



**HAL**  
open science

# Contribution aux méthodes et outils de conception des convertisseurs de puissance

Guillaume Fontès

► **To cite this version:**

Guillaume Fontès. Contribution aux méthodes et outils de conception des convertisseurs de puissance. Energie électrique. Institut National Polytechnique de Toulouse, 2022. tel-03716869

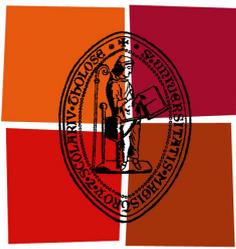
**HAL Id: tel-03716869**

**<https://hal.science/tel-03716869v1>**

Submitted on 7 Jul 2022

**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.



Université  
de Toulouse

# Mémoire

En vue de l'obtention de

## L'HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES

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

---

---

Présentée et soutenue le 01 07 2022 par :

GUILLAUME FONTÈS

## Contribution aux méthodes et outils de conception des convertisseurs de puissance

---

---

### JURY

MME DELPHINE RIU  
M. LAURENT GERBAUD  
M. ERIC LABOURÉ  
M. STÉPHAN ASTIER  
M. THIERRY MEYNARD

Professeur des Universités  
Professeur des Universités  
Professeur des Universités  
Professeur des Universités  
Directeur de Recherche

Rapporteur  
Rapporteur  
Rapporteur  
Examineur  
Examineur

---

### École doctorale et spécialité :

*GEET : Génie Electrique*

### Unité de Recherche :

*Laboratoire Plasma et Conversion d'Energie (UMR 5213)*

### Correspondant :

*Thierry Meynard*

### Rapporteurs :

*Mme Delphine Riu, M. Laurent Gerbaud et M. Eric Labouré*



# Table des matières

<b>Avant propos</b>	<b>3</b>
<b>Curriculum vitae</b>	<b>5</b>
<b>1 Synthèse des activités d'enseignement</b>	<b>11</b>
1.1 Les nouvelles technologies au service de l'enseignement . . . . .	12
1.2 EcoEnergie . . . . .	13
1.3 Modélisation, caractérisation de composants électrochimiques . . . . .	14
1.4 Etude d'un système énergétique hybride . . . . .	16
1.5 Liste complète des enseignements effectués . . . . .	18
<b>2 Synthèse des activités de recherche</b>	<b>21</b>
2.1 Etude des composants électrochimiques... . . . .	22
2.2 Méthodes et outils de conception... . . . .	26
2.3 OpenComp3d . . . . .	34
2.4 Action de valorisation : logiciel PowerForge . . . . .	36
2.5 Expertise scientifique : logiciel Simba . . . . .	43
2.6 Liste des publications . . . . .	44
<b>3 Bilan et perspectives</b>	<b>49</b>
<b>Conclusion</b>	<b>57</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>59</b>



# Avant-propos

Conscient que mon parcours puisse paraître assez atypique, je vais tenter dans cet avant-propos d'expliquer brièvement les différents choix que j'ai pu effectuer depuis un peu plus de 20 ans et montrer comment ils s'inscrivent finalement tous dans une passion pour transmettre des connaissances que ce soit dans des activités d'enseignement ou de valorisation d'activités de recherche...

Je pense avoir compris dès mon année de terminale que je souhaitais enseigner en physique appliquée à un « haut niveau » de connaissance, c'est-à-dire dans le supérieur. C'est ainsi qu'après un diplôme d'ingénieur de l'N7, je suis rentré (par la petite porte) à l'antenne de Bretagne de l'ENS Cachan pour y préparer l'agrégation de génie électrique. Les postes de PRAG ou de « prof en prépa » étant assez rares à cette époque et la perspective de me concentrer quelques années sur une thématique de recherche qui puisse contribuer favorablement aux enjeux environnementaux et énergétiques m'ont motivé à poursuivre sur une thèse au LEEI de Toulouse en 2002.

J'ai ensuite saisi l'opportunité de rentrer en tant que maître de conférences à l'INP pour contribuer en particulier au côté de Stéphane Astier (mon premier mentor) à la mise en place de la nouvelle spécialité de 3e année « Eco-Energie » commune à deux écoles différentes : l'N7 et l'A7. Après quelques années constituées de (beaucoup) d'enseignement et (d'un peu) de recherche, j'ai profité d'un congé de recherche puis d'une délégation CNRS pour contribuer plus activement au côté de Thierry Meynard (mon second mentor) à la thématique de la conception en électronique de puissance. Ceci m'a permis de m'engager dans la foulée dans une action de valorisation de ces travaux avec la création d'une spin-off du laboratoire LAPLACE.

Puis, au bout de près de quatre ans, ayant le sentiment d'avoir fini d'apporter ce que je pouvais à l'aventure de cette start-up et les activités d'enseignement me manquant également de plus en plus, je suis retourné à l'N7. J'ai alors ressenti que c'était un bon moment pour faire le point sur mes activités professionnelles et partager le chemin que j'avais parcouru par le biais d'une HDR le plus tôt possible... (mais le covid et mon implication pour mettre en place de nouvelles méthodologies d'enseignement ont eu raison quelques temps de mon élan de motivation!)

J'ai également été séduit par l'aventure entrepreneuriale! Aussi, convaincu qu'il y a encore à innover dans le domaine du logiciel en électronique de puissance je me suis associé à une nouvelle start-up québécoise lorsque son fondateur Emmanuel Rutovic – avec

qui j'échangeais pour lui faire un retour d'expérience – me l'a proposé. Cette activité de cumul a également beaucoup enrichi les enseignements que je pouvais dispenser en dernière année N7 car elle me donne, notamment au contact des utilisateurs du logiciel, une vision différente, plus concrète du monde industriel et de son évolution que celle que je pouvais avoir en tant que chercheur. Je pense que c'est d'ailleurs sans doute la raison pour laquelle ce type d'activité annexe est très fortement encouragé dans d'autres systèmes d'enseignement supérieur comme au Québec, tant pour les enseignants-chercheurs que pour les maîtres d'enseignement.

Enfin, en juin 2021, j'ai saisi l'opportunité d'effectuer un détachement à l'Ecole Nationale Supérieure Maritime de Saint-Malo, peut-être au premier abord à cause du peu de perspective professionnelle à Toulouse INP (d'autant plus pour un profil comme le mien), mais surtout motivé à la fois pour enseigner autour d'applications concrètes dans le domaine maritime qui me passionne et par le projet familial de faire découvrir à mes enfants la nature bretonne.

Au vu de cet avant-propos, le lecteur de ce manuscrit d'un peu plus de cinquante pages pourra découvrir après un bref curriculum vitae :

- une première partie synthétisant mes activités d'enseignement qui ont beaucoup gravité autour de la spécialité de dernière année « EcoEnergie »,
- une seconde partie synthétisant mes activités de recherche et de valorisation,
- une troisième et dernière partie avec un bilan et quelques perspectives pour les outils de conception en électronique de puissance.

A l'issue de la soutenance, suite aux encouragements du jury pour faire partager le travail supplémentaire réalisé, je propose un enregistrement audio - forcément moins spontané que le live du Jour J - accompagnant les slides présentés lors de la soutenance : <https://youtu.be/f0tqlx1Zzjo>.

# **Curriculum vitae**

# Guillaume Fontès

MAITRE DE CONFÉRENCES DES UNIVERSITÉS

✉ guillaume.fontes@laplace.univ-tlse.fr

## Education

---

### Haute Ecole de Commerce (HEC)

FORMATION HEC CHALLENGE PLUS

- Programme d'aide à la création d'entreprises innovantes et de haute technologie

*Jouy-en-Josas*

2015 - 2016

### Institut National Polytechnique (INP)

DOCTORAT

- Spécialité Génie Electrique

*Toulouse*

2002 - 2005

### Ecole Normale Supérieure

AGRÉGATION GÉNIE ELECTRIQUE

- Elève normalien diplômé

*Cachan, Antenne de Bretagne*

2001 - 2002

### École nationale supérieure d'électrotechnique, d'électronique, d'informatique, d'hydraulique et des télécommunications (ENSEEIH)

INGÉNIEUR GÉNIE ELECTRIQUE AUTOMATIQUE

*Toulouse*

1998 - 2001

## Parcours

---

2021-2022 **Professeur (en détachement)**, Ecole Nationale Supérieure Maritime de Saint-Malo

2021-2022 **Associé - Expert scientifique**, Aesim

2020-2021 **Maître de Conférences**, Institut National Polytechnique de Toulouse, Laplace UMR 5213 CNRS

2016-2020 **Co-fondateur & Directeur Scientifique**, Power Design Technologies

2006-2016 **Maître de Conférences**, Institut National Polytechnique de Toulouse, Laplace UMR 5213 CNRS

2005-2006 **Post-doctorat**, Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) et laboratoire LEEI

2002-2005 **Doctorant**, Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique Industrielle (LEEI)

## Activités de recherche et développement

---

### Aesim

ASSOCIÉ ET EXPERT SCIENTIFIQUE

- Stratégie & support au développement d'un nouveau logiciel d'électronique de puissance (<https://simba.io>)

*Montréal, Quebec*

2021 - present

### Laboratoire Plasmas et Conversion d'Energie (LAPLACE), UMR 5213-CNRS

MAÎTRE DE CONFÉRENCES

- Méthodes et outils pour la conception et la simulation en électronique de puissance

*Toulouse*

2020 - 2021

### Power Design Technologies

CO-FONDATEUR & DIRECTEUR SCIENTIFIQUE

- *Spin-off* du laboratoire LAPLACE
- Développement de *PowerForge*, premier logiciel web d'aide à la conception de convertisseurs de puissance, exploitant la licence du logiciel *l'Ootee*
- Pilotage des activités de R&D, roadmap produit et support client pour la commercialisation de *PowerForge*, premier logiciel d'aide à la conception de convertisseurs de puissance

*Toulouse*

2016 - 2020

**Laboratoire Plasmas et Conversion d'Énergie (LAPLACE), UMR 5213-CNRS**

Toulouse

**MAÎTRE DE CONFÉRENCES**

2006 - 2016

- Méthodes et outils pour la conception en électronique de puissance
- Développement du prototype logiciel *l'Ootee*
- Modélisation et caractérisation d'accumulateurs électrochimiques en vue de leur utilisation dans des chaînes de conversion d'énergie électrique

**Centre National d'Études Spatiales (CNES) et laboratoire LEEI**

Toulouse

**POST-DOCTORANT**

2005 - 2006

- Responsables : Stéphan Astier, Stéphane Fredon
- Modélisation SABER© basée sur une approche énergétique et caractérisation d'accumulateurs Lithium-ion

**Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique Industrielle (LEEI)**

Toulouse

**DOCTORANT**

2002 - 2006

- Responsables : Thierry Meynard, Christophe Turpin
- Modélisation et caractérisation de la pile à combustible PEM pour l'étude des interactions avec les convertisseurs statiques

**Activités d'enseignement****Ecole Nationale Supérieure Maritime (ENSM)**

Saint-Malo

**ENSEIGNANT ELECTROTECHNIQUE ELECTRONIQUE ET AUTOMATIQUE**

2021 - present

- *Automatique* : TPs logique séquentielle et combinatoire, programmation d'automates en langage Grafcet, Ladder et ST (L2)
- *Maintenance* et réparation des équipements électriques de pont et hôteliers : cours, TPs (L2)
- *Machines électriques* tournantes : TPs (L2)
- *Électronique de puissance* : cours et TPs des fonctions de conversion de base (redresseurs, hacheurs, onduleurs et gradateurs) (L2)
- *Formation Haute Tension* : cours appareillage et propulsion électrique des navires (L3)

**Institut Français du Pétrole (IFP-school)**

Rueil-Malmaison

**VACATAIRE**

2022

- Modélisation et caractérisation expérimentale des piles à combustibles type PEM (M2)

**École nationale supérieure d'électrotechnique, d'électronique, d'informatique, d'hydraulique et des télécommunications (ENSEEIH)**

Toulouse

**MAÎTRE DE CONFÉRENCES**

2020 - 2021

- *Électronique de puissance* : cours onduleurs (M1 et M2), BE onduleurs multi-niveaux (M2), cours technologie des composants passifs (M2), cours et BE CEM (M2), Apprentissage par projet pour la conception de convertisseurs (M1), cours et BE thermique (M1), BE alimentations à découpage (L3), BE commande rapprochée des convertisseurs (M1)
- *Conception de systèmes énergétiques* : cours et BE modélisation systémique "Bond-Graph" (M2), BE dimensionnement d'un système énergétique hybride (M2)
- *Réseaux électriques* : cours et BE sur les FACTS (M1)

**MAÎTRE DE CONFÉRENCES**

2006 - 2016

- *Électronique de puissance* : TPs sur les structures de bases (M1), Projet Alimentation à découpage isolée (M1), Apprentissage par projet pour la conception de convertisseurs (M1)
- *Association machines - convertisseurs* : TPs (M1)
- *Conversion photovoltaïque* : TP (M1) et BE (M2)
- *Composants électrochimiques* : cours et BE modélisation et caractérisation expérimentale des piles à combustibles PEM (M2), cours modélisation des accumulateurs (M2)
- *Conception de systèmes énergétiques* : BE dimensionnement d'un système énergétique hybride (M2), cours et BE systèmes énergétiques autonomes (M2)
- Projets tutorés (M2)

**MONITEUR**

2003 - 2006

- TP Génie Electrique (L3)
- Projets tutorés (M2)

**CNAM et Cycle Préparatoire Polytechnique de l'INP**

VACATAIRE

Toulouse  
2002 - 2003

- Modélisation machines électriques en vue de la commande: cours (M1)
- Physique appliquée : TPs mécanique, optique, thermodynamique, électromagnétisme et électronique (L2)

**Responsabilités**

---

**École nationale supérieure d'électrotechnique, d'électronique, d'informatique, d'hydraulique et des télécommunications (ENSEEIH)**

Toulouse

RESPONSABLE DU SEMESTRE S8 PARCOURS "ENERGIE" DU DÉPARTEMENT 3EA (80 ÉTUDIANTS) ET

2020 - 2021

RESPONSABLE DU PARCOURS DE SPÉCIALITÉ "SYSTÈMES ÉLECTRIQUES DU FUTUR" (25 ÉTUDIANTS)

- Semestre composé d'un tronc commun en Génie Electrique et de 3 spécialités au choix : systèmes mécatroniques, systèmes électriques du futur et systèmes automatiques et temps réels
- Coordination du programme pédagogique constitué d'unités d'enseignement de tronc commun et de spécialité
- Proposition d'un ruban chronologique des enseignements respectant les contraintes pédagogiques
- Conception de l'emploi du temps
- Suivi des étudiants
- Interface entre les gestionnaires d'emploi du temps, les collègues enseignants et les intervenants extérieurs

MEMBRE DU CONSEIL DE DÉPARTEMENT ET DE LA COMMISSION FORMATION- RECHERCHE

**École nationale supérieure d'électrotechnique, d'électronique, d'informatique, d'hydraulique et des télécommunications (ENSEEIH)**

Toulouse

CO-ANIMATION DU MASTÈRE SPÉCIALISÉ « NOUVELLES TECHNOLOGIES DE L'ÉNERGIE » (15 ÉTUDIANTS)

2008 - 2016

- Enseignements dispensés en commun avec la spécialisation « EcoEnergie »
- Examen et sélection des candidatures
- Suivi des étudiants

RESPONSABLE DU PLATEAU INFORMATIQUE DU DÉPARTEMENT GEA

- Recueil des besoins des logiciels d'enseignement
- Maintenance des parcs de machines informatiques

RESPONSABLE DU PLATEAU D'ÉLECTRONIQUE DE PUISSANCE DU DÉPARTEMENT GEA

- Gestion du matériel et organisation de la salle
- Élaboration des cartes électroniques pour les activités d'enseignement

**Laboratoire Plasmas et Conversion d'Énergie (LAPLACE), UMR 5213-CNRS**

Toulouse

CORRESPONDANT FORMATION DU LAPLACE

2007 - 2010

- Recueil des besoins en formation des personnels
- Rédaction et suivi du plan de formation de l'unité

**Projets et collaborations**

---

**Université de Technologie d'Ho-Chi-Minh (HCMUT)**

Ho-Chi-Minh, Vietnam

PROGRAMME DE FORMATION D'INGÉNIEURS D'EXCELLENCE DU VIETNAM (PFIEV)

2008 - 2010

- Co-crédation du laboratoire Nouvelles Technologies de l'Énergie Electrique et Développement durable (NTEDD)
- Formation d'enseignants sur les nouvelles technologies de l'énergie électrique
- Cours et bureaux d'études niveau L3 à M2
- Durée et fréquence des séjours : 15 jours à 1 mois par an

**Projet Genome-Premices, Conseil pour la recherche aéronautique civile (CORAC)**

PARTICIPATION AU WORK-PACKAGE 5.2.5

2014 - 2016

- *Partenaires* : Liebherr Toulouse Aerospace
- *Thématique* : Optimisation de la chaîne "réseau / filtre / moteur / commande" de la turbomachine motorisée (pack conditionnement d'air), via le développement d'un outil logiciel permettant d'atteindre des gains significatifs en termes d'énergie électrique consommée, de masse et de compacité du sous-système

**Projet ISS Power & Control, DGAC**

DGAC

CO-RESPONSABLE DU WORK-PACKAGE 6-LAP05

2009 - 2013

- *Partenaires* : Airbus, SAFT
- *Thématique* : Dimensionnement des convertisseurs de puissance et du pack de batteries Lithium-ion pour le réseau électrique de secours de l'avion plus électrique

**Projet ANR-07-PANH-0012**

PARTICIPATION

2009 - 2013

- *Partenaires* : Helion, Université de Corte, Cea-Liten, Armines-Cep
- *Thématique* : Etudes et expérimentation de puissance pour la gestion des énergies intermittentes par les technologies électrochimiques

**Programme énergie du CNRS**

RESPONSABLE DU PROJET INSUCON

2009 - 2013

- *Partenaires* : G2ELab, Laboratoire Louis Neel
- *Thématique* : Interrupteur supraconducteur et convertisseurs statiques associés

**Publications sur 10 ans****BREVETS**

- T. Meynard et G. Fontes, "Convertisseur continu-continu et architecture électrique associée", WO2017089686A1, juin 01, 2017
- G. Fontes, T. Meynard, et R. Ruelland, "Object Oriented Tool for Electrical Engineering (Ootee)", Dépôt Agence de Protection des Programmes, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2014. IDN.FR.001.360033.000.S.P.205.000.20600

**REVUES**

- Alvaro Morentin, Guillaume Fontès, Miguel Mannes Hillesheim, Didier Flumian, Hubert Piquet, Thierry Meynard, "Open-Comp3d: An open-source framework dedicated to design in power electronics", *Mathematics and Computers in Simulation*, vol. 158, p. 477-489, 2019, doi : 10.1016/j.matcom.2018.11.006doi
- Nicolas Videau, Guillaume Fontès, Didier Flumian, Guillaume Gateau, Thierry Meynard, Joao L. Da Silva, Olivier Verdu, "High Ratio Non-Isolated DC-DC Converter for Hydrogen Battery Using a 50 kW PEM Fuel Cell", *Fuel Cells*, vol. 17, no 2, p. 187-195, 2017, doi: 10.1002/face.201600071
- R. R. Mariani, F. Lacressonniere, G. Fontes, et X. Roboam, "Design of a medium voltage power converter-storage devices embedded in a hybrid emergency network for more electrical aircraft", *Mathematics and Computers in Simulation*, vol. 91, p. 72-90, mai 2013, doi: 10.1016/j.matcom.2012.07.009.
- L. Ménard, G. Fontès, et S. Astier, "Dynamic energy model of a lithium-ion battery", *Mathematics and Computers in Simulation*, vol. 81, no 2, p. 327-339, oct. 2010, doi: 10.1016/j.matcom.2010.07.026.
- G. Fontes, C. Turpin, et S. Astier, "A Large-Signal and Dynamic Circuit Model of a H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> PEM Fuel Cell: Description, Parameter Identification, and Exploitation", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, no 6, p. 1874-1881, juin 2010, doi: 10.1109/TIE.2010.2044731.

**ACTES DE COLLOQUES**

- Guillaume Fontes, François Boige, Alvaro Morentin, Guillaume Delamare, Thierry Meynard, Nicolas Videau, Semiconductor loss estimation in an innovative global power converter designer, PCIM Europe 2020.
- A. Furlan, T. Meynard, A. Morentin, M. L. Heldwein, et G. Fontes, "Fast Hybrid Design Approach for Optimization of Inductors", in PCIM Europe digital days 2020; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management, juill. 2020, p. 1-8.
- A. Furlan, A. Morentin, G. Fontes, G. Delamare, M. L. Heldwein, et T. Meynard, "Homothetic Method to Compute Winding Losses in the Design of Power Inductors", in 2019 IEEE 15th Brazilian Power Electronics Conference and 5th IEEE Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC), déc. 2019, p. 1-6, doi: 10.1109/COBEP/SPEC44138.2019.9065497.
- Guillaume Fontès, Régis Ruelland, Alvaro Morentin, Thierry Meynard, Guillaume Delamare, Nicolas Videau, Adel Ziani, Fast Solver to Get Steady-State Waveforms for Power Converter Design, PCIM Europe 2018.
- N. Videau et al., "5-phase interleaved buck converter with gallium nitride transistors", in The 1st IEEE Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications, oct. 2013, p. 190-193, doi: 10.1109/WIPDA.2013.6695594.

- F. Lacressonnière, E. Bru, G. Fontes, et X. Roboam, "Experimental validation of a hybrid emergency network with low and medium voltage Li-Ion batteries for more electrical aircraft", in 2013 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE), sept. 2013, p. 1-9, doi: 10.1109/EPE.2013.6634664.
- R. R. Mariani, F. Lacressonnière, G. Fontes, et Roboam, "Design of Power Converter Devices embedded in a Hybrid Emergency Network for More Electrical Aircraft", présenté à Electrimacs, Cergy-Pontoise, France, 2011.
- L. Ménard, S. Astier, G. Fontès, J.-M. Blaquièrre, C. Turpin, et F. Gailly, "Modeling of an hybrid solar car with a lithium-ion battery", in 2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, sept. 2010, p. 1-6, doi: 10.1109/VPPC.2010.5729064.

#### WORKSPHOPS, TUTORIAUX

- G. Fontes, S. Gabouj, "Design Automation of Power Electronic Converters: Demands, Current Solutions and Perspectives", Industry Forum, PCIM 2020, 8 juillet 2020.
- G. Fontes, T. Meynard, "Si vs. SiC? 2-Level vs. x-Level topologies? Open The Competition With New Design Methods & Solutions for Power Electronics", Tutorial, PEDS 2019, 9 juillet 2019.
- G. Fontes, T. Meynard, "Methods and tools for power converter design", 2019, Tutorial, PCIM 2019, 6 mai 2019.
- T. Meynard, G. Fontes, "Design Methods and Tools for Power Electronics", CERN Accelerator School : Power Converters, 2014.

# Chapitre 1

## Synthèse des activités pédagogiques d'enseignement

### Sommaire

---

<b>1.1 Les nouvelles technologies au service de l'enseignement . . . . .</b>	<b>12</b>
<b>1.2 EcoEnergie . . . . .</b>	<b>13</b>
<b>1.3 Modélisation, caractérisation de composants électrochimiques . . . . .</b>	<b>14</b>
<b>1.4 Etude d'un système énergétique hybride . . . . .</b>	<b>16</b>
<b>1.5 Liste complète des enseignements effectués . . . . .</b>	<b>18</b>

---

Exceptée cette dernière année effectuée à l'ENSM de Saint-Malo, mes enseignements ont été essentiellement dispensés au département GEA (devenu 3EA) de l'INP-ENSEEIH, et plus particulièrement pour la spécialisation « Eco-Energie » au grade de master créée en 2006 et pour laquelle mon recrutement avait été effectué. Pour donner une signification plus particulière quant à mon investissement en enseignement, quatre thèmes seront soulignés :

- les nouvelles technologies au service de l'enseignement,
- le master « EcoEnergie »,
- la modélisation et la caractérisation de composants électrochimiques,
- l'étude d'un système énergétique hybride alimentant un actionneur électro hydrostatique associant pile à combustible et supercondensateurs.

Une liste exhaustive des enseignements que j'ai pu effectuer sera ensuite proposée.

## 1.1 Les nouvelles technologies au service de l'enseignement

Convaincu du potentiel des nouvelles technologies pour l'innovation pédagogique - comme les plateformes d'enseignement type « Moodle » qui semblent aujourd'hui incontournables - pour favoriser les enseignements avec des approches originales, interactives et peut-être conviviales, je me suis efforcé de promouvoir la plateforme Moodle de l'ENSEEIH de 2008 à 2016 en proposant notamment des maquettes ou des tutoriels pour mes collègues enseignants et en mettant systématiquement des versions électroniques de mes supports de cours à disposition des étudiants.

Pour illustrer mon propos concernant ces approches innovantes d'enseignement, je citerai :

- la création de vidéos, d'ateliers d'exercices et de classe inversée pour deux enseignements dans le contexte sanitaire lié au covid-19 (cette mise en place a fait l'objet d'une reconnaissance horaire de transformation pédagogique) ; les étudiants m'ont fait un excellent retour et je pense que la thématique (modélisation systémique) abordée dans ce cours s'y prête particulièrement bien ;
- le projet d'aide à la préparation de travaux pratiques (TP) via le réseau Internet, intitulé « WebTP » [1], destiné à des élèves ingénieurs, impulsé par Guillaume Gateau dans les années 2000. Ce projet consistait à s'appuyer sur des ressources numériques (cours, méthodes expérimentales, matériel utilisé...) et proposait, pour la préparation des TPs, de naviguer dans ces ressources en suivant un chemin déterminé par l'enseignant, avec la libre possibilité d'approfondir les notions abordées plus ou moins directement dans le TP.

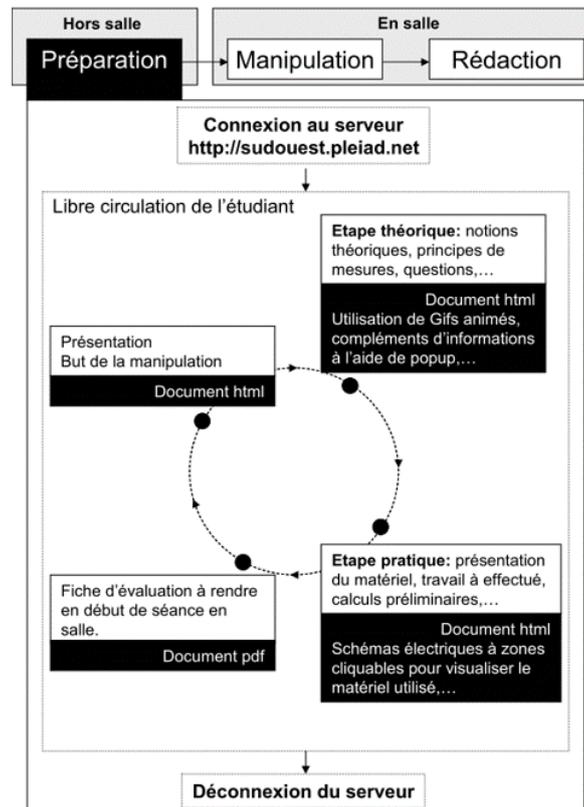


FIGURE 1 – Synoptique du chemin pédagogique proposé pour une préparation de TP

Plusieurs versions et « chemins pédagogiques » ont ainsi pu être testés au fil des ans. La figure 1 illustre la version mise en place en 2006-07 en utilisant le serveur Plei@d du CNAM où l'étudiant peut « librement » circuler entre 3 ressources principales (introduction, étape théorique avec les notions préliminaires, étape pratique où est abordée le cœur de la préparation au TP) et une activité (QCM / fiche d'évaluation).

## 1.2 EcoEnergie

Le programme du master « EcoEnergie » [2], spécialisation de 3e année inter-écoles à la fois de l'INP-ENSEEIH et de l'INP-ENSIACET, s'inscrit dans le contexte du développement des énergies durables et des problématiques d'éco-conception. Ainsi, ce programme de master à temps plein sur un semestre forme des ingénieurs dans le domaine des technologies et systèmes énergétiques avancés. La caractéristique clé du programme repose sur une combinaison originale et équilibrée des disciplines Génie des Procédés et Génie Electrique, basée sur une approche commune de résolution de problèmes pour identifier les solutions durables dans le secteur de l'énergie.

La figure 2 montre l'exemple des systèmes électrolyseur et pile à combustible dans un portfolio énergétique. Cet exemple illustre intrinsèquement la motivation à utiliser et à combiner les concepts des deux disciplines pour couvrir la chaîne de production d'électricité (principalement orienté génie électrique) à partir d'alternatives de procédés du-

rables (principalement orienté génie des procédés).

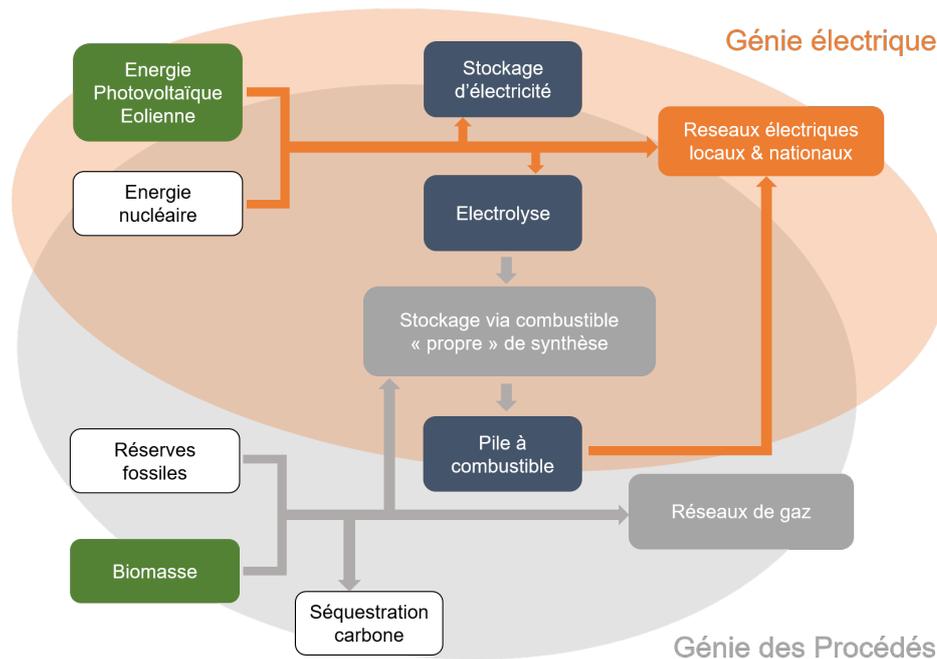


FIGURE 2 – Illustration du portfolio énergétique autour des systèmes électrolyseur et pile à combustible mixant les disciplines du génie des procédés et du génie électrique

Plus généralement, les étudiants apprennent à concevoir, développer et mettre en oeuvre des systèmes et des technologies énergétiques dans différents secteurs industriels pour lesquels une gestion efficace de l'énergie est essentielle pour rester compétitif. L'évaluation des systèmes énergétiques actuel et futur est ainsi traitée et comprend des sujets sur les ressources, l'extraction, la conversion et l'utilisation, en mettant l'accent sur les besoins énergétiques au 21e siècle de manière responsable et durable.

Ma contribution a été de co-animer avec Stéphane Astier la partie Génie Electrique de cette formation mais surtout la création des enseignements, bureaux d'études et travaux pratiques associés pour la partie « énergie électrique » comme ceux présentés dans les deux parties suivantes.

### 1.3 Modélisation et caractérisation de composants électro-chimiques

Ces enseignements découlent naturellement des premiers travaux de recherche que j'ai menés au LEEI (devenu LAPLACE) au début des années 2000 et leur mise en place a constitué mes premières contributions en tant que maître de conférences. Ces enseignements sont dispensés en dernière année du cycle de formation ingénieur pour l'option « EcoEnergie » et ont pour objectif de donner aux étudiants une approche globale de modélisation et de caractérisation expérimentale [3] qui nous semble bien adaptée en vue de leur utilisation dans des systèmes électriques. On peut distinguer :

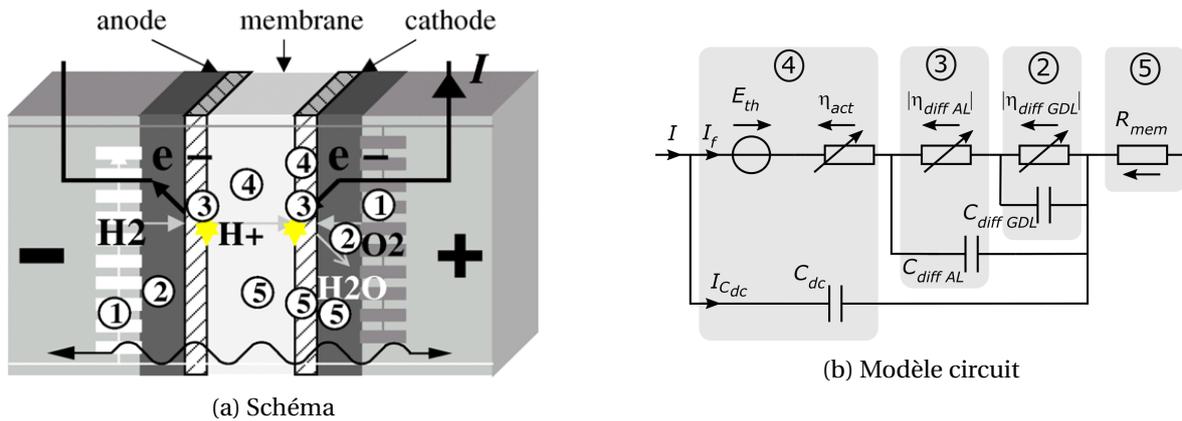


FIGURE 3 – Schéma et modèle d'une cellule d'une pile à combustible type PEM

- un cours sur la modélisation « circuit » des piles à combustible PEM, complété par un cours sur la caractérisation des piles à combustible (proposé par Christophe Turpin);
- un cours sur la modélisation « Bond-Graph » des composants électrochimiques; l'outil « Bond-Graph » est particulièrement adapté pour illustrer la généralité de l'approche de modélisation, illustrée avec une pile à combustible PEM et une batterie Lithium-ion;
- un cours sur les éléments technologiques des accumulateurs (Acide-Pb, Ni-MH ou NiCd et Lithium-ion);
- des bureaux d'études composés de travaux expérimentaux qui vont permettre aux étudiants d'appliquer cette approche de modélisation et de caractérisation expérimentale.

La modélisation proposée de ces composants électrochimiques repose sur une approche énergétique macroscopique et semi-empirique. Les figures 3a et 3b montrent que chaque phénomène considéré est modélisé par un élément dipôle sur le modèle.

Les différents phénomènes représentés figure 3a sont listés ci-dessous :

1. Diffusion des gaz dans les canaux (négligée dans cette approche)
2. Diffusion des gaz dans la couche de diffusion dite "GDL" (Gas Diffusion Layer)
3. Diffusion des gaz dans la couche d'activation dite "AL" (Gas Activation Layer)
4. Réaction électrochimique gérée par les phénomènes thermodynamiques, d'activation et de double couche
5. Phénomène ohmique : transport de protons

Chaque dipôle du modèle circuit de la figure 3b représente ainsi le siège d'un phénomène modélisé par une loi semi-empirique non-linéaire (comme la loi de Butler-Volmer pour la réaction électrochimique en 4, ou la loi diffusion en 2 et 3) ou linéaire (transport de protons en 5).

Ma contribution pour ces enseignements a plus particulièrement porté sur :

- la mise en place de cette unité d'enseignement sur la modélisation et caractérisation des composants électrochimiques;
- la création des nouveaux cours sur la modélisation des composants électrochimiques et sur les éléments technologiques de batteries;
- la création du bureau d'études et des manipulations expérimentales associées.

## 1.4 Etude d'un système énergétique hybride

Il s'agit d'un bureau d'études qui découle des travaux de recherche menés par les chercheurs du groupe « Système » devenu « Genesys » [4, 5, 6, 7]. J'ai créé cet enseignement avec mes collègues Bruno Sareni et Xavier Roboam. Il est dispensé après environ 10 heures de cours en dernière année de la formation ingénieur pour les spécialisations « Conversion Electrique et Réseaux d'Energie » et « Eco-Energie », qui a pour objectif d'illustrer le dimensionnement et l'analyse d'un système électrique hybride « réaliste » et se déroule sur 2 ou 3 séances de 3h30 suivant la spécialisation. Le sujet est l'étude d'un Actionneur Electro-Hydrostatique, figure 4a, (communément appelé EHA pour l'acronyme en langue anglaise) pour une application de contrôle de vol, exemple type d'un système physique multi-disciplinaire (électrique, hydraulique et mécanique), alimenté par un système hybridant une pile à combustible type PEM et un stockage de supercondensateurs [8]. Ce système est contrôlé pour satisfaire une stratégie de gestion d'énergie typique d'une architecture multi-sources.

Pas à pas, les étudiants font face à des problématiques relatives au dimensionnement d'un système énergétique hybride :

- modélisation multi-domaine et analyse causale (approche à l'aide du Bond-Graph);
- analyse des besoins du système;
- dimensionnement des composants du système hybride et stratégie de gestion d'énergie.

Les figures 4b et 4a illustrent la première partie du bureau d'études visant à modéliser l'actionneur électro-hydrostatique (EHA) avec les différents domaines physiques concernés.

La figure 5 illustre la seconde partie du bureau d'études visant à dimensionner le système d'alimentation hybride composée de la pile à combustible PEM et du stockage de supercondensateurs.

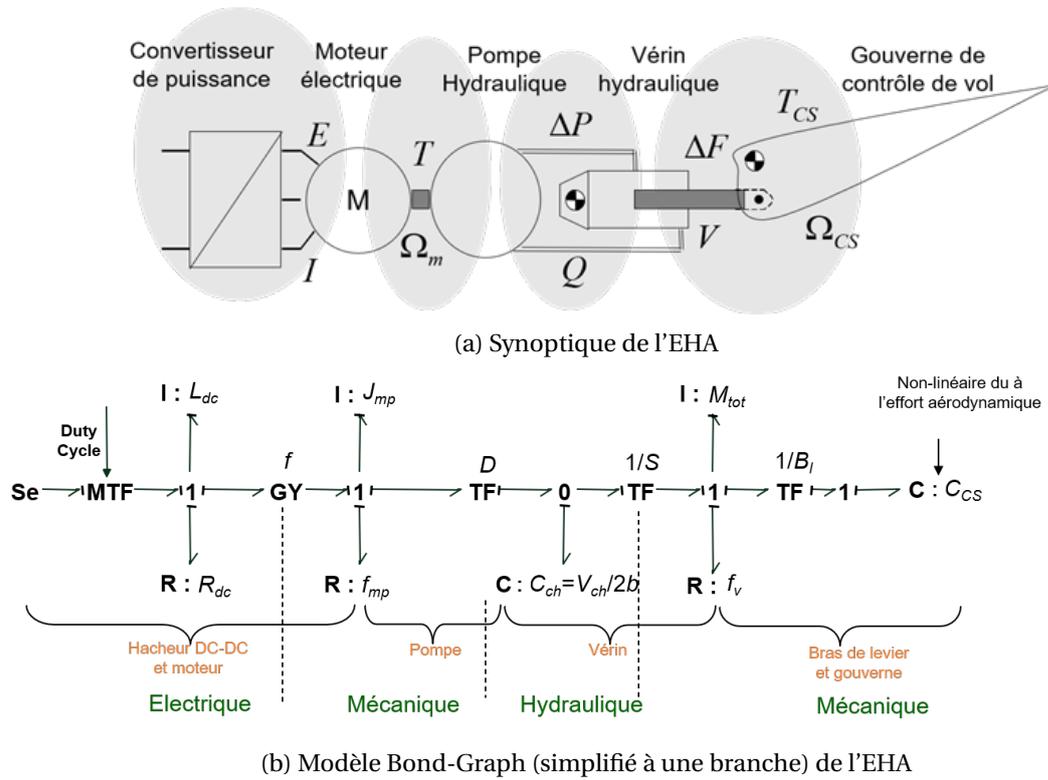


FIGURE 4 – Synoptique et modèle de l'actionneur électro-hydraulique (EHA)

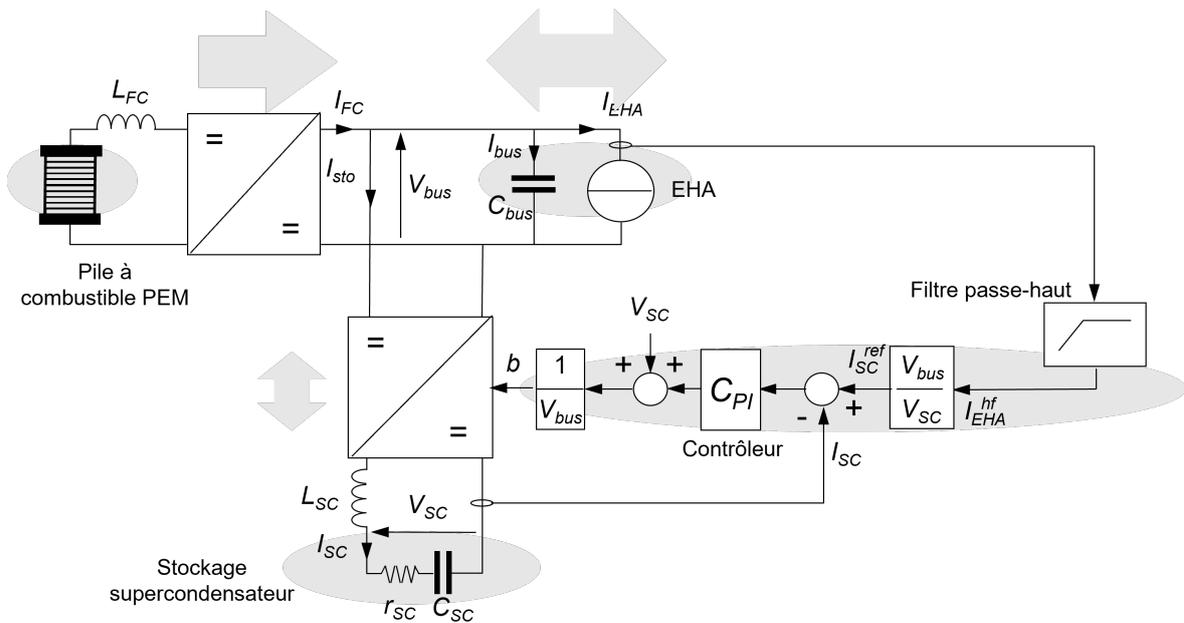


FIGURE 5 – Système d'alimentation hybride de l'EHA

## 1.5 Liste complète des enseignements effectués

Comme précédemment énoncé, mon recrutement ayant été effectué pour la spécialisation « EcoEnergie », environ la moitié de mon service d'enseignement a été dispensé pour cette spécialisation et cette part est restée globalement constante sur la période 2006 - 2016. La seconde moitié de mon service d'enseignement a été dispensé pour les première et deuxième année du département GEA et a évolué progressivement aboutissant sur une implication plus forte en 2e année et notamment sur le thème de l'électronique de puissance.

### Enseignements en tant que vacataire à l'institut Français du Pétrole : 2021-2022

Niveau	Thème / intitulé	Volume / an
M2	Modélisation et caractérisation expérimentale des piles à combustibles type PEM	6 hTD

### Enseignements en détachement à l'ENSM : 2021-2022

Niveau	Thème / intitulé	Volume / an
L2	TPs Automatique : logique séquentielle et combinatoire, programmation d'automates en langage Grafset, Ladder et ST	128 hTD
	TPs machines électriques tournantes : machine courant continu, machine asynchrone, alternateur et couplage	72 hTD
	Cours et TP's électronique de puissance : fonctions de conversion de base (redresseurs, hacheurs, onduleurs et gradateurs)	90 hTD
L3	Cours et TP's Maintenance et réparation des équipements électriques de pont et hôteliers	48 hTD
	Formation avancée haute tension : appareillage et propulsion électrique des navires	16 hTD
M1	TP électrotechnique : analyse des harmoniques dans une chaîne de propulsion électrique	4 hTD

### Enseignements en tant que maître de conférences : 2020-2021

Niveau	Thème / intitulé	Volume / an
M2 80 hTD	Cours de remise à niveau sur les Onduleurs pour les admis sur titre	13 hTD
	Cours et bureau d'études sur la modélisation systémique avec les « Bond-Graph »	29 hTD
	Bureau d'études sur l'analyse et le dimensionnement d'un système électrique hybride	21 hTD
	Bureau d'études sur les onduleurs multiniveaux	7 hTD
	Cours et bureau d'études sur la compatibilité électromagnétique	12 hTD
M1 statut apprenti 66 hTD	Cours et bureau d'études sur l'introduction aux FACTS	20 hTD
	Cours et bureau d'études sur les onduleurs et leur filtrage	35 hTD
	Cours et bureau d'études sur la thermique en électronique de puissance	11 hTD
M1 statut étudiant 50 hTD	Apprentissage par projet sur la synthèse et la conception de convertisseurs en électronique de puissance	30 hTD
	Commande rapprochée des convertisseurs statiques	21 hTD
L3 statut apprenti	Introduction à la conversion statique et alimentation à découpage	25 hTD

### Enseignements en tant que maître de conférences : 2006-2016

M2 90 hTD	Cours sur la modélisation des composants électrochimiques	6 hTD
	Cours sur les éléments de technologies des accumulateurs	2,5 hTD
	Cours et bureau d'études « Autonomous Energy Systems »	10 hTD
	Bureau d'études sur la caractérisation des piles à combustibles type PEM	21 h TD
	Bureau d'études sur la conversion photovoltaïque	21 h TD

	Bureau d'études sur l'analyse et le dimensionnement d'un système électrique hybride	21 hTD
M1 statut étudiant 80 hTD	Apprentissage par projet sur la synthèse et la conception de convertisseurs en électronique de puissance (à partir de 2014)	42 hTD
	TPs électronique de puissance (jusqu'en 2013) : mesures des pertes IGBT sur un bras de hacheur, onduleur monophasé et mécanismes de commutation, gradateur à thyristors	21 hTD
	Micro-projet d'alimentation à découpage isolée : dimensionnement d'une alimentation de type « Forward » (jusqu'en 2013)	21 hTD
	TPs sur le thème association machines-convertisseurs (machine synchrone autopilotée à aimants permanents, machine synchrone alimentée par commutateur de courant, cascade hyposynchrone)	10,5 hTD
	TPs électronique de puissance & conversion d'énergie (compensation d'énergie réactive, conversion photovoltaïque...)	10,5 hTD
M1 statut apprenti	Cours et bureau d'études : conception et mise en oeuvre de convertisseurs de puissance	24 hTD
L3 - Formation à distance	Filière Fontanet - formation continue INP - Régimes transitoires des circuits électriques	15 hTD
L3	TPs de Génie Electrique; c'est dans le cadre de ces TPs que les préparations par internet (« WebTP ») ont été mises en place	42 hTD
	Bureau d'études d'une alimentation à découpage non-isolée : fonctionnement de la cellule de commutation, filtrage de sortie	14 hTD

### Enseignements en tant que moniteur : 2003-2006

L3	TPs de Génie Electrique	54 hTD
M2	Projets longs - il s'agissait premièrement de proposer un sujet sur lequel les étudiants travailleront de manière assez autonome tout au long du premier semestre; ce sujet pouvait être issu d'une application connue en génie électrique – automatique, ou bien être lié à un thème de recherche mené par les enseignants-chercheurs; deux projets ont été proposés, successivement l'année 2004-2005, et l'année 2005-2006; les étudiants mènent leur projet tout en bénéficiant de l'aide et du recul des encadrants sur le thématique proposée	10 hTD

### Enseignements en tant vacataire : 2002-2003

M1 - ingénieur CNAM	Cours et TDs sur la modélisation des machines électriques (courant continu, synchrone et asynchrone) en vue de leur commande	40 hTD
L1 - L2	Cycle Préparatoire Polytechnique (« La Prépa des INP ») - TPs de physique appliquée (mécanique, optique, thermodynamique, électromagnétisme et électronique); j'ai pu élaborer le TP d'électronique sur le transistor bipolaire.	30 hTD



# Chapitre 2

## Synthèse des activités de recherche et de valorisation

*« De l'étude des interactions entre composants électrochimiques et convertisseurs de puissance, à la conception des convertisseurs de puissance. »*

---

### Sommaire

---

<b>2.1 Etude des composants électrochimiques...</b>	<b>22</b>
2.1.1 Rappel des activités de doctorat : modélisation et caractérisation des piles PEM	22
2.1.2 Modélisation et caractérisation des accumulateurs Lithium-ion	23
<b>2.2 Méthodes et outils de conception...</b>	<b>26</b>
2.2.1 Dimensionnement des convertisseurs de puissance et du pack de batteries Lithium-ion	26
2.2.2 Prototype logiciel d'aide à la conception en électronique de puissance	29
<b>2.3 OpenComp3d</b>	<b>34</b>
<b>2.4 Action de valorisation : logiciel PowerForge</b>	<b>36</b>
2.4.1 Positionnement, caractéristiques	37
2.4.2 Rôles et missions	38
<b>2.5 Expertise scientifique : logiciel Simba</b>	<b>43</b>
2.5.1 Qu'est-ce que Simba?	43
2.5.2 Mes contributions	44
<b>2.6 Liste des publications</b>	<b>44</b>

---

## 2.1 Etude des composants électrochimiques en vue de leur insertion dans des systèmes électriques

### 2.1.1 Rappel des activités de doctorat : modélisation et caractérisation des piles PEM

De nombreux travaux ont été entrepris sur la pile à combustible, maillon essentiel de la chaîne d'exploitation de l'hydrogène. En électronique de puissance, beaucoup d'études ont été menées sur la mise en œuvre d'une production décentralisée ou sur des convertisseurs statiques dédiés. L'objectif de mes travaux de thèse était d'étudier les interactions entre les piles à combustible et les convertisseurs, afin d'obtenir des éléments pour le cahier des charges de l'électronicien de puissance.

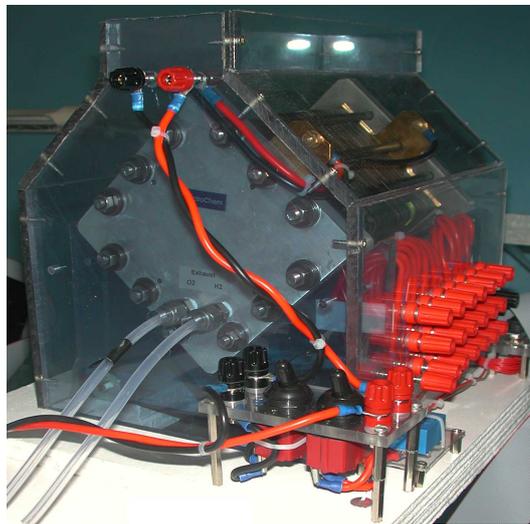


FIGURE 6 – Stack Electrochem 20 cellules de 50 cm<sup>2</sup> - puissance 200 W

Ce travail a proposé des modèles électriques (type circuit) dynamiques et forts signaux de pile à combustible PEM, prenant en compte les différents phénomènes physico-chimiques (activation, diffusion, ohmiques). Des méthodes originales de caractérisation expérimentale - comme le balayage en courant basse fréquence - ont permis d'extraire les paramètres de ces modèles. Ces modèles ont été utilisés pour l'étude des interactions entre les piles à combustible et les convertisseurs statiques les plus usités : hacheurs (abaisseur ou élévateur) et onduleurs. Le rôle fondamental des phénomènes de double couche a été démontré : ils offrent ainsi un filtrage partiel des harmoniques de courant générés par les convertisseurs statiques. Ce rôle est cependant aujourd'hui à mettre en balance avec les dégradations que ces harmoniques peuvent provoquer sur les coeurs de pile [9].

De plus, ces travaux ont fait émerger de prometteuses perspectives en termes de diagnostic pour les piles à combustible en utilisant avantageusement le couple modèle / méthode de paramétrage (exploité dans la thèse de Vincent Phlipoteau [10] en collaboration

avec HELION industriel français de la pile à combustible) et ont permis le dépôt d'un brevet [11].

La figure 6 montre une photo du stack caractérisé entre 2001 et 2004. La puissance massique ou volumique de ces stacks a depuis bien augmenté, notamment grâce à l'augmentation de la densité de courant.

### 2.1.2 Modélisation et caractérisation des accumulateurs Lithium-ion

Ces travaux ont été initiés avec mon post-doctorat effectué en collaboration avec le CNES et ont été poursuivis lors des travaux de thèse de Laurianne Ménard [12]. Il s'agissait d'appliquer une approche énergétique - analogue à celle utilisée pour les piles à combustible [7] - s'appuyant sur le formalisme « Bond-Graph » pour modéliser des accumulateurs Lithium-ion.

C'est une approche macroscopique qui utilise des lois comportementales de la physique faisant intervenir des paramètres identifiés expérimentalement. Elle est basée sur la description des couplages énergétiques au sein du composant et permet par principe de traiter avec le même formalisme les aspects multidisciplinaires. D'un point de vue plus général, cette approche semble particulièrement bien adaptée aux composants électrochimiques qui font intervenir des couplages forts entre les domaines chimiques, thermiques et électriques.

Comme il s'agit avant tout d'une démarche de modélisation, le codage final peut être effectué sous divers formalismes. Si le formalisme Bond Graph a été optimisé pour cette approche, il est peu usité directement sous sa forme originelle. Ainsi, cette approche peut également être déclinée sous une forme circuit.

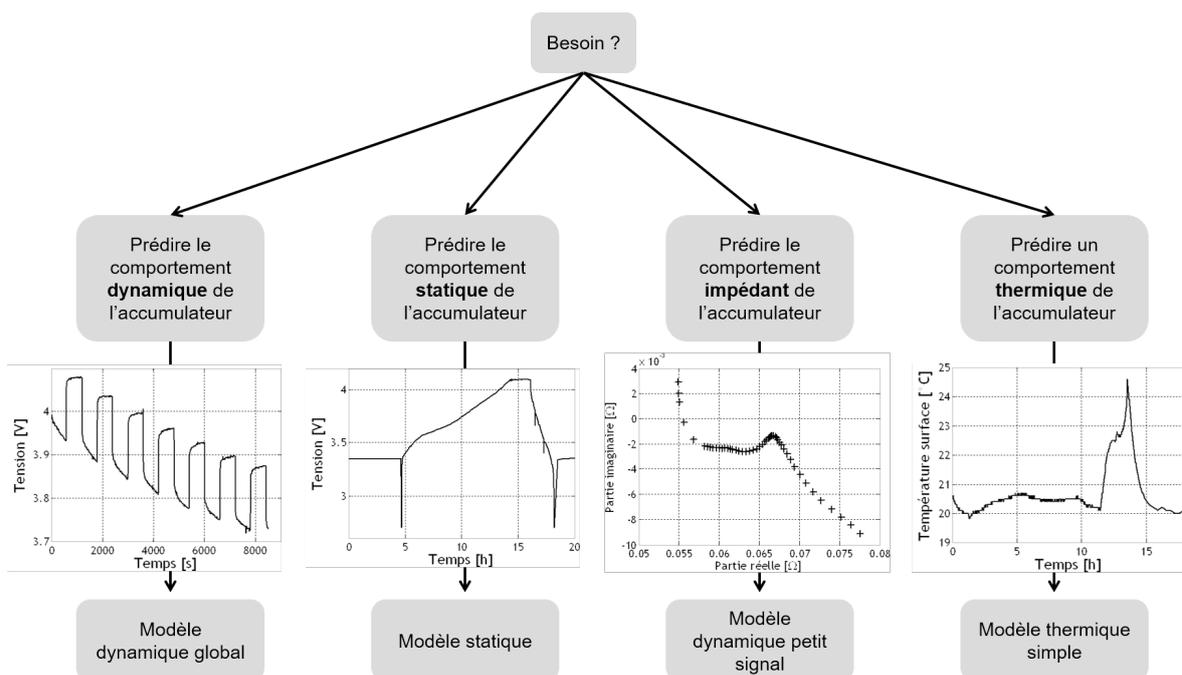


FIGURE 7 – Différents type de modèles Lithium-ion suivant le besoin

Différents types de modèles ont été déclinés suivant le besoin :

- un modèle dynamique fort signal, susceptible de reproduire le comportement dynamique de l'accumulateur à l'échelle de quelques minutes;
- un modèle « statique », susceptible de donner la tension en fonction de l'état de charge à l'échelle de plusieurs heures;
- un modèle dynamique petit signal, susceptible de reproduire le comportement impédant de l'accumulateur de manière plus fine de quelques millisecondes à plusieurs dizaines de minutes;
- un modèle thermique qui peut venir se coupler aux modèles dynamiques fort signal ou statique.

La figure 7 illustre ces différents modèles et la figure 8 présente les modèles dynamiques fort signal en représentation Bond-Graph (a) et en représentation circuit (b). Comme pour la modélisation de la pile à combustible, les fondements de cette approche de modélisation sont physiques. Ici, ils renvoient à la compréhension et la mise en équation des phénomènes physico-chimiques mis en jeu au sein de l'accumulateur Li-Ion. Ces différents phénomènes physico-chimiques sont ainsi représentés par des éléments dissipatifs (éléments type  $R$  en Bond-Graph ou résistances en circuit) ou des éléments de stockage (éléments type  $C$  en Bond-Graph ou condensateurs en circuit) faisant intervenir :

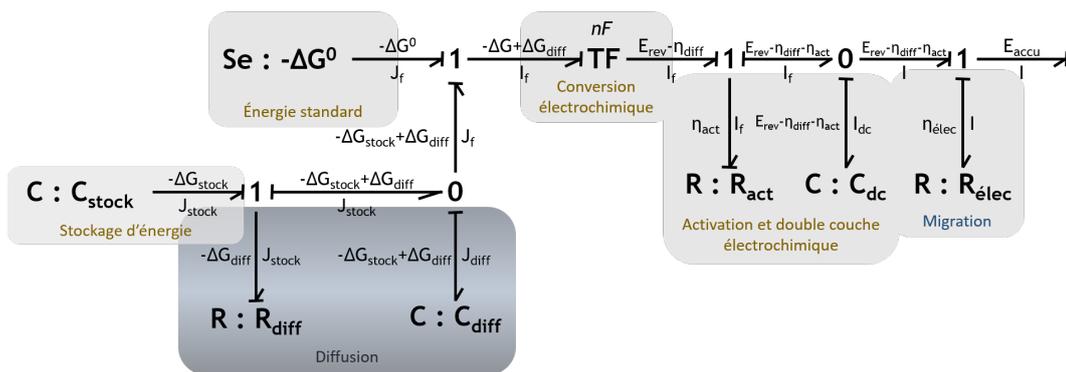
- la loi de Nernst pour prendre en compte l'état de charge (modélisé par un élément  $C$ );
- la loi de Butler-Volmer ou de Tafel pour prendre en compte les phénomènes d'activation de la cinétique électrochimique;
- le condensateur de double couche;
- la loi de diffusion pour prendre en compte les phénomènes de transport.

Cette modélisation a été appliquée pour deux types d'accumulateurs :

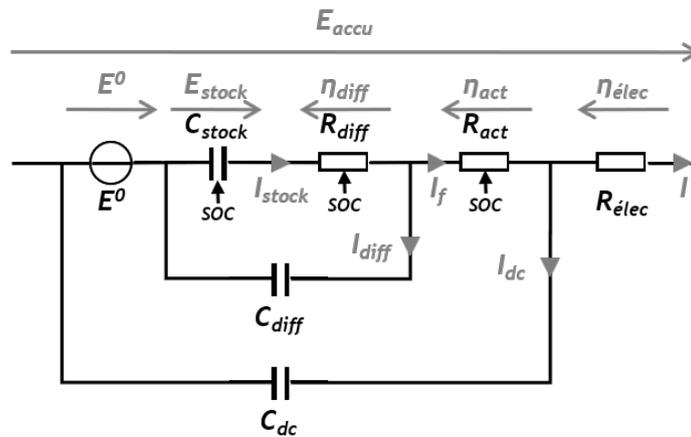
- élément MP176065 : 3,6V - 24 Wh;
- élément VES 180 : 3,6V - 180 Wh.

Les différentes lois mises en oeuvre dans ces éléments  $R$  ou  $C$  font intervenir des paramètres extraits à l'aide de différentes caractérisations expérimentales pour chaque modèle. Ces différentes caractérisations sont illustrées figure 7 :

- modèle fort signal : couplage d'une spectroscopie d'impédance, et d'un essai avec des décharges partielles successives à  $C/2$  ou  $C/3$ ;
- modèle statique : décharge totale à  $C/2$  ou  $C/3$ ;
- modèle dynamique petit signal : spectroscopie d'impédance;
- modèle thermique : essai de « qualification » (uniquement pour l'accumulateur VES 180).



(a) Représentation Bond-Graph



(b) Représentation circuit

FIGURE 8 – Modèles dynamiques fort signal d'un accumulateur Lithium-ion

Les paramètres sont extraits grâce une méthode d'optimisation des moindres carrés qui cherche à minimiser la différence au carrée entre la tension aux bornes de l'accumulateur (ou la température) obtenue à partir du modèle et la tension mesurée aux bornes de l'accumulateur (ou la température) lors de l'essai expérimental. La figure 9 illustre ce type de méthode pour le modèle dynamique fort signal.

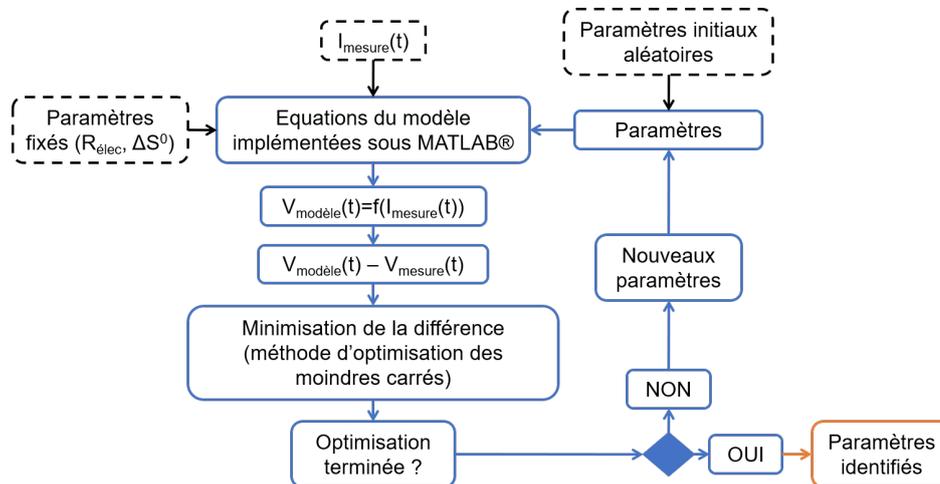


FIGURE 9 – Méthode d'extraction des paramètres du modèle dynamique fort signal

Cette approche de modélisation couplée aux méthodes de caractérisation expérimentale a permis à l'équipe Genesys du Laplace de bien appréhender les accumulateurs Lithium-ion en vue de leur utilisation dans des systèmes énergétiques hybrides pour des applications aéronautiques [13] ou de véhicules électriques [14].

## 2.2 Méthodes et outils de conception de convertisseurs de puissance

### 2.2.1 Dimensionnement des convertisseurs de puissance et du pack de batteries Lithium-ion pour le réseau électrique de secours de l'avion plus électrique

Pour limiter l'impact du trafic aérien sur l'environnement, l'industrie aéronautique doit réduire la consommation de carburant et les émissions de CO<sub>2</sub>. L'avion « plus électrique » permettrait de résoudre partiellement ce challenge [15] où les équipements conventionnels qui dépendent de systèmes hydrauliques et pneumatiques sont progressivement remplacés par des systèmes électriques, comme les systèmes de dégivrage, le conditionnement d'air ou les gouvernes de vol.

C'est dans ce contexte de l'avion plus électrique que se situent ces travaux et plus précisément pour le réseau électrique de secours d'un avion où il a été montré qu'une hybridation de l'éolienne de secours (RAT) avec un composant de stockage d'énergie pouvaient

permettre un gain en 30 % en masse et volume de cette éolienne [4] [16] (rappelons que le concept d'hybridation repose sur le fait que la puissance moyenne est fournie par la source de puissance principale - ici l'éolienne de secours - et que la puissance fluctuante est fournie par le composant de stockage).

Ces travaux ont comporté deux volets [13] :

- une validation expérimentale du concept d'hybridation sur un banc de test avec une batterie Lithium-ion basse tension 28V et des stratégies associées de gestion d'énergie;
- une étude visant à évaluer l'intérêt de l'architecture électrique avec une batterie « moyenne tension » en dimensionnant l'ensemble du système convertisseurs - batterie.

Seule la seconde étude portant l'architecture avec la batterie moyenne tension (figure 10) est développée dans ce mémoire. Elle met en œuvre :

- un DC / DC non-isolé réversible entre les bus HVDC et MVDC,
- un DC / DC isolé non-réversible de type « full-bridge » entre les bus MVDC et LVDC.

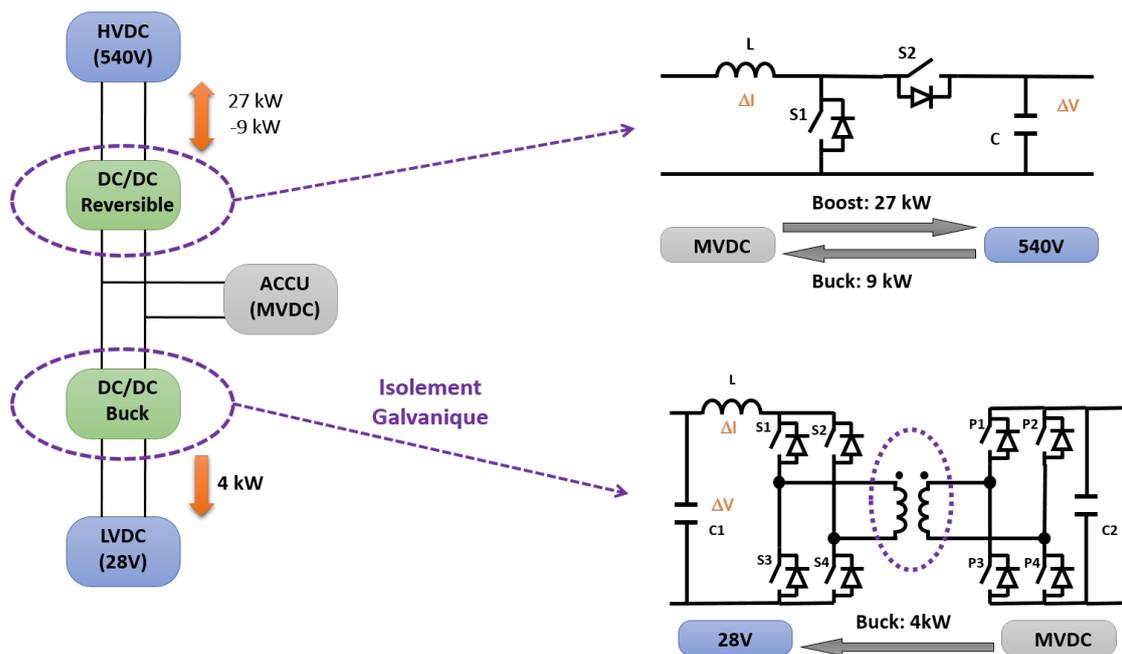


FIGURE 10 – Détail de l'architecture du réseau de secours avec une batterie « moyenne tension » : topologies des convertisseurs

L'objectif de cette étude était de déterminer la tension dite MVDC de raccordement permettant d'obtenir le meilleur compromis en termes de masse et de rendement. En effet, cette tension influe sur la masse et le rendement de chaque convertisseur et également sur la masse de la batterie (le nombre d'éléments et leur surface étant très différents, des technologies différentes ont été envisagées par le constructeur).

Une approche globale de dimensionnement de ces convertisseurs a été développée (figure 11 depuis des spécifications d'entrée (tensions, puissance, nombre de branches et

nombre d'interrupteurs en parallèle) jusqu'à l'estimation des masses des différents composants (magnétiques, condensateurs, radiateurs...) et des pertes totales.

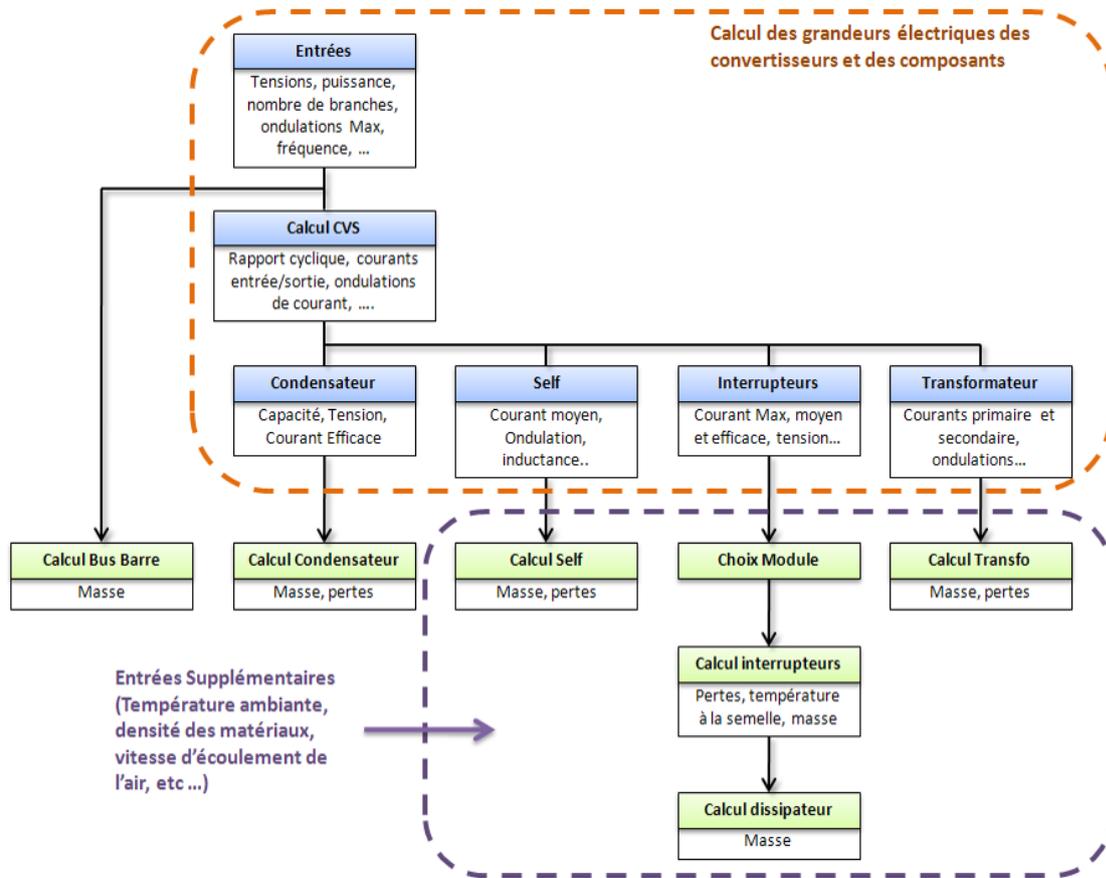


FIGURE 11 – Approche globale de dimensionnement des convertisseurs

Il s'agit d'une approche qui vise à obtenir une première évaluation de la masse et du rendement du système global, en proposant un pré-dimensionnement pour chaque composant avec par exemple :

- une évaluation des pertes dans les semiconducteurs IGBT de manière classique avec les données constructeurs (chute de tension par conduction et énergies de commutation),
- un dimensionnement des composants magnétiques (transformateur et inductance) avec une approche « produit des aires » [17],
- un dimensionnement du radiateur avec les équations aéro-fluidiques [18],

à partir des expressions analytiques des courants moyens, efficaces et maxima issues des formes d'ondes propres à chacun des convertisseurs.

Ce process de dimensionnement a donc été appliqué pour les deux convertisseurs connectés à la batterie MVDC et pour différents niveaux de tension de connexion de cette batterie. Associé aux résultats de dimensionnement de la batterie fournis par le constructeur, ce travail a mis en évidence l'intérêt du développement d'une batterie dite moyenne

tension pour obtenir un bon compromis en terme de masse et de rendement, comme le montre la figure 12.

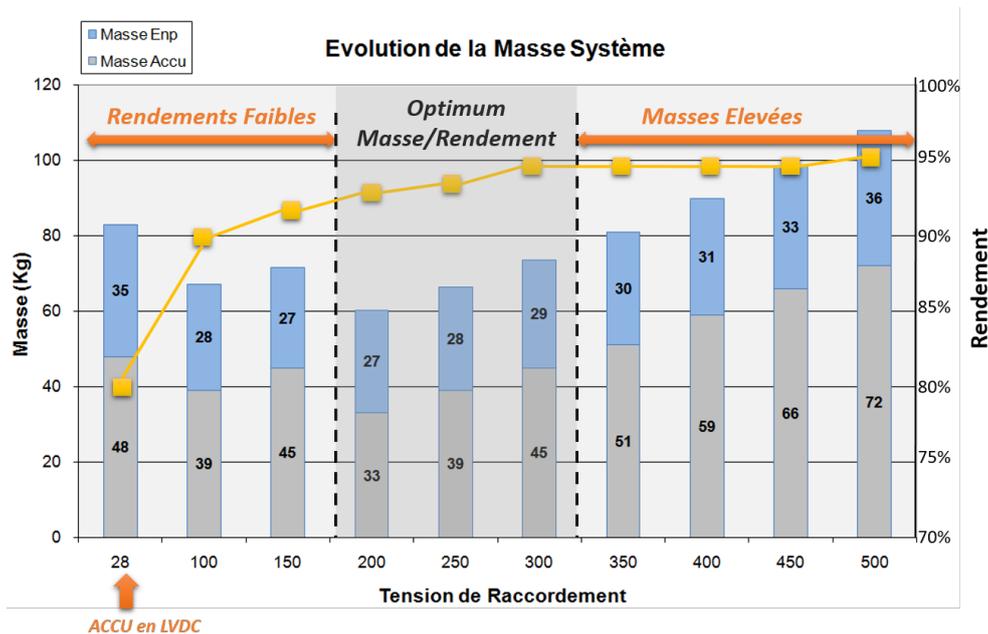


FIGURE 12 – Compromis masse - rendement du système global convertisseurs et batterie

Ces travaux ont donc permis de développer une approche de dimensionnement de convertisseurs mais spécifiques aux topologies considérées dans cette application : un convertisseur DC / DC non isolé et un convertisseur DC / DC isolé de type « full bridge ». Dans la même période où se déroulait ces travaux, de nombreuses autres études ([19], [20], [21], [22]) avec une approche similaire étaient menées au Laplace et plus particulièrement dans le groupe Convertisseurs Statiques du Laplace. Toutefois, si l'approche était similaire, les calculs de dimensionnement étaient le plus souvent spécifiques à la topologie de convertisseur considéré dans l'étude, et la réutilisation de méthodes précédemment développées d'une étude à une autre restait marginale.

Une prise de recul par rapport à ces approches spécifiques a progressivement mené les réflexions vers l'intérêt de proposer une approche plus générique par rapport aux topologies de convertisseur.

### 2.2.2 Prototype logiciel d'aide à la conception en électronique de puissance

Les études de conception de convertisseurs effectuées au Laplace mentionnées dans la partie précédente ont mis en évidence une préoccupation importante pour cette problématique de trouver des compromis entre la masse et le rendement d'un système.

Face à ce constat, j'ai entrepris en 2012-13 en collaboration avec la société Liebherr Aerospace (Régis Ruelland et Pierre Brodeau) et avec un autre collègue du Laplace (Thierry

Meynard) le développement d'un outil logiciel - évolutif - d'aide à la conception en électronique de puissance qui puisse être plus générique par rapport aux topologies considérées de convertisseur. Ce travail a ainsi abouti à un prototype logiciel, disponible via une API sous la forme d'une toolbox Matlab, qui est illustré sur la figure 13 et permet - en termes de fonctionnalités - de :

- supporter des topologies de convertisseurs à base de cellules de commutation dure et en conduction continue,
- prendre en compte les éléments technologiques en gérant des bases de données existantes de matériaux passifs et de semiconducteurs,
- déterminer le point de fonctionnement du convertisseur à partir des spécifications,
- déterminer les différentes formes d'ondes et grandeurs importantes de manière quasi-instantanée (il s'agit en fait de se dispenser des méthodes classiques de résolution d'équation différentielle),
- balayer des paramètres de dimensionnement (degrés de liberté des convertisseurs multicellulaires et des stratégies de modulation...),

afin d'évaluer les pertes, la masse et le volume de différentes solutions, de les comparer et d'appréhender ainsi l'influence des paramètres de dimensionnement balayés.

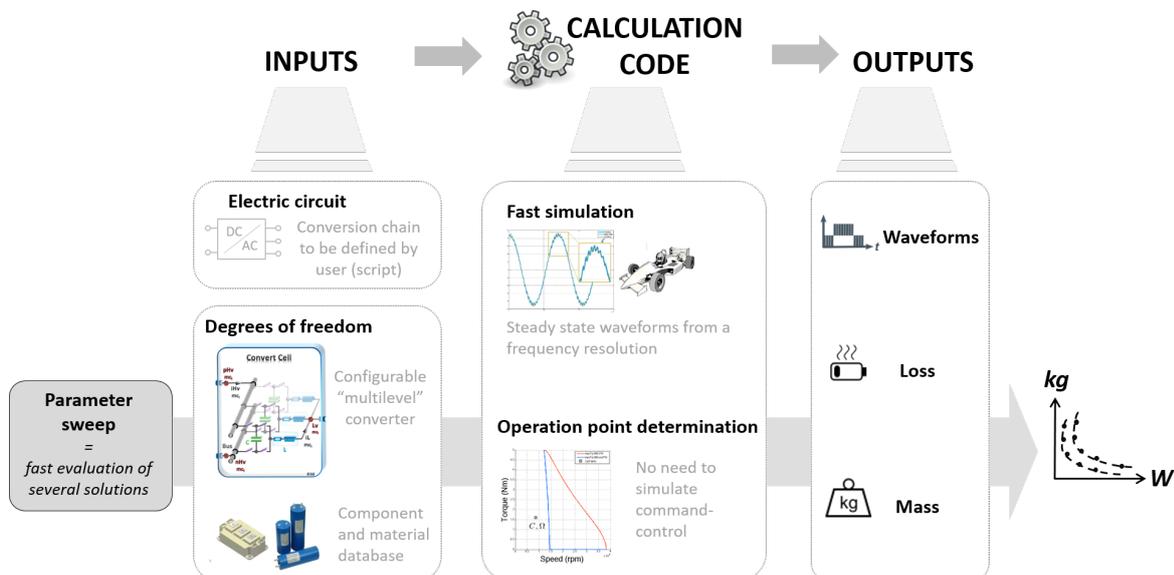


FIGURE 13 – Principe général de l'Ootee (issue de l'illustration proposée lors de l'action de valorisation menée avec la SATT)

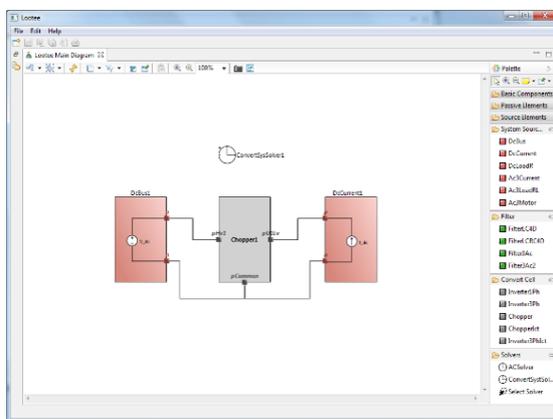
Dans la continuité de ce travail, afin d'améliorer l'expérience utilisateur du prototype, une interface graphique ainsi que deux modules d'aide au dimensionnement ont ensuite été développés dans le cadre d'un « work package » d'un programme de recherche de l'aviation civile intitulé « Corac-Genome » de 2014 à 2016, plus particulièrement avec les travaux d'un post-doctorat d'un docteur en informatique, Adel Ziani de 2014 à 2016.

Cette interface graphique a été développée dans l'environnement *Eclipse* en utilisant deux modules open-source développés par l'entreprise *Obeo* :

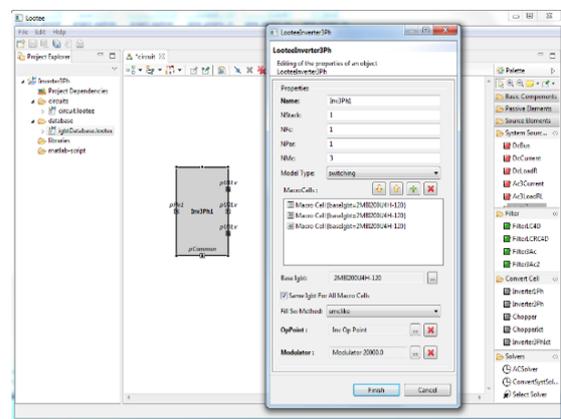
- le module Sirius [23], bien adapté pour développer rapidement des éditeurs graphique [24],
- le module acceleo [25] pour la génération de code qui sera ensuite interprété dans Matlab.

L'interface graphique permet :

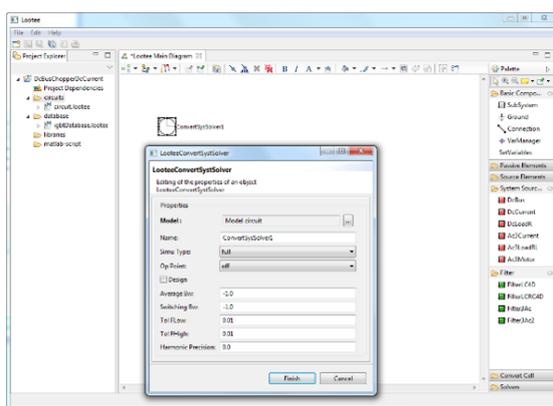
- la saisie graphique de circuits électriques : composants électriques élémentaires et sous-systèmes électriques type filtres, hacheurs, onduleurs. . . (figure 14a),
- la spécification des paramètres des composants et des sous-systèmes (figure 14b),
- la spécification d'un solveur et de ses paramètres (figure 14c),
- la génération d'un script Matlab décrivant le circuit électrique saisi et des options du solveur choisi (figure 14d).



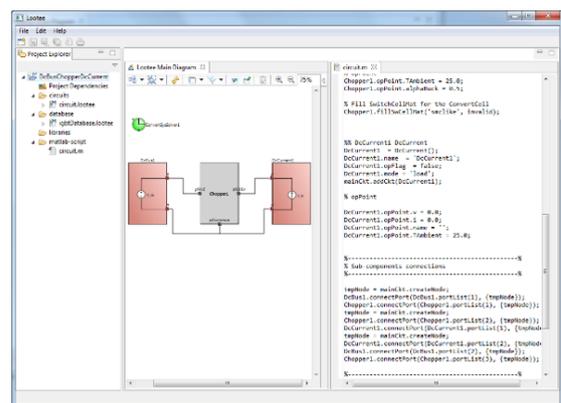
(a) Vue générale de l'interface présentant une chaîne de conversion hacheur



(b) spécification des paramètres d'un onduleur triphasé



(c) spécification des paramètres du solveur



(d) vue générale avec l'arborescence de dossiers d'un projet, la fenêtre de saisie du circuits et une fenêtre présentant le code Matlab généré

FIGURE 14 – Interface graphique du prototype logiciel l'Ootee, développée dans l'environnement Eclipse

Deux modules d'aide au dimensionnement de convertisseurs de puissance ont également été développés :

- un module de balayage de semiconducteurs qui permet :
  - de calculer les pertes par conduction et commutation (à partir des formes d’ondes obtenues avec le solveur précédemment développé) pour différents semiconducteurs d’une base de données qui peut être modifiée par l’utilisateur,
  - de trier les résultats en fonction des pertes ou des caractéristiques des semiconducteurs (calibres en courant, en tension, résistance thermique, etc),
- un module de dimensionnement de filtre DC de mode différentiel du second ordre. Ce module permet actuellement de calculer les valeurs des éléments inductance et condensateur à partir :
  - d’une spécification fréquentielle (via un gabarit ou une ondulation maximale en régime permanent),
  - d’une spécification de dépassement en régime transitoire.

Ce prototype logiciel ainsi dénommé « l’Ootee » a fait l’objet d’un dépôt à l’Agence de Protection des Programmes (APP) et d’une action de valorisation menée par la SATT de Toulouse, Toulouse Transfer Technologies qui a abouti à une licence d’utilisation exclusive pour la start-up Power Design Technologies.

Pour illustrer plus concrètement la teneur de ce travail, je détaillerai ci-dessous brièvement trois points clés qui ont marqué l’originalité du travail autour de ce prototype logiciel : la première brique logicielle formalisant les degrés de liberté offerts pour la conception, le solveur fréquentiel et la structuration du travail collaboratif.

**Première brique logicielle :** elle est issue de la formalisation des degrés de liberté offerts par les convertisseurs multicellulaires, les stratégies de modulation et les choix de composants semiconducteurs ; c’est une valorisation des activités de recherche menées auparavant dans le groupe convertisseurs du Laplace. Les topologies multicellulaires peuvent en effet offrir des degrés de liberté pour concevoir des convertisseurs avec de meilleurs compromis masse - rendement que les solutions actuelles (perspective notamment confirmée a posteriori par J. W. Kolar [26]). L’élément central de cette brique logicielle est ainsi une « macrocellule » de commutation, dénommée *macrocell* et fait intervenir le nombre de cellules en série  $n_{FC}$ , en parallèle  $n_{PAR}$  et empilées  $n_{STACK}$ . Cette brique permet d’obtenir les pertes dans les interrupteurs semiconducteurs, les formes d’ondes ou les spectres des tensions et de courant (respectivement côté basse tension et haute tension de la macrocellule de commutation) et est illustrée figure 15.

**Solveur fréquentiel :** son implémentation découle d’une approche initiée dans le post-doctorat de Sylvain Girinon mené en 2011-2012. Il s’agit de déterminer très rapidement et directement en régime permanent les formes d’ondes en tension et courant de topologies de convertisseurs à base de cellules de commutation dure et en conduction continue [27].

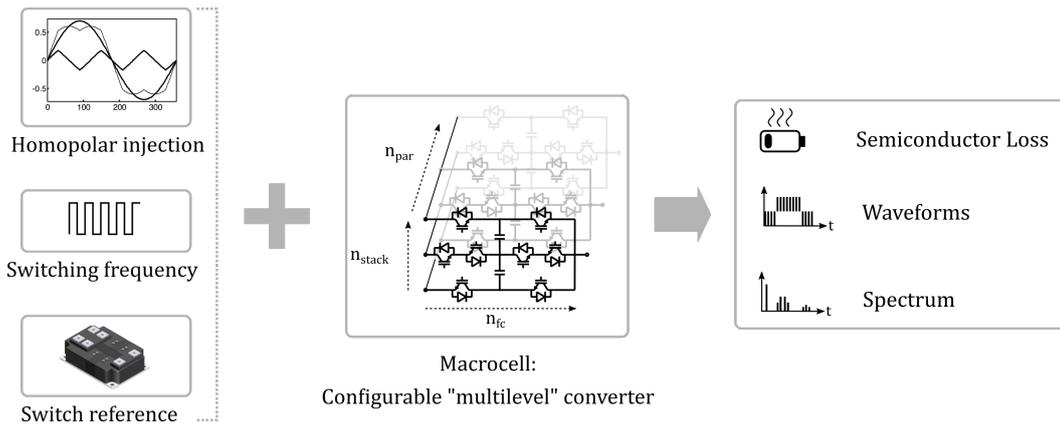


FIGURE 15 – Macrocell et la première brique du prototype logiciel

Un état de l'art sur les solveurs circuit, leur temps de simulation et la convergence vers le régime permanent a confirmé que les outils de simulation circuit dédiés à l'électronique de puissance (i.e. capables de gérer les discontinuités générées par les commutations naturelles des interrupteurs) recherchant un régime permanent sont rares. Quelques travaux - justement dans le cadre de la conception de convertisseurs de puissance - illustrent l'intérêt de disposer de solveurs rapides de régime permanent, avec une approche fréquentielle [28] ou une approche temporelle [29].

Globalement, le principe du solveur fréquentiel développé au Laplace est basé sur deux principes. Le premier consiste à modéliser la cellule de commutation par une source de courant côté haute tension et une source de tension côté basse tension (figure 16).

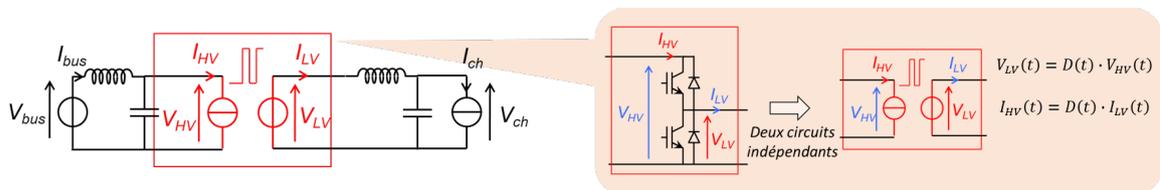


FIGURE 16 – Modèle de la cellule de commutation utilisé pour le solveur fréquentiel

Le second principe consiste à effectuer une résolution fréquentielle des signaux afin d'obtenir directement les formes d'ondes en régime permanent. Il est illustré figure 17 et peut être résumé en trois étapes :

1. les spectres fréquentiels du courant  $I_{HV}$  et de la tension  $V_{LV}$  sont obtenus via l'algorithme de la FFT;
2. la résolution via une analyse nodale modifiée (MNA) est appliquée à toutes les fréquences des spectres, et les différentes tensions et courants ( $I_{LV}$ ,  $V_{HV}$ ,  $V_{ch}$ ,  $I_{bus}$ ) sont déterminées;
3. l'algorithme de la FFT inverse est utilisé pour en déduire les formes d'ondes temporelles de part et d'autre de la cellule de commutation.

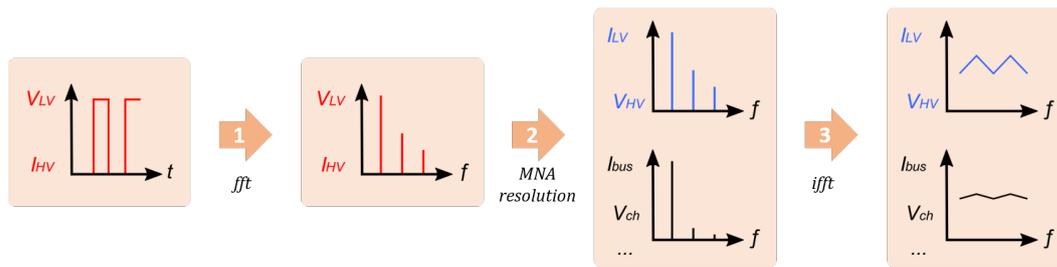


FIGURE 17 – Processus de la résolution fréquentielle

**Structuration du travail collaboratif :** Le travail sur ce prototype logiciel m’a également permis d’acquérir de nouvelles compétences :

- la maîtrise d’un formalisme proposé par la modélisation orientée objet, qui joue – à mon sens – un rôle essentiel dans la structuration des modèles afin de faciliter l’échange entre développeurs (et utilisateurs) ainsi que la maintenance,
- la maîtrise de l’outil de gestion de version *Git*, outil essentiel pour l’écriture de code et la collaboration entre développeurs.

Ces compétences m’ont permis de mettre en place une forge au sein du groupe et de promouvoir les bonnes pratiques de développement afin d’accompagner différentes activités de recherche relatives à la problématique « conception » menées par le groupe convertisseur statique du Laplace, pour le développement de modèles de conception [30] [31], et de proposer un « framework » pour la conception en électronique de puissance, qui sera détaillé dans la partie suivante.

## 2.3 OpenComp3d

L’objectif de ce travail était la constitution d’un « framework » open-source pour la conception en électronique de puissance [32].

Si différents langages de modélisations existent déjà pour les phases de conception dans l’industrie, comme Modelica ou SysML, ils ne sont cependant pas adaptés à la conception en électronique de puissance car ils ne permettent pas de déterminer correctement les interactions électriques entre les différents composants d’un convertisseur de puissance.

J’ai donc constitué le framework OpenComp3d - publié dans un dépôt « GitHub » sous une licence MIT - qui propose un formalisme de description physique 3D des composants de puissance, utilisant une approche de modélisation orienté objet. Chaque modèle est ainsi décrit par des propriétés physiques (matériaux, dimensions) et des méthodes qui permettent de calculer les masses, volumes, pertes et températures (figure 18).

Ce formalisme permet de grouper des objets ou composants dans des catégories qui partagent du même code (pour des propriétés ou des méthodes de calcul de pertes, de masses, etc) grâce à l’approche orienté objet mais aussi d’assembler différents mo-

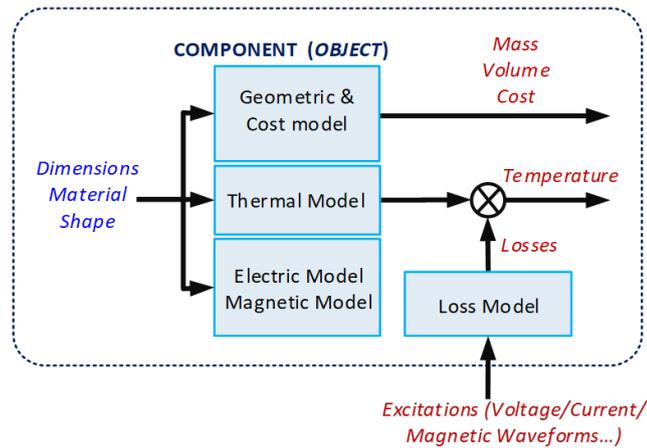
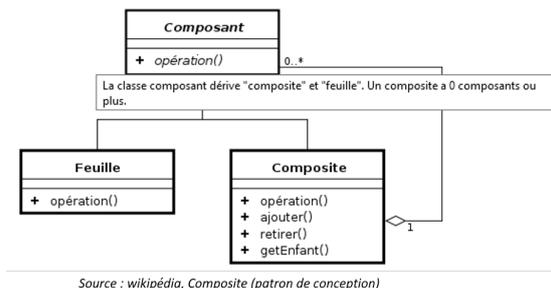


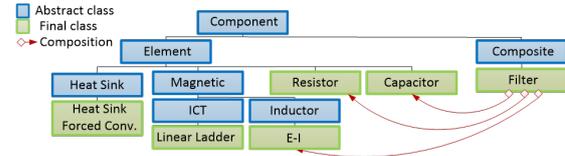
FIGURE 18 – Principe de description de modèle d'un composant de puissance

dèles de composants (par exemple des résistances, inductances, condensateurs, etc) pour constituer des sous-systèmes du convertisseur (par exemple des filtres) qui se manipulent comme des composants grâce au patron de conception « composite » [33], [34]. La figure 19(a) illustre le patron de conception « Composite » et la figure 19(b) son exploitation à travers un diagramme de classe d'OpenComp3d.



Source : wikipédia, Composite (patron de conception)

(a) Patron de conception composite



(b) Exemple d'un diagramme de classe du framework OpenComp3d

FIGURE 19 – Patron de conception composite et exploitation dans le framework OpenComp3d

Le respect de ce formalisme de modélisation permettra aux utilisateurs :

- d'associer des modèles déjà existant avec leurs propres modèles,
- d'accéder directement aux paramètres des composants (dimensions, matériaux, etc) qui constituent les degrés de liberté pour la phase de conception,
- et de pouvoir ainsi intégrer tous les composants du convertisseur (ou d'un de ses sous-systèmes) dans un process de dimensionnement.

La figure 20 présente un exemple de process de dimensionnement - basé sur un algorithme d'optimisation - résumé en trois grandes étapes :

- *Etape 1* : Description de la fonction objectif, spécifications et définition de la topologie
- *Etape 2* : Process de dimensionnement
  - 2.a) Description des paramètres de dimensionnement;

- 2.b) Description des modèles (électriques, magnétiques et thermique);
  - 2.c) Concaténation des différents modèles et simulation;
  - 2.d) Récupération des températures, masses, volumes, pertes, calcul des contraintes des composants et du système;
  - 2.e) Algorithme d'optimisation : définition de la fonction objectif, récupération des différentes contraintes;
  - 2.f) Algorithme d'optimisation : test de la fonction objectif et des respects des contraintes;
- *Etape 3* : vérification avec une simulation numérique (simulation par éléments finis typiquement).

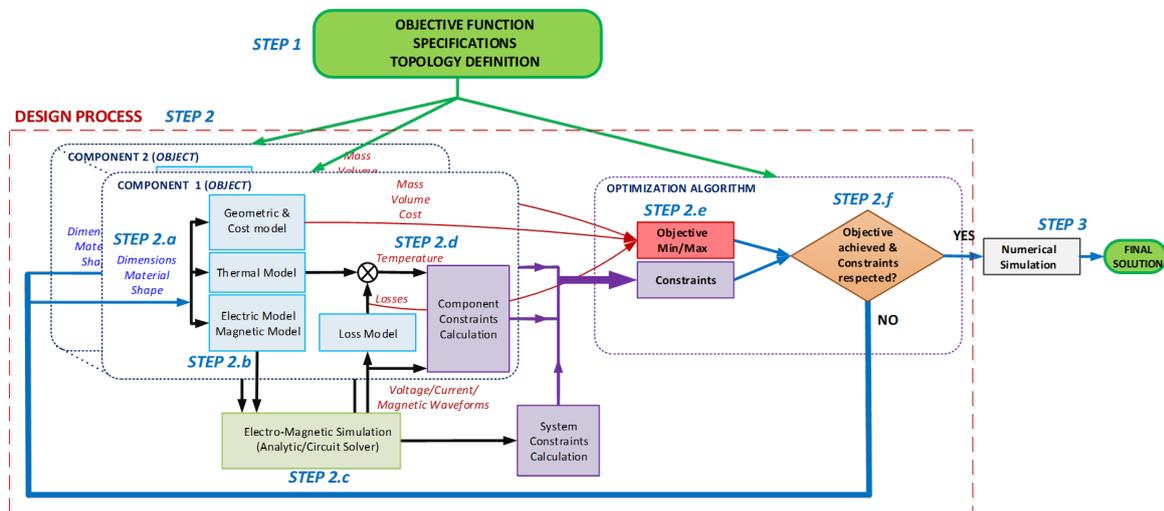


FIGURE 20 – Process de dimensionnement - basé sur algorithme d'optimisation - utilisant le framework OpenComp3d

Sur ce principe, le travail présenté dans [32] a proposé, pour illustrer l'utilisation de ce framework, le dimensionnement d'une inductance d'un hacheur dévolteur, en évaluant la sensibilité du coefficient de convection sur la masse. Ce dimensionnement a ensuite été validé avec une simulation par éléments finis avec le logiciel *femm*.

## 2.4 Action de valorisation : start-up Power Design Technologies et logiciel PowerForge

Il s'agit d'une action de valorisation du prototype logiciel d'aide à la conception en électronique de puissance *Ootee*. A l'issue des travaux sur le prototype logiciel, une première étude menée par Nicolas Videau pour son mémoire de master « Management des Nouvelles Technologies » à l'IAE de Toulouse a proposé la création d'une start-up pour distribuer un logiciel d'aide à la conception de convertisseurs statiques.

Nous faisons une nouvelle fois le constat que les ingénieurs disposent de nombreux logiciels de simulation (génériques ou très spécifiques), mais qu'ils ne disposent que de peu d'outils métier pour la phase de conception. Ce besoin de nouveaux outils a été d'ailleurs plusieurs fois exprimé depuis plus de 10 ans [35], [36].

C'est ainsi, que nous, cinq anciens docteurs en génie électrique du Laplace (Guillaume Delamare, Thierry Meynard, Régis Ruelland, Nicolas Videau et moi-même) avons donc décidé de créer la société Power Design Technologies pour développer et distribuer *PowerForge*, le premier logiciel de conception de convertisseurs de puissance. Trois d'entre nous (Thierry Meynard, Nicolas Videau et moi-même) sont même retournés sur les bancs de l'école pour suivre la formation « HEC Challenge Plus », programme d'aide à la création d'entreprises innovantes et de hautes technologies !

Ce projet a bénéficié de plusieurs prix ou concours : prix d'innovation de la fondation Université Capitole, concours d'innovation i-Lab de la BPI, et prix d'innovation de l'INPT. Une levée de fonds a été effectuée durant l'été 2017 permettant d'assurer le développement du produit pour les premières années.

La start-up Power Design Technologies a finalement été acquise durant l'été 2021 par la société Gamma Technologies.

### 2.4.1 Positionnement, caractéristiques

L'utilisation de la plateforme logicielle PowerForge se situe dans une phase de conception amont, appelée pré-dimensionnement, et adressait - jusqu'en automne 2020 - deux types d'étage de conversion : un convertisseur DC / DC non isolé réversible et un onduleur MLI triphasé.



FIGURE 21 – Process de pré-dimensionnement proposé par PowerForge

Cette phase de pré-dimensionnement est illustrée par un flux de travail (figure 21) qui a pour objectif :

1. à partir des spécifications électriques (niveaux de tension, puissance transférée, contrainte thermique, contraintes de filtrage),
2. de balayer différents degrés de liberté (topologies multiniveaux, référence des composants semiconducteurs, fréquence de découpage, etc),
3. afin d’appréhender leur influence sur la masses, les pertes, etc, en comparant les différentes solutions possibles,
4. de sélectionner les solutions les plus prometteuses par rapport à ses critères de conception,
5. et d’exporter ces solutions vers des outils métier plus classiques pour continuer le process de conception.

Cette plateforme logicielle est proposée sous la forme d’un service logiciel (abonnement annuel) via une application web accessible depuis la plupart des navigateurs et permet ainsi une collaboration multi-utilisateurs sur un même projet.

#### 2.4.2 Rôles et missions

Cette aventure a duré pour ma part un peu plus de 3 ans - jusqu’au mois de février 2020 - et cette période enrichissante sur de nombreux plans techniques et humains m’a permis d’assumer en parallèle différents rôles :

- ingénieur support où il s’agit d’assurer les relations avec les prospects : démonstration du logiciel, tutoriaux, et recueil des besoins;
- « product Owner » (terme utilisé dans la méthodologie de développement agile dite « scrum » qui a pour meilleure traduction *responsable produit*) : il s’agit de prioriser le développement des fonctionnalités à venir pour maximiser la valeur du produit (chaque nouvel ajout de fonctionnalité doit permettre d’acquérir de nouveaux utilisateurs).
- responsable scientifique où il s’agit de définir la stratégie des activités R&D pour le développement des fonctionnalités à venir qui le nécessite.

De par la nature de son activité, l’effort de recherche & développement de Power Design Technologies a été prépondérant les premières années de l’existence de l’entreprise : l’offre commerciale était encore en pleine élaboration à partir notamment de nombreux résultats et pistes issus des activités de recherche académique liées au développement du prototype « l’Ootee ».

Différentes activités R& D ont ainsi été menées les premières années de la vie de la start-up, spécifiques à l’implémentation logicielle d’algorithmes de conception des sous-systèmes de convertisseurs de puissance et sont synthétisées dans les tableaux ci-après :

<b>Estimation multi-paramétrique de composants de puissance et matériaux magnétiques à partir des données constructeur</b>		
<i>Objectifs</i>	<i>Problématiques</i>	<i>Travaux</i>
Constitution d'une bibliothèque de composants semiconducteurs de puissance et de matériaux magnétiques	Collecte d'un grand nombre de données brutes issues de datasheets publiées	Mise en place d'un outillage logiciel + Harmonisation du format des données (électriques, thermiques et dimensionnelles)
	Obtention de données de pertes par commutation de composants Mosfet-Si	Développement et la validation de modèles de simulations LTspice de composants Mosfet-Si pour l'obtention de tables de données de pertes

<b>Couplage d'un algorithme analytique à un solveur circuit rapide pour le dimensionnement de convertisseurs de puissance</b>		
<i>Objectifs</i>	<i>Problématiques</i>	<i>Travaux</i>
Intégration du solveur circuit numérique fréquentiel développé dans le prototype logiciel l'Ootee du Laplace dans l'algorithme de conception de convertisseurs	Obtention de formes d'ondes multiniveaux dites optimales vis-à-vis de la tension côté basse tension ou vis-à-vis du courant côté haute tension	Définition des règles de permutation des ordres de commande des macrocellules hybrides (mise en parallèle d'associations de cellules elles-mêmes en série en Flying Capacitor)
	Résonance des filtres avec du bruit numérique issu de la FFT pour des résolutions de problèmes à faible pas fréquentiel	Modification des données issues de la FFT afin de réduire du bruit numérique sur des raies spectrales
	Déséquilibre des courants de phaselette dans les structures parallèles ou de courants des condensateurs flottants dans les structures série	Recherche de la périodicité des formes d'ondes (le motif est périodique sur $n_{cell} \cdot f_0$ )
	Problème mémoire du au calcul numérique vectoriel du modulateur de l'ensemble des instants de commutation sur l'ensemble de la période de fonctionnement (pour les topologies multi-niveaux)	Calcul analytique des instants de commutation sur chaque demi-période de porteuse qui permet de ne stocker qu'un couple (date, valeur)
	Minimisation du temps de calcul pour des ratios élevés fréquence de découpage / fréquence de modulante	Evaluation de la méthode FFT2D qui ne réalise le calcul que sur $f = k \cdot f_0 + p \cdot f_{dec}$ où $f_0$ est la fréquence fondamentale, et $f_{dec}$ la fréquence de découpage et $k, p$ sont des entiers naturels. Evaluation d'enveloppes spectrales et temporelles.

<b>Approches de dimensionnement de composants passifs : dissipateurs, inductances et condensateurs</b>		
<i>Objectifs</i>	<i>Problématiques</i>	<i>Travaux</i>
Dissipateurs : Minimisation de la masse	Détermination du facteur de forme	Détermination d'une disposition optimale de semiconducteurs de puissance (non abouti)
	Garantir la détermination d'un minimum global pour la masse	Trouver une formulation qui soit adaptée à des problèmes d'optimisation convexe qui garantissent le minimum global (non abouti)
Inductances : amélioration de l'estimation des pertes cuivre AC	Le calcul plus précis des pertes cuivre nécessite une estimation 2D du champ magnétique dans la fenêtre de l'inductance (à cause de l'influence de l'entrefer), mais aucune formulation universelle n'existe.	Réalisation d'une approche hybride de modélisation des pertes cuivre en utilisant des interpolations linéaires sur un nuage de points obtenus à partir des calculs par éléments finis réalisés « off-line », c'est-à-dire en dehors de la phase de design. Cette démarche permettra de bénéficier la rapidité du calcul analytique et la précision des éléments finis
Condensateurs : considération des éléments parasites lors de dimensionnement des capacités dans les filtres	Les designs des filtres déterminent généralement une valeur de capacité à atteindre qui ne prend pas en compte les non-idéalités du condensateur (effets résistifs et inductifs). De ce fait, les performances finales du filtre ne respectent pas les contraintes, surtout quand la fréquence de découpage est élevée	Démarche qui détermine - en tenant compte des effets parasites - le nombre de condensateurs nécessaires en parallèle et en série pour satisfaire les différentes contraintes de tenue en tension, en courant, température maximale, d'ondulation de tension, et de spectre fréquentiel

Dimensionnement de convertisseurs multiniveaux		
Recherche d'une distribution optimale des fonctions de commutations dans les convertisseurs multiniveaux « hybrides » pour les convertisseurs dc-dc et dc-ac monophasés	La distribution des ordres de commande pour les macrocellules « hybrides », i.e. la mise en parallèle d'associations de cellules elles-mêmes en série en « Flying Capacitor » (FC), n'est pas toujours « optimale » vis-à-vis de la tension côté basse tension ou vis-à-vis du courant côté haute tension en fonction du nombre de cellules en parallèle et du nombre de cellules en série.	Détermination d'un algorithme qui permet : dans le cas où le nombre de cellules en parallèle et le nombre de cellules en série sont premiers entre eux, d'obtenir des formes d'ondes « optimales » à la fois en courant et en tension; dans le cas où le nombre de cellules en parallèle et le nombre de cellules en série ne sont pas premiers entre eux, d'obtenir des formes d'ondes « optimales » en tension et des formes d'ondes en courant se rapprochant le plus possible de formes d'ondes optimales et ce d'autant plus lorsque le nombre de mise en parallèle augmente.
Proposer le dimensionnement d'onduleurs triphasés multiniveaux : NPC, T-type et SMC	Développer un algorithme générique qui permet de designer les différentes topologies « multiniveaux ». Ces algorithmes doivent être également adaptés pour des interrupteurs discrets ou des modules spécifiques. Calcul des pertes dans la topologie NPC au zéro de courant.	Trois formalismes d'adressage : 1- décrivant l'interrupteur physique sous une forme matricielle et associant les ordres de commande des cellules et les états de conduction de chaque puce. 2- associant les références des puces qui interviennent dans chaque cellule logique de commutation (1 interrupteur pouvant faire partie de plusieurs cellules de commutation comme le NPC). 3- permettant de distribuer les pertes des cellules dans les interrupteurs physiques correspondant et de calculer la température de jonction de chaque interrupteur.
Synthèse des meilleures stratégies multiniveaux vis-à-vis du filtre AC	Identifier les cas de déséquilibre des courants dans les inductances en parallèle côté basse tension, tensions aux bornes des condensateurs flottants dans les topologies « FlyCap ». Assurer une représentation fidèle avec le solveur fréquentiel	Détermination de l'impact des différents modes de commande sur le dimensionnement final du filtre AC, en fonction du type de convertisseur et du point de fonctionnement; étude ou recherche de différentes méthodes pour essayer d'équilibrer les tensions / courants dans une période du fondamental.
Détermination précise des mécanismes de conduction inverse de la mise en parallèle mosfet / diode	Comportement d'un module semiconducteur en conduction inverse en fonction de sa structure (diode externe en anti-parallèle ou non), du courant total et de la température de jonction des puces.	Détermination de la répartition des courants en conduction inverse des mosfets en redressement synchrone entre le canal et la diode (interne ou externe) en fonction du courant total et des températures de jonction.

A titre d'illustration, je détaillerai ci-dessous les travaux effectués pour le dimensionnement des inductances et notamment pour l'amélioration de l'estimation des pertes cuivre [37, 38]. Ces travaux ont été menés par André Leal Furlan qui a travaillé pendant un an pour Power Design Technologies et a été encadré par Alvaro Morentin, Thierry Meynard (au titre de son concours scientifique) et moi-même.

Le calcul précis des pertes cuivre nécessite une estimation 2D du champ magnétique dans la fenêtre de l'inductance (à cause de l'influence de l'entrefer), mais aucune formulation universelle n'existe. Or, la plupart des formulations repose sur l'hypothèse que le champ magnétique est 1D, hypothèse qui n'est pas satisfaite dans le cas d'un grand nombre d'inductances à cause de l'entrefer des noyaux. De plus, pour des conducteurs rectangulaires, les formulations ne sont pas adaptées pour des cas où les dimensions largeur et longueur sont similaires. La difficulté est donc de trouver une formulation d'évaluation des pertes cuivre qui soit rapide pour être utilisée dans une démarche de concep-

tion (contrairement aux calculs par éléments finis) mais à la fois suffisamment précise pour que le design soit cohérent avec la réalité (contrairement aux formules analytiques de la littérature).

Le premier objectif de ce travail était de développer une méthode permettant d'évaluer les pertes cuivre AC avec un excellent compromis précision - rapidité afin que celui-ci puisse être intégré dans un processus de dimensionnement comme illustré sur la figure 22a.

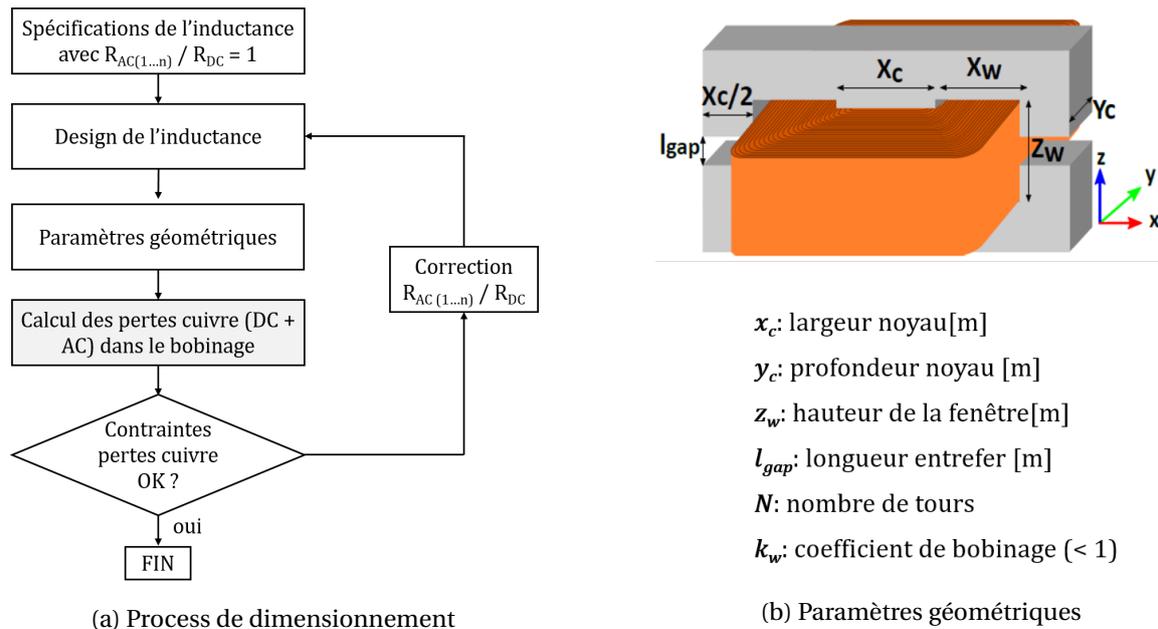


FIGURE 22 – Dimensionnement d'une inductance avec calcul des pertes cuivre AC

Cette méthode d'évaluation des pertes cuivre utilise ainsi des interpolations linéaires sur un nuage de points obtenus à partir des calculs par éléments finis réalisés « off-line », c'est-à-dire en dehors de la phase de design. Cette démarche permet de bénéficier de la rapidité du calcul analytique et de la précision des éléments finis. Ce travail a comporté différentes étapes :

- détermination des variables auxquelles le calcul de pertes cuivre est sensible et du nombre de points nécessaire pour couvrir les variations de géométrie : une relation homothétique a ainsi été constaté entre les différentes équations physiques, ce qui a permis d'enlever une variable et donc de réduire le nombre de simulations à faire.
- extraction des données sur la résistance haute fréquence à partir d'un modèle par éléments finis pour différentes géométries (EE et tore) et types de bobinages (rond et feuillard) : 210 000 simulations 2D ont ainsi été réalisées dans un temps de 4 mois.
- exploitation de cette surface de données avec un algorithme d'interpolation pertinent qui sera appelé à l'issue d'un dimensionnement : un algorithme d'interpolation linéaire sur une grille régulière a ainsi été développé en utilisant la classe « RegularGridInterpolator » de la bibliothèque scientifique *Scipy* [39].

Cette approche a été évaluée en calculant les erreurs relatives du ratio  $R_{AC_n}/R_{DC}$  - obtenues pour 10 000 dimensionnements différents d'inductances - pour cette approche ou pour la méthode de Dowell décrite dans [40] (qui est équivalente à l'approche proposée en terme de temps de calcul) avec la relation suivante :

$$E_{rr}\left(\frac{R_{AC_n}}{R_{DC}}\right) = 100 \cdot \left| \frac{\left(\frac{R_{AC_n}}{R_{DC}}\right)_{FEM} - \left(\frac{R_{AC_n}}{R_{DC}}\right)_{Dowell / \text{approche proposée}}}{\left(\frac{R_{AC_n}}{R_{DC}}\right)_{FEM}} \right| \quad (2.1)$$

La figure 23 représente la fréquence d'apparition de ces erreurs relatives et permet de mettre en évidence l'amélioration de la précision par rapport la méthode de Dowell.

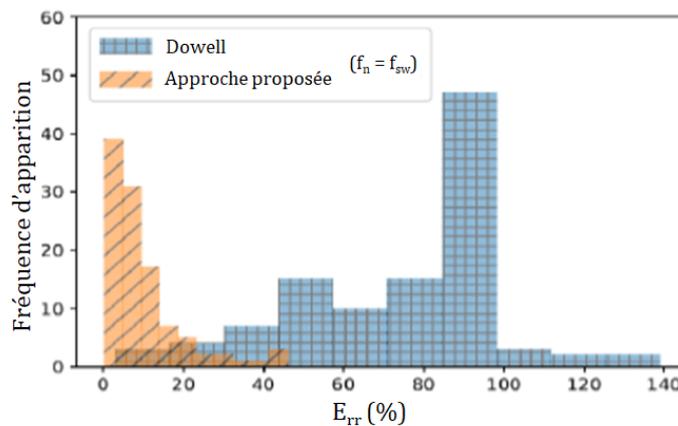


FIGURE 23 – Fréquence d'apparition des erreurs relatives entre la méthode de Dowell ou la méthode proposée et un calcul par éléments finis pour l'évaluation des pertes cuivre

Dans un second temps, cette surface de données développée a été exploitée avec un algorithme d'optimisation de type « Geometric programming » garantissant un optimum global avec une formulation permettant d'intégrer l'optimisation de la masse de l'inductance dans un problème de type convexe [38].

Pour conclure sur cette partie concernant Power Design Technologies, ces activités m'ont ainsi permis d'obtenir une vision plus opérationnelle des problématiques industrielles de R&D, et donc davantage de recul sur les problématiques de dimensionnement mais plus largement de simulation et de prototypage virtuel en électronique de puissance.

Cette expérience m'a également donné l'opportunité d'échanger avec d'autres distributeurs logiciels et notamment avec la start-up québécoise Aesim, qui propose le logiciel de simulation Simba.

A l'issue de mon expérience avec Power Design, j'ai poursuivi les échanges avec Aesim et nous avons décidé de collaborer pour que je puisse apporter mon expérience, comme ce sera décrit dans la partie suivante.

## 2.5 Expertise scientifique pour le développement du logiciel Simba

### 2.5.1 Qu'est-ce que Simba?

Simba est un logiciel de simulation d'électronique de puissance (illustré figure 24) développé par la société québécoise Aesim, qui a été créée par Emmanuel Rutovic. L'ambition est de créer une plateforme suffisamment simple pour les étudiants et les amateurs, mais suffisamment rapide et puissante pour les cas d'utilisation les plus complexes. Il se positionne avant tout sur le marché des logiciels de simulation comme *Psim*® ou *Plecs*®.

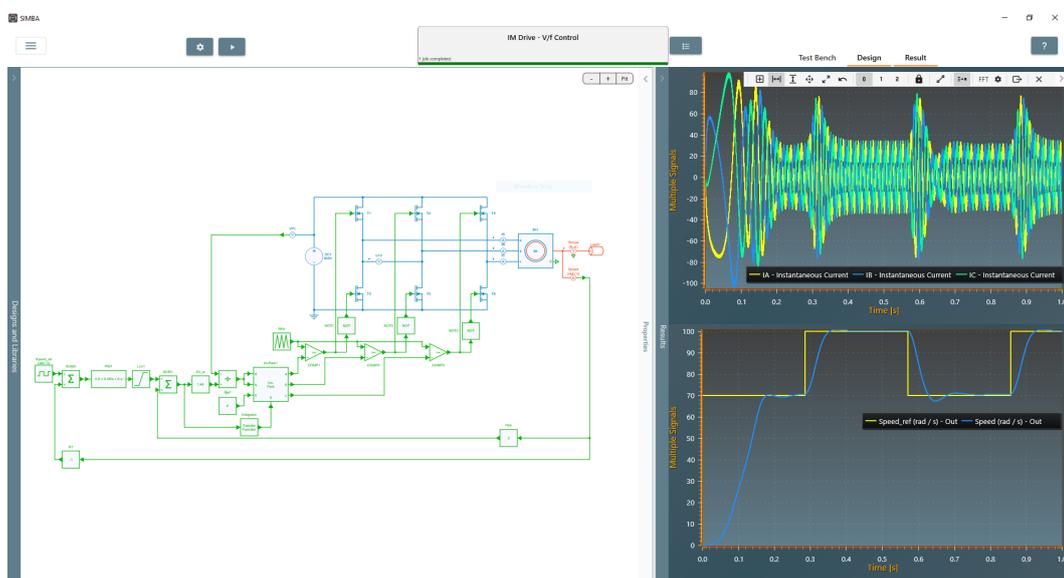


FIGURE 24 – Vue générale du logiciel Simba : fenêtres d'édition du circuit et de visualisation de courbes

L'originalité de Simba est d'inclure une nouvelle génération de moteur de simulation appelée « Predictive Time-Step solver » qui permet automatiquement de trouver le pas de temps optimal pour simuler toutes les constantes de temps et les événements d'un système sans compromettre la précision.

Simba est à - mon sens - particulièrement adapté pour les activités d'enseignement et de recherche car :

- il est gratuit et libre d'utilisation pour les activités d'enseignement et de recherche académique,
- il propose une API python, qui permet de développer des scripts pour effectuer, entre autres, des études de sensibilité paramétrique,
- il propose une roadmap publique et participative sous la forme d'un dépôt sous GitHub.

## 2.5.2 Mes contributions

Mes contributions à ce projet émarginent dans les missions suivantes :

- participation à la roadmap du logiciel,
- recueil des besoins utilisateurs,
- définition des fonctionnalités métier (support code-C, analyse thermique, etc),
- développement d'exemples et de cas d'utilisation.

## 2.6 Liste des publications

### Brevets

1. T. Meynard et G. Fontes, « Convertisseur continu-continu et architecture électrique associée », WO2017089686A1, juin 01, 2017. <https://patents.google.com/patent/WO2017089686A1/>
2. G. Fontes, T. Meynard, et R. Ruelland, Object Oriented Tool for Electrical Engineering (Ootee), Dépot Agence de Protection des Programmes Institut National Polytechnique de Toulouse, 2014.IDDN.FR.001.360033.000.S.P.205.000.20600
3. V. Phlippoteau, A. Rakotondrainibe, C. Turpin, et G. Fontes, « Method for determining a state of health for an electrochemical device », US8907675B2, déc. 09, 2014. <https://patents.google.com/patent/WO2010097355A1/>

### Reuves internationales

1. A. Morentin et al., « OpenComp3d : An open-source framework dedicated to design in power electronics », *Mathematics and Computers in Simulation*, vol. 158, p. 477 489, avr. 2019, <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2018.11.006>.
2. N. Videau et al., « High Ratio Non-Isolated DC–DC Converter for Hydrogen Battery Using a 50 kW PEM Fuel Cell », *Fuel Cells*, vol. 17, no 2, p. 187 195, 2017, <https://doi.org/10.1002/fuce.201600071>
3. R. R. Mariani, F. Lacressonniere, G. Fontes, et X. Roboam, « Design of a medium voltage power converter-storage devices embedded in a hybrid emergency network for more electrical aircraft », *Mathematics and Computers in Simulation*, vol. 91, p. 72 90, mai 2013, <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2012.07.009>.
4. L. Ménard, G. Fontès, et S. Astier, « Dynamic energy model of a lithium-ion battery », *Mathematics and Computers in Simulation*, vol. 81, no 2, p. 327 339, oct. 2010, <https://doi.org/10.1109/TIE.2010.2044731>.
5. G. Fontes, C. Turpin, et S. Astier, « A Large-Signal and Dynamic Circuit Model of a H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> PEM Fuel Cell : Description, Parameter Identification, and Exploitation », *Mathematics and Computers in Simulation*, vol. 81, no 2, p. 340 350, oct. 2010, <https://doi.org/10.1109/TIE.2010.2044732>.

- IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, no 6, p. 1874 1881, juin 2010, <https://doi.org/10.1109/TIE.2010.2044731>.
6. C. Darras et al., « Sizing of photovoltaic system coupled with hydrogen/oxygen storage based on the ORIENTE model », *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 35, no 8, p. 3322 3332, avr. 2010, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.01.060>
  7. G. Fontes, C. Turpin, S. Astier, et T. A. Meynard, « Interactions Between Fuel Cells and Power Converters : Influence of Current Harmonics on a Fuel Cell Stack », *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 22, no 2, p. 670 678, mars 2007, <https://doi.org/10.1109/TPEL.2006.890008>.
  8. R. Saisset, G. Fontes, C. Turpin, et S. Astier, « Bond Graph model of a PEM fuel cell », *Journal of Power Sources*, vol. 156, no 1, p. 100 107, mai 2006, <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2005.08.040>.

### Contributions à des ouvrages

1. X. Roboam, S. Astier, H. Foch, et G. Fontes, « Application des Bond Graphs Causaux aux systèmes à énergie renouvelable », *Techniques de l'ingénieur Systèmes électriques pour énergies renouvelables*, vol. base documentaire : TIB248DUO, no ref. article : d3970, 2006, [lien](#).

### Actes de colloques

1. G. Fontes, F. Boige, A. Morentin, G. Delamare, T. Meynard, et N. Videau, « Semiconductor loss estimation in an innovative global power converter designer », in *PCIM Europe digital days 2020; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management*, juill. 2020, p. 1 7.
2. A. Furlan, T. Meynard, A. Morentin, M. L. Heldwein, et G. Fontes, « Fast Hybrid Design Approach for Optimization of Inductors », in *PCIM Europe digital days 2020; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management*, juill. 2020, p. 1-8.
3. A. Furlan, A. Morentin, G. Fontes, G. Delamare, M. L. Heldwein, et T. Meynard, « Homothetic Method to Compute Winding Losses in the Design of Power Inductors », in *2019 IEEE 15th Brazilian Power Electronics Conference and 5th IEEE Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC)*, déc. 2019, p. 1 6, <https://doi.org/10.1109/COBEP/SPEC44138.2019.9065497>.
4. G. Fontes et al., « Fast Solver to Get Steady-State Waveforms for Power Converter Design », in *PCIM Europe 2018; International Exhibition and Conference for Po-*

- wer Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management*, juin 2018, p. 1 7.
5. N. Videau et al., « 5-phase interleaved buck converter with gallium nitride transistors », in *The 1st IEEE Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications*, oct. 2013, p. 190 193, <https://doi.org/10.1109/WiPDA.2013.6695594>.
  6. F. Lacressonnière, E. Bru, G. Fontes, et X. Roboam, « Experimental validation of a hybrid emergency network with low and medium voltage Li-Ion batteries for more electrical aircraft », in *2013 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE)*, sept. 2013, p. 1 9, <https://doi.org/10.1109/EPE.2013.6634664>.
  7. R. R. Mariani, F. Lacressonnière, G. Fontes, et Roboam, « Design of Power Converter Devices embedded in a Hybrid Emergency Network for More Electrical Aircraft », présenté à *Electrimacs 2011*, Cergy-Pontoise, France, 2011.
  8. L. Ménard, S. Astier, G. Fontès, J.-M. Blaquière, C. Turpin, et F. Gailly, « Modeling of an hybrid solar car with a lithium-ion battery », in *2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, sept. 2010, p. 1 6, <https://doi.org/10.1109/VPPC.2010.5729064>.
  9. G. Fontes, B. Sareni, et X. Roboam, « Systemic design of multidisciplinary electrical energy devices : A pedagogical approach », in *2009 13th European Conference on Power Electronics and Applications*, sept. 2009, p. 1 10.
  10. G. Fontes, C. Turpin, L. Ménard, O. Rallières, et S. Astier, « Applied Work for Engineer Students : Characterisation and modelling of a PEM Fuel Cell », présenté à *Electrimacs 2008*, Quebec, Canada, juin 2008.
  11. C. Azzaro-Pantel et al., « Development of sustainable energy systems : a new challenge for process systems engineering education », in *Computer Aided Chemical Engineering*, janv. 2008, vol. 25, p. 1167 1173, [https://doi.org/10.1016/S1570-7946\(08\)80201-5](https://doi.org/10.1016/S1570-7946(08)80201-5).
  12. S. Astier, G. Fontes, et C. Azzaro-Pantel, « Design of sustainable energy systems : a new challenge for Engineering Education », présenté à *Electrimacs 2008*, Quebec, Canada, juin 2008.
  13. G. Fontes, C. Turpin, R. Saisset, T. Meynard, et S. Astier, « Interactions between fuel cells and power converters influence of current harmonics on a fuel cell stack », in *2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference*, juin 2004, vol. 6, p. 4729-4735 Vol.6, <https://doi.org/10.1109/PESC.2004.1354835>.

## Publications dans des magazines

1. G. Fontes, "A Step Forward for Benchmark and Design Tools for Power Electronics", *Bodo's Power Systems*, Septembre 2019, pp 40-43, ISSN 1863-5598.

2. G. Fontes, "Optimize your Power Converters : With Faster, Lighter, Cheaper and More Efficient Designs. Get to the Next Level of Power Converters!", *Bodo's Power Systems*, Mai 2019, pp 98-101, ISSN 1863-5598

### **Forums, workshops, tutoriaux**

1. G. Fontes, S. Gabouj, "Design Automation of Power Electronic Converters : Demands, Current Solutions and Perspectives", *Industry Forum, PCIM 2020*, 8 juillet 2020.
2. G. Fontes, T. Meynard, "Si vs. SiC? 2-Level vs. x-Level topologies? Open The Competition With New Design Methods & Solutions for Power Electronics", *Tutorial, PEDS 2019*, 9 juillet 2019
3. G. Fontes, T. Meynard, "Methods and tools for power converter design", 2019, *Tutorial, PCIM 2019*, 6 mai 2019.
4. Meynard, Thierry, et Guillaume Fontes. "Design Methods and Tools for Power Electronics", *CERN Acceletator School : Power Converters*, 2014.



## Chapitre 3

# Bilan et perspectives pour les outils de conception en électronique de puissance

### Rappel du contexte

La manipulation de l'énergie sous sa forme électrique permet des conversions sous de hauts rendements impliquant depuis plusieurs années une utilisation croissante des convertisseurs d'électronique de puissance tant dans les applications stationnaires qu'embarquées. La conception de ces convertisseurs est ainsi un enjeu important dans le domaine industriel, car les prototypes sont généralement coûteux et cette phase de conception – qui se complique de plus en plus avec l'augmentation des contraintes des cahiers des charges (rendement, compacité, fiabilité, coût matière) – repose principalement sur l'expérience des ingénieurs du domaine. Il apparaît donc pertinent de développer des démarches de conception de ces convertisseurs qui visent à en optimiser le rendement de conversion. Or, étant donné que ces convertisseurs manipulent des flux d'énergie, chercher le rendement maximum conduit à concevoir des systèmes de conversion minimisant la densité de ces flux d'énergie et donc dont la taille tend vers l'infini... Le problème se pose alors pour les concepteurs de trouver des solutions présentant les meilleurs compromis entre le rendement et la masse ou le volume (compacité) du système de conversion.

Aujourd'hui, les concepteurs ont à leur disposition des logiciels d'analyse génériques ou très spécifiques, dont l'usage s'est à présent banalisé, mais ne répondant que partiellement ou localement à la problématique. En revanche, ils disposent encore de peu d'outils « Métier » dans le domaine de l'électronique de puissance pour les aider dans les phases mêmes « opérationnelles » de conception telles que le dimensionnement ou l'optimisation. Ce besoin de nouveaux outils a été plusieurs fois clairement exprimé ces dernières années surtout dans le milieu académique : dès les années 2010 [36], plus récemment dans des éditions spéciales de Power Electronics Magazine avec comme sujet principal l'automatisation de la conception [41, 42] et encore dernièrement lors du workshop ECPE

du 2 décembre 2021 qui étend le sujet à l'utilisation de l'intelligence artificielle pour la conception.

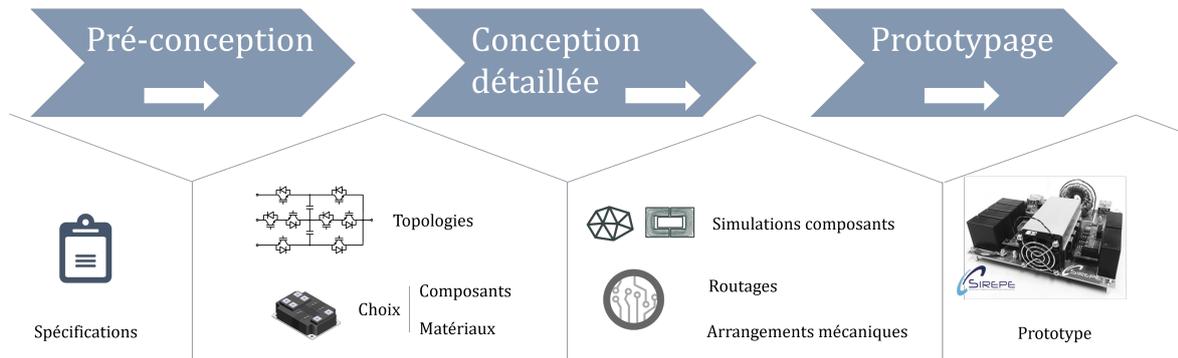


FIGURE 25 – Etapes de réalisation d'un convertisseur : des spécifications jusqu'au prototype

Afin de préciser ce qui est entendu dans cette partie par conception et également pré-conception (ou conception préliminaire) d'un convertisseur de puissance, la figure 25 propose un schéma de différentes étapes de réalisation d'un convertisseur de la spécification jusqu'au prototype qui illustre qu'il s'agit d'une démarche pluridisciplinaire complexe.

## Etat de l'art / Brève revue de l'offre des outils de conception

Ces quelques lignes ont pour objectif d'esquisser une tendance des outils et approches de dimensionnement disponibles sur le marché en ingénierie système et en électronique de puissance. La prétention de l'exercice effectué n'est pas de faire une revue exhaustive.

La plupart des outils actuels de simulation en ingénierie système et électronique de puissance (Dymola, Amesim, Plecs, Psim...) se présentent comme des outils d'aide à la conception pour l'ingénieur. Il s'agit en fait d'outils de simulation qui peuvent en effet s'intégrer dans une démarche plus globale de conception.

La thèse d'Andre Andreta [43] soutenue en Novembre 2019 propose un historique et un état des lieux intéressant sur les démarches et outils de conception en électronique de puissance. Cet état des lieux souligne ainsi le manque (voire l'absence) d'outils qui proposeraient de partir d'un cahier des charges pour aboutir à un produit final avec un process automatique.

### Simulation vs Conception

Avec un peu d'abstraction, il est possible de distinguer comme illustré sur la figure 26 :

- une démarche de *simulation* qui part d'un modèle issu de la description physique d'un composant ou d'un système et qui permet d'obtenir des résultats de performances : pertes, températures, formes d'ondes, courants, tensions, etc; cette démarche peut être considérée comme une *injection* au sens mathématique dans la

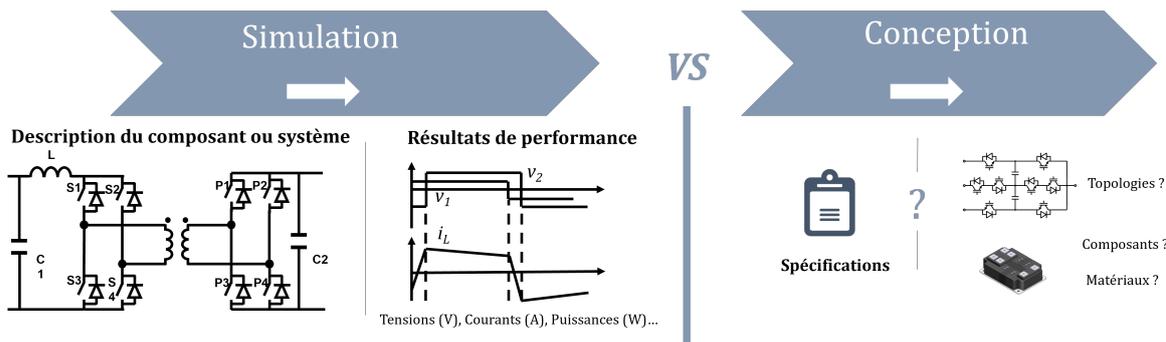


FIGURE 26 – Démarches de simulation vs conception

mesure où une simulation d'un modèle paramétré donne un et un seul jeu de résultats;

- une démarche de *conception* qui part d'un cahier des charges (spécifications) et qui peut aboutir à une infinité de solutions! Le rôle du concepteur est ensuite de choisir une solution qui répond au mieux à son cahier des charges par rapport aux critères de masse, volume, pertes, coût, etc de son cahier des charges.

## Des outils « système »

Dans le domaine de l'ingénierie des systèmes mécatroniques, la préoccupation pour des démarches de conception et d'optimisation des performances est bien installée. Les outils « système » comme Dymola, Amesim, etc, qui supportent Modelica - langage acausal de modélisation [44, 45, 46] - peuvent ainsi permettre des formulations de modèles dit « inverses » [47] qui sont une étape clé d'une démarche de conception. Ces concepts de simulation de modèles directs ou inverses sont illustrées sur la figure 27.

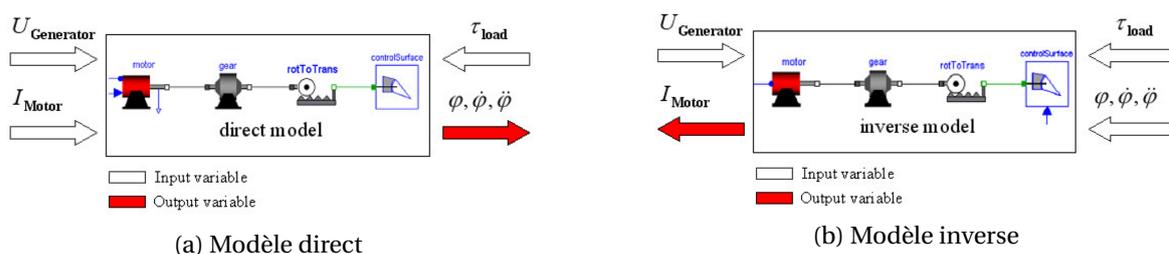


FIGURE 27 – Simulations des modèles direct et inverse (source : Object-Oriented Inverse Modelling of Multi-Domain Aircraft Equipment Systems and Assessment with Modelica [47])

Dans une démarche de conception préliminaire (comme la comparaison d'architectures) qui vise à estimer les principales caractéristiques (géométrie puis masse et pertes) des composants, les simulations de ces modèles inverses peuvent être associées à des lois d'échelles [48, 49, 50] ou des surfaces de réponse qui permettent de relier les paramètres de simulation (inertie, raideur, capacitance, etc), des dimensions géométriques et des zones de fonctionnement (couple nominal, couple max, vitesse max, courant max...).

Ces outils d'ingénierie système peuvent être aussi associés à des modèles plus fins des composants du système (par exemple les dissipateurs ou les composants magnétiques), issus d'autres outils métier (notamment les outils d'éléments finis), notamment via le standard d'interface « Fonctionnal Mockup Interface » (FMI) [51, 52] (souvent utilisé pour des problématiques de contrôle - commande). Ces associations avec des modèles plus fins peuvent aussi permettre d'effectuer des analyses plus fines d'estimation ou de validation des performances dans une démarche de conception plus détaillée.

On peut également distinguer des environnements davantage « orientés conception » comme CADES (Component Architecture for Design of Engineering Systems) [53] qui offre un cadre d'optimisation pour réaliser une conception de système optimisée.

## Des outils métiers pour l'électronique de puissance

Pour l'électronicien de puissance, on peut trouver quelques outils spécifiques sur le marché pour le dimensionnement d'alimentations à découpage ou pour le dimensionnement de composants comme les dissipateurs ou les composants magnétiques.

Pour le dimensionnement des alimentations à découpage, on peut citer PowerEsim [54], Webench®Power Designer de Texas Instruments [55], RidleyWorks®[56], qui proposent, à partir d'un cahier des charges, un dimensionnement de topologies bien identifiées à l'aide d'un catalogue de composants semiconducteurs, dissipateurs, condensateurs, inductances.

Pour le dimensionnement de composants magnétiques - ces derniers constituant souvent le point dur dans une phase de conception de convertisseurs de puissance - on peut ainsi citer Gecko-Magnetics (qui n'est plus maintenu aujourd'hui), le module de dimensionnement magnétique de SIMetrix / SIMPLIS® qui s'inspirent tous deux de travaux réalisés à l'ETH de Zurich, le module de RidleyWorks ou encore Frenetic qui utilise des algorithmes d'intelligence artificielle (notamment d'apprentissage profond). La plupart de ces outils ont été évalués dans un article d'IEEE Power Magazine [57] qui a pour but de faire une brève revue des outils disponibles sur le marché de dimensionnement des composants magnétiques. Ces outils proposent réellement une formulation à partir d'un cahier des charges : pour les inductances, cette formulation démarre par exemple d'une valeur d'inductance et d'une forme d'onde de courant qui peut être obtenue à partir d'un simulateur circuit et aboutit sur des choix de matériau, de circuit magnétique, de type de bobinage, de nombre de tours, etc.

En revanche, pour dimensionner l'ensemble d'un convertisseur de forte puissance, on distingue très peu d'outils disponibles sur le marché. On peut néanmoins citer l'entreprise PE-Systems qui propose à ses clients un outil appelé « PE-Finder » pour évaluer les performances de différents semiconducteurs et effectuer ainsi une sélection; puis PowerSynth [58] qui propose un outil pour dimensionner et disposer automatiquement des modules semiconducteurs de puissance; enfin, PowerForge est le premier outil à

ma connaissance à proposer un pré-dimensionnement d'un convertisseur « complet » i.e. avec les principaux composants : semiconducteurs, filtres et dissipateurs.

C'est en amont, en recherche et développement, que beaucoup d'efforts ont été menés ces dernières années pour développer des méthodes et outils de design, chez quelques industriels et surtout dans le domaine académique. Ainsi, dans le workshop ECPE de juillet 2019 dédié à la thématique « Design Automation », on a pu voir que d'importants industriels - plutôt côté constructeurs - ont récemment développé des outils très aboutis : comme ABB avec la « Power Electronic Converter Optimization Toolbox » [59] ou Infineon avec la « Multi-objective Optimization Toolbox » [60].

Mais c'est dans le domaine académique que la préoccupation pour cette thématique semble la plus importante, comme le souligne l'organisation de ces différents workshops sur les trois dernières années : les premier et second workshop Design Automation for Power Electronics (DAPE), dont le journal IEEE Power Electronics Magazine en a fait des éditions spéciales en 2019 [41] et 2020 [42], le workshop ECPE de juillet 2019. Parmi ces travaux, on pourra notamment citer :

- au « Center of Reliable Power Electronics (CORPE) » de l'université d'Aalborg, qui propose un outil de conception pour la fiabilité et la robustesse, considérant un profil de mission, permettant une analyse de fiabilité des composants et du système,
- au « Center for Power Electronics Systems (CPES) » de Virginia Tech, qui propose une méthodologie de conception et d'optimisation basée sur une description hiérarchique multidisciplinaire de tous les constituants d'un convertisseur,
- au Power Electronics Systems Laboratory (PES) de l'ETH Zurich, qui a évalué différents algorithmes d'optimisation pour parcourir l'espace de conception (les degrés de liberté) de la manière la plus exhaustive possible,
- à l'Université d'Arkansas, qui développe et propose l'outil logiciel *PowerSynth*,
- au G2ELab de l'Institut Polytechnique de Grenoble, qui a développé CADES [53].

## Quel besoin utilisateur en électronique de puissance ?

Du côté utilisateur, malgré des enjeux identifiés comme forts, la définition des besoins semble encore floue. Lorsque j'assurais la fonction d'ingénieur support chez Power Design, nous avons pu constater une préoccupation importante de la part de nos prospects pour cette problématique d'outils et d'automatisation de la conception de convertisseurs puissance en vue de déterminer les meilleurs compromis autour du tryptique : masse, rendement et coût. Il était ainsi assez facile d'obtenir des rendez-vous pour une démonstration de PowerForge et discuter de leur process de conception et de leurs éventuels besoins, qu'il s'agisse de « petits ou de grands comptes ». Et en même temps, je percevais pratiquement toujours un certain attachement au process interne de conception,

principalement manuel, itératif qui s'appuie sur l'expérience de l'ingénieur et donc une certaine réserve par rapport à l'utilisation d'outils « extérieurs ».

Aussi, je n'ai jamais pu établir un schéma commun clair quant à l'expression de ces besoins utilisateurs (c'est également un constat du workshop ECPE de juillet 2019), mis à part des demandes quasi-systématiques quant à la constitution de base de données (de composants, modules semiconducteurs, matériaux, composants passifs, etc...) qui puissent être :

- transparentes par rapport à la constitution de celles-ci (modèles utilisés, sources des données, validation avec caractérisations ou essais expérimentaux, etc),
- flexibles pour que les utilisateurs puissent les modifier eux-mêmes : rajouter des composants / matériaux, modifier des données existantes, ou encore rajouter des données (par exemple des données de prix) sur des composants / matériaux existants,
- exportables (par exemple pour les composants semiconducteurs, qu'il soit possible d'extraire de cette même base de données un modèle Spice, un modèle Plecs ou simplement les données dans un format tableur type CSV...),
- interfaçables avec d'autres bases de données (typiquement des bases de données « internes » ou des bases de données proposant des estimations de prix comme *Ootepart...*)

### Quelles perspectives d'évolution pour les outils ?

Compte-tenu des besoins mentionnés ci-dessus, comment faire évoluer à l'avenir les outils existants dans un processus de (pré)conception ?

Il semble qu'il reste encore un peu de chemin avant de disposer sur le marché d'un outil de conception dit « automatique » même si on note finalement des projets très aboutis chez des acteurs industriels ou académiques.

Quel que soit l'outil ou la plateforme d'outils utilisés, l'utilisateur souhaite maîtriser complètement son processus de conception (de la phase de conception préliminaire à la phase de conception détaillée). L'outil doit donc offrir une grande transparence, afin que l'utilisateur adhère à la démarche proposée. A mon sens, un processus envisageable pour la phase de pré-conception serait donc que l'utilisateur puisse disposer des fonctionnalités suivantes :

- un « chef d'orchestre » pour interfacé différents modèles : un solveur « rapide » de circuits électriques, capable de déterminer automatiquement un régime permanent (à l'image d'un compilateur modelica qui permet d'interfacé différents modèles codés au formalisme modelica). C'est pourquoi il s'agissait de la première brique de notre prototype logiciel *Ootep*. Ce requis de base pour un solveur rapide a encore été évoqué récemment [42];

- le développement et l'utilisation de ses propres modèles inverses (pour aboutir à des jeux de paramètres dimensionnels);
- des bases de données formalisées pour les matériaux et composants (typiquement données de pertes semiconducteur, tables de variation paramétrique pour des machines tournantes, inductances...);
- une manipulation facilitée de toutes ces données.

Un premier enjeu majeur de la conception est ainsi aujourd'hui à la frontière des « data sciences » et de l'électronique de puissance pour la constitution et la manipulation de bases de données en conjuguant formalisme et degré d'expertise élevée. A titre d'exemple, exploiter tout le potentiel des « nouveaux » composants semiconducteurs SiC, GaN par rapport à leurs performances électrothermiques et évaluer leur impact sur les filtres de mode différentiel et de mode commun et le dissipateur relève du « casse-tête » car les données proposées par les constructeurs ne présentent pas de garantie d'être homogènes.

Plus aval dans le processus de conception, figure à mon sens un autre enjeu de taille : la simulation temps réel des convertisseurs très haute fréquence utilisant les composants semiconducteurs GaN. En effet, les solutions actuelles de simulation temps réel les plus rapides - avec des pas de temps d'environ 200 ns - permettent difficilement de simuler des convertisseurs découpant au-delà de 50 kHz, bien en dessous des fréquences de découpage visées pour ces convertisseurs à venir.

Enfin, un enjeu tout aussi important à mes yeux se rapporte aux problématiques environnementales actuelles : en plus des critères classiques utilisés pour la conception des convertisseurs, il s'agirait premièrement d'améliorer la prise en compte de la fiabilité des convertisseurs, mais surtout d'introduire de nouveaux critères liés à l'analyse de leur cycle de vie (matières premières et énergie consommées pour produire les composants, durée de vie, empreinte carbone). Pour ce dernier enjeu également, la constitution de bases de données est essentielle et il subsiste encore dans celles existantes (par exemple EcoInvent [61]) des obstacles pour des analyses détaillées. S'il existe des données utilisables au niveau « système » comme pour des onduleurs dans des chaînes de conversion d'énergie solaire ou plus récemment pour des chaînes de traction de véhicule électrique, je trouve qu'il y a généralement un manque de données relatives aux composants (les travaux de Schellscheidt et al. [62] allant dans ce sens font parmi des tous premiers à ma connaissance), et leur format est souvent aussi inadapté (comme Nordelof et al. [63] note que l'usage courant pour les inventaires en analyse de cycle de vie est d'exprimer les flux de référence en kg, ce qui nécessite, pour faire le lien avec les spécifications électriques des convertisseurs, des données supplémentaires ou la formulation d'hypothèses mal maîtrisées).

Dans tous les cas, ces travaux mériteraient d'être réalisés dans le cadre de partenariats forts entre académiques et industriels.



# Conclusion

En conclusion de ce mémoire synthétisant mes activités d'enseignement et de recherche, je résumerai mon parcours en trois points, qui illustrent mon engagement dans ce métier d'enseignant - chercheur :

- une forte contribution pour la mise en place de la spécialité de 3e année « EcoEnergie » au coeur des enjeux environnementaux et énergétiques actuels,
- l'utilisation et la promotion de nouvelles méthodologies d'enseignement au service de l'innovation pédagogique,
- le développement et la valorisation des activités de recherche autour de la conception en électronique de puissance, avec notamment la création d'une « spin-off » du laboratoire Laplace dans laquelle je me suis impliquée à 100 % pendant presque quatre ans.

Aujourd'hui, après quelques années d'expérience et ce travail d'introspection, mon état d'esprit est de contribuer au transfert de connaissances que ce soit au travers d'activités d'enseignement, de valorisation de recherche ou d'expertise, en apportant un soin particulier au côté humain.

Cette habilitation à diriger des recherches pourra me permettre à moyen terme :

- dans le cas d'un retour au Laplace, de continuer les activités de recherche en conception de convertisseurs statiques décrites dans les perspectives de ce manuscrit,
- dans le cas d'une poursuite à l'ENSM qui a pour ambition de développer des activités de recherche, d'encadrer des travaux par exemple sur les perspectives de l'hydrogène marine en terme de production et d'utilisation pour la propulsion des navires.

Enfin, je profite de cette conclusion pour remercier chaleureusement mes collègues enseignants, enseignants-chercheurs et chercheurs qui m'ont soutenu et encouragé jusqu'ici.



# Bibliographie

- [1] G. Gateau, G. Fontes, N. Roux, F. Bonnet, and F. Defay, "WebTP : Les nouvelles technologies au service de l'aide à la préparation des travaux pratiques," *J3eA*, vol. 7, p. 1017, 2008, publisher : EDP Sciences. [Online]. Available : <https://www.j3ea.org/articles/j3ea/abs/2008/02/j3ea08016/j3ea08016.html> 12
- [2] S. Astier, G. Fontes, and C. Azzaro-Pantel, "Design of sustainable energy systems : a new challenge for Engineering Education," in *Electrimacs 2008*, Quebec, Canada, Jun. 2008. 13
- [3] G. Fontes, C. Turpin, L. Ménard, O. Rallières, and S. Astier, "Applied Work for Engineer Students : Characterisation and modelling of a PEM Fuel Cell," in *Electrimacs 2008*, Quebec, Canada, Jun. 2008. 14
- [4] O. Langlois, X. Roboam, J.-C. Maré, H. Piquet, and G. Gandanegara, "Bond Graph Modeling of an Electro-Hydrostatic Actuator for Aeronautic Applications," in *17th IMACS World Congress*, Paris, France, Jul. 2005. [Online]. Available : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02517142> 16, 27
- [5] G. Gandanegara, X. Roboam, and B. Sareni, "Model inversion of electrical engineering systems from bicausal bond graphs," in *International Mediterranean Modeling Multiconference (IMAACA'05)*, Marseille, France, 2005. [Online]. Available : <https://oatao.univ-toulouse.fr/9260/> 16
- [6] G. Gandanegara, X. Roboam, J.-C. Maré, and B. Sareni, "Synthesis of an electro hydrostatic actuator from bicausal bond graphs," in *8th International Conference on Bond Graph Modeling and Simulation (ICBGM'07)*, 2007. [Online]. Available : <https://oatao.univ-toulouse.fr/9258/> 16
- [7] R. Saisset, G. Fontes, C. Turpin, and S. Astier, "Bond Graph model of a PEM fuel cell," *Journal of Power Sources*, vol. 156, no. 1, pp. 100–107, May 2006. [Online]. Available : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037877530501178X> 16, 23
- [8] G. Fontes, B. Sareni, and X. Roboam, "Systemic design of multidisciplinary electrical energy devices : A pedagogical approach," in *2009 13th European Conference on Power Electronics and Applications*, Sep. 2009, pp. 1–10. 16
- [9] O. Rallières, "Modélisation et caractérisation de Piles A Combustible et Electrolyseurs PEM," phd, Institut National Polytechnique de Toulouse-INPT, Nov. 2011. [Online]. Available : <http://ethesis.inp-toulouse.fr/archive/00001766/> 22
- [10] V. Phlippoteau, "Outils et Méthodes pour le diagnostic d'un état de santé d'une pile à combustible," phdthesis, Institut National Polytechnique de Toulouse-INPT, Jul. 2009. [Online]. Available : <http://ethesis.inp-toulouse.fr/archive/00001495/> 22
- [11] V. Phlippoteau, A. Rakotondrainibe, C. Turpin, and G. Fontes, "Procede de determination d'un etat de sante d'un dispositif electrochimique," FR Patent FR2942545B1, Aug., 2012. [Online]. Available : <https://patents.google.com/patent/FR2942545B1/en?q=Method+determining+state+health+electrochemical+device&oq=Method+for+determining+a+state+of+health+for+an+electrochemical+device> 23
- [12] L. Ménard, G. Fontès, and S. Astier, "Dynamic energy model of a lithium-ion battery," *Mathematics and Computers in Simulation*, vol. 81, no. 2, pp. 327–339, Oct. 2010. [Online]. Available : <https://doi.org/10.1109/TIE.2010.2044731> 23

- [13] R. R. Mariani, F. Lacressonniere, G. Fontes, and X. Roboam, "Design of a medium voltage power converter-storage devices embedded in a hybrid emergency network for more electrical aircraft," *Mathematics and Computers in Simulation*, vol. 91, pp. 72–90, May 2013. [Online]. Available : <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2012.07.009> 26, 27
- [14] L. Ménard, S. Astier, G. Fontès, J.-M. Blaquièrre, C. Turpin, and F. Gailly, "Modeling of an hybrid solar car with a lithium-ion battery," in *2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, Sep. 2010, pp. 1–6, iSSN : 1938-8756. 26
- [15] J. Rosero, J. Ortega, E. Aldabas, and L. Romeral, "Moving towards a more electric aircraft," *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, vol. 22, no. 3, pp. 3–9, Mar. 2007, conference Name : IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine. 26
- [16] X. Roboam, "New trends and challenges of electrical networks embedded in "more electrical aircraft"," in *2011 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Jun. 2011, pp. 26–31, iSSN : 2163-5145. 27
- [17] J.-P. Ferrieux and F. Forest, *Alimentations a decoupage, convertisseurs a resonance*. Paris; Milan; Barcelone : Masson, Jan. 1994. 28
- [18] A. Bejan and A. D. Kraus, *Heat transfer handbook*. New York : J. Wiley, 2003. 28
- [19] B. Cougo França, "Design and Optimization of InterCell Transformers for Parallel MultiCell Converters," These de doctorat, Toulouse, INPT, Oct. 2010. [Online]. Available : <http://www.theses.fr/2010INPT0057> 29
- [20] V. Costan, "Convertisseurs parallèles entrelacés : étude des pertes fer dans les transformateurs inter-cellules," These de doctorat, Toulouse, INPT, Jan. 2007. [Online]. Available : <http://www.theses.fr/2007INPT034H> 29
- [21] A.-M. Lienhardt, "Étude de la commande et de l'observation d'une nouvelle structure de conversion d'énergie de type SMC (Convertisseur Multicellulaire Superposé)," These de doctorat, Toulouse, INPT, Jan. 2006. [Online]. Available : <http://www.theses.fr/2006INPT026H> 29
- [22] M. Garcia Arregui, "Theoretical study of a power generation unit based on the hybridization of a fuel cell stack and ultracapacitors : application to the design of an aircraft emergency electrical network," These de doctorat, Toulouse, INPT, Jan. 2007. [Online]. Available : <http://www.theses.fr/2007INPT040H> 29
- [23] "Sirius," 2021. [Online]. Available : <https://www.eclipse.org/sirius/> 31
- [24] V. Viyović, M. Maksimović, and B. Perišić, "Sirius : A rapid development of DSM graphical editor," in *IEEE 18th International Conference on Intelligent Engineering Systems INES 2014*, Jul. 2014, pp. 233–238, iSSN : 1543-9259. 31
- [25] "Acceleo," 2021. [Online]. Available : <https://www.eclipse.org/acceleo/> 31
- [26] J. W. Kolar, "Power Electronics Design 4.0," Jul. 2019. 32
- [27] G. Fontes, R. Ruelland, A. Morentin, T. Meynard, G. Delamare, N. Videau, and A. Ziani, "Fast Solver to Get Steady-State Waveforms for Power Converter Design," in *PCIM Europe 2018; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management*, Jun. 2018, pp. 1–7. 32
- [28] L. N. H. Tran, "Modélisation fréquentielle analytique de convertisseurs statiques en vue du dimensionnement de systèmes par optimisation," phdthesis, Université Grenoble Alpes, Dec. 2015. [Online]. Available : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01272378/document> 33
- [29] A. Stupar and A. Müsing, "Design, Modeling, and Optimization of Power Electronics Systems Virtual Prototyping," Nuremberg, Germany, Oct. 2011. 33

- [30] A. Morentin Etayo, "Methods and tools for the optimization of modular electrical power distribution cabinets in aeronautical applications," Ph.D. dissertation, Institut National Polytechnique de Toulouse-INPT, 2017. [Online]. Available : <http://oatao.univ-toulouse.fr/17846/> 34
- [31] L. Havez, "Contribution au prototypage virtuel 3D par éléments finis de composants magnétiques utilisés en électronique de puissance," Ph.D. dissertation, Institut National Polytechnique de Toulouse-INPT, Jul. 2016. 34
- [32] A. Morentin, G. Fontes, M. M. Hillesheim, T. Meynard, D. Flumian, J. Bourdon, and H. Piquet, "OpenComp3d : An open-source framework dedicated to design in power electronics," *Mathematics and Computers in Simulation*, vol. 158, pp. 477–489, Apr. 2019. [Online]. Available : <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2018.11.006> 34, 36
- [33] Gamma, R. Helm, R. Johnson, J. Vlissides, and E. Gamma, *Design patterns. Catalogue des modèles de conception réutilisables*. Vuibert informatique, Jul. 1999. 35
- [34] "Composite (patron de conception)," Jan. 2021. [Online]. Available : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Composite\\_\(patron\\_de\\_conception\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Composite_(patron_de_conception)) 35
- [35] U. Drogenik, D. Cottet, A. Müsing, and J. W. Kolar, "Design Tools for Power Electronics : Trends and Innovations," in *2nd International Conference on Automotive Power Electronics (APE)*, Paris, France, Sep. 2008. [Online]. Available : [https://www.pes-publications.ee.ethz.ch/uploads/tx\\_ethpublications/drogenik\\_APE07.pdf](https://www.pes-publications.ee.ethz.ch/uploads/tx_ethpublications/drogenik_APE07.pdf) 37
- [36] "What are the "Big CHALLENGES" in Power Electronics?" 2014. 37, 49
- [37] A. Furlan, A. Morentin, G. Fontes, G. Delamare, M. L. Heldwein, and T. Meynard, "Homothetic Method to Compute Winding Losses in the Design of Power Inductors," in *2019 IEEE 15th Brazilian Power Electronics Conference and 5th IEEE Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC)*, Dec. 2019, pp. 1–6, iSSN : 2643-9778. 40
- [38] A. Furlan, T. Meynard, A. Morentin, M. L. Heldwein, and G. Fontes, "Fast Hybrid Design Approach for Optimization of Inductors," in *PCIM Europe digital days 2020; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management*, Jul. 2020, pp. 1–8. 40, 42
- [39] "SciPy.org — SciPy.org," Aug. 2021. [Online]. Available : <https://www.scipy.org/> 41
- [40] P. L. Dowell, "Effects of eddy currents in transformer windings," *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, vol. 113, no. 8, pp. 1387–1394, Aug. 1966, publisher : IET Digital Library. [Online]. Available : <https://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/piee.1966.0236> 42
- [41] A. Bindra and A. Mantooth, "Modern Tool Limitations in Design Automation : Advancing Automation in Design Tools is Gathering Momentum," *IEEE Power Electronics Magazine*, vol. 6, no. 1, pp. 28–33, Mar. 2019, conference Name : IEEE Power Electronics Magazine. 49, 53
- [42] K. Hermanns, Y. Peng, and A. Mantooth, "The Increasing Role of Design Automation in Power Electronics : Gathering What Is Needed," *IEEE Power Electronics Magazine*, vol. 7, no. 1, pp. 46–50, Mar. 2020, conference Name : IEEE Power Electronics Magazine. 49, 53, 54
- [43] A. Andreta, "Automatic Design for Manufacturing in Power Electronics Based on Power Converter Arrays," Ph.D. dissertation, Université Grenoble Alpes, 2019. 50
- [44] S. E. Mattsson, H. Elmqvist, and M. Otter, "Physical system modeling with Modelica," *Control Engineering Practice*, vol. 6, no. 4, pp. 501–510, Apr. 1998. [Online]. Available : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0967066198000471> 51
- [45] P. Fritzson, *Principles of Object-Oriented Modeling and Simulation with Modelica 2.1*. Piscataway, N.J. : New York : Wiley-Blackwell, 2004. 51

- [46] D. Broman, “Equation-Based Object-Oriented Languages for Acausal Modeling and Simulation,” University of California, Berkeley, Apr. 2013. [Online]. Available : <https://ptolemy.berkeley.edu/projects/embedded/eecsx44/lectures/Spring2013/modelica-dae-part-1.pdf> 51
- [47] J. Bals, G. Hofer, A. Pfeiffer, and C. Schallert, “Object-Oriented Inverse Modelling of Multi-Domain Aircraft Equipment Systems and Assessment with Modelica,” in *3rd International Modelica Conference*, Linköping, Nov. 2003, pp. 377–384. 51
- [48] J. Liscouët, M. Budinger, J.-C. Maré, and S. Orieux, “Modelling approach for the simulation-based preliminary design of power transmissions,” *Mechanism and Machine Theory*, vol. 46, no. 3, pp. 276–289, Mar. 2011. [Online]. Available : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0094114X10002077> 51
- [49] M. Budinger, J. Liscouët, F. Hospital, and B. Multon, “Chaînes de transmission de puissance mécatroniques- Mise en place des modèles d’estimation pour la conception préliminaire,” Oct. 2011. [Online]. Available : <http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/mecanique-th7/mecatronique-42509210/chaines-de-transmission-de-puissance-mecatroniques-bm8025/> 51
- [50] L. Brault and M. Budinger, “ACTUATION 2015 Model based design of electromechanical actuators,” Toulouse, Sep. 2013. 51
- [51] “Functional Mock-up Interface.” [Online]. Available : <http://fmi-standard.org/> 52
- [52] K. Stavåke, P. Fritzson, C. Song, M. Wlotzka, and V. Heuveline, “PDE Modeling with Modelica via FMI import of Hiflow3 C++ Components with Parallel Multi-Core Simulations,” in *55th Scandinavian Conference on Simulation and Modeling (SIMS'2014)*, Aalborg, Denmark, Oct. 2014. [Online]. Available : <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:liu:diva-114205> 52
- [53] B. Delinchant, D. Duret, L. Estrabaut, L. Gerbaud, H. Nguyen Huu, B. Du Peloux, H. Rakotoarison, F. Verdier, and F. Wurtz, “An optimizer using the software component paradigm for the optimization of engineering systems,” *COMPEL - The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*, vol. 26, no. 2, pp. 368–379, Apr. 2007. [Online]. Available : <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/03321640710727728/full/html> 52, 53
- [54] “PowerEsim - Free SMPS Switching Power Supply / Transformer Design Software,” 2021. [Online]. Available : <https://www.poweresim.com/> 52
- [55] “WEBENCH Power Designer | Overview | Design Resources | TI.com,” 2021. [Online]. Available : <https://www.ti.com/design-resources/design-tools-simulation/webench-power-designer.html> 52
- [56] “Ridley Engineering,” 2021. [Online]. Available : <https://ridleyengineering.com/software-ridley/ridleyworks/ridleyworks-software.html> 52
- [57] R. V. White, “Will a Computer Design Your Next Transformer? [White Hot],” *IEEE Power Electronics Magazine*, vol. 8, no. 3, pp. 97–100, Sep. 2021, conference Name : IEEE Power Electronics Magazine. 52
- [58] I. Al Razi, Q. Le, T. M. Evans, S. Mukherjee, H. A. Mantooth, and Y. Peng, “PowerSynth Design Automation Flow for Hierarchical and Heterogeneous 2.5-D Multichip Power Modules,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 36, no. 8, pp. 8919–8933, Aug. 2021. [Online]. Available : <https://ieeexplore.ieee.org/document/9316981/> 52
- [59] R. M. Burkart, “From Models Towards a Corporate Converter Design Tool,” Jul. 2019. 53
- [60] M. Kasper, “From Semiconductor Performance to System Improvements - How Pareto Fronts change Customer Interactions,” Jul. 2019. 53
- [61] “Ecoinvent,” 2021. [Online]. Available : <https://ecoinvent.org/> 55
- [62] B. Schellscheidt, J. Richter, and T. Licht, “Life-Cycle Assessment for Power Electronics Module Manufacturing,” in *2019 22nd European Microelectronics and Packaging Conference Exhibition (EMPC)*, Sep. 2019, pp. 1–4. 55

- [63] A. Nordelöf, M. Alatalo, and M. L. Söderman, "A scalable life cycle inventory of an automotive power electronic inverter unit—part I : design and composition," *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 24, no. 1, pp. 78–92, Jan. 2019. [Online]. Available : <https://doi.org/10.1007/s11367-018-1503-3> 55