans ce programme, nous sommes associé au dépôt d'un brevet [annexe B.5].

4.3.2.4 Programme ANR CAPTIF

C'est dans le cadre de l'appel à projet générique de l'Agence Nationale de la Recherche 2014, que j'ai déposé un projet collaboratif. Le projet CAPTeurs innovants Intégrés et logiciels au cœur d'un dispositif d'électronique de puissance, CAPTIF, ANR-14-CE05-0044-01, est construit autour de 5 partenaires : 2 laboratoires de recherche et 3 entreprises :

- le LGP ;
- l'Institut du Matériau au Système (IMS) de Bordeaux ;
- une start-up de Toulouse : NANOLIKE ;
- une start-up de Tarbes : aPsi3D ;
- l'association PRIMES.

Ce programme est en cours et porte sur la période janvier 2015 - juillet 2018. Il a pour contexte l'émergence conjointe de matériaux grand gap (SiC, GaN, C) et des techniques d'intégration hybride de nouvelle génération. Dans ce projet, les défis concernent le développement, l'intégration et le traitement de plusieurs types de capteurs, avec pour ambition une connaissance plus fine du comportement du module. Ceci afin d'accompagner la mise au point des nouveaux modules d'électronique de puissance. Les laboratoires développeront des capteurs électromagnétiques, définiront les techniques de traitement de données et la modélisation multiphysique. Ils effectueront également des tests préliminaires de fiabilité pour les capteurs et les prototypes fonctionnalisés associés. Les partenaires industriels fourniront des capteurs à base de nanoparticules, adapteront le processus d'intégration en salle blanche et garantiront le niveau de maturité technologique des ensembles intégrés. 6 lots de travail sont définis et des tâches spécifiques sont programmées au cours des 42 mois du programme. Pendant la première phase, les spécifications globales seront établies. L'ensemble des capteurs seront étudiés et développés. Ils seront finalement intégrés au sein d'un démonstrateur de faisabilité. La modélisation multiphysique ainsi que des tests de fiabilité préliminaires seront conduits en parallèle de ces développements. Ceci fournira des informations et des recommandations pour le prototype final. Dans la deuxième étape, des techniques de traitement de données seront étudiées et mises au point pour le filtrage des informations ainsi que l'estimation de paramètres et variables. Dans la dernière étape, un ensemble de capteurs sera adapté et dédié à un dispositif d'électronique

de puissance représentatif. Pour conclure l'objectif principal est de construire, pour la première fois, un ensemble intégré multi-échelle de capteurs.

Les activités menées dans le projet sont en partie réalisées par 3 thèses (dont 2 au LGP), et des recrutements temporaires chez les partenaires industriels.

4.3.2.5 Programme CLE Conversion'99

Ce programme est en cours et se déroule sur la période juillet 2016 - juillet 2018. Nous avons rédigé conjointement avec le LAPLACE et la société TFE une proposition soumise dans le cadre des Contrats Laboratoire Entreprise - CLE en juillet 2014.

L'objectif initial du projet est de contribuer au développement d'une nouvelle gamme de convertisseurs électriques aéronautiques à très haut rendement dont une des applications serait la distribution de l'énergie électrique aux passagers dans les nouvelles cabines d'avions ECO PREMIUM. A travers ce programme les capacités de recherche du LGP-ENIT et du LAPLACE dans les domaines de la conversion d'énergie et de l'électronique de puissance seront combinées. La société TFE à Toulouse vise ainsi le développement d'une gamme de convertisseurs innovants, voire en rupture, pour l'alimentation collective et individuelle des sièges passagers dans les configurations 42 VDC / 110 VAC-220 VAC à 50/60 Hz et à un niveau de puissance 100 W - 3 kW (actionnement des sièges et énergie pour le passager : ordinateur portable et recharge des appareils nomades) ainsi qu'en mode USB 5 V DC/10 W compatible avec la plupart des équipements personnels des passagers. Le challenge principal de ce projet est de concevoir des convertisseurs dont le rendement devra être suffisamment élevé pour autoriser un refroidissement naturel par convection (absence de ventilation) dans le siège lui-même (10 W-100 W max) ou dans la cabine (3 kW max). Cette gamme de convertisseur doit se différencier de l'état de l'art par une amélioration importante du rendement car les contraintes de la cabine passager ne permettent pas l'installation de ventilation forcée (problème acoustique). De plus, des points chauds au niveau des sièges ne sont pas acceptables. Nous visons à fonction comparable des rendements allant de 95 à 99% (conversion99). De tels objectifs imposent des activités conjointes liées à la définition, l'étude, la mise en œuvre, l'optimisation et l'évaluation de différentes solutions candidates. Dans cette démarche, les architectures de conversion adaptées et les géométries optimisées des modules de puissance seront définies de manière à permettre l'intégration des composants électroniques de puissance innovants. Ainsi, des composants dits à large bande interdite à base de carbure de silicium (SiC) et de nitrure de gallium (GaN) permettent d'améliorer les performances connues du silicium (Si). L'utilisation de ces matériaux au sein de géométries dédiées permet d'imaginer des architectures au fonctionnement optimisé sur une large gamme de température. Le consortium est donc construit autour d'une mixité de partenaires complémentaires détaillée comme suit :

- pour le LGP de l'ENI de Tarbes (porteur) : pour la conception et le prototypage des besoins de conversion intégrés aux sièges passagers (10 W et 100 W) incluant les contraintes électrothermiques (2 post-doc sur 12 mois chacun) ;
- pour le laboratoire LAPLACE (partenaire) : conception et prototypage des besoins de conversion en distribution et en alimentation d'un groupe de

- sièges (3 kW) incluant la recherche d'un optimum, rendement / densité de puissance, (1 post-doc sur 24 mois) ;
- pour TFE (industriel) : fourniture des éléments des cahiers des charges, des normes électriques et environnementales cabines, accompagnement technique visant à assurer une bonne applicabilité des solutions des laboratoires et enfin le prototypage de validation (TRL5 à TRL7)⁸.

4.3.2.6 Programmes refusés

Les programmes suivants ont été écrits, déposés puis refusés par les instances d'évaluation :

- programme IET Supergrid pour lequel une demande de financement de 24 mois de contrat post-doctoral avait été formulée ;
- CEPIA 2, déposé pour financement par FUI, pour lequel une de demande de financement de 1 thèse avait été formulée ;
- ISYCE, déposé pour financement régional Contrat Laboratoire Entreprise, pour lequel une demande de financement de 1 thèse et d'un ingénieur de recherche pour 18 mois avaient été formulées.

D'autres programmes ont été transférés à des collègues après qu'une proposition initiale ait été développée par nos soins. C'est le cas du programme DIAMONIX, dans lequel nous avons participé à la réponse initiale, avant de nous effacer au profit d'autres acteurs du LGP.

4.3.3 Relation avec l'école doctorale

Le travail associé à cette mission a été de faire connaître et reconnaître les activités du LGP dans une école doctorale à orientation Génie Électrique. Nous avons naturellement été rattaché au sein de l'ED Génie Électrique, Électronique, Télécommunications : du système au nanosystème, ED 323. Au cours de nos travaux, nous avons commencé à participer de manière active à la vie de l'école doctorale en renseignant les feuilles annuelles d'activités et en participant à la demande d'allocation doctorale. Le fonctionnement actuel de l'école est tel que ses enseignants-chercheurs excentrés sont répartis dans des Équipes d'Accueil de Doctorant, EAD. Celle à laquelle nous appartenons nous lie à des collègues de l'École Nationale de l'Aviation Civile, de l'Institut de Recherche en Astrophysique et Planétologie, ainsi que de l'IUT de l'UPS de Figeac. Il n'y a aucun lien thématique entre ces acteurs ni aucun échange, au contraire des acteurs locaux qui se retrouvent dans des EADs dont le périmètre est leur équipe de recherche. C'est le travail de communication directe avec l'équipe dirigeante de l'ED qui nous a permis de bénéficier de bourses doctorales. C'est ainsi que sur la période de 11 ans considérée, les thèses de H. Medjahed (2008-2011) et de K. Berkoune (2012-2015) ont été financées.

8. Technology Readiness Level (TRL), graduation de 1 à 9 traduisant le niveau de maturité d'une technologie.

4.4 Actions liées à la communication

4.4.1 Stratégie de communication

Faut-il encore répéter que faire de la science n'est souvent pas suffisant, il faut le faire savoir. La montée en compétence des chercheurs du domaine de l'électronique de puissance s'accompagne d'une stratégie de communication. Celle-ci peut être déclinée en 3 étapes. La première a été de publier nos résultats tant au niveau national qu'international, et plus particulièrement en conférence. Cela nous a permis de rencontrer les acteurs français du domaine et de tisser avec eux les liens de futures collaborations. La deuxième étape a été de participer régulièrement aux manifestations de la communauté et de participer aux réunions et prises de décisions de réseaux professionnels. Enfin, la troisième étape consiste à poursuivre notre croissance, en adoptant une stratégie de communication et de valorisation de nos travaux et savoir-faire, à l'international. Nous rentrons actuellement dans cette dernière étape.

Je focaliserai mon propos sur la deuxième étape et la participation active aux réseaux professionnels.

4.4.2 Participation au GDR SEEDS

Afin de mieux communiquer et d'affirmer le positionnement du LGP et de la plateforme PRIMES au sein de la communauté nationale qui travaille dans les domaines de l'électronique de puissance, j'ai pris part aux réunions du Groupe De Recherche SEEDS (Systèmes Énergétiques et électriques dans leur dimension sociétale) du CNRS, et plus particulièrement aux réunions thématiques du socle Intégration des Systèmes de Puissance en 3 Dimensions (ISP3D). Ces réunions ont permis la mise en place de plusieurs actions d'envergure nationale. Notre présence régulière et constructive a rendu le LGP et la plateforme PRIMES visibles et reconnus. Ainsi, un flyer édité par le GDR, et qui fait état des recherches menées en France dans le domaine de la fiabilité et de la robustesse en électronique de puissance, référence le LGP comme un des acteurs de la filière. J'ai aussi été sollicité pour contribuer à un article collaboratif, [ACL8] (annexe B.2).

4.4.3 Participation au comité scientifique DECIELEC 2015

En tant que membre du COPPS PRIMES et acteur local de la recherche en électronique de puissance, j'ai été invité à participer au comité de pilotage et scientifique de DECIELEC 2015. Cela a permis d'inviter des conférenciers sur des thématiques particulières.

4.4.4 Participation au DAS SOCLE pôle AESE

L'ambition du pôle Aerospace Valley - AESE est de faire croître les emplois sur son territoire, dans les domaines de l'aéronautique, de l'espace et des systèmes embarqués. Ce pôle est un acteur important dans le cycle de vie des projets de recherche, mais aussi dans la mise en relation des acteurs du domaine. J'ai donc décidé de m'impliquer dans l'animation du pôle, avec l'ambition de proposer mon expertise scientifique, ma connaissance du monde académique régional, mais aussi

national, et mon expérience dans le montage de projet et des instruments de financement. Je suis devenu animateur du Domaine d'Activités technologiques Stratégiques (DAS) Systèmes embarqués, Objets Connectés, Logiciels et Électronique (SOCLE). J'aurai à cœur d'œuvrer à l'animation, tout particulièrement autour des problématiques d'Intégration des systèmes Électroniques Embarqués. Suite à cette candidature, j'ai été sollicité pour expertiser des projets déposés en deuxième phase de l'Appel à Projet Générique ANR, ainsi que pour contribuer à l'organisation d'une journée à destination des adhérents du pôle. Cette Journée Thématique "Composants de Puissance Nouvelle Génération : Interconnexion et Packaging - Innovations et Challenges", aura lieu sur la plateforme PRIMES. Divers acteurs de la plateforme, dont le LGP, réaliseront des présentations de leurs connaissances et savoir-faire.

4.4.5 Synthèse

Dans ces actions liées à la communication, la stratégie mise en place a permis de faire connaître et reconnaître le LGP comme un laboratoire ayant des compétences originales en électronique de puissance. Ainsi, les acteurs du monde académique savent un peu mieux quels sont nos domaines d'expertises.

4.5 Conclusions

La coordination d'actions pour le développement d'activités en électronique de puissance permet de faire exister et de rendre indépendante une activité de recherche. Cette garantie de fonctionnement favorise la croissance de notre activité, et le choix des thématiques que nous souhaitons aborder. De plus, dans son ensemble, le LGP est fortement imprégné d'une culture de recherche partenariale, ainsi, les actions entreprises en électronique de puissance ont mis en phase notre activité avec cette spécificité. Pour conclure, l'animation scientifique a débouché sur le montage de projets collaboratifs associant académiques et industriels sur la plateforme PRIMES. La coordination des compétences et des moyens de l'ENIT sur la thématique intégration de puissance a permis la spécification d'équipements dans le plan d'investissement, et a encouragé le dialogue entre acteurs du LGP et industriels de l'association des utilisateurs de PRIMES. Le positionnement de la plateforme PRIMES et des activités du LGP dans l'environnement régional et national est renforcé grâce aux actions spécifiques, au sein de Groupes de Recherche du CNRS notamment.

Malgré un bilan très positif de ces actions connexes à la recherche, certains points interpellent et doivent être améliorés. Le nombre d'acteurs du LGP directement impliqués autour des problématiques de l'électronique de puissance reste trop restreint, alors que nombre d'enseignants-chercheurs du LGP ont des savoir-faire qui pourraient être appliqués. Les actions de formation, et plus particulièrement celles à destination des étudiants de l'ENIT, sont de trop faibles amplitudes. Effectivement, il apparaît très difficile de recruter un étudiant ayant fait un cursus ENIT en vue d'un stage de MASTER ou d'un stage de recherche en Génie Électrique.

Chapitre 5

Perspectives de recherches

Dans cette partie, nous allons préfigurer ce que pourront être les perspectives de recherche à court et moyen terme. Pour certaines, il s'agira donc des travaux futurs des activités exposées au chapitre précédent. Pour d'autres, les perspectives envisagées conduiront à l'émergence de nouveaux axes. L'exposé des travaux futurs est structuré en cinq points : méthodes de modélisation pour la représentation et la simulation des systèmes et composants mécatroniques ; pilotage et observation des systèmes et composants mécatroniques ; méthodes de caractérisation expérimentale ; analyses, conception, intégration et procédés pour les systèmes et composants mécatroniques ; analyse des interactions électromagnétiques en électronique de puissance. Relativement à l'exposé des travaux de ce mémoire, cela consiste à : scinder et définir de nouveaux contours pour des axes déjà présentés, et à en créer un nouveau : analyse des interactions électromagnétiques en électronique de puissance.

5.1 Sur les différents axes de recherche

5.1.1 Méthodes de modélisation pour la représentation et simulation des systèmes et composants mécatroniques

5.1.1.1 Modèles multiphysiques

Concernant cet axe, nous continuerons nos développements avec pour objectif de proposer des modèles comportementaux, soit analytiques, soit de type circuit électrique équivalent. Ces développements seront menés conjointement avec B. Trajin.

Certaines des problématiques rencontrées lors des modélisations multiphysiques sont liées à la méthode de discrétisation. Dans les travaux futurs, nous proposons de prendre en compte les méthodes récentes en génie thermique, qui concernent la détermination des chemins de flux thermique, en lieu et place de la détermination de valeurs à chaque nœud d'un maillage géométrique. Cette méthode peut être associée aux techniques des logiciels d'images de synthèse pour la reconstruction, dans le temps et dans des espaces géométriques complexes, d'un ensemble de chemins de flux thermiques. Ceci permet de reconstruire, avec plus de rapidité que les logiciels éléments finis, les températures aux interfaces des matériaux et géométries, [29]. Cette méthode consiste à la formulation en espace de chemins et à

la résolution par un algorithme de Monte Carlo. Selon les auteurs, les intérêts de cette méthode sont multiples :

- insensibilité aux rapports d'échelles géométriques. Ainsi, la complexité géométrique des systèmes de puissance pourrait être prise en compte ;
- insensibilité aux rapports d'échelles temporelles. Par conséquent, la complexité des sollicitations au sein de l'électronique de puissance entre phénomènes à basses et hautes fréquences, pourrait être conservée ;
- exploitation de l'information portée par les chemins. Cette information peut aider au design, ou au contrôle-commande, par représentation du chemin sous la forme d'un transfert.

Ce dernier point est à mettre en lien avec les travaux entrepris, qui visent à représenter, sous la forme d'équation d'état ou par circuit électrique équivalent, les phénomènes électro-thermomécaniques.

5.1.1.2 Méthodes pour l'identification des modèles

Les développements de modèles s'effectuent avec l'utilisation de méthodes d'identification, qui permettent la détermination des paramètres nécessaires à l'utilisation des modèles lors d'une simulation. Sur ce point, nous souhaitons œuvrer à l'exploration et l'exploitation de techniques permettant :

- de mieux identifier des valeurs de paramètres, notamment de manière expérimentale, ce qui rejoint l'axe associé aux développements de bancs expérimentaux ;
- de mieux caractériser la performance d'un modèle par la comparaison mesure simulation.

Concernant le premier point, le potentiel de collaboration, avec les équipes M2SP et IMF du laboratoire, pourrait permettre de mieux déterminer les lois de comportement ou de vieillissement à utiliser pour les matériaux de l'assemblage, de mieux discerner les tests à mettre en œuvre pour déterminer les paramètres des lois, tant pour les matériaux métalliques [45], que polymères [63].

5.1.2 Pilotage et observation des systèmes et composants mécatroniques

Les perspectives de cet axe portent sur 3 aspects : l'exploitation des modèles génériques de modulation, la mise en œuvre d'observateurs pour les systèmes de conversion d'énergie, et la commande dynamique. Les deux premières propositions sont inscrites dans un projet de collaboration déposé dans le cadre du Partenariat Hubert Curien-Utique (PHC-Utique), [10], sous forme d'un projet de recherche mixte de coopération inter-universitaire franco-tunisienne. Il porte sur 2 thèses en cotutelles. La dernière proposition est un projet interne.

5.1.2.1 Exploitation des modèles génériques de modulation

Dans le cadre de nos travaux de recherche, nous avons mis à jour un modèle générique des modulations appliquées aux structures de conversion de type onduleur de tension à N-niveaux, et dont la résolution permet de générer l'ensemble des solutions. Les bornes de cet ensemble sont ensuite déterminées par l'analyse des contraintes inhérentes à la structure de conversion retenue. L'exploration de cet

ensemble est possible par l'ajout de variables ou degrés de liberté, dont le choix agit sur des critères à optimiser. Un des objectifs de ces perspectives est donc de déterminer comment utiliser ce degré de liberté pour permettre une action corrective, suite au diagnostic d'un défaut convertisseur. Les verrous concernés par ces propositions sont :

- quels degrés de liberté peuvent-être liés à des critères à optimiser ?
- Ces degrés de liberté peuvent-ils être choisis de façon à compenser l'occurrence d'un défaut mineur (par exemple, un déséquilibre instantané de la tension ou du courant), ou être utilisés comme une variable supplémentaire de réglage en cas de défaut majeur ?
- Comment ces degrés de libertés et les stratégies de modulation auxquelles ils sont associés peuvent être liés à des observateurs ?

Ces propositions pourront être complétées par notre volonté d'étendre cette représentation à d'autres structures de conversion. Plus particulièrement, les structures DC - DC abaisseuse ou élévatrice de tension, sont des candidates assez immédiates. Parmi ces convertisseurs, les structures à entrelacements, qui imposent de bien choisir les différents rapports cycliques pour ne pas déséquilibrer les courants de bras, sont intéressantes, car elles permettraient de transposer l'approche proposée sur la base d'une structure multiniveaux en tension, à une structure duale, multiniveaux en courant.

5.1.2.2 Mise en œuvre d'observateurs pour les systèmes de conversion d'énergie.

Les collaborations entreprises au sein de l'équipe DIDS, sur la base d'un savoir faire spécifique sur la conception d'observateurs de fonctionnelles linéaires de dimensions minimales par des méthodes rapides de conception, devraient permettre de les appliquer à la conversion d'énergie électrique. Ainsi, dans ces propositions de développements, il s'agira de :

- concevoir des observateurs minimaux à entrées inconnues ;
- tenir compte de non-linéarités éventuelles dans le modèle ou dans la fonction à estimer ;
- prendre en compte un environnement incertain ;
- mettre en œuvre des techniques d'estimation rapides et non asymptotiques ;
- appliquer les techniques d'estimation à la gestion de sources multiples d'énergie, par la surveillance de quantités éventuellement non linéaires.

5.1.2.3 Commande par platitude des systèmes de conversion d'énergie

La commande par bouclage d'un système de conversion d'énergie, mettant en œuvre des organes d'électronique de puissance, permet d'assurer et d'optimiser son fonctionnement. Bien que diverses méthodes de commande des convertisseurs aient été exploitées, il nous paraît intéressant de mener une étude sur la commande par platitude de ces systèmes. Proposée par M. Fliess, J. Lévine, P. Martin et P. Rouchon [25], cette méthode vise à démontrer la platitude d'un modèle. Dans ce cas, son application permet de révéler la commande des systèmes. La notion de trajectoire que le système doit exécuter, mais aussi la conception d'un contrôle par bouclage permettant la poursuite de cette trajectoire, deviennent des expressions assez immédiates. Ainsi, par cette technique, l'asservissement réalisé pour un

système mécatronique de puissance permet de définir et d'assurer la poursuite de trajectoire pour le courant de charge [36], par exemple, ou pour la tension de bus continu et la puissance réactive [64]. Les études menées au sein du LGP, sur cette thématique, ont montré que cette technique permet de construire des commandes à différents niveaux, quand différentes échelles dynamiques présentes au sein du système [55] doivent être pris en compte. Par ailleurs, les travaux collaboratifs internes sur la modélisation des stratégies de modulation, ont permis de mettre à jour le lien entre un schéma de modulation et son impact sur une variable interne du système, non prise en compte dans la boucle de régulation. Plus particulièrement dans le cas des onduleurs triphasés et connectés à des charges symétriques inductives, il a été démontré le lien, entre la tension de mode commun ou la tension aux bornes d'une capacité de découplage, et les degrés de liberté mis à jour pour explorer l'ensemble des solutions pour la modulation. Nous pensons que la platitude permettrait de procéder à un contrôle de ces variables, par la prise en compte, dès la phase de modélisation d'un système fortement couplé et aux dynamiques différentes entre, par exemple, éléments passifs et charges connectées.

5.1.3 Méthodes de caractérisation expérimentale

Concernant les méthodes de caractérisation expérimentale, une activité de recherche qui nous paraît pertinente est la conception d'outils statistiques spécifiques. Ceci vise à optimiser l'utilisation, en terme de performance et d'efficacité, d'une plate-forme expérimentale d'évaluation de la durée de vie. Cette activité concernera le développement d'outils de statistiques décisionnelles. De façon plus précise, seront adaptés aux sollicitations environnementales et électriques envisagées pour les systèmes électriques embarqués. Ces outils permettront d'étudier les liens entre les modes de défaillance des briques technologiques et le comportement du système intégré. Sur la base d'un état de l'art des outils logiciels utilisables, la construction et l'analyse des plans d'expériences devraient être exprimées. Cette dernière devrait être conduite en trois étapes :

- analyse des facteurs pertinents ;
- analyse de corrélation, en particulier pour dégager des liens entre les comportements aux différents niveaux d'intégration ;
- analyse de régression, en particulier dans un objectif de prédiction.

Idéalement, il faudrait que ces outils soient parfaitement adaptés aux bancs de la plateforme PRIMES, notamment au banc CEPIA. Ainsi nous pourrions concevoir un outil temps réel intégré au banc, pour la détection d'apparition de défauts.

Un travail sur les distributions statistiques des temps de défaillance, ainsi que les lois de vieillissement ou d'activation des mécanismes associées peut également faire l'objet des études. Effectivement, l'apparition de nouvelles technologies et de nouveaux matériaux rend toujours intéressant l'analyse expérimentale et la quantification en terme de temps de défaillance d'un assemblage.

Un dernier axe de proposition concerne la mise à jour d'indicateurs. Plus particulièrement, des indicateurs de la température de jonction, associés ou non à des paramètres thermosensibles, seront abordés. Ils pourraient être liés aux mesures issues des capteurs électromagnétiques intégrés qui ont été développés. La construction d'indicateurs de l'état de santé d'un assemblage est également un sujet qui s'inscrit logiquement dans les suites des travaux décrits. Ces points peuvent,

d'ailleurs, faire l'objet de collaborations avec le G2ELAB et le SATIE, pour le premier point ou l'IMS pour le second. Effectivement, nous avons des programmes de recherche en cours et des valorisations communes, qui attestent de l'intérêt que nous portons mutuellement à ces sujets, par exemple [24].

5.1.4 Analyses, conception, intégration et procédés pour les systèmes et composants mécatroniques

Sur ces activités, le point central sera l'optimisation fonctionnelle de l'élément central dans la conversion de l'énergie électrique : le module ou le composant. Les activités viseront un gain des ratios masse - puissance électrique, ou volume - puissance électrique. De manière plus concrète, nous proposons deux activités qui retiennent notre intérêt pour de futurs développements.

5.1.4.1 L'intégration de passifs

L'intégration de passifs est souvent citée comme un axe de développement à forte valeur ajoutée, des futurs composants de l'électronique de puissance. En effet, on peut penser que l'expérience, en matière d'intégration de passifs dans les PCB¹, sera appliquée pour le développement de modules de puissance, [53]. Ainsi, les modules d'électronique de puissance pourraient voir leur substrat inférieur modifié pour accueillir des couches successives de matériaux conducteurs et diélectriques, avec l'objectif de créer des condensateurs de découplage en forte proximité des interconnexions des composants semi-conducteurs. Des travaux effectués en ce sens sont très prometteurs, par exemple [21], et mériteraient d'être complétés par les approches d'intégration que nous maîtrisons. Il est aussi probable que l'avènement de la fabrication additive pourra jouer un très grand rôle dans cette intégration. La création d'un centre d'excellence en impression 3D, à l'ENIT², ouvre la voie à des possibles collaborations dans ce domaine.

5.1.4.2 Les procédés d'intégration et les nouveaux matériaux

Lors de la conception d'un module de puissance, l'idéal recherché est le développement de procédés d'intégration qui garantissent une grande fiabilité des assemblages. Il est admis qu'au sein d'un assemblage, les interfaces dues à la multiplicité des matériaux et des procédés pour les mettre en œuvre, sont les lieux privilégiés des mécanismes de défaillance. Il est facile d'imaginer qu'une homogénéité des matériaux internes aux modules serait un élément favorable pour la fiabilité. Une étape intermédiaire avant la création de ces matériaux homogènes à gradient de propriété est la suppression de certaines interfaces actuelles. Dans cette optique, la suppression du matériau de scellement entre métallisation inférieure de la puce et métallisation supérieure du substrat serait un atout (à fiabilité et performances thermique, mécanique et électrique, équivalentes). Ainsi, les contraintes engendrées par les procédés de fabrication pourraient être minimisées. De ce fait, nous proposons l'étude de scellement entre puce et substrat par grippage. Cette

1. Printed Circuit Board.

2. CEF3D, structure mutualisée de recherche en fabrication additive par fusion laser sur lit de poudre métallique. Début prévisionnel des activités en septembre 2017.

idée est le fruit d'une discussion devant être poursuivie avec l'équipe IMF, et plus particulièrement avec les collègues s'intéressant à la tribologie.

5.1.5 Analyse des interactions électromagnétiques en électronique de puissance

Il s'agit ici d'un nouvel axe de recherche qui sera mené conjointement avec S. Baffreau, maître de conférences à l'IUT département GEII, de Tarbes. Effectivement, nous sommes convaincus que le contenu harmonique des signaux conduits ou rayonnés d'un module de puissance, porte des informations liées à son état de santé. En ce sens, nous avons développé des activités de recherche dont nous souhaitons la poursuite dans les années à venir. L'intégration de nouvelles technologies, au sein de composants ou modules à plus haut ratio puissance/masse ou puissance/volume, entraîne une remise en cause des connaissances pour l'évaluation de la fiabilité et de la durée de vie de ces nouveaux systèmes. Dans la démarche actuelle d'évaluation de la fiabilité, des tests de vieillissement sont mis en place pour tenter de reproduire les modes et mécanismes de défaillance identifiés et, ainsi, caractériser leur probabilité d'occurrence et les niveaux de sollicitations à ne pas atteindre. De plus, lors du fonctionnement, il serait intéressant d'avoir une information de l'état de santé de ces systèmes, en vue de leur maintenance prédictive. La proposition d'activité porte sur l'évaluation de l'état de santé des systèmes d'électronique de puissance, par un nouveau type de contrôle non destructif. Déjà envisagé pour caractériser l'apparition de défauts au sein de structures d'interconnexion de type ball grid array, suite à des cyclages thermiques au sein d'assemblage pour la radiofréquence [51], nous souhaitons compléter cette caractérisation par l'expression d'un modèle. Ceci a été illustré sur la modélisation de défauts de cartes électroniques comprenant des vias traversants [35].

Une première étude bibliographique a permis d'identifier les principaux phénomènes de dégradation et/ou défaillance des composants de puissance. En suivant, des travaux préliminaires, focalisés sur les phénomènes les plus récurrents, ont permis de mettre en œuvre et valider une première démarche sur la faisabilité d'un contrôle non destructif, à travers des simulations électriques et des mesures expérimentales. Cependant, il est nécessaire d'éprouver et compléter la méthode, afin de pouvoir identifier objectivement la présence d'un défaut, voire sa future occurrence.

Le travail consistera, principalement, à développer une méthode de caractérisation expérimentale de défauts physiques dans les composants d'électronique de puissance, au moyen d'analyses de signaux électromagnétiques :

- simulations et comparaisons de modèles sains et défaillants ;
- réalisation d'expérimentations sur un prototype représentatif des composants d'électronique de puissance actuels ;
- analyses des données ;
- comparaison des résultats expérimentaux avec ceux préalablement simulés ;
- identification paramétrique des éléments composant le modèle pour une optimisation de ce dernier.

Ces démarches s'appuient sur la compréhension des méthodes de représentation de type paramètres S ou temps-fréquence. Elles nécessitent de bien maîtriser la chaîne de mesure et pourraient être associées à des méthodes statistiques. Ces dernières permettraient de corrélérer de manière statistique la répartition de fréquences

caractéristiques ou des amplitudes, lors de l'occurrence de défauts et, de leur signature dans les répartitions spectrales des signaux. A terme, nous pourrions envisager d'agresser de manière spécifique les modules, avec l'objectif de caractériser à l'état initial leur comportement, comme appliqué dans les travaux [22], puis en cours de fonctionnement, pour déterminer une évolution consécutive à la dégradation de leur état de santé

5.2 Avec une ambition commune : l'éco-conception

Ces développements pourraient être réalisés avec un objectif commun : se placer dans une démarche d'éco-conception. L'idée est notamment de mettre en œuvre une méthode pour le dimensionnement, la conception et la fabrication de modules d'électronique de puissance, recyclables à 100%. Cette méthode devrait intégrer la protection de l'environnement, dès la phase de conception. Elle aurait pour objectif de réduire les impacts environnementaux des modules tout au long de leur cycle de vie : extraction des matières premières, production, distribution, utilisation et fin de vie. Les questions sont nombreuses et concernent toutes les étapes de la conception de ces objets : quelle puissance, quelle fonction, quels semi-conducteurs, quels matériaux autour et donc quels procédés, pour finalement, quelles performances et quelle fiabilité ? Il faudrait également rajouter quels procédés pour le recyclage ? A ce titre, des collaborations avec la plateforme Agromat [3] (présente sur le site de l'ENIT), pourraient conduire au développement de bio-matériaux adaptés à l'électronique de puissance.

Un autre axe de réflexion sur ce point concerne la réutilisabilité des composants. Notre proposition consiste à développer une méthode de caractérisation expérimentale pour la re-"qualification" de composants de "deuxième main". A ce titre, la plateforme de démantèlement d'avions TARMAC Aerosave [65], pourrait être un partenaire de ces activités.

5.3 Dans les autres missions en support de l'activité recherche

5.3.1 Activités pédagogiques et de formations

Comme dit précédemment, nous souhaitons faire en sorte que les étudiants de l'ENIT, mais aussi d'autres profils soient attirés par les thématiques de recherche, et aient envie d'approfondir leurs connaissances en participant à des activités de formation. En premier lieu, il me semble que la conception et le pilotage des architectures de conversion se prêtent très bien à l'apprentissage par projet ou problème. Je souhaiterais continuer à participer et développer ces approches, tant au sein du cursus ENIT que dans d'autres contextes.

Effectivement, afin d'attirer des jeunes chercheurs vers nos thématiques, il me semble intéressant de développer la mise en œuvre d'écoles d'été thématiques, en langue anglaise. Cela nécessite, au préalable, de travailler avec le concours du service des relations internationales, à l'identification des partenaires susceptibles d'être intéressés, et développer les accords d'échanges avec ces derniers. Ces écoles

d'été devraient être organisées autour de nos savoir-faire. Elles pourraient également adopter la chronologie particulière aux nouvelles pratiques pédagogiques.

Une autre piste de développement concerne un format de formation sur les thématiques de la conversion de puissance, avec une visée à plus long terme, par exemple sous la forme d'un MASTER. La possibilité de réunir, autour d'un cursus commun de formation pour la recherche, plusieurs acteurs aux intérêts convergents existe sur Tarbes. Ainsi, l'ENIT pourrait proposer des terrains de stage ou une possibilité de formation complémentaire à ces étudiants en formation initiale. Cela pourrait aussi permettre d'accueillir plus facilement des étudiants étrangers au sein d'un semestre spécialisé. Les étudiants de l'IUT se verraient offrir la possibilité d'une poursuite d'études localement. Plus globalement, la synergie résultant de cette démarche structurante permettrait la mise en œuvre de collaborations dépassant le cadre ENIT-IUT, en intéressant les acteurs de l'UPPA (Université de Pau et des Pays de l'Adour) de Pau, de Toulouse et, plus localement des BTS Génie Électrique du Lycée Jean-Dupuy, et des filières professionnelles associées à cette thématique à Tarbes. A ce titre l'obtention d'un an de financement pour le projet F.I.M.I (Filière Industrielle Module Innovant), porté par l'ENIT en partenariat avec l'association des industriels de PRIMES et avec le soutien du pôle Aerospace Valley, d'ALSTOM et de la FRENCH TECH Hautes-Pyrénées³, peut être un facilitateur.

5.3.2 Activités partenariales

Concernant les activités partenariales, les perspectives sont envisagées en 3 points : renforcer notre participation et notre implication auprès de la communauté française ; créer de nouveaux partenariats à l'international ; maintenir notre capacité d'autofinancement et de recherche amont.

Le premier travail à accomplir, nous conduira à renforcer notre implication dans les réseaux de la communauté de l'électronique de puissance. Cela consiste à participer de manière active aux réunions du GDR SEEDS, en étant force de proposition, en accueillant des journées thématiques, en proposant des communications, ou en répondant aux appels à projet internes en accord avec d'autres partenaires. De manière plus générale, ce réseau est celui par lequel nous construirons des collaborations avec d'autres partenaires institutionnels français. Au niveau de l'école doctorale, nous devons travailler à un schéma de communication pour que notre activité soit plus visible et mieux reconnue. Cela doit, notamment, nous permettre de satisfaire aux indicateurs demandés par l'école doctorale afin d'obtenir plus régulièrement des bourses doctorales. Au niveau du pôle AESE, notre présence doit favoriser l'émergence de projets autour de l'optimisation fonctionnelle des systèmes d'électronique de puissance, de leur développement sur la plateforme PRIMES.

Les partenariats internationaux sont l'objet du second axe de travail. Effectivement, il nous semble important d'affirmer notre savoir-faire en tissant des liens avec des partenaires universitaires étrangers. En effet, cela doit nous permettre de partager nos compétences, tout en les complétant et en les confrontant à d'autres méthodes. Ces actions doivent également favoriser les échanges de permanents,

3. Ce projet a été déposé à l'appel à projet MUTEKO, Accompagnements de Mutations Économiques et développement de l'emploi en Occitanie, de la DIRECCTE Occitanie, le 10 avril 2017.

ainsi que d'étudiants pour des stages de recherche, ou la mise en place de thèses en co-tutelles. A cette fin, les premières démarches ont déjà été initiées. Nous avons répondu à un premier appel à projet commun, avec des partenaires tunisiens, en vue du financement d'un projet autour du pilotage et de la reconfiguration par la commande, après détection d'un mode de défaillance d'un convertisseur. Cela concerne 2 thèses en co-tutelles. Nous avons mis en place l'accueil de chercheurs de la Facultad de Ciencias Exactas, Ingenieria y Agrimensura- FCEIyA, Universidad Nacional de Rosario, dont l'objectif est de déterminer les axes et les modalités d'une future collaboration. Le second objectif est de développer des partenariats avec des pays nord-européens.

Enfin, le dernier point concerne l'effort à développer pour pouvoir développer des activités de recherche qui soient en amont des problématiques industrielles. Pour ce faire, il nous faut développer notre capacité à autofinancer ces derniers. Par conséquent, je propose de déposer plus régulièrement des propositions à des appels à projets qui exigent un positionnement des verrous et des problématiques, en rupture avec l'état de l'art existant. Ceci sera possible, par des candidatures plus régulières aux appels à projet de l'ANR, ou au sein de grands projets structurants de types FUI ou H2020.

5.3.3 Activités de valorisation et de diffusion de la connaissance

Enfin, dans cette activité, nous souhaitons mettre l'accent sur notre stratégie de valorisation. Jusqu'à présent, nous avons privilégié notre présence aux conférences du domaine avec l'ambition de rencontrer de potentiels partenaires. Nous devons maintenant œuvrer à une production en journaux plus régulière. Cette démarche nous permettra de faire la synthèse de nos savoir-faire et compétences et, ainsi, d'être plus à même de répondre à des programmes collaboratifs ambitieux. Nous pourrons ainsi mieux mettre en exergue nos compétences particulières.

5.4 Conclusions

Dans ces perspectives, nous proposons de poursuivre les activités entreprises et de faire émerger plus distinctement une nouvelle activité de recherche. Ces développements sont associés à une restructuration du lien entre les activités. Ainsi, nous souhaitons que l'animation du thème de recherche optimisation fonctionnelle des systèmes mécatroniques de puissance prenne la forme de cinq activités. Les quatre premières sont la poursuite des activités déjà entreprises, alors que la dernière est nouvelle. Afin de garantir la pérennité et la qualité des recherches de celles-ci, je propose de poursuivre les démarches en faveur de l'implication de différents collègues au sein de ces activités.

Pour appuyer cette démarche, une stratégie d'information et de formation, à destination des étudiants potentiellement intéressés par ces activités, doit être poursuivie. Notre implication dans les réseaux nationaux et internationaux doit continuer de croître.

Chapitre 6

Conclusion

Les quelques lignes qui vont suivre, vont clore la synthèse écrite de ces 11 dernières années de recherche, au sein du Laboratoire Génie de Production de l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes.

Cette synthèse a fait l'exposé de travaux menés dans 3 axes de recherche. Il s'agit de recherches portant sur l'intégration et les interactions, la caractérisation expérimentale, le pilotage et la mesure, associés à des systèmes complexes mettant en œuvre des dispositifs d'électronique de puissance. Dans ces travaux, l'objectif a été d'optimiser le fonctionnement de ces derniers, en réalisant des études de modélisations et de simulations comportementales multiphysiques, en les caractérisant de manière expérimentale, et en définissant des stratégies de pilotage. Le lien commun entre ces études est la démarche adoptée. Effectivement, pour chacune, la démarche de modélisation découle d'une stratégie identique. De plus, ces travaux ont nécessité la mise en œuvre d'un socle commun de méthodes mathématiques. Pour la plupart, des outils matériels et leurs procédés de fonctionnement, ont été définis ou utilisés. Sur la base, de ce socle commun de compétences, ainsi que de l'expérience acquise sur ces objets de conversion de puissance, sont proposées les perspectives de recherche pour les années à venir.

Notre environnement devrait continuer sa mutation, où cohabitent, la prise de conscience collective de l'énergie consommée, et un accroissement de la demande en énergie électrique. Notamment, le domaine des transports devrait poursuivre son changement vers l'énergie électrique, et sa plus grande connectivité avec le monde extérieur. Ces "révolutions", qui s'opèrent aujourd'hui en douceur, pourraient nous faire vivre dans les 20 ans à venir, des changements radicaux dans nos modes d'utilisation de ces derniers. L'électronique de puissance, et je l'espère nos travaux, y joueront un rôle majeur.

Annexe A

Curriculum Vitae

M. VIDAL Paul-Etienne
Génie Électrique - Automatique
Docteur - DEA - Ingénieur

Né le 26 juillet 1978, à CARCASSONNE (Aude)

Nationalité française,

Marié, 3 enfants,

Maître de conférences, École Nationale d'Ingénieurs de Tarbes (ENIT), 47 avenue d'Azereix -BP1629- 65016 TARBES CEDEX, depuis septembre 2006.

Coordonnées : (+33)5.62.44.60.94, (+33)6.31.84.57.01,
paul-etienne.vidal@enit.fr.

Section de CNU : 63°,

Unité de recherche d'appartenance : Laboratoire Génie de Production (LGP) EA 1905, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes, Institut National Polytechnique de Toulouse, Université de Toulouse.

Docteur de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, Spécialité Génie Électrique, avec mention "Très honorable", Décembre 2004.

Diplôme d'Etudes Approfondies de Génie Électrique, Septembre 2001.

Ingénieur de l'Ecole Nationale Supérieure d'Électrotechnique, d'Électronique, d'Informatique et d'Hydraulique de Toulouse, Spécialité Génie Électrique, Juin 2001.

Activités de recherche

A.1 Thème de recherche

Les activités de recherche développées ci après l'ont été dans un contexte de reconversion thématique, suite à mon recrutement à l'ENI de Tarbes, en septembre

2006. De plus, ces travaux doivent être vus comme la construction d’une démarche, et l’affirmation d’une stratégie et d’activités de recherche, au sein d’un laboratoire qui ne compte au moment de mon recrutement **aucun** enseignant-chercheur ou chercheur en 63^{ème} section. Depuis, la reconnaissance et le développement des activités de recherche ayant pour objet applicatif les systèmes mécatroniques et en particulier les dispositifs d’électronique de puissance, a favorisé la demande de rattachement à l’unité d’un professeur des universités (avril 2012), d’un maître de conférences (chercheur associé depuis janvier 2015), ainsi que le recrutement d’un maître de conférence (septembre 2013). Au sein de cette équipe de travail, les activités de recherche concernent des **analyses et méthodes d’études pour une intégration optimale en électronique de puissance**. Les études répondent aux problématiques rencontrées en :

- modélisation comportementale ;
- pilotage et mesures ;
- interactions multiphysiques ;
- caractérisations expérimentales,

pour des systèmes mettant en œuvre des dispositifs d’électronique de puissance. Le socle méthodologique sur lequel s’appuient nos recherches est :

- la physique appliquée ;
- la modélisation ;
- l’intégration en électronique de puissance ;
- l’automatique et les mathématiques appliquées ;
- la programmation et l’utilisation de logiciels de simulation comportementale ;
- la caractérisation.

Ce savoir-faire nous permet de répondre aux questions de prédiction du comportement, d’optimisation des architectures et des choix technologiques, de validation du comportement lors du vieillissement, ainsi que du pilotage optimal du dispositif.

A.2 Encadrement doctoral

Synthèse :

Direction ou codirection de 4 thèses soutenues dont 1 en cours.

Codirection de la thèse de Hassen Medjahed :

1 Octobre 2008 - 11 Mai 2012 : doctorant inscrit à l’école doctorale Génie Électrique Électronique et Télécommunications de Toulouse (GEET).

Titre : "Contribution à la simulation électro-thermomécanique numérique 3D : appliquée à l’étude de la fiabilité des interrupteurs à semiconducteurs packagés, utilisés en traction ferroviaire."

Contexte : Cette thèse, sur financement MENESR, a débuté en octobre 2008. Codirigée par Bertrand Nogarede, professeur des universités de l’équipe de recherches en électrodynamique (GREM3) du LAPLACE (UMR 5213 - TOULOUSE), la thèse a été soutenue le 11 mai 2012.

Encadrement :

- directeur de thèse : Bertrand Nogarede, PU, INPT-ENSEEIHT, 30% ;
- codirecteur de thèse, P.-E. Vidal, MCF, INPT-ENIT, 70%.

Socle méthodologique concerné : la physique appliquée ; la modélisation ; l'intégration en électronique de puissance ; la programmation et l'utilisation de logiciels de simulation comportementale ; la caractérisation.

Publications associées : [ACL6], [ACTI8], [ACTI10], [ACTN4], [ACTN5], [ACTN6].

Devenir du doctorant : ingénieur calcul - Induction, Fives Celes.

Codirection de la thèse de Alioune Cisse :

1 Septembre 2009 - renoncement en décembre 2015 : doctorant inscrit à l'école doctorale Génie Électrique Électronique et Télécommunications de Toulouse (GEET).

Titre : "Développement d'un module électronique de puissance haute température pour composants SiC dans les applications aéronautiques."

Contexte : Cette thèse a été financée par un contrat CIFRE EADS-IW (EADS-Innovation Works). En décembre 2015, Alioune Cisse a renoncé à soutenir ses travaux de thèse, suite à la signature d'un contrat de travail en milieu industriel.

Encadrement :

- directeur de thèse : Francisco Carrillo, PU, INPT-ENIT, 40% ;
- codirecteur de thèse, P.-E. Vidal, MCF, INPT-ENIT, 60%.

Socle méthodologique concerné : l'intégration en électronique de puissance ; la programmation et l'utilisation de logiciels de simulation comportementale ; la caractérisation.

Publications associées : [ACTI7], [ACTI9], [ACTN7].

Devenir du doctorant : chef de projet normalisation AFNOR - French Standardization System - UTE.

Direction de la thèse de Karima Berkoune :

1 Octobre 2012 - 1 Juillet 2016 : doctorant inscrit à l'école doctorale Génie Électrique Électronique et Télécommunications de Toulouse (GEET).

Titre : "Approche Mathématique pour la Modulation de Largeur d'Impulsion pour la conversion statique de l'énergie électrique."

Contexte : contrat doctoral l'école doctorale GEET. Cette étude a fait suite aux travaux de niveau MASTER réalisé par Simon Cailhol.

Taux d'encadrement : 100%. J'ai bénéficié d'une dérogation à titre individuel pour encadrer.

Socle méthodologique concerné : la modélisation ; l'automatique et les mathématiques appliquées ; la programmation et l'utilisation de logiciels de simulation comportementale ; la caractérisation.

Publications associées : [ACTI16], [ACTN10], [ACTN11].

Devenir du doctorant : ingénieur de recherche - ALTRAN.

Codirection de la thèse de Guillaume Parent :

1 Novembre 2012 - 6 Février 2017 : doctorant inscrit à l'école doctorale Génie Électrique Électronique et Télécommunications de Toulouse (GEET).

Titre : "Méthode expérimentale pour estimer la fiabilité de modules électroniques de puissance à grand gap."

Contexte : Cette thèse a été financée par un contrat CIFRE ANRT et EADS-Innovation Works devenue AIRBUS-Group. Elle a fait suite pour partie aux travaux impulsés par Alioune Cisse.

Encadrement :

- directeur de thèse : Francisco Carrillo, PU, INPT-ENIT, 40% ;
- codirecteur de thèse, P.-E. Vidal, MCF, INPT-ENIT, 60%.

Socle méthodologique concerné : la physique appliquée ; la modélisation ; l'intégration en électronique de puissance ; la programmation et l'utilisation de logiciels de simulation comportementale ; la caractérisation.

Publications associées : [ACTI12], [ACTI19].

Devenir du doctorant : ingénieur de recherche - société de prestation en ingénierie.

Codirection de la thèse de José Ioav Ramos Chavez :

14 Février 2013 - 21 Novembre 2016 : doctorant inscrit à l'école doctorale Génie Électrique Électronique et Télécommunications de Toulouse (GEET).

Titre : "Conception d'ensembles mécatroniques à haute fréquence de fonctionnement : optimisation des conditions d'interactions électromagnétiques et multi-physiques entre la machine et le convertisseur."

Contexte : Thèse cofinancée ANRT - entreprise NOVATEM-SAS. Elle a fait suite, pour partie aux travaux de modélisation multiphysique initiés dans la thèse d'Hassen Medjahed et à ceux encadrés par Jean-Marc Dienot, sur les interactions électromagnétiques au sein des architectures électroniques embarquées.

Encadrement :

- directeur de thèse : J.-M. Dienot, PU, UPS-IUT-GEII-TARBES, 60% ;
- codirecteur de thèse, P.-E. Vidal, MCF, INPT-ENIT, 40%.

Socle méthodologique concerné : la physique appliquée ; la modélisation ; la programmation et l'utilisation de logiciels de simulation comportementale ; la caractérisation.

Publications associées : [ACTI13], [ACTI14], [ACTI22].

Devenir du doctorant : ingénieur de recherche - NOVATEM SAS.

Codirection de la thèse de Guillaume Vine :

Depuis le 1 Février 2015 : doctorant inscrit à l'école doctorale Génie Électrique Électronique et Télécommunications de Toulouse (GEET).

Titre : "Études et développements de capteurs électromagnétiques large-bande, en vue de leur intégration dans des architectures d'électronique de puissance."

Contexte et résumé des activités : Le financement de cette thèse a pour cadre le programme de recherche CAPTIF (Agence Nationale de la Recherche, ANR-14-CE05-0044-01) ayant pour objectif l'implémentation de différents capteurs au sein d'une architecture d'électronique de puissance à des fins de diagnostic et d'optimisation, soit des géométries, soit des choix technologiques.

Encadrement :

- directeur de thèse : Jean-Marc Dienot, PU, UPS-IUT-GEII-TARBES, 40% ;
- codirecteur de thèse, P.-E. Vidal, MCF, INPT-ENIT, 60%.

Socle méthodologique concerné : la physique appliquée ; la modélisation ; l'intégration en électronique de puissance ; la programmation et l'utilisation de logiciels de simulation comportementale ; la caractérisation.

Publications associées : [ACTI25], [ACTI26], [ACTN13].

A.3 Encadrement de post-doctorants

Synthèse :

coencadrement de 3 activités post-doctorales.

Co-encadrement du contrat post-doctoral de Raphaël Riva :

Novembre 2014 à novembre 2015.

Sujet : "Optimisation et réflexions autour de l'intégration 3D, et la fiabilité des assemblages."

Contexte : Les activités menées dans ce programme ont été liées au programme Double and Bump. Une description des activités est donnée ci-après dans la section "Programmes de recherche". Activité co-encadrée par Baptiste Trajin.

Publication associée : [BR1].

Devenir post-doctorant : ingénieur de recherche IRT Saint-Exupéry.

Co-encadrement du contrat post-doctoral de Simon Cailhol :

Janvier 2015 à juin 2016.

Sujet : "Caractérisation électro-thermo-mécanique des polymères encapsulants pour l'électronique de puissance."

Contexte : Les activités menées dans ce programme étaient liées au programme GENOME et pour partie au stage de MASTER de Marion Haussener. Activité co-encadrée par Baptiste Trajin et Francisco Carrillo.

Publications associées : [ACL7], [ACTI18], [ACTN12].

Co-encadrement du contrat post-doctoral de Simon Cailhol :

Juillet 2016 à juillet 2018.

Sujet : "Mise en œuvre d'architectures intégrées de conversion 10W et 100W."

Contexte : Les activités menées dans ce programme sont liées au programme CONVERSION'99. Activité co-encadrée par Baptiste Trajin.

A.4 Encadrement scientifique

Synthèse :

- Ces activités ont été menées avec un objectif principal de développement scientifique, soit en compléments d'autres activités, soit dans le cadre d'activités de recherches prospectives.
- Encadrement ou co-encadrement d'1 stage de fin d'étude, de 3 MASTER 2 et de 2 MASTER 1.

Co-encadrement d'un stage de fin d'étude :

De septembre 2010 à janvier 2011 : stage de Simon Cailhol ;

Sujet : "Approche mathématique pour la Modulation de Largeur d'Impulsion."

Résumé des activités : suite demande de financement à l'Institut National Polytechnique de Toulouse nous avons obtenu un Bonus Qualité Recherche afin de financer une étude partagée entre le LAPLACE et le LGP-ENIT. Cette étude proposait une nouvelle approche de la Modulation de Largeur d'Impulsion. Cette approche mathématique s'appuyait sur les notions de pseudo-inverse et d'inverse généralisée. L'étude ne permettait pas de dégager une solution meilleure que les solutions existantes, mais offrait un nouvel outil d'investigation pour explorer les possibilités offertes par les degrés de liberté, que présentait le calcul des rapports cycliques. Suite à une pénurie de candidats de niveau MASTER, nous avons encadré ce stage sous la forme d'un projet de fin d'étude pour un élève-ingénieur. J'ai co-encadré ce stage avec Maurice Fadel et Ana Llor, respectivement professeur des universités et maître de conférences à l'ENSEEIH-T-LAPLACE, et Frédéric Rotella, professeur des universités à l'ENI de Tarbes.

Publication associée : [ACTI11].

Co-encadrement d'un stage de MASTER 1 suivi d'un stage MASTER 2 :

D'avril 2014 à janvier 2015 : stage de Julien Viven ;

Sujet : "Modélisation multiphysique d'un système d'électronique de puissance."

Contexte : Activité co-encadrée par Baptiste Trajin, MCF, INPT-ENIT. Étude réalisée sur financement propre.

Résumé des activités : les axes de recherche d'intégration en électronique de puissance concernent des verrous-clés pour l'avènement de systèmes à énergie électrique que ceux-ci soient hybrides ou entièrement électrifiés. Pour ces

systèmes, les problématiques liées à la miniaturisation et à la densification de puissance, par optimisation géométrique et technologique des fonctions de conversion, amènent de nouvelles formes de réflexion et de préconisations dans le savoir-faire en conception des architectures d'électronique de puissance. En ce sens, la prise en compte lors du dimensionnement virtuel d'un composant (ou module, ou convertisseur), de phénomènes électro-thermomécaniques couplés, conduit à concevoir de manière globale ces objets. Il devient alors indispensable d'être doté d'outils ouverts et efficaces, pour modéliser ces architectures, les simuler et les optimiser. Parmi ces outils, les modèles et logiciels à éléments finis permettent parfois de prendre en considération plusieurs domaines physiques, lors de l'application d'une sollicitation à l'objet. Cependant, il s'agit souvent de codes propriétaires non ouverts. De plus, par essence, ces simulations résultent d'algorithmes de résolution dont la convergence est obtenue aux frontières des éléments finis. Ils se basent sur une géométrie exacte de la pièce. A moins de parvenir à une extraction paramétrique forcément découplée de la géométrie, ces modèles à éléments finis ne peuvent interagir avec des simulations de type circuit, qui permettraient d'appliquer des profils de sollicitation de courant plus proches des profils réels. L'enjeu de cette étude était donc d'étudier et de proposer des modèles réduits, dits compacts, d'une fonction de type hacheur intégrée sur substrat. De cette manière, le comportement d'un objet, lors de son fonctionnement, pouvait être obtenu et chaque paramètre identifié correspondait à une réalité géométrique.

Publication associée : [ACTI17].

Co-encadrement d'un stage de MASTER 2 :

De septembre 2014 à février 2015 : stage de Marion Haussener ;

Sujet : "Caractérisation électro-thermo-mécanique des polymères encapsulants pour l'électronique de puissance."

Contexte : une description des activités est donnée ci-après, dans la section "Programmes de recherche", et est relative au programme GENOME. Ce stage a été préalable au recrutement d'un post-doctorant sur ces activités. Activité co-encadrée par Baptiste Trajin.

Résumé des activités : pour les équipes du LGP un des objectifs a été d'établir (modéliser et caractériser) le comportement électrique, thermique et mécanique des polymères encapsulants, lorsqu'ils étaient soumis à des sollicitations provenant des composants de puissance. Cette étude, a été structurée par des aspects théoriques mais aussi expérimentaux forts, avec l'appui de la plateforme d'innovation technologique PRIMES.

Publications associées : [ACL7], [ACTI15], [ACTI18], [ACTN9].

Co-encadrement d'un stage de MASTER 1 :

D'avril 2016 à juillet 2016 : stage de Zakaria Mansour ;

Sujet : "Nouvelle méthode de Contrôle Non Destructif - CND pour l'électronique de puissance".

Résumé des activités : cette proposition a porté sur une méthode originale de caractérisation, par contrôle non destructif des assemblages de puissance. Cette proposition visait à développer une méthode originale de caractérisation des modules de puissance afin de déterminer la présence potentielle de défauts par contrôle non destructif. Afin de compléter le panel de méthodes de type CND déjà existantes, nous avons abordé cette problématique sous l'angle des investigations électromagnétiques (EM).

Contexte : Compte tenu du caractère innovant et amont de cette étude un support pour le financement du stage a été obtenu auprès de la structure fédérative SYRIUS. Activité co-encadrée par Stéphane Baffreau.

Co-encadrement d'un stage de MASTER 2 :

De mars 2017 à août 2017 : stage de Abdelali Choukri ;

Sujet : "Nouvelle méthode de Contrôle Non Destructif - CND pour l'électronique de puissance".

Résumé des activités : il s'agit de la suite du stage de Z. Mansour. Les travaux préliminaires, focalisés sur les phénomènes les plus récurrents, ont permis de mettre en œuvre et valider une première démarche sur la faisabilité d'un contrôle non destructif, à travers des simulations électriques et des mesures expérimentales. Cependant, il est nécessaire d'éprouver et compléter la méthode afin de pouvoir identifier objectivement la présence d'un défaut voire sa future occurrence. Le travail consistera, principalement, à développer une méthode de caractérisation expérimentale de défauts physique dans les composants d'électronique de puissance, au moyen d'analyses électromagnétiques :

- simulations et comparaisons de modèles sains et défaillants ;
- réalisation d'expérimentations sur un prototype représentatif des composants d'électronique de puissance actuels ;
- analyses des données ;
- comparaison des résultats expérimentaux avec ceux préalablement simulés ;
- identification paramétrique des éléments composant le modèle, pour une optimisation de ce dernier.

Contexte : compte tenu du caractère stratégique de cette étude, elle est autofinancée. Activité co-encadrée par Stéphane Baffreau.

A.5 Autres encadrements

Encadrement ou participation à des encadrements dans le cadre de l'accompagnement au montage de bancs expérimentaux. Ces stages ont été des supports aux activités scientifiques mentionnées ci-dessus :

Stagiaire inscrit en IUT :

- J.-P. Castelo, 3 mois (2015), budget convention IRT, support activités Double and Bump.

Stagiaire inscrit en licence :

- J. Awassi, 1,5 mois (2013), autofinancé, support activités thèse K. Berkoune.

Stage de Master 1 :

- F. Driard, 3 mois (2012), budget équipe, support activités thèse K. Berkoune.

Stagiaire en projet de fin d'étude de cycle ingénieur :

- A. Dondon, 5 mois (2014), sur convention AIRBUS GROUP, support activités thèse G. Parent.

A.6 Programmes de recherche

Synthèse :

- membre du comité d'orientation et de pilotage scientifique et stratégique de la plateforme PRIMES ;
- porteur de projets scientifiques (notamment projet CAPTIF ANR-AAP-2014), coordinateur de lots ;
- financement de 72 mois de post-doc, 2 thèses et d'1 stage de MASTER Recherche.

Préambule :

La plupart des études expérimentales ont été possibles grâce à la plateforme de recherche mixte académique - industriel PRIMES (Plateforme de Recherche et d'Innovation en Mécatronique, Énergie et Systèmes). Je suis membre du comité d'orientation et de pilotage scientifique et stratégique de cette plateforme, et participe à ce titre à l'animation scientifique de cette dernière. De plus, j'ai la volonté de structurer des activités de recherche et de participer aux activités d'une équipe autour des problématiques de l'électronique de puissance au LGP. Cela nécessite notamment de relier les activités scientifiques à des fonds de financement, mais également à les placer dans le cadre de partenariats. C'est avec cet objectif que j'ai participé au montage ou à la coordination de projets scientifiques, dont les natures de financement sont diverses. Ainsi, par le biais des partenariats, des objectifs applicatifs aux développements scientifiques sont possibles.

Le programme CEPIA :

Octobre 2007 - décembre 2010.

Contexte : le projet CEPIA (Convertisseur Électronique de Puissance à Intégration Avancée), labellisé par le pôle de compétitivité Aerospace Valley, de Midi-Pyrénées et Aquitaine, le 24 janvier 2006, a bénéficié d'un financement du Fond Unique Interministériel. Il concernait 6 partenaires industriels du monde ferroviaire et aéronautique, et 2 partenaires académiques dont l'ENIT.

Implication : [coordinateur](#) de 2 WP ; participation à 8 comités de pilotage, 2 comités scientifiques et 2 comités techniques.

Le programme GENOME :

Octobre 2013 - octobre 2016.

Contexte : les équipes du LGP ont effectué conjointement avec l'institut Charles Gerhardt de Montpellier, une proposition dans le cadre du Programme d'Investissements d'Avenir, et de la Charte des plateformes de Démonstration Technologique proposée par le secteur aéronautique. Celle-ci a été inscrite au sein du programme national GENOME (Gestion OptiMisée de l'Energie). Au cours de la première phase (PREMICES), ce programme a concerné 49 partenaires et 8 Work-Packages.

Moyens : 1 stage de MASTER et 2 contrats post-doctoraux de 2*18 mois sont financés.

Implication : [coordinateur pour le LGP](#) de la proposition scientifique associée ; co-encadrement des activités de recherche d'un post-doctorant.

Le programme Double and Bump :

Novembre 2014 - novembre 2015.

Contexte : le LGP et l'IMS (laboratoire d'Intégration du Matériau au Système) de Bordeaux se sont associés pour travailler dans le cadre d'un projet propre à l'Institut de Recherche Technologique Saint-Exupéry. Ce programme a été dénommé Double and Bump.

Moyens : 2 contrats post-doctoraux sont financés, 2*12 mois, dont 1 pour LGP.

Implication : [porteur pour le LGP](#) de la proposition scientifique associée ; co-encadrement des activités de recherche d'un post-doctorant.

Le programme CAPTIF :

Janvier 2015 - juillet 2018.

Contexte : ce projet fait l'objet d'un financement de l'Agence Nationale de la Recherche, ANR-14-CE05-0044-01.

Moyens : 3 thèses sont financées, dont 2 pour LGP.

Implication : [Porteur pour le consortium](#) de la proposition ; co-encadrement des activités de recherche (codirecteur de thèse).

Le programme CONVERSION'99 :

Juillet 2016 - juillet 2018.

Contexte : projet de recherche, en partie subventionné par la Région Midi-Pyrénées - Contrat Laboratoire Entreprise.

Moyens : 2 post-docs sont financés, 2*24 mois, dont un encadré par le LGP.

Implication : [porteur pour le consortium](#) de la proposition ; co-encadrement des activités de recherche.

INFORMATIONS SIGNIFICATIVES SUR LE DÉROULEMENT DE LA CARRIÈRE

A.7 Activités pédagogiques

Synthèse

09/2008 - 07/2012 : responsable du parcours orienté métier : Ingénierie des Systèmes Électriques, Électronique de Puissance (ISEEP).

03/2010 - 01/2015 : créateur, puis responsable du semestre international "European Project Semester".

Résumé des activités

Responsable de septembre 2008 à juillet 2012 du parcours orienté métier : Ingénierie des Systèmes Électriques, Électronique de Puissance (ISEEP) de l'ENI de TARBES. Ce parcours est une possibilité de formation ouverte à 12 étudiants par semestre avec l'objectif de compléter leurs acquis, par le biais de cours spécifiques sur les thématiques liées au Génie Électrique. Les étudiants sont répartis sur 5 semestres de cours et 2 semestres de stage soit 84 étudiants au maximum. 30 ECTS sont attribués aux cours spécifiques du parcours, soit 360h de cours réparties sur 5 emplois du temps différents. Des interventions de partenaires industriels, des visites de sites, des conférences thématiques ou des participations à des salons professionnels sont inclus au sein de l'option.

Du fait de son ouverture à l'international, l'ENIT accueille 10 à 15 étudiants étrangers sur un nouveau semestre, dit "European Project Semester" (EPS). De sa naissance en mars 2010, jusqu'en janvier 2015, j'étais en charge de ce semestre entièrement réalisé en anglais. Ces étudiants candidatent sur des sujets suggérés par des partenaires industriels de l'ENIT. Encore aujourd'hui, l'ENIT est le seul partenaire du réseau européen EPS en France. Ce semestre fait l'objet d'un article de valorisation de l'INP Communiqué, n° 36, mois de juin 2012, (p15).

Dans le cadre de mes responsabilités au sein de ces deux parcours, les missions que j'ai eu à effectuer sont :

- interface entre les intervenants et les étudiants du parcours,
- gestion des étudiants (notes, jury, admissibilité, stages, départs à l'étranger, etc.),
- création (pour l'EPS) et gestion des parcours (planification, réflexion pédagogique, management des budgets des parcours, opération de communication externe, représentation du parcours dans les différents conseils de l'école, etc.).

A.8 Rayonnement

Jury de thèse :

- Membre du jury à la soutenance de F. Bonnet - LAPLACE (Toulouse), le 30/09/2008, "Contribution à l'optimisation de la commande d'une machine asynchrone à double alimentation utilisée en mode moteur".
- Membre du jury à la soutenance de W. Sabbah - IMS (Bordeaux), le 25/06/2013, "Contribution à l'étude des assemblages et connexion nécessaires à la réalisation d'un cœur de puissance haute température à base de JFET Carbure de Silicium (SiC)".

Relecture critique :

- Rapport pour la Revue Internationale de Génie Électrique, décembre 2006 ;
- rapport pour le congrès ELECTRIMACS'08, février 2008 ;
- rapport pour les journées de l'école doctorale GEET 2009, janvier 2009 ;
- rapport pour le congrès CIFA 2010, janvier 2010 ;
- rapports pour la revue Elsevier Renewable Energy, avril 2011, janvier 2012, juillet 2013, octobre 2013 et juillet 2015 ;
- 1 relecture critique pour le congrès IEEE-ISIE17.

Fonction d'expertise :

- Un rapport pour le programme blanc ANR (SIMI 9 - Sciences de l'ingénierie, matériaux, procédés, énergie), avril 2011.
- Deux rapports pour l'appel à projet générique de l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) : 2015, 2016.

Membre de comités de sélection :

- Comité de sélection, Université Paul-Verlaine, METZ 2011.
- Comité de sélection, Université de Lorraine, METZ 2012.
- Comité de sélection, École Nationale d'Ingénieurs de Tarbes, TARBES 2013.

Accueil d'un chercheur étranger :

Accueil de Mauro Guido Carignano pour un séjour de recherche du 28 septembre au 23 octobre 2015 avec initialement un double objectif :

- présenter et échanger autour des activités Laboratorio de Automatización y Control (LAC), de l'Universidad Nacional de ROSARIO, et du Laboratoire Génie de Production de l'ENIT ;
- Définir des possibilités de collaborations entre nos deux établissements autour des travaux de recherche menés au LGP en électronique de puissance.

Organisateur d'un séminaire :

Co-organisateur d'un séminaire de travail : Interaction and Compliances in Power Mechatronic Systems - ICPMS - 20 à 30 personnes par séminaires, en 2012,

2013 et 2014. Organisé conjointement avec J-M. Dienot, professeur à l'IUT GEEI de Tarbes.

Comité scientifique :

Membre du comité scientifique du congrès associé à la convention d'affaire et Congrès DeciElec Embedded Systems 2015, Tarbes, 18 et 19 mars 2015.

Annexe B

Bibliographie personnelle

Les personnes concernées par les activités de thèse, de post-doctorat ou de stage sont soulignées en gras.

B.1 Revues internationales (comité de lecture)

- [ACL1] F. Bonnet, P.-E. Vidal, M. Pietrzak-David, "Direct torque control of doubly fed induction machine", Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Vol. 54, N°3, ISSN 0239-7528, sept. 2006.
- [ACL2] A. Bouscayrol, M. Pietrzak-David, P. Delarue, R. Pena-eguiluz, P.-E. Vidal, X. Kestelyn, "Weighted control of traction drives with parallel-connected AC machines", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 53, Issue 6, pp 1799-1806, doi 10.1109 / TIE.2006.885106, dec. 2006.
- [ACL3] F. Bonnet, P.-E. Vidal, M. Pietrzak-David, "Dual Direct Torque Control of Doubly Fed Induction Machine", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol 54 n°5, pp 2482-2490, doi 10.1109/ TIE.2007.900330, oct. 2007.
- [ACL4] P.-E. Vidal, M. Pietrzak-David, "Mixed control strategy of a doubly fed induction machine", Electrical Engineering, Archiv Für Elektrotechnik, Springer Verlag, 10 pages, doi 10.1007/s00202-007-0082-2, dec. 2007.
- [ACL5] K. Chen, P. Delarue, A. Bouscayrol, P.-E. Vidal, M. Pietrzak-David, "Minimum Copper Loss and Power Distribution Control Strategies of Double-Inverter-Fed Wound-Rotor Induction Machines Using Energetic Macroscopic Representation", IEEE Transactions on Energy Conversion, Volume : 25 Issue :3, pp 642 - 651, ISSN : 0885-8969, sept. 2010.
- [ACL6] **H. Medjahed**, P.-E. Vidal, B. Nogarède, "Thermo-mechanical stress of bonded wires used in high power modules with alternating and direct current modes", Microelectronics Reliability, Elsevier, 52 (2012), pp 1099-1104, doi 10.1016/j.microrel.2012.01.013.
- [ACL7] **M. Haussener**, **S. Cailhol**, B. Trajin, P.-E. Vidal, F. Carrillo, "Thermomechanical modelling and simulation of a silicone gel for power electronic devices", Microelectronics Reliability, Elsevier, 55 (2015), pp 2045-2049, doi 10.1016/j.microrel.2015.06.116.

B.2 Revues nationales (comité de lecture)

- [ACL8] L. Dupont, Y. Avenas, P.-E. Vidal, "Evaluation de la température des composants actifs de puissance", Technique de l'Ingénieur, D3114, édition et parution en août 2017.

B.3 Congrès internationaux (comité de lecture et actes)

- [ACTI1] P.-E. Vidal, M. Pietrzak-David, "Stator flux oriented control of a doubly fed induction machine", European Conference on Power Electronics and Applications, EPE 2003, Toulouse (France), 2-4 sept. 2003.
- [ACTI2] P.-E. Vidal, P. Delarue, A. Bouscayrol, M. Pietrzak-David, "Control of a bi-converter bi-machine using the Energetic Macroscopic Representation, 16th IEEE Conference on Electrical Machines ICEM 2004, Cracow - Poland, 5-8 sept. 2004.
- [ACTI3] P.-E. Vidal, M. Pietrzak-David, "Flux sliding mode control of a doubly fed induction machine", European Conference on Power Electronics and Applications, EPE 2005, doi 10.1109/EPE.2005.219569, Dresden - Germany, 11-14 sept. 2005.
- [ACTI4] A. Bouscayrol, M. Pietrzak-David, P. Delarue, R. Pena-Eguiluz, P.-E. Vidal, X. Kestelyn, "Weighted control of traction drives with parallel-connected AC machines", IEEE International Conference on Electric Machines and Drives, IEMDC 2005, pp 111 - 118, doi 10.1109/IEMDC.2005.195710, 15-18 May 2005.
- [ACTI5] F. Bonnet, A.-L. Lowinsky, M. Pietrzak-David, P.-E. Vidal, "Doubly Fed Induction Machine Speed Drive for Hydro-Electric Power Station", European Conference on Power Electronics, EPE'2007, Aalborg - Denmark, doi 10.1109/EPE.2007.4417532, 2-5 sept. 2007.
- [ACTI6] K. Chen, P. Delarue, A. Bouscayrol, P.-E. Vidal, M. Pietrzak-David, "Energetic Macroscopic Representation and Inversion based Control of Double Inverter Fed Wound Rotor Induction Machine", 9th International Conference on Modeling and Simulation of Electric Machines, Converters and Systems, ELECTRIMACS 2008, Quebec Canada, 9-11 jun. 2008.
- [ACTI7] **A. Cissé**, G. Massiot, C. Munier, P.-E. Vidal, F. Carrillo, M. Iturriz, "Development of a High Temperature Power Module Technology with SiC Devices for High Density Power Electronics", SAE 2011 AeroTech Congress and Exhibition, doi :10.4271/2011-01-2620, Toulouse - France, 18-21 oct. 2011.
- [ACTI8] **H. Medjahed**, P.-E. Vidal, B. Nogarède, "Comparison between electromagnetic and thermal stress induced by Direct Current flow in IGBT bond wires", International Conference on Integrated Power Electronics Systems - CIPS 2012, Nuremberg - Germany, 6-8 mar. 2012.
- [ACTI9] **A. Cissé**, G. Massiot, C. Munier, P.-E. Vidal, F. Carrillo, "Numerical modelling of a high temperature power module technology with SiC

devices for high density power electronics" PCIM Europe, Power Electronics - Intelligent Motion - Renewable Energy - Energy Management, Nuremberg - Germany, 8-10 may 2012.

- [ACTI10] **H. Medjahed**, P.-E. Vidal, J.-M. Dienot, B. Nogarède, "Mechanical stress induced by electromagnetic forces on wire bonds of high power modules", IEEE European Conference and Exhibition on Electromagnetics, EUROEM 2012, Toulouse France, 2-6 jul. 2012.
- [ACTI11] P.-E. Vidal, **S. Cailhol**, F. Rotella, **K. Berkoune**, A.-M. Llor, M. Fadel, "Generalized inverses applied to Pulse Width Modulation for static conversion : a first study", 15th European Conference on Power Electronics, EPE'13 ECCE Europe, Lille France, 2-6 sept. 2013.
- [ACTI12] **G. Parent**, G. Massiot, V. Rouet, C. Munier, P.-E. Vidal, F. Carrillo, "Toward a reliability analysis method of wide band gap power electronic components and modules", IMAPS-Europe European Microelectronics and Packaging Conference EMPC, Grenoble France, 9-12 sept. 2013.
- [ACTI13] **J.-I. Ramos**, J.-M. Dienot, P.-E. Vidal, C. Viguié, B. Nogarède, "Contribution to Modeling of Parasitic Couplings for Predicting EMC Behavior of Electrical Machines", 2014 International Conference on Electrical Machines, ICEM 2014, Berlin Germany, 2-5 sept. 2014.
- [ACTI14] **J.-I. Ramos**, J.-M. Dienot, P.-E. Vidal, B. Nogarède, C. Viguié, E. Batista "Virtual experimentation for EMC parameters extraction : case of the parasitic capacitance in wound structures", 11th International Conference on Modeling and Simulation of Electric Machines, Converters and Systems, ELECTRIMACS 2014, Valencia Spain, 19-22 may 2014.
- [ACTI15] N. Vivès, **M. Haussener**, H. Weleman, B. Trajin, P.-E. Vidal, "Characterization of an integrated buck converter using infrared thermography", Quantitative InfraRed Thermography, QIRT 2014, Bordeaux France, 7-11 jul. 2014,
- [ACTI16] **K. Berkoune**, P.-E. Vidal, F. Rotella, "New Pulse Width Modulation approach and model applied to multilevel inverters", 11th International Conference on Modeling and Simulation of Electric Machines, Converters and Systems ELECTRIMACS 2014, Valencia Spain, 19-22 may 2014.
- [ACTI17] B. Trajin, P.-E. Vidal, **J. Viven**, "Electro-thermal model of an integrated buck converter", 17th Conference on Power Electronics and Applications, EPE'15-ECCE Europe, Geneva Switzerland, 8-10 sept. 2015.
- [ACTI18] **M. Haussener**, **S. Cailhol**, B. Trajin, P.-E. Vidal, F. Carrillo, "Thermomechanical modelling and simulation of a silicone gel for power electronic devices", 26th European Symposium on Reliability of Electron Devices, Failure Physics and Analysis, ESREF 2015, Toulouse France, 5-9 oct. 2015.
- [ACTI19] **G. Parent**, V. Huleux, G. Massiot, V. Rouet, C. Munier, P.-E. Vidal, F. Carrillo, "Study of packaging reliability of two SiC Schottky diodes of power electronic", IMAPS From Nano to Macro Power Electronics and Packaging International Workshop, Tours France, 15 oct. 2015.
- [ACTI20] S. Cailhol, P.-E. Vidal and F. Rotella "A generic method of Pulse Width Modulation applied to 3-Level T-type NPC inverter", 17th Interna-

- tional Conference on Power Electronics and Motion Control, IEEE PEMC 2016, Varna Bulgaria, 25-30 sept. 2016.
- [ACTI21] P.-E. Vidal, J.-M. Dienot, F. Rotella, I. Sakhraoui, B. Trajin, **G. Vine**, I. Zambettakis, A. Renaud, E. Woirgard, G. Bayle, S. Behar, P. Las-serre, J. Favre "Innovative embedded sensors for power electronic modules : CAPTIF-ANR research project", From Nano to Macro Power Electronics and Packaging International Workshop, IMAPS POWER 2016, Tours France, 11-12 oct. 2016.
- [ACTI22] **J.-I. Ramos Chávez**, J.-M. Dienot, P.-E. Vidal, C.Viguier, B. Nogarède "Capacitive couplings modeling in concentrated windings" *XXIIth* International Conference on Electrical Machines, ICEM'2016, Lausanne - Switzerland, 4-7 sept. 2016.
- [ACTI23] P.-E. Vidal, J.-M. Dienot, F. Rotella, I. Sakhraoui, B. Trajin, G. Vine, I. Zambettakis, A. Renaud, E. Woirgard, G. Bayle, S. Behar, P. Las-serre, J. Favre "Embedded set of sensors for power electronic modules", More Electric Aircraft - MEA 2017, Bordeaux France, 1-2 feb. 2017.
- [ACTI24] P.-E. Vidal, S. Cailhol, F. Rotella "Generic Modeling of N-Level Pulse Width Modulation Voltage Source Inverters and their Control", 20th World Congress of the International Federation of Automatic Control, IFAC 2017 World Congress, Toulouse France 9-14 jul. 2017.
- [ACTI25] **G. Viné**, P.-E. Vidal, J.-M. Dienot "Electromagnetic antenna for power electronic modules : towards a real time electromagnetic characteri-zation", 19th Conference on Power Electronics and Applications (and Ex-hibition), EPE'17 ECCE (Energy Conversion Congress and Expo), Varsaw Poland 11-14 sept. 2017.
- [ACTI26] **G. Viné**, J.-M. Dienot, P.-E. Vidal "Theoretical and Experimental Study of Magnetic Sensors for Near-Field Emission Measurement. Applica-tion to Design and Integration in Power Printed Board Circuit", Interna-tional Symposium on Electromagnetic Compatibility, EMC Europe 2017, Angers France, 4-8 sep. 2017.

B.4 Congrès nationaux (comité de lecture et actes)

- [ACTN1] P.-E. Vidal and M. Pietrzak-David, "Commande vectorielle discrète d'une machine asynchrone à double alimentation", Electrotechnique du Fu-tur EF-2003, Gif sur Yvette, 9-10 déc. 2003.
- [ACTN2] P.-E. Vidal, "Contrôle vectoriel du flux statorique d'une machine asynchrone à double alimentation", 6^{ème} congrès des Jeunes Chercheurs en Génie Electrique JCGE-2003, St Nazaire, 5-6 juin 2003.
- [ACTN3] S. Azzopardi, J.-P. Fradin, M. Médina, R. Meuret, M. Piton, P. Rol-lin, C. Tereskiwicz, P.-E. Vidal, "Etude prédictive de la fiabilité de l'électro-nique de puissance embarquée : projet CEPIA", Electronique de Puissance du Futur EPF'2008, Tours, 2-3 juil. 2008.
- [ACTN4] **H. Medjahed**, P.-E. Vidal, B. Nogarede, "Déterminations des contraintes électrothermiques dues à la circulation d'un courant électrique dans les

- fil de connexion des modules IGBT." Electronique de puissance du futur, EPF'2010, Saint-Nazaire, 30 juin - 2 juil. 2010.
- [ACTN5] **H. Medjahed**, P.-E. Vidal, B. Nogarede, "Analyse des contraintes thermomécaniques des fils de connexion d'un Module IGBT en régime de courant constant et variable", Journées Nationales du Réseau Doctoral en Micro-nanoélectronique - JNRDM 2011, Paris (France), 23-25 mai 2011.
- [ACTN6] **H. Medjahed**, P.-E Vidal, B. Nogarede, "Simulation électro-thermomécanique 3D des fils de connexion utilisée dans les modules de puissances IGBT", Conférence Jeunes Chercheurs en Génie Electrique, JCGE-2011, Belfort, 13 déc. 2011.
- [ACTN7] **A. Cissé**, P.-E. Vidal, F. Carrillo, G. Massiot, C. Munier, J. Alexis, "Etude du comportement des joints de brasure Au-Ge pour le report des composants SiC pour l'électronique de puissance haute température", Electronique de Puissance du Futur, EPF-2012, Bordeaux, 5-7 juil. 2012.
- [ACTN8] J.-M. Dienot, **J.-I. Ramos Chavez**, P.-E. Vidal, C. Viguier, B. Nogarede, E. Batista, "Investigations multi physiques et expérimentations virtuelles des cas de bruits électromagnétiques et d'interactions champ proche dans les systèmes mobiles et mécatroniques", Assemblée plénière "Interférences d'Ondes", GDR Ondes, 2013.
- [ACTN9] **M. Haussener**, N. Viviès, B. Trajin, P.-E. Vidal, H. Weleman, "Etude et caractérisation d'une fonction hacheur intégrée par thermographie infrarouge", Symposium de Génie Electrique (SGE), Cachan, juil. 2014.
- [ACTN10] **K. Berkoune**, P.-E. Vidal, F. Rotella, "Approche mathématique originale appliquée à la modélisation des stratégies de modulation des onduleurs multiniveaux", Conférence Jeunes Chercheurs en Génie Electrique, JCGE-2015, Cherbourg, 10-11 juin 2015.
- [ACTN11] **K. Berkoune**, P.-E. Vidal, F. Rotella, "Modélisation générique pour les stratégies de modulation des onduleurs multiniveaux : application aux onduleurs à capacités flottantes", Symposium de Génie Electrique (SGE 2016) : EF-EPF-MGE 2016, Grenoble, 7-9 juin 2016.
- [ACTN12] **S. Cailhol**, B. Trajin, P.-E. Vidal, F. Carrillo, "Modélisation thermomécanique de matériaux encapsulants en électronique de puissance", Symposium de Génie Electrique (SGE 2016) : EF-EPF-MGE 2016, Grenoble, 7-9 juin 2016.
- [ACTN13] **G. Viné**, P.-E. Vidal, J.-M. Dienot, "Caractérisation des interactions électromagnétiques pour l'intégration de capteurs en électronique de puissance", Symposium de Génie Electrique, SGE 2016 : EF-EPF-MGE 2016 Grenoble, 7-9 juin 2016.

B.5 Soumissions et valorisations en attente d'acceptation

Revue internationale (comité de lecture)

- [ACLsoutmise1] **G. Viné**, P.-E. Vidal, J.-M. Dienot, "Study of electromagnetic interactions with near field antennas in power electronic", European Journal

of Electrical Engineering, (submitted march 2017) ;

[ACLsoumise2] S. Cailhol, P.-E. Vidal, F. Rotella, "A generic method of Pulse Width Modulation applied to 3-Level T-type NPC inverter", IEEE Transactions on Industry Applications, soumis en juillet 2017.

Brevet international

[BR1] J.-M. Reynes (IRT), J. Favre (aPSI3D), **R. Riva** (IRT), P.-E. Vidal (ENIT), B. Trajin (ENIT), "Sintering patent application", 2016.

Bibliographie

- [1] European project semester. une expérience unique en france avec l'inp-enit !, interview de l. arconada, directeur des affaires internationales de l'inp-enit. In *INP Communiqué, numéro 36*, page 14, June 2012.
- [2] ABAQUS. Dassault systèmes, <https://www.3ds.com/fr/produits-et-services/simulia/produits/abaqus/>.
- [3] AGROMAT. Un outil de démonstration pour la production d'agromatériaux <https://www6.toulouse.inra.fr/lca/agromat>.
- [4] Ansys. Maxwell, <http://www.ansys.com/products/electronics/ansys-maxwell>.
- [5] C. Bailey, H. Lu, and T. Tilford. Predicting the reliability of power electronic modules. In *Proc. 2007 8th International Conference on Electronic Packaging Technology*, doi : 10.1109/ICEPT.2007.4441543, pages 1–5, 2007.
- [6] M. Barrière, A. Guédon-Gracia, E. Woïrgard, S. Bontemps, and F. Le Henaff. Innovative conception of sic mosfet-schottky 3d power inverter module with double side cooling and stacking using silver sintering. *Microelectronics Reliability*, July 2017.
- [7] A. Ben-Israel and T. N. E. Greville. *Generalized Inverses : Theory and Applications*. Springer-Verlag, Second edition, 2003.
- [8] K. Berkoune, P.-E. Vidal, and F. Rotella. New pulse width modulation approach and model applied to multilevel inverters. In *Proc. of 11th International Conference on Modeling and Simulation of Electric Machines, Converters and Systems ELECTRIMACS 2014*, Valencia - Spain, May 2014.
- [9] H. Bishnoi, A. Carson Baisden, P. Mattavelli, and D. Boroyevich. Analysis of emi terminal modeling of switched power converters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, Volume : 27, Issue : 9 :3924–3933, May 2012.
- [10] Campus-France. Campus france agence française pour la promotion de l'enseignement supérieur l'accueil et la mobilité internationale, <http://www.campusfrance.org/fr/utique>.
- [11] S. L. Capitaneanu. *Optimisation de la fonction MLI d'un onduleur de tension deux-niveaux*. PhD thesis, INPT - Institut National Polytechnique de Toulouse, 6 allée Emile Monso BP 34038 31029 Toulouse cedex 4, November 2002.
- [12] T.R. Chandrupatla and A.D. Belegundu. *Introduction to Finite Elements in Engineering*. Pearson Education, Inc. Upper Saddle River, 2012.
- [13] J.-I. Ramos Chávez, J.-M. Dienot, P.-E. Vidal, C.Viguié, and B. Nogarède. Capacitive couplings modeling in concentrated windings. In *Proc. of XXIIth*

- International Conference on Electrical Machines, ICEM'2016*, Lausanne - Switzerland, 2016.
- [14] R.P. Clayton. *Introduction to Electromagnetic Compatibility*. Wiley-Blackwell, Second Edition, 2006.
 - [15] Compiègne. Musée palais de compiègne, place du général de gaulle, 60200 compiègne, france, <http://palaisdecompiègne.fr/>.
 - [16] F. Costa and D. Magnon. Graphical analysis of the spectra of emi sources in power electronics. *IEEE Transactions on Power Electronics*, Volume : 20, Issue : 6 :1491–1498, 2005.
 - [17] F. Costa and C. Vollaïre. Caractéristiques et évolution du bruit électromagnétique dans les dispositifs d'alimentation embarqués sur aéronef. In *Proc. EM08*, Paris, 2008.
 - [18] S. Dagdag. *Matériaux et revêtements céramiques multifonctionnels par PECVD et SPS pour l'intégration de puissance haute température - haute tension*. PhD thesis, thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes, 47 avenue d'Azereix BP1629 65016 TARBES CEDEX, December 2005.
 - [19] Laboratoire Génie de Production. Rapport de recherche laboratoire génie de production, bilan scientifique 2003-2005, projet de recherche 2006-2010.
 - [20] J.M. Dienot and E. Batista. Em-matrix antenna for real-time measurements of electromagnetic noise in power electronic modules. In *Proc. of Antennas and Propagation Conference, LAPC 2009*, pages 753–756, Loughborough, 2009.
 - [21] T. B. Doan. *Contribution à l'intégration 3D de composants passifs pour l'électronique de puissance*. PhD thesis, UT3 Paul Sabatier, Toulouse, 2014.
 - [22] G. Duchamp, D. Castagnet, and A. Meresse. Near-field emc study to improve electronic component reliability. *Microelectronics Reliability*, Volume 47, Issues 9-11, doi :10.1016/j.microrel.2007.07.044 :1668–1672, September 2007.
 - [23] C. Duchesne. *Contribution à l'étude de la gradation de potentiel dans les modules de puissance haute tension*. PhD thesis, Université Toulouse III Paul Sabatier, January 2009.
 - [24] L. Dupont, Y. Avenas, and P.-E. Vidal. Evaluation de la température des composants actifs de puissance. *Technique de l'Ingénieur*, D3114, September 2017.
 - [25] M. Fliess, J. Lévine, P. Martin, and P. Rouchon. Sur les systèmes non linéaires différentiellement plats. *C. R. Acad. Sciences*, vol. 315, série 1, pages 619–624, 1992.
 - [26] H. Foch, F. Forest, and T. Meynard. Onduleurs de tension, mise en œuvre. *Technique de l'Ingénieur*, D 3 177 :1–20.
 - [27] H. Foch, F. Forest, and T. Meynard. Onduleurs de tension, structures, principes. applications. *Technique de l'Ingénieur*, D 3 176 :1–18.
 - [28] F. Forest, J.-J. Huselstein, G. Pellecuer, and Serge Bontemps. A power cycling test bench dedicated to the test of power modules in a large range of cycling frequency. In *Proc. of PCIM Europe 2017, International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management*, pages 1–7, 2017.

- [29] R. Fournier, S. Blanco, M. El Ha, J.J. Bézian, C. Caliot, B. Piaud, V. Eymet, V. Forest, C. Coustet, L. Ibarrart, and J.M. Tregan. Une ingénierie thermique de la complexité 2017.
- [30] Direct Industry France. <http://www.directindustry.fr/>.
- [31] Nexans France. <http://www.nexans.fr/>.
- [32] H. Frémont, G. Duchamp, A. Gracia, and F. Verdier. A methodological approach for predictive reliability : Practical case studies. *Microelectronics Reliability*, Volume 52, Issue 12, <http://dx.doi.org/10.1016/j.microrel.2012.07.016> :3035–3042, December 2012.
- [33] A. Graham. *Kronecker products and matrix calculus : with applications*. Ellis Horwood series in mathematics and its applications. Horwood, 1981.
- [34] GSMaintenance. <http://www.gsmaintenance.fr/>.
- [35] D.H. Jung, Y. Kim, J.J. Kim, H. Kim, S. Choi, Y.-H. Song, H.-C. Bae, K.-S. Choi, S. Piersanti, F. de Paulis, A. Orlandi, and J Kim. Through silicon via (tsv) defect modeling, measurement, and analysis. *IEEE Transactions on components, packaging and manufacturing technology*, vol. 7, n° 1, doi : 10.1109/TCPMT.2016.2631731 :138–152, January 2017.
- [36] A.E. León, J.A. Solsona, C. Busada, H. Chiacchiarini, and M.I. Valla. High-performance control of a three-phase voltage-source converter including feed-forward compensation of the estimated load current. *Energy Conversion and Management* 50, doi :10.1016/j.enconman.2009.04.004, pages 2000–2008, 2009.
- [37] T. Liu, R. Ning, Thomas T.Y. Wong, and Z. John Shen. Modeling and analysis of sic mosfet switching oscillations. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, Volume : 4, Issue : 3, doi : 10.1109/JESTPE.2016.2587358 :747–756, July 2016.
- [38] C.F. Van Loan. The ubiquitous kronecker product. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, pages 85–100, 2000.
- [39] LTSPICE. Linear system, <http://www.linear.com/designtools/software/>.
- [40] M. Malinowski, K. Gopakumar, J. Rodriguez, and M.A. Perez. A survey on cascaded multilevel inverters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Volume : 57, Issue : 7, DOI : 10.1109/TIE.2009.2030767 :2197–2206, 2010.
- [41] H. Medjahed, P.-E. Vidal, and B. Nogarede. Comparison between electromagnetic and thermal stress induced by direct current flow in igbt bond wires. In *Proc. of International Conference on Integrated Power Electronics Systems - CIPS 2012*, Nuremberg - Germany, March 2012.
- [42] J. Meng, W. Ma, Q. Pan, L. Zhang, and Z. Zhao. Multiple slope switching waveform approximation to improve conducted emi spectral analysis of power converters. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 48, no. 4 :742–751, November 2006.
- [43] A.-F. Moreira, T.A. Lipo, G. Venkataramanan, , and S. Bernet. High-frequency modeling for cable and induction motor overvoltage studies in long cable drives. *IEEE Transactions Industry Applications*, 38, no. 5 :1297–1306, September 2002.

- [44] S. M'Rad, B. Allard, X. Jorda, and M. Vellvehi. An experimentally verified compact transient electro-thermal modeling procedure for power modules. In *Proc. of 2007 European Conference on Power Electronics and Applications*, pages 1–8, 2007.
- [45] S. Msolli, J. Alexis, O. Dalverny, and M. Karama. Experimental characterization of the mechanical behavior of two solder alloys for high temperature power electronics applications. *Microelectronics Reliability (n° 55), ISSN 0026-2714*, pages 164–171, 2015.
- [46] P.R. Mugur, J. Roudet, and J.C. Crebier. Power electronic converter emc analysis through state variable approach techniques. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 43, no. 2 :229–238, May 2001.
- [47] M. Musallam, C. Mark Johnson, C. Yin, H. Lu, and C. Bailey. Real-time life expectancy estimation in power modules. In *Proc. 2008 2nd Electronics System-Integration Technology Conference*, doi : 10.1109/ESTC.2008.4684355, pages 231–236, 2008.
- [48] D.-O. Neacsu. Vector modulation ? an introduction. In *Tutorial at IECON 2001, IECON'01 : The 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2001.
- [49] J. Popovic, , and J.A. Ferreira. An approach to deal with packaging in power electronics. *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 20, n°. 3 :550–557, May 2005.
- [50] PSIM. Powersim, <https://powersimtech.com/products/psim/>.
- [51] J. Putaala, T. Kangasvieri, O. Nousiainen, H. Jantunen, and M. Moilanen. Detection of thermal cycling-induced failures in rf/microwave bga assemblies. *IEEE Transactions on electronics packaging manufacturing*, vol. 31, n° 3, doi : 10.1109/TEPM.2008.926289 :240–247, July 2008.
- [52] A. Raman, M. Pindera, P. Wilkerson, and M. Turowski. Multi-resolution simulation and design tool for thermal management of electronics packages in complex systems. In *Thermal and Thermomechanical Proceedings of 10th Intersociety Conference on Phenomena in Electronics Systems, ITherm 2006*, pages 697–704, 2006.
- [53] G. Regnat, P.-O. Jeannin, J. Ewanchuk, D. Frey, S. Mollov, and J.-P. Ferrieux. Packaging 3d pour mosfet en carbure de silicium. In *SYMPOSIUM DE GENIE ELECTRIQUE (SGE 2016) : EF-EPF-MGE 2016*, Grenoble, France, June7–9 2016.
- [54] E. Rondon-Pinilla. *Conception de convertisseurs électroniques de puissance à faible impact électromagnétique intégrant de nouvelles technologies d'interrupteurs à semi-conducteurs*. PhD thesis, Ecole Centrale de Lyon, June 2014.
- [55] F. Rotella and I. Zambettakis. Commande des systèmes par platitude. *Technique de l'Ingénieurs, S7450 V1*, pages 1–18, 2007.
- [56] W. Sabbah, F. Arabi, O. Avino-Salvado, C. Buttay, L. Théolier, and H. Morel. Lifetime of power electronics interconnections in accelerated test conditions : High temperature storage and thermal cycling. *Microelectronics Reliability*, <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2017.06.091>, July 2017.

- [57] W. Sabbah, R. Riva, S. Hascoët, C. Buttay, S. Azzopardi, E. Woïrgard, D. Planson, B. Allard, and R. Meuret. Evaluation of silver-sintering die attach. In *Proc. Conference on Integrated Power Systems (CIPS)*, pages 237–243, ISSN 0341-3934, 2012.
- [58] M. Schinkel, S. Weber, S. Guttowski, W. John, and H. Reichl. Efficient hf modeling and model parameterization of induction machines for time and frequency domain simulations. In *Proc. of Twenty-First Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2006. APEC'06*, 2006.
- [59] L. Schwager, A. Tüysüz, C. Zwyssig, and J. W. Kolar. Modeling and comparison of machine and converter losses for pwm and pam in high-speed drives. *IEEE Transactions on Industry Applications*, Volume : 50, Issue : 2 :995–1006, 2014.
- [60] Scilab-Enterprises. Scilab : Logiciel open source gratuit de calcul numérique, (os, version 5.4.0) [logiciel] (2012) <http://www.scilab.org>.
- [61] Semikron. <http://www.directindustry.fr/>.
- [62] S.H. Shehadeh, Hamed H. Aly, and M E. El-Hawary. Photovoltaic inverters technology. In *Proc. of the IEEE 28th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering Halifax, Canada*, pages 1–8, May 2015.
- [63] K.S. Siow, T.F. Chen, Y.W. Chan, A. Jalar, R.M. Vemal, S.T. Chua, and F. Husna. Characterization of silicone gel properties for high power igt modules and mems. In *Proc. of 2015 IEEE Conference on Sustainable Utilization and Development in Engineering and Technology (CSUDET)*, pages 23–27, 978-1-4799-8612-5/15, 2015.
- [64] E. Song, A.F. Lynch, and Venkata Dinavahi. Experimental validation of non-linear control for a voltage source converter. *IEEE Transactions on control systems technology*, vol. 17, n° 5, pages 1135–1144, 2009.
- [65] Tarmac-Aerosave. <http://www.tarmacaerosave.aero/index.php?lang=en>, l'aérodrome tarbes-lourdes-pyrénées 65380 azereix(france).
- [66] B. Trajin, P.-E. Vidal, and J. Viven. Electro-thermal model of an integrated buck converter. In *Proc. of 17th Conference on Power Electronics and Applications, EPE'15-ECCE Europe*, Geneva - Switzerland, 2015.
- [67] P.-E. Vidal. Etat de l'art et axes de recherche possibles pour le lgp en Électronique de puissance. Rapport interne, Ecole Nationale d'Ingénieurs de TARBES, 47 avenue d'Azereix BP1629 65016 TARBES CEDEX, 24 janvier 2007.
- [68] P.-E. Vidal, S. Cailhol, and F. Rotella. Generic modeling of n-level pulse width modulation voltage source inverters and their control. In *Proc. of 20th World Congress of the International Federation of Automatic Control, IFAC 2017 World Congress*, Toulouse - France, July 2017.
- [69] P.-E. Vidal, S. Cailhol, F. Rotella, K. Berkoune, A.-M. Llor, and M. Fadel. Generalized inverses applied to pulse width modulation for static conversion : a first study. In *Proc. of 15th European Conference on Power Electronics, EPE'13 ECCE Europe*, Lille - France, 2013.
- [70] R. Wang, Z. Chen, D. Boroyevich, L. Jiang, Y. Yao, and K. Rajashekara. A novel hybrid packaging structure for high-temperature sic power modules.

- IEEE Transactions on Industry Applications*, Volume : 49, Issue : 4 :1609–1618, 2013.
- [71] S.-P. Weber, E. Hoene, S. Guttowski, W. John, , and H. Reichl. Modeling induction machines for emc-analysis. In *Proc. of Power Electronics Specialists Conference, 2004. PESC 04, IEEE 35th Annual, vol. 1*, pages 94–98, 2004.
 - [72] S. Wolfgang and T. Krebs. Adjust the mechanical properties of sintered silver layers using additives. In *Proc. of CIPS 2016; 9th International Conference on Integrated Power Electronics Systems*, pages 1–7, 2016.
 - [73] X. Wu, G. Tan, Z. Ye, Y. Liu, and S. Xu. Optimized common-mode voltage reduction pwm for three-phase voltage-source inverters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, Volume : 31, Issue : 4, DOI : 10.1109/TPEL.2015.2451673 :2959–2969, April 2016.
 - [74] Y. Yao, G.-Q. Lu, D. Boroyevich, and K.D.T. Ngo. Survey of high-temperature polymeric encapsulants for power electronics packaging. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, Volume : 5, Issue : 2, doi : 10.1109/TCPMT.2014.2337300 :168–181, February 2015.
 - [75] E. Zhong and T. A. Lipo. Improvements in emc performance of inverter-fed motor drives. *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 31, no. 6 :1247–1256, 1995.
 - [76] K. Zhou and D. Wang. Relationship between space-vector modulation and three-phase carrier-based pwm :a comprehensive analysis. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 49, N°. 1, February 2002.