



HAL
open science

Électrolyseur à membrane échangeuse de protons : modélisation et contrôle

Damien Guilbert

► **To cite this version:**

Damien Guilbert. Électrolyseur à membrane échangeuse de protons : modélisation et contrôle. Energie électrique. Université de Lorraine, 2022. tel-03700054

HAL Id: tel-03700054

<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-03700054>

Submitted on 20 Jun 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.

Électrolyseur à membrane échangeuse de protons : modélisation et contrôle

Mémoire de recherche

présenté et soutenu publiquement le 9 juin 2022

pour l'obtention de

l'Habilitation à Diriger des Recherches de l'Université de Lorraine

(spécialité génie électrique)

par

Damien GUILBERT

Maître de Conférences à l'Université de Lorraine

Composition du jury

Président : HAMID GUALOUS Professeur, Université de Caen Normandie

Rapporteurs : MARIE-CÉCILE ALVAREZ-HERAULT Maître de Conférences HDR, Université Grenoble Alpes
CHRISTOPHE TURPIN Directeur de Recherche CNRS, Laplace
JEAN-MICHEL VINASSA Professeur, Bordeaux INP

Examineurs : MELIKA HINAJE Professeur, Université de Lorraine
ALI SARI Professeur, Université Claude Bernard Lyon 1
GIANPAOLO VITALE Directeur de Recherche, ICAR CNR, Palerme
NOUREDDINE TAKORABET Professeur, Université de Lorraine

Mis en page avec la classe thloria.

Remerciements

Tout d'abord, je souhaiterais exprimer ma profonde reconnaissance à l'ensemble des membres de mon comité d'HDR pour avoir accepté d'en faire partie et pour l'intérêt qu'ils ont porté à mes travaux de recherche initiés depuis mon recrutement au laboratoire GREEN en septembre 2016.

À Marie-Cécile Alvarez-Herault, Maîtresse de conférences HDR à l'Université Grenoble Alpes, Christophe Turpin, Directeur de recherche CNRS au Laplace et Jean-Michel Vinassa, Professeur à Bordeaux INP, pour avoir rapporté mon manuscrit d'HDR, pour leurs conseils précieux dans ma carrière professionnelle et dans la poursuite de mes activités de recherche et enfin pour les nombreux échanges constructifs et très enrichissants que nous avons eus pendant ma soutenance d'HDR.

À Hamid Gualous, Professeur à l'Université de Caen Normandie, pour avoir présidé ce comité d'HDR et pour son soutien et ses encouragements constants dans l'épanouissement de ma carrière professionnelle.

À Ali Sari, Professeur à l'Université Claude Bernard Lyon 1 et Gianpaolo Vitale, Directeur de Recherche à l'institut ICAR-CNR de Palerme, pour avoir accepté d'évaluer mes travaux de recherche et pour leurs soutiens indéfectibles exprimés tout au long de ces dernières années.

À Melika Hinaje, Professeur à l'Université de Lorraine, pour avoir accepté d'être ma marraine scientifique, pour avoir toujours cru en moi, pour l'enrichissement personnel et professionnel de travailler à ses côtés, et enfin pour son soutien et sa disponibilité de tous les instants, qui ont permis l'aboutissement de ce projet d'HDR.

À Noureddine Takorabet, Professeur à l'Université de Lorraine, pour m'avoir encouragé et soutenu dans le développement des activités de recherche sur le site de Longwy malgré les nombreuses contraintes et pour son soutien dans le renforcement des coopérations de recherche entre le GREEN, l'Université de technologie King Mongkut de Bangkok et l'Université de technologie Rajamangala de Bangkok.

Je souhaiterais adresser ma profonde gratitude à tous mes collègues du GREEN, qui malgré la distance, m'ont toujours soutenu et encouragé dans le développement des activités de recherche sur le site de Longwy. Nos nombreux échanges entre Longwy et Nancy ont été très enrichissants et ont permis d'alimenter les activités de recherche et également d'initier des interactions entre les équipes de recherche au sein du GREEN. Un remerciement spécial à Bruno Douine pour m'avoir fait confiance lors de l'encadrement de ma première thèse et pour son amitié très précieuse, qui a joué un grand rôle dans la réalisation de ce projet d'HDR. Je souhaiterais également remercier chaleureusement Sylvie Colinet pour son soutien constant et son aide précieuse de tous les instants qui m'ont beaucoup apporté tout au long de ces années.

J'aimerais exprimer mes remerciements à tous mes collègues de l'IUT de Longwy pour leurs accueils chaleureux lors de mon recrutement, pour leurs soutiens constants, pour les nombreux échanges enrichissants et fructueux dans le renforcement des activités pédagogiques et de recherche. Un remerciement spécial à Serge Merafina pour son aide précieuse et constante dans le développement des maquettes de recherche et pédagogiques. J'ai beaucoup appris à ses côtés et je lui en serais toujours reconnaissant. Je tiens également à remercier toute l'équipe de direction de l'IUT de Longwy avec laquelle j'ai pris beaucoup de plaisir à travailler, à échanger et à promouvoir l'IUT sur le plan national et international.

Je tiens à remercier les doctorants que j'ai pu co-encadrer, Vittorio Guida, Ángel Mauricio Hernández Gómez, Burin Yodwong, ainsi que tous les ATER, doctorants invités et stagiaires master pour leurs travaux qui ont permis de nourrir ces activités de recherche.

Je voudrais adresser un remerciement spécial à Stéphanie Lamane, Aurore Tranchina, Souad Boutaguermouchet, Isabelle Marechal, Sabrina Divoux, Régine Malnati, Corinne Zanella, Marielle Torri, Christelle Moine, Marie-Odile Simonnot, Havanna Lagarde, Patrick Henaff, pour leurs aides précieuses dans toutes les démarches que j'ai pu rencontrer et pour leurs soutiens qui m'ont permis d'aller de l'avant pour atteindre mes objectifs. Je tiens également à remercier Dominique Mauvet, Muriel Ferraro, Alain Pagny, Sébastien Thil, Steve Pereira, Pierre Marras et Valérie, Pascal Jeanselle, Bernard Lurot, Gianvito, Franco, pour leurs amitiés et leurs soutiens dans ma carrière professionnelle.

Je n'oublie pas mes collègues de l'UTBM, du laboratoire FEMTO-ST, du FCLAB et du laboratoire G2Elab qui j'ai pu côtoyer pendant mes études à l'UTBM et mon ATER à l'ENSE3, avec lesquels j'ai beaucoup apprécié échanger et pour leurs soutiens. Un remerciement spécial à mes encadrants de thèse, Abdesslem Djerdir, Abdoul N'Diaye et Arnaud Gaillard, qui m'ont beaucoup apporté tout au long de ma thèse et pour leurs encouragements dans la réussite de ma carrière professionnelle.

Je souhaiterais remercier également Mohamed Benbouzid, Pascal Venet, Yassine Amirat, Jean-Frederic Charpentier, Elhoussin Elbouchikhi, Serge Pierfederici, Jean-Philippe Lecointe, Giuseppe Marsala, pour nos nombreux échanges scientifiques et pour leurs soutiens dans ma carrière professionnelle.

J'aimerais témoigner toute ma gratitude à Phatiphat Thounthong, Poom Kumam, Pongsiri Mungporn, Matheepot Phattanasak, Wattana Kaewmanee, Songklod Sriprang, Nicu Bizon, Hanson Sun, Victor Manuel Ramirez Rivera, Francesco Alonge, Filippo D'Ippolito, Massimiliano Luna, Adriano Fagiolini, Giansalvo et Maurizio Cirrincione, Ali Mohammadi, Zhixue Zheng, Javier Solano Martinez, Georgios Papakonstantinou, Jero Ahola, Antti Kosonen, Vesa Ruuskanen, Pertti Kauranen, avec lesquels j'ai pu collaborer sur de nombreuses thématiques de recherche et pour leurs appuis scientifiques très enrichissants. Je n'oublie pas Pee-han, Pee-nim, Panarit Sethakul pour leurs accueils chaleureux lors de mes nombreux séjours en Thaïlande et leurs soutiens dans la réussite de la coopération entre KMUTNB et le GREEN.

Mes derniers remerciements et non des moindres, sont destinés à ma maman, mes deux frères Laurent et Mickaël, ma grand-mère, mes deux nièces Clémence et Lucie, Feriel Mustapha, Daniel Durand, qui ont été une source de joie et de soutien incommensurable durant toutes ces années. Je leur dois beaucoup dans ma réussite d'aujourd'hui.

Je dédie ce travail à mes parents, sans lesquels rien n'aurait été possible. Je leur en serais éternellement reconnaissant de m'avoir toujours soutenu et d'avoir toujours cru en mes capacités.

Table des matières

| | |
|---------------------------|-------------|
| Remerciements | i |
| Table des figures | ix |
| Liste des tableaux | xiii |
| Abréviations | xv |

Introduction générale

| | | |
|---|---|---|
| 1 | Avant-propos | 1 |
| 2 | Organisation de ce mémoire de HDR | 1 |

Chapitre 1

Curriculum vitæ détaillé

| | | |
|---------|--|----|
| 1.1 | Parcours personnel | 5 |
| 1.1.1 | Situation actuelle et contexte de ma demande de HDR | 5 |
| 1.1.2 | Formation initiale | 6 |
| 1.1.3 | Expériences professionnelles | 6 |
| 1.2 | Activités de recherche | 7 |
| 1.2.1 | Introduction | 7 |
| 1.2.2 | Mobilités géographiques et thématiques | 9 |
| 1.2.2.1 | Thèse de doctorat, 2011-2014 | 9 |
| 1.2.2.2 | ATER, 2014-2015 | 10 |
| 1.2.2.3 | ATER, 2015-2016 | 11 |
| 1.2.2.4 | Activités de recherche en cours au GREEN de Longwy | 11 |
| 1.2.3 | Encadrements Master et Thèse | 12 |
| 1.2.3.1 | Co-encadrements de thèse | 12 |
| 1.2.3.2 | Encadrements et co-encadrements de master | 14 |
| 1.2.4 | Collaborations internationales et chercheurs invités | 15 |
| 1.2.5 | Participation à des jurys de thèse et comités de sélection | 19 |

| | | |
|---------|---|----|
| 1.2.6 | Congé recherche dans le cadre d'un CRCT | 19 |
| 1.2.6.1 | Contexte de la demande | 19 |
| 1.2.6.2 | Projet de recherche | 20 |
| 1.2.7 | Rayonnements scientifiques | 21 |
| 1.3 | Activités pédagogiques | 23 |
| 1.4 | Activités administratives | 25 |
| 1.5 | Projets et productions scientifiques | 27 |
| 1.5.1 | Projets nationaux et internationaux | 27 |
| 1.5.2 | Publications | 32 |
| 1.5.2.1 | Articles dans des revues internationales à comité de lecture (RICL) | 33 |
| 1.5.2.2 | Article dans une revue nationale à comité de lecture (RNCL) . . | 37 |
| 1.5.2.3 | Articles dans des revues pédagogiques à comité de lecture (RPCL) | 37 |
| 1.5.2.4 | Articles dans des conférences internationales à comité de lecture (CICL) | 37 |
| 1.5.2.5 | Articles dans des conférences nationales à comité de lecture (CNCL) | 39 |
| 1.5.2.6 | Article de vulgarisation scientifique (AVS) | 40 |

Chapitre 2

Synthèse des travaux de recherche

| | | |
|-------|---|-----|
| 2.1 | Introduction | 42 |
| 2.2 | Modélisation statique/dynamique des électrolyseurs PEM | 44 |
| 2.2.1 | Modèle électrique équivalent du stack de l'électrolyseur et détermination des paramètres | 45 |
| 2.2.2 | Modélisation mathématique des paramètres du modèle électrique équivalent (stack de l'électrolyseur) | 55 |
| 2.2.3 | Modélisation mathématique des paramètres du modèle électrique équivalent d'une cellule d'électrolyseur | 66 |
| 2.3 | Conception et développement d'un émulateur d'électrolyseur PEM | 80 |
| 2.4 | Électronique de puissance et sa commande associées à l'électrolyseur PEM | 92 |
| 2.5 | Conclusion | 110 |

Chapitre 3

Perspectives à moyen et long terme

| | | |
|-------|--|-----|
| 3.1 | Introduction | 112 |
| 3.2 | Perspectives pédagogiques et administratives | 112 |
| 3.3 | Perspectives de recherche à moyen et long terme | 113 |
| 3.3.1 | Développement d'architectures d'électrolyseurs multi-stack | 113 |

| | | |
|-------|--|------------|
| 3.3.2 | Gestion d'énergie des systèmes multi-sources incluant un stockage d'énergie sous forme d'hydrogène | 115 |
| 3.3.3 | Association hydrogène et éléments supraconducteurs pour le génie électrique | 117 |
| 3.4 | Conclusion | 119 |
| | Bibliographie | 121 |

Table des figures

| | | |
|------|---|----|
| 1.1 | Banc expérimental pile à combustible. | 8 |
| 1.2 | Bureau des doctorants/stagiaires. | 8 |
| 1.3 | Répartition des activités d'enseignement sur une année universitaire. | 25 |
| 1.4 | Organigramme de fonctionnement de l'IUT de Longwy. | 26 |
| 1.5 | Répartition des productions pédagogiques et scientifiques par catégorie. | 33 |
| 2.1 | Vue d'ensemble des applications basées sur l'électrolyse de l'eau alimentée par des sources d'énergies renouvelables et nucléaires. | 44 |
| 2.2 | Banc de test pour la caractérisation statique/dynamique d'un électrolyseur commercial PEM. | 46 |
| 2.3 | Système électrolyseur avec son électronique de puissance. | 47 |
| 2.4 | Essai 1 : réponse en tension de l'électrolyseur. | 48 |
| 2.5 | Essai 2 : réponse en tension de l'électrolyseur. | 48 |
| 2.6 | Modèle électrique équivalent de l'électrolyseur. | 49 |
| 2.7 | Exemple de réponse en tension de l'électrolyseur suivant le profil de courant. | 50 |
| 2.8 | Caractéristique statique obtenue par régression linéaire. | 50 |
| 2.9 | Zoom sur les transitoires avec les courbes exponentielles. | 52 |
| 2.10 | Comparaison des données expérimentales avec le modèle statique et dynamique. | 52 |
| 2.11 | Erreur obtenue en comparant les mesures expérimentales avec le modèle statique (haut), avec le modèle dynamique (bas). | 53 |
| 2.12 | (1) profil de courant, (2) surtension à la cathode, (3) surtension à l'anode, (4) surtension à la membrane. | 53 |
| 2.13 | Bilan de puissance au sein de l'électrolyseur : (1) puissance électrique fournie, (2) pertes dans la cathode, (3) pertes dans l'anode, (4) pertes dans la membrane, (5) puissance convertie en hydrogène. | 54 |
| 2.14 | Rendement de l'électrolyseur. | 55 |
| 2.15 | Caractéristique statique tension-courant de l'électrolyseur. | 58 |
| 2.16 | Ondulation basse et haute fréquence d'un système électrolyseur PEM. | 58 |
| 2.17 | Comportement de l'électrolyseur pour des profils de courant montant. | 59 |
| 2.18 | Comportement de l'électrolyseur pour des profils de courant descendant. | 59 |
| 2.19 | Comportement et estimation du paramètre V_{int} | 60 |
| 2.20 | Comportement et estimation du paramètre R_{int} | 60 |
| 2.21 | Comportement et estimation du paramètre τ_1 | 61 |
| 2.22 | Comportement et estimation du paramètre τ_2 | 61 |
| 2.23 | Comportement et estimation du paramètre C_1 | 62 |
| 2.24 | Comparaison des résultats obtenus expérimentalement (ligne continue) et avec le modèle (ligne pointillée) considérant un courant de 0 à 5 A. | 63 |

| | | |
|------|--|----|
| 2.25 | Comparaison des résultats obtenus expérimentalement (ligne continue) et avec le modèle (ligne pointillée) considérant un courant de 5 à 7 A. | 63 |
| 2.26 | Comparaison des résultats obtenus expérimentalement (ligne continue) et avec le modèle (ligne pointillée) considérant un courant de 8 à 5 A. | 64 |
| 2.27 | Comparaison des résultats obtenus expérimentalement (ligne continue) et avec le modèle (ligne pointillée) considérant un courant de 5 à 0 A. | 64 |
| 2.28 | Comparaison des résultats obtenus expérimentalement (ligne continue) et avec le modèle (ligne pointillée) considérant une plage de courant de 0 à 3 A, 0 à 6 A, et 0 à 10 A. | 65 |
| 2.29 | Comparaison des résultats obtenus expérimentalement (ligne continue) et avec le modèle (ligne pointillée) considérant une plage de courant de 10 à 0 A, et de 2 à 10 A. | 65 |
| 2.30 | Réponse de l'électrolyseur suite à un échelon de courant montant de 0 à 10 A. . . | 67 |
| 2.31 | Réponse de l'électrolyseur suite à un échelon de courant descendant de 10 à 0 A. . . | 68 |
| 2.32 | Tension de cellule en régime permanent soumise à des ondulations de courant. . . | 69 |
| 2.33 | Caractéristique statique des tensions de cellule. | 69 |
| 2.34 | Rendement des tensions de cellule en fonction du courant. | 70 |
| 2.35 | Réponse en tension des cellules suite à un échelon de courant montant de 0 à 4 A. . . | 70 |
| 2.36 | Réponse en tension des cellules suite à un échelon de courant montant de 4 à 8 A. . . | 71 |
| 2.37 | Réponse en tension des cellules suite à un échelon de courant descendant de 8 à 4 A. | 71 |
| 2.38 | Réponse en tension des cellules suite à un échelon de courant descendant de 4 à 0 A. | 72 |
| 2.39 | Comportement et estimation du paramètre V_{int} | 72 |
| 2.40 | Comportement et estimation du paramètre R_{int} | 73 |
| 2.41 | Comportement et estimation du paramètre τ_c | 74 |
| 2.42 | Comportement et estimation du paramètre τ_a | 74 |
| 2.43 | Comportement et estimation du paramètre C_c | 75 |
| 2.44 | Comparaison des tensions de cellule entre les expérimentations (ligne continue) et le modèle (ligne en pointillée) considérant une plage de courant de 0 à 4 A. . . . | 75 |
| 2.45 | Comparaison des tensions de cellule entre les expérimentations (ligne continue) et le modèle (ligne en pointillée) considérant une plage de courant de 4 à 8 A. . . . | 76 |
| 2.46 | Comparaison des tensions de cellule entre les expérimentations (ligne continue) et le modèle (ligne en pointillée) considérant une plage de courant de 8 à 4 A. . . . | 76 |
| 2.47 | Comparaison des tensions de cellule entre les expérimentations (ligne continue) et le modèle (ligne en pointillée) considérant une plage de courant de 4 à 0 A. . . . | 77 |
| 2.48 | Comparaison des tensions de cellule entre les expérimentations (ligne continue) et le modèle (ligne en pointillée) considérant une plage de courant de 0 à 3 A, 0 à 10 A, et 10 à 0 A. | 77 |
| 2.49 | Principe du générateur de tension et de la saturation de la tension de l'électrolyseur. . . | 82 |
| 2.50 | Vue de dessus de l'émulateur. | 83 |
| 2.51 | Vue de côté de l'émulateur faisant apparaître les supercondensateurs. | 83 |
| 2.52 | (a) Erreur à la résistance de la cathode, (b) erreur à la capacité de la cathode. . . | 86 |
| 2.53 | Banc de test réalisé pour tester les performances de l'émulateur. | 87 |
| 2.54 | Configuration du banc de test pour tester l'émulateur. | 87 |
| 2.55 | Réponse de l'émulateur suite à un échelon de courant de 2 à 8 A. | 88 |
| 2.56 | Comparaison de la caractéristique statique obtenue avec l'émulateur et l'électrolyseur réel. | 88 |

| | | |
|------|--|-----|
| 2.57 | Comparaison entre l'émulateur et l'électrolyseur réel pour un échelon de courant de 2 à 8 A. | 90 |
| 2.58 | Comparaison entre l'émulateur et l'électrolyseur réel pour un échelon de courant de 8 à 2 A. | 91 |
| 2.59 | Redresseur triphasé à thyristors. | 93 |
| 2.60 | Redresseur hexaphasé à thyristors. | 93 |
| 2.61 | Redresseur triphasé à diodes connecté au SIBC. | 95 |
| 2.62 | SIBC et son chronogramme de fonctionnement. | 95 |
| 2.63 | Modèle simplifié considéré d'un électrolyseur PEM. | 96 |
| 2.64 | Réponses indicielles en considérant un modèle résistif ou dynamique. | 97 |
| 2.65 | Diagrammes de Bode en considérant un modèle résistif ou dynamique. | 97 |
| 2.66 | Banc de test développé avec le SIBC. | 98 |
| 2.67 | Résultats obtenus avec une base de temps de 100 ms. | 99 |
| 2.68 | Résultats obtenus avec une base de temps de 400 ms. | 100 |
| 2.69 | Résultats obtenus avec une base de temps de 10 ms. | 100 |
| 2.70 | Résultats obtenus avec une base de temps de 2 s. | 101 |
| 2.71 | Ondulations de courant et en tension de l'électrolyseur. | 101 |
| 2.72 | Redresseur triphasé à diodes connecté au convertisseur entrelacé buck trois niveaux. | 102 |
| 2.73 | Convertisseur entrelacé buck trois niveaux alimentant un électrolyseur PEM. | 103 |
| 2.74 | Plateforme expérimentale développée à KMUTNB. | 103 |
| 2.75 | Représentation schématique de l'implémentation des lois de contrôle. | 105 |
| 2.76 | Test en dynamique avec une variation de la tension du bus DC de 75 à 150 V. | 105 |
| 2.77 | Test en dynamique avec une variation de la tension du bus DC de 150 à 100 V. | 106 |
| 2.78 | Équilibre des condensateurs d'entrée. | 107 |
| 2.79 | Résultats expérimentaux pour un changement de courant de référence de 3 à 10 A. | 108 |
| 2.80 | Résultats expérimentaux pour un changement de courant de référence de 10 à 3 A. | 108 |
| 2.81 | Résultats expérimentaux pour une variation de tension du bus DC de 150 à 100 V. | 109 |
| 2.82 | Ondulations de courant et de tension en régime permanent. | 109 |
| | | |
| 3.1 | Architecture série d'électrolyseurs multi-stack. | 113 |
| 3.2 | Architecture parallèle d'électrolyseurs multi-stack. | 114 |
| 3.3 | Système multi-sources intégrant une chaîne de production-stockage-valorisation de l'hydrogène. | 116 |
| 3.4 | Gestion du fonctionnement de l'électrolyseur suivant la consommation d'hydrogène de la pile à combustible. | 117 |
| 3.5 | Principe de fonctionnement du concept ASCEND pour la propulsion des avions zéro-émission à hydrogène. | 118 |
| 3.6 | Plateforme expérimentale hydrogène au laboratoire GREEN de l'IUT de Longwy. | 119 |

Liste des tableaux

| | | |
|-----|--|-----|
| 1.1 | Synthèse des co-encadrements de thèse. | 13 |
| 1.1 | Synthèse des co-encadrements de thèse (suite). | 14 |
| 1.2 | Synthèse des encadrements et co-encadrements de master. | 14 |
| 1.2 | Synthèse des encadrements et co-encadrements de master (suite). | 15 |
| 1.3 | Synthèse des doctorants invités. | 17 |
| 1.4 | Synthèse des invitations. | 17 |
| 1.4 | Synthèse des invitations (suite). | 18 |
| 1.4 | Synthèse des invitations (suite). | 19 |
| 1.5 | Synthèse de mes rôles dans différents comités éditoriaux. | 23 |
| 1.6 | Synthèse des activités d'enseignement. | 24 |
| 1.7 | Synthèse des projets nationaux. | 28 |
| 1.8 | Synthèse des projets internationaux. | 30 |
| 1.9 | Synthèse des productions scientifiques par catégorie. | 33 |
| | | |
| 2.1 | Données techniques de l'électrolyseur PEM. | 46 |
| 2.2 | Synthèse des performances du modèle. | 66 |
| 2.3 | Synthèse des performances du modèle pour la cellule 1. | 78 |
| 2.4 | Synthèse des performances du modèle pour la cellule 2. | 79 |
| 2.5 | Synthèse des performances du modèle pour la cellule 3. | 80 |
| 2.6 | Comparaison entre les valeurs estimées et réelles de l'émulateur. | 82 |
| 2.7 | Comparaison entre les erreurs de l'émulateur et de l'électrolyseur réel. | 92 |
| 2.8 | Données techniques du convertisseur SIBC. | 99 |
| 2.9 | Données techniques du convertisseur entrelacée buck trois niveaux. | 104 |

Abréviations

| | |
|-----------|--|
| 2L2S | Laboratoire Lorrain des Sciences Sociales |
| ATS | Adaptation Technicien Supérieur |
| AVS | Article de Vulgarisation Scientifique |
| BDMS | Bâtiment Durable et Mobilité Soutenable |
| BUT | Bachelor Universitaire de Technologie |
| CEREFIGE | Centre Européen de Recherche en Économie Financière et Gestion des Entreprises |
| CICL | Conférence Internationale à Comité de Lecture |
| CICY | Centro de Investigación Científica de Yucatán |
| CNCL | Conférence Nationale à Comité de Lecture |
| CNR | Consiglio Nazionale delle Ricerche (Conseil National des Recherches) |
| CRAN | Centre de Recherche en Automatique de Nancy |
| EMPP | Énergie, Mécanique, Procédés, Produits |
| ENSE3 | École Nationale Supérieure de l'Énergie, l'Eau et l'Environnement |
| G2Elab | Laboratoire de Génie Électrique de Grenoble |
| GEA | Gestion des Entreprises et des Administrations |
| GEII | Génie Électrique et Informatique Industrielle |
| GREEN | Groupe de Recherche en Énergie Électrique de Nancy |
| ICAR | Institute for High Performance Computing and Networking |
| IRTES-SET | Institut de Recherche sur les Transports, l'Énergie, et la Société-Systèmes et Transport |
| ISSIA | Institute of Intelligent Systems for Automation |
| KMUTNB | King Mongkut's University of Technology North Bangkok |
| KPI | Kyiv Polytechnic Institute |
| LEMTA | Laboratoire Énergétique et Mécanique Théorique Appliquée |
| LERMAB | Laboratoire d'Étude et de Recherche sur le Matériau Bois |
| LP | Licence Professionnelle |
| LUE | Lorraine Université d'Excellence |
| MT2E | Métiers de la Transition et de l'Efficacité Énergétiques |
| PEM | Proton Exchange Membrane (Membrane à Échangeuse de Protons) |
| PHC | Partenariat Hubert Curien |

| | |
|-------|--|
| PI | Projet International |
| PN | Projet National |
| RICL | Revue Internationale à Comité de Lecture |
| RNCL | Revue Nationale à Comité de Lecture |
| RPCL | Revue Pédagogique à Comité de Lecture |
| RUT | Rajamangala University of Technology |
| SAE | Situation d'Apprentissage et d'Évaluation |
| SARII | Systèmes Automatisés, Réseaux, Informatique Industrielle |
| SIBC | Stacked Interleaved Buck Converter |
| SWJTU | Southwest Jiaotong University |
| USP | University of South Pacific |
| UTBM | Université de Technologie de Belfort-Montbéliard |

Introduction générale

1 Avant-propos

Ce mémoire synthétise mes travaux de recherche effectués au sein du laboratoire GREEN depuis mon recrutement en septembre 2016 dans l'objectif d'obtenir le diplôme d'habilitation à diriger des recherches (HDR) de l'Université de Lorraine. Ces travaux de recherche se concentrent principalement sur l'électronique de puissance interfaçant les sources d'énergies renouvelables et l'électrolyseur à membrane échangeuse de protons (communément appelé *Proton Exchange Membrane (PEM)*) et sa commande. Par ailleurs, la modélisation de l'électrolyseur PEM tenant compte des fonctionnements dynamiques est également considérée, permettant d'accroître la fiabilité des modèles développés à reproduire le comportement dynamique de l'électrolyseur couplé à des sources d'énergies renouvelables. La finalité de ces activités de recherche est le développement d'un émulateur d'électrolyseur PEM permettant de tester et de valider de nouvelles structures de conversion d'énergie et leurs commandes sans endommager un électrolyseur PEM physique.

2 Organisation de ce mémoire de HDR

Ce mémoire de HDR est structuré en trois chapitres organisé comme suit :

Le **Chapitre 1** présente un curriculum vitæ détaillé incluant mon parcours personnel, mes activités de recherche, d'enseignement, administratives, les projets nationaux et internationaux auxquels j'ai participé, et une liste de mes publications.

Tout d'abord, ce chapitre s'ouvre sur ma situation actuelle et le contexte de ma demande de HDR. Par la suite, je donne un aperçu de mon parcours personnel avec la formation initiale et les expériences professionnelles. Ensuite, la deuxième partie se focalise sur mes activités de recherche (thématiques de recherche, encadrements master et thèse, collaborations nationales et internationales, rayonnements scientifiques, etc). La troisième partie, quant à elle, se concentre sur mes activités d'enseignement et le développement de nouvelles maquettes pédagogiques. Enfin, ce chapitre se conclut sur mes activités administratives (IUT de Longwy, sur le plan national et international), sur la présentation des projets nationaux et internationaux, et sur la liste de mes publications classées par catégorie.

Le **Chapitre 2** expose de façon synthétique et concise mes travaux de recherche conduits depuis mon recrutement au sein du laboratoire GREEN.

Dans un premier temps, ce chapitre se focalise sur la modélisation et l'émulation d'un électrolyseur PEM commercial en tenant compte du comportement dynamique de l'électrolyseur lorsque ce dernier est couplé à des sources d'énergie renouvelables. Pour modéliser les pertes et les différentes dynamiques rencontrées à l'anode et à la cathode, un circuit équivalent électrique est proposé. Une première approche est présentée pour déterminer les paramètres du modèle pour une plage de fonctionnement spécifique. Toutefois, comme l'électrolyseur présente différentes dynamiques suivant le point de fonctionnement (en l'occurrence le courant de l'électrolyseur), les paramètres ne peuvent pas être considérés constants. C'est pourquoi, deux approches de modélisation à paramètres variables sont par la suite introduites. Une, consistant à modéliser le stack de l'électrolyseur, la seconde à modéliser chaque cellule de l'électrolyseur permettant de prendre en compte d'éventuelles dégradations pouvant survenir lors de sollicitations dynamiques et également lorsque l'électrolyseur est soumis à des ondulations de courant (basse et haute fréquence) provenant de l'électronique de puissance associée. Dans un deuxième temps, ce chapitre se tourne sur l'électronique de puissance associée à l'électrolyseur et sa commande. L'objectif est de présenter quelques topologies candidates pouvant interfacer des sources d'énergie renouvelables et des électrolyseurs, et permettre leur intégration dans des systèmes multi-sources à architecture DC.

Enfin, le **Chapitre 3** révèle des perspectives pédagogiques et également de recherche à moyen et long terme qui sont principalement basées sur des travaux préliminaires en lien avec des défis techniques pour la diffusion à grande échelle de la technologie d'électrolyseur PEM.

Ce chapitre revient sur des premiers travaux préliminaires effectués concernant la commande des électrolyseurs et dévoile des perspectives de recherche sur ces thématiques. Ces dernières englobent le développement des architectures d'électrolyseurs dites *multi-stack* permettant d'offrir une meilleure fiabilité, flexibilité et efficacité, mais également la gestion d'énergie des systèmes multi-sources incluant sources d'énergie renouvelables, stockage classique (batterie, supercondensateur, volant d'inertie), et technologies hydrogène (électrolyseur et pile à combustible). Enfin, ce chapitre se ferme en donnant des pistes de collaborations concernant l'utilisation de l'hydrogène dans le domaine de la supraconductivité.

Chapitre 1

Curriculum vitæ détaillé

Sommaire

| | | |
|------------|--|-----------|
| 1.1 | Parcours personnel | 5 |
| 1.1.1 | Situation actuelle et contexte de ma demande de HDR | 5 |
| 1.1.2 | Formation initiale | 6 |
| 1.1.3 | Expériences professionnelles | 6 |
| 1.2 | Activités de recherche | 7 |
| 1.2.1 | Introduction | 7 |
| 1.2.2 | Mobilités géographiques et thématiques | 9 |
| 1.2.2.1 | Thèse de doctorat, 2011-2014 | 9 |
| 1.2.2.2 | ATER, 2014-2015 | 10 |
| 1.2.2.3 | ATER, 2015-2016 | 11 |
| 1.2.2.4 | Activités de recherche en cours au GREEN de Longwy | 11 |
| 1.2.3 | Encadrements Master et Thèse | 12 |
| 1.2.3.1 | Co-encadrements de thèse | 12 |
| 1.2.3.2 | Encadrements et co-encadrements de master | 14 |
| 1.2.4 | Collaborations internationales et chercheurs invités | 15 |
| 1.2.5 | Participation à des jurys de thèse et comités de sélection | 19 |
| 1.2.6 | Congé recherche dans le cadre d'un CRCT | 19 |
| 1.2.6.1 | Contexte de la demande | 19 |
| 1.2.6.2 | Projet de recherche | 20 |
| 1.2.7 | Rayonnements scientifiques | 21 |
| 1.3 | Activités pédagogiques | 23 |
| 1.4 | Activités administratives | 25 |
| 1.5 | Projets et productions scientifiques | 27 |
| 1.5.1 | Projets nationaux et internationaux | 27 |
| 1.5.2 | Publications | 32 |
| 1.5.2.1 | Articles dans des revues internationales à comité de lecture (RICL) | 33 |
| 1.5.2.2 | Article dans une revue nationale à comité de lecture (RNCL) | 37 |
| 1.5.2.3 | Articles dans des revues pédagogiques à comité de lecture (RPCL) | 37 |
| 1.5.2.4 | Articles dans des conférences internationales à comité de lecture (CICL) | 37 |
| 1.5.2.5 | Articles dans des conférences nationales à comité de lecture (CNCL) | 39 |

| | |
|---|----|
| 1.5.2.6 Article de vulgarisation scientifique (AVS) | 40 |
|---|----|

1.1 Parcours personnel

1.1.1 Situation actuelle et contexte de ma demande de HDR

Depuis le 1^{er} septembre 2016, je suis maître de conférences (échelon 5) à l'Université de Lorraine et rattaché au laboratoire GREEN. Ma titularisation est effective depuis le 1^{er} septembre 2017. Par ailleurs, depuis le 1^{er} octobre 2021, je suis titulaire de la prime d'encadrement doctoral et de recherche (PEDR) pour une période de quatre ans. Mes activités d'enseignement et de recherche se déroulent principalement à l'IUT Henri Poincaré de Longwy au sein du département génie électrique et informatique industrielle (GEII).

Après avoir longuement travaillé pendant ma thèse et mes deux années d'ATER sur la disponibilité et la fiabilité des convertisseurs DC-DC pour des applications pile à combustible, j'ai décidé de me focaliser sur les systèmes électrolyseur PEM dès mon recrutement en tant que maître de conférences. Ce choix est principalement motivé par le fait que cette thématique de recherche est encore très peu étudiée dans la littérature contrairement aux thématiques de recherche liées à la pile à combustible (modélisation, électronique de puissance, diagnostic de défauts, fiabilité). Ces thématiques de recherche sont très bien installées dans le paysage national et international en raison de l'intérêt que portent les chercheurs et les industriels dans le développement et la commercialisation des piles à combustible à grande échelle et pour différentes applications, dont le transport terrestre.

Depuis mes premières années en tant que jeune chercheur, j'ai toujours été passionné par l'électronique de puissance et ses applications. C'est pourquoi, je souhaitais poursuivre sur cette thématique en lien avec les électrolyseurs PEM. Comme pour les piles à combustible, les convertisseurs de puissance doivent répondre à de nombreuses problématiques, particulièrement en termes de gain de conversion en tension, d'efficacité énergétique, d'ondulation de courant en sortie et de disponibilité en cas de défaillances électriques. C'est pour cette raison qu'une attention particulière doit être portée sur l'architecture du convertisseur de puissance et de sa commande.

D'ailleurs, l'électronique de puissance pour des objectifs de commande est fortement liée à la modélisation de l'électrolyseur. Généralement, des modèles simples sont utilisés (résistifs, statiques) pour des études en régime statique. Étant donné que l'électrolyseur PEM est capable de répondre plus rapidement aux sollicitations dynamiques que l'électrolyseur alcalin, cette technologie est particulièrement bien adaptée pour être couplée à des sources d'énergies renouvelables telles que l'éolien. Ces sources d'énergie sont considérées comme très dynamiques ; des fonctionnements fortement liés aux conditions météorologiques. De là, j'ai commencé à travailler sur l'étude et la modélisation dynamique de ces électrolyseurs dans l'objectif de reproduire leurs comportements lorsqu'ils fonctionnent en régime dynamique.

Mes encadrements de thèse et de master, mes recherches et collaborations (Chine, Colombie, Italie, Mexique, Thaïlande, Ukraine), et mes nombreux séjours à l'étranger m'ont permis de m'enrichir personnellement et professionnellement. En effet, tout au long de ces dernières années, j'ai beaucoup étudié et appris au contact de mes étudiants, de mes collègues et de toutes les personnes que j'ai pu rencontrer jusqu'à l'aboutissement de ce projet. De par ces expériences, j'en ressors grandi et cela m'a permis d'atteindre une certaine maturité scientifique qui m'a motivé à passer mon HDR.

La rédaction de ce manuscrit a pour objectif de synthétiser mes travaux de recherche sur cette thématique de recherche en pleine émergence et de tracer de nouvelles perspectives de recherche qui me semblent pertinentes et prometteuses. Enfin, l'obtention de cette habilitation me permettra d'acquérir une meilleure autonomie pour diriger des futures thèses et conduire ces recherches de façon efficiente.

1.1.2 Formation initiale

2011-2014 Thèse de doctorat en génie électrique (mention très honorable) réalisée au sein de l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard (UTBM) et soutenue le 1^{er} décembre 2014. Cette thèse de doctorat portait sur le sujet suivant : "tolérance aux défauts et optimisation des convertisseurs DC/DC pour véhicules électriques à pile à combustible". Cette dernière a été effectuée au sein du laboratoire de recherche IRTES-SET (institut de recherche sur les transports, l'énergie, et la société-systèmes et transport) sous la direction d'Abdesslem DJERDIR (professeur des universités), codirigée par Arnaud GAILLARD (maître de conférences) et Abdoul N'DIAYE (docteur-ingénieur). Le jury de thèse était composé de :

- Mohamed Benbouzid (président, Université de Bretagne Occidentale, section 63) ;
- Hamid Gualous (rapporteur, Université de Caen Normandie, section 63) ;
- Gianpaolo Vitale (rapporteur, Université de Palerme (Italie)) ;
- Omar Bouhali (examinateur, Université de Jijel (Algérie)) ;
- Pascal Venet (examinateur, Université Lyon 1, section 63) ;
- Abdesslem Djerdir (directeur de thèse, UTBM, section 63) ;
- Arnaud Gaillard (co-directeur de thèse, UTBM, section 63) ;
- Abdoul N'Diaye (co-directeur de thèse, UTBM, section 63).

2008-2011 Diplôme d'ingénieur en génie électrique et systèmes de commande (GESC), UTBM, Belfort, (major de promotion).

2010-2011 Programme d'échange Erasmus (6 mois), Università degli studi di Palermo (Italie), département de génie électrique. Les enseignements ont été suivis essentiellement en langue italienne.

2010-2011 Classe préparatoire aux grandes écoles ATS, lycée Diderot (Paris 19^{ième}).

2005-2007 Brevet de technicien supérieur en électrotechnique (mention Bien), lycée Louis Armand (Paris 15^{ième}), (major de promotion).

2004-2005 Baccalauréat sciences techniques industrielles génie électrotechnique (mention assez bien), lycée La Tourelle, Sarcelles (95).

1.1.3 Expériences professionnelles

Depuis le 1^{er} septembre 2016 maître de conférences, Université de Lorraine/IUT de Longwy, laboratoire GREEN, Longwy.

2015-2016 ATER, école nationale supérieure de l'énergie, l'eau et l'environnement (ENSE3), laboratoire de génie électrique de Grenoble (G2Elab), Grenoble.

2014-2015 ATER, UTBM, département énergie, institut FEMTO-ST, Belfort.

2012-2014 Enseignant vacataire, UTBM, Belfort, département énergie, laboratoire IRTES-SET. (172,5 Heures Equivalent Travaux Dirigés (HETD)).

Mars-Août 2011 Projet de fin d'étude (6 mois), société PROMEC SARL, Ponte San Pietro (Italie), spécialisée dans la distribution des composants mécaniques (turbine et alternateur) pour les centrales de production d'énergie électrique (nucléaire, thermique, géothermique).

Missions et objectifs : étude de faisabilité d'un réseau de type "microgrid" composé de plusieurs sources d'énergies renouvelables pour l'alimentation de l'entreprise.

Septembre 2009-Février 2010 Stage assistant ingénieur (6 mois), laboratoire de recherche ISSIA-CNR, Palerme (Italie), spécialisé dans l'étude des perturbations électromagnétiques émises par les systèmes de conversion d'énergie (convertisseur de puissance et moteur).

Missions et objectifs : étude des perturbations électromagnétiques dans les systèmes d'entraînement électrique.

1.2 Activités de recherche

1.2.1 Introduction

Lors de mon arrivée à l'IUT de Longwy, j'ai intégré l'équipe de recherche GREEN de Longwy qui était composée d'un seul maître de conférences, Mr. Angel Scipioni. Les axes de recherche de cette équipe se concentraient principalement sur le développement durable et les énergies renouvelables. Étant donné la distance (environ 120 km) entre l'IUT de Longwy et Nancy (où la majeure partie des enseignants-chercheurs du GREEN se trouvent), il était crucial pour moi de développer les activités de recherche directement sur le site de l'IUT de Longwy. La première étape importante était de définir les axes de recherche pouvant être développés sur le site de Longwy en s'appuyant sur la littérature existante, mais également sur les compétences de l'équipe de recherche GREEN. Après discussion avec les membres du laboratoire, il a été décidé que les axes du GREEN à Longwy seraient les suivants :

- (i) conception, dimensionnement, réalisation expérimentale, contrôle et détection de défauts des convertisseurs DC/DC pour électrolyseurs (PEM en cours, alcalins en perspective) ;
- (ii) modélisation et développement d'émulateurs d'électrolyseurs PEM (à court terme, la technologie alcaline sera également considérée) ;
- (iii) gestion d'énergie des systèmes multi-sources basés sur les énergies renouvelables et les technologies à hydrogène (pile à combustible, électrolyseur).

Étant donné que l'équipe GREEN de l'IUT Longwy a des activités de recherche liées à l'hydrogène, les membres du GREEN ont décidé de déménager un banc expérimental avec une pile à combustible de Nancy à Longwy. Ce banc expérimental a été installé dans une salle dédiée exclusivement aux activités de recherche (Figure 1.1). Dans cette même salle, un bureau a été spécialement aménagé pour accueillir les doctorants du GREEN, mais également des doctorants étrangers et des stagiaires pour des stages en recherche (Figure 1.2).

Depuis mon recrutement à l'IUT de Longwy, j'ai été très actif et dynamique pour développer les activités de recherche du GREEN autour des électrolyseurs PEM, en particulier concernant leurs modélisations dynamiques et leurs électroniques de puissance. Ce sont deux thèmes de recherche encore très peu étudiés dans la littérature, et qui vont prendre de l'importance d'ici les prochaines années en raison du déploiement du stockage chimique de l'énergie électrique sous forme d'hydrogène. Par l'intermédiaire de mes collaborations très enrichissantes et fructueuses,

j'ai acquis une certaine expérience dans ces thèmes de recherche au travers de nombreuses publications (congrès, revues) citées dans ce document.



FIGURE 1.1 – Banc expérimental pile à combustible.



FIGURE 1.2 – Bureau des doctorants/stagiaires.

Je vais détailler dans les prochaines sous-sections mes activités de recherche suivant les points suivants :

- (i) Mobilités géographiques et thématiques.
- (ii) Encadrements Master et Thèse.
- (iii) Collaborations internationales et chercheurs invités.
- (iv) Participation à des jurys de thèse et comités de sélection.
- (v) Congé recherche dans le cadre d'un CRCT.
- (vi) Rayonnements scientifiques.

1.2.2 Mobilités géographiques et thématiques

Comme indiqué dans mon parcours personnel, j'ai été très mobile géographiquement avec quatre années passées à Belfort (trois ans de thèse + une année d'ATER), une année à Grenoble (ATER) et actuellement à Longwy depuis mon recrutement en tant que maître de conférences. En outre, pendant mes études d'ingénieur à l'UTBM, j'ai effectué plusieurs séjours en Italie (un an et demi au total incluant un semestre d'étude Erasmus à Palerme et deux stages dont un à Palerme et l'autre à Ponte San Pietro (à proximité de Bergame)). Depuis ma première année de thèse initiée en octobre 2011, j'ai été amené à travailler sur différentes thématiques de recherche détaillées dans les prochaines sous-sections. Cette mobilité thématique m'a permis d'élargir mes connaissances et mes compétences, et également de gagner en expériences avec mes nombreuses collaborations internationales, séminaires et publications.

1.2.2.1 Thèse de doctorat, 2011-2014

Le sujet de thèse de ma thèse de doctorat "tolérance aux défauts et optimisation des convertisseurs DC/DC pour véhicules électriques à pile à combustible" s'est inscrit dans le cadre du projet Européen Mobypost (<http://mobypost-project.eu/>) qui visait à développer un nouveau concept de véhicule électrique alimenté par une pile à combustible pour la livraison du courrier. La première partie de mon travail a consisté à réaliser une recherche bibliographique sur les convertisseurs DC/DC pour des applications véhicule électrique à pile à combustible. Après une analyse rigoureuse des différentes topologies de convertisseurs DC/DC en termes de compacité, de réduction de l'ondulation de courant, d'optimisation de l'efficacité énergétique et de la tolérance aux défauts, il a été choisi de focaliser les travaux de recherche sur deux topologies de convertisseur DC/DC tolérantes aux défauts. La première topologie est une topologie boost entrelacée classique composée de 3 phases; tandis que la deuxième est une topologie boost entrelacée flottante composée de 4 phases. Ces deux architectures sont naturellement tolérantes aux défauts en raison de la présence de redondance statique. En cas de perte d'une phase du convertisseur, les phases saines peuvent être utilisées comme un système de compensation évitant par conséquent toute interruption de fourniture d'énergie. Une étude a permis de démontrer que la topologie entrelacée flottante de par son architecture est soumise à des contraintes électriques plus importantes qu'une topologie entrelacée classique en cas de perte d'une phase. C'est pourquoi, la topologie boost entrelacée classique a été utilisée pour poursuivre les travaux de recherche sur la tolérance aux défauts.

Dans la deuxième partie, je me suis plus particulièrement intéressé au développement d'algorithmes de détection et de contrôles tolérants aux défauts en cas de défauts d'interrupteur de puissance. Les défauts étudiés sont les défauts de types circuit-ouvert et de court-circuit. A travers des résultats de simulation et expérimentaux, il a été montré que la perte d'une phase conduisait à l'augmentation drastique de l'ondulation de courant en entrée du convertisseur et également à des contraintes électriques supplémentaires particulièrement sur les composants magnétiques. Une recherche bibliographique rigoureuse a permis de mettre en lumière que l'ondulation de courant à haute fréquence pouvait conduire à des dégradations à long terme sur la pile à combustible, particulièrement sur la durée de vie des catalyseurs en platine. C'est pourquoi, des contrôles tolérants aux défauts ont été développés de telle sorte à minimiser l'ondulation de courant d'entrée et également à protéger les composants magnétiques lors de fonctionnements défectueux. Par ailleurs, un contrôle tolérant aux défauts a été spécialement développé lorsqu'un défaut d'assèchement de la membrane de la pile à combustible est présent. Ce dernier consiste à agir sur le contrôle du convertisseur, permettant à la membrane de retrouver un état d'hy-

dratation optimal. Les algorithmes de détection et les contrôles tolérants aux défauts ont été validés dans un premier temps par simulation, puis dans un second temps expérimentalement sur un banc expérimental de faible puissance comprenant une pile à combustible PEM et un convertisseur de puissance boost entrelacé.

Dans une dernière partie, une étude a été portée sur les interactions entre une pile à combustible PEM et un convertisseur de puissance en cas de défauts d'interrupteurs de puissance. Alors que ces deux composants sont généralement étudiés séparément dans la littérature, plusieurs aspects de leurs interactions exigent davantage de recherche particulièrement en cas de défauts provenant de la pile à combustible et/ou du convertisseur de puissance. En outre, l'utilisation d'un convertisseur de puissance entrelacé permet d'explorer des nouvelles pistes de recherche, particulièrement sur les effets de l'ondulation de courant haute-fréquence supérieure à 10 kHz . Des résultats expérimentaux ont permis de démontrer que la perte d'une phase n'a pas d'impact direct sur les performances de la pile à combustible. L'augmentation de l'ondulation de courant entraîne une surconsommation d'hydrogène. La régulation de la tension du bus DC en sortie du convertisseur de puissance n'est pas impactée suite à un défaut, permettant d'assurer la continuité de service du groupe moteur-variateur.

Ces travaux de recherche ont pu être valorisés à travers de nombreuses publications (conférences et revues) citées à la fin de ce chapitre [GGM⁺15, GGG⁺15, GGND13b, GGND13a, GMG⁺13, MGG⁺13, HHC⁺13, FRG⁺13, GGND15b, Gui14, GGND14].

1.2.2.2 ATER, 2014-2015

L'objectif de mon ATER était de poursuivre mes travaux de recherche initiés en thèse sur l'amélioration de la fiabilité et la disponibilité des systèmes pile à combustible et photovoltaïques. Mes travaux ont porté essentiellement sur le développement d'algorithmes de détection et de contrôles tolérants aux défauts pour des topologies de convertisseur de puissance entrelacées. Ces topologies présentent de nombreux avantages en termes de compacité, réduction de l'ondulation de courant d'entrée, efficacité énergétique et prédisposition aux fonctionnements en mode dégradé (i.e. défectueux) en cas de défauts d'interrupteur de puissance. Ces topologies sont particulièrement bien adaptées pour des applications pile à combustible et photovoltaïques afin d'améliorer la fiabilité de ces systèmes. Malgré le fait que ces convertisseurs continuent à fonctionner suite à un défaut d'interrupteur de puissance, ces derniers sont soumis à des contraintes électriques supplémentaires, particulièrement sur les composants magnétiques et les interrupteurs de puissance. Si ces contraintes électriques supplémentaires ne sont pas prises en compte, cela peut conduire à la saturation des composants magnétiques et à de nouvelles défaillances dans ces convertisseurs. C'est pourquoi, le développement d'algorithmes de détection et de contrôles tolérants aux défauts sont obligatoires afin d'améliorer la fiabilité des convertisseurs entrelacés. Les algorithmes de détection développés pour ce type convertisseur se basent sur des transformations utilisées en électrotechnique (Concordia, Park, Clarke) pour simplifier l'analyse des courants du convertisseur. Les algorithmes de détection de défauts et les contrôles tolérants aux défauts ont été implémentés sur une cible FPGA, afin d'optimiser le temps de détection. Les résultats obtenus à travers différents essais expérimentaux ont permis de valider l'efficacité des algorithmes de détection et des contrôles tolérants aux défauts à améliorer la fiabilité et la disponibilité du convertisseur. Ces nouveaux travaux de recherche ont permis la publication de revues et conférences internationales citées à la fin de ce chapitre [GGND16, GNGD16, GNLD17, GNGD19, GGND15a, GNL⁺16].

1.2.2.3 ATER, 2015-2016

L'objectif de mon ATER était d'étudier la tolérance aux défauts d'interrupteur de puissance d'un onduleur triphasé entrelacé pour des applications aéronautiques. Afin de réduire la taille et le volume du convertisseur, des inductances couplées sont utilisées dans ce convertisseur. En raison de l'utilisation d'inductances couplées, la tolérance aux défauts d'interrupteur de puissance peut être compromise. Afin d'améliorer la disponibilité et la continuité de service de l'onduleur triphasé entrelacé, le développement d'algorithmes de détection et de contrôles tolérants aux défauts est crucial. En outre, une recherche bibliographique a été réalisée sur les topologies de convertisseur de puissance tolérantes aux défauts et également sur les algorithmes de détection développés pour ce type de convertisseur. Cette étude a permis la rédaction d'un article de revue pour IEEE Transactions of Power Electronics.

1.2.2.4 Activités de recherche en cours au GREEN de Longwy

Après mon doctorat et mes deux années d'ATER focalisés essentiellement sur l'électronique de puissance pour les piles à combustible et sur les problématiques de fiabilité, j'ai décidé de réorienter mes activités de recherche lors de mon recrutement au laboratoire GREEN sur les électrolyseurs. Ce choix est parti d'un constat après avoir consulté la littérature existante sur cette thématique. En effet, il est apparu que cette thématique est assez peu représentée en termes de publications comparée à la pile à combustible. De là, en lien avec mes activités de recherche passées, des travaux de recherche ont été initiés concernant la modélisation, l'émulation et le contrôle des électrolyseurs de type PEM. Ces thèmes ont pour finalité d'intégrer les électrolyseurs dans des systèmes multi-sources avec des sources d'énergies renouvelables et des dispositifs de stockage de l'énergie. Les électrolyseurs sont dans ce cas associés avec des réservoirs de stockage et des piles à combustible pour la valorisation de l'hydrogène.

Lors de mon recrutement à l'IUT de Longwy en Septembre 2016, nous étions deux maîtres de conférences. Suite au départ de mon collègue Angel Scipioni en Septembre 2018 pour un détachement de 6 ans (2018-2024), je suis le responsable de l'équipe de recherche GREEN de l'IUT de Longwy ainsi que de la plateforme expérimentale. Cette plateforme fait environ 49 m^2 d'un montant de 60.000 € incluant les équipements suivants :

- banc pile à combustible PEM de 500 W ;
- réservoirs hydrogène et air haute pression (extérieurs à la plateforme) ;
- installation hydrogène (modules, centrales à inversion, manomètres, détendeurs, soupapes, clapets aller-retour) ;
- réservoirs de stockage solide d'hydrogène basse pression basés sur des hydrures métalliques ;
- systèmes de stockage de l'énergie (batteries, supercondensateurs, condensateurs lithium ion) ;
- appareils de mesure (courant, tension) ;
- système temps-réel de prototypage rapide dSPACE (DS1104 et MicroLabBox) ;
- convertisseurs de puissance ;
- systèmes informatiques ;
- sources d'alimentation et charges électroniques ;
- électrolyseurs alcalin et PEM d'une puissance de 150 W ;
- oscilloscopes.

L'installation hydrogène associée au banc pile à combustible PEM ainsi que les deux technologies d'électrolyseur nécessitent une maintenance régulière décrite ci-dessous suivant ces points :

- entretien de la centrale de détection hydrogène (entretien annuel) ;
- maintenance des équipements de l'installation hydrogène (entretien annuel) ;
- remplacement des bouteilles d'hydrogène et d'air (entretien régulier suivant l'utilisation du banc pile à combustible) ;
- entretien régulier des électrolyseurs alcalin (remplacement de la solution liquide de l'électrolyte composée d'un mélange d'hydroxyde de potassium (KOH) avec de l'eau distillée) et PEM (remplacement de l'eau distillée avec une conductivité très faible ($<2 \mu S.m^{-1}$) pour ne pas endommager les cellules de l'électrolyseur).

Depuis septembre 2018, l'équipe est composée de doctorants (trois en moyenne) et d'un ATER hébergée dans un bureau d'environ $24 m^2$ à proximité de la plateforme expérimentale. Je suis en charge également du budget annuel alloué concernant la participation aux congrès et l'achat de matériels. Comme mentionné dans l'introduction de mes activités de recherche, les thématiques de recherche sont complémentaires par rapport aux activités de recherche conduites à Nancy, et s'inscrivent dans l'axe *chaînes de conversion d'énergie* portant sur l'électronique de puissance associée à une charge électrochimique (électrolyseur). Cet axe a été enrichi et renforcé à travers des publications, des collaborations nationales et internationales et via des projets de recherche nationaux et internationaux (discutés dans les prochaines sous-sections). Par ailleurs, ces activités de recherche conduites à Longwy peuvent être vues comme une *passerelle* entre l'axe *chaînes de conversion d'énergie* et l'axe *supraconductivité appliquée au génie électrique* étant donné que l'hydrogène produit par électrolyse de l'eau peut être utilisé à différentes fins (couplage de l'hydrogène liquide refroidi par cryogénie avec des matériaux supraconducteurs pour la propulsion électrique des avions). Cette *passerelle* entre ces deux axes sera développée dans le chapitre 3 concernant les perspectives de recherche.

Les activités de recherche conduites depuis mon recrutement au laboratoire GREEN sur ces thématiques sont présentées de façon synthétique dans le chapitre 2.

1.2.3 Encadrements Master et Thèse

1.2.3.1 Co-encadrements de thèse

Du 1^{er} octobre 2017 au 29 septembre 2020, j'ai co-encadré avec le Professeur Bruno Douine (directeur de thèse) la thèse de M. Vittorio GUIDA, dont son sujet de thèse porte sur la conception et la réalisation d'un convertisseur DC-DC à haut rapport de conversion pour électrolyseurs. Cette thèse a conduit à la publication de deux articles de revues internationales [GGD19, GGVD20], deux articles de conférences internationales [GGD18, V. 19], et enfin un article dans une conférence nationale [GGSD18].

Une seconde thèse a été initiée en octobre 2018 en collaboration avec le CICY (Centre d'investigation scientifique du Yucatán) au Mexique. J'ai collaboré avec mon collègue mexicain Dr. Victor Manuel RAMIREZ RIVERA (directeur de thèse), Chargé de Recherche au CICY sur la thèse de M. Ángel Mauricio HERNÁNDEZ GÓMEZ sur le sujet «voltage modeling of a PEM electrolyzer based on the input current for the design and construction of an electronic emulator». Cette thèse a déjà conduit à la publication de quatre articles de revues internationales [AHGRG20, AHGRGS20, AHGRGS21a, AHGRGS21b]. La soutenance de thèse est prévue le 8 avril 2022.

Je co-encadre actuellement deux thèses avec 50% d'encadrement. La troisième thèse a été initiée en octobre 2019 dans le cadre d'une cotutelle entre l'université de Lorraine et King Mongkut's University of Technology North Bangkok (KMUTNB) de Thaïlande. La thèse est conduite par M. Burin YODWONG sur le sujet «contribution to the development of a high-power low-voltage DC-DC converter for proton exchange membrane electrolyzer applications». Elle est co-encadrée côté Thaïlandais par Dr. Wattana Kaewmanee (co-directeur de thèse) et Prof. Matheepot Phattanasak (directeur de thèse), et côté Français par Prof. Melika Hinaje (directrice de thèse) et moi-même en tant que co-directeur de thèse. Cette thèse a déjà conduit à la publication de quatre articles de revues internationales [YGP⁺20c, YGP⁺20a, YGP⁺20b, YGH⁺21] et deux articles de conférences internationales [GYK⁺19, YGK⁺21]. La soutenance de thèse est prévue le 10 juin 2022.

Enfin, la quatrième thèse a démarré en octobre 2021 dans le cadre d'une cotutelle entre l'université de Lorraine et Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute (KPI). La thèse est conduite par Mme. Iryna BEVZA sur le sujet «novel topologies and control of power converters for hybrid energy storages». Elle est co-encadrée côté Ukrainien par Dr. Oleksandr Bondarenko, et côté Français par Prof. Melika Hinaje (directrice de thèse) et moi-même en tant que co-directeur de thèse. Cette cotutelle s'inscrit dans la continuité de la collaboration initiée suite à l'accueil de deux doctorantes de KPI entre septembre 2020 et janvier 2021 (voir 1.2.4).

La synthèse de mes co-encadrements de thèse est donnée dans la Table 1.1. Les publications qui en découlent sont classées par catégorie (revue internationale à comité de lecture (RICL), conférence internationale à comité de lecture (CICL), et conférence nationale à comité de lecture (CNCL)).

TABLE 1.1 – Synthèse des co-encadrements de thèse.

| Période | Étudiant | Sujet | Publications |
|-----------|-----------------|--|------------------------------|
| 2017-2020 | Vittorio GUIDA | conception et réalisation d'un convertisseur DC-DC à haut rapport de conversion pour électrolyseurs | RICL : 2, CICL : 2, CNCL : 1 |
| 2018-2022 | Ángel HERNÁNDEZ | voltage modeling of a PEM electrolyzer based on the input current for the design and construction of an electronic emulator | RICL : 4 |
| 2019-... | Burin YODWONG | contribution to the development of a high-power low-voltage DC-DC converter for proton exchange membrane electrolyzer applications | RICL : 4, CICL : 2 |

TABLE 1.1 – Synthèse des co-encadrements de thèse (suite).

| Période | Étudiant | Sujet | Publications |
|----------|-------------|---|--------------------|
| 2021-... | Iryna BEVZA | novel topologies and control of power converters for hybrid energy storages | RICL : 0, CICL : 1 |

1.2.3.2 Encadrements et co-encadrements de master

J’ai pu accueillir et encadrer un étudiant Thaïlandais de master, Burin YODWONG, de KMUTNB pendant une période d’un mois (novembre/décembre 2017). Le sujet de stage était focalisé sur la gestion d’énergie des systèmes multi-sources basés sur des énergies renouvelables et d’un stockage tampon par hydrogène. Ce stage a été valorisé par un article dans une conférence internationale [GYKP18]. Par la suite, plusieurs publications ont pu voir le jour et une thèse en co-tutelle (présentée ci-dessus) a démarré en octobre 2019. En outre, par l’intermédiaire de programmes de bourses de stage du laboratoire GREEN et de l’IUT de Longwy, j’ai pu encadrer plusieurs étudiants pour des stages master de 1 à 5 mois dont certains se sont inscrits dans le cadre de collaboration internationale avec l’université de Palerme (Italie) et nationale avec l’équipe de recherche du LERMAB (Laboratoire d’Etude et de Recherche sur le MATériau Bois) située sur le site de Longwy. L’un des stages master a été valorisé à travers une publication dans une revue internationale [GSV20]. La synthèse de mes encadrements et co-encadrements de master est donnée dans la Table 1.2. Les publications qui en découlent sont mentionnées par catégorie (RICL et CICL).

TABLE 1.2 – Synthèse des encadrements et co-encadrements de master.

| Période | Étudiant | Sujet | Encadrement |
|----------------------------|---------------------------------------|--|-------------|
| Du 12/07 au 13/08/21 | Abdel Farid SALEY ELH TCHIAMBOU | recherche bibliographique sur les électrolyseurs alcalins et PEM (en collaboration avec Prof. Michel Zasadzinski du laboratoire CRAN de l’IUT de Longwy) | 50 % |
| Du 1/03 au 31/07/21 | Amine BAKZIZ | analyse du comportement thermique d’un électrolyseur de type PEM (en collaboration avec Dr. Mourad RAHIM du laboratoire LERMAB de l’IUT de Longwy) | 50 % |
| Du 30/03 au 28/08/20 | Oumar JEKANI | étude de la conversion d’énergie électrique en hydrogène pour un électrolyseur de type PEM | 100 % |

TABLE 1.2 – Synthèse des encadrements et co-encadrements de master (suite).

| Période | Étudiant | Sujet | Publications |
|----------------------------|--------------------------|--|--------------|
| Du 1/04 au 15/09/19 | Djamel BENMEZIANE | développement d'un modèle thermique d'un électrolyseur de type PEM et validation expérimentale (en collaboration avec Dr. Mourad RAHIM du laboratoire LERMAB de l'IUT de Longwy) | 50 % |
| Du 3/09 au 3/10/18 | Dario SORBERA (RICL : 1) | réalisation d'un convertisseur DC-DC et développement des lois de contrôle pour un électrolyseur de type PEM | 100 % |
| Du 17/09 au 17/11/18 | Omar ELSHABRAWI | développement et réalisation d'un émulateur pour un électrolyseur de type PEM | 100 % |
| Du 17/11 au 17/12/17 | Burin YODWONG (CICL : 1) | électronique de puissance pour les systèmes électriques hybrides basés sur du stockage de l'énergie en hydrogène | 100 % |

1.2.4 Collaborations internationales et chercheurs invités

Afin de développer l'ouverture et la coopération internationale de l'équipe de recherche GREEN de Longwy, j'ai pu accueillir entre le 24 Avril et le 24 Juillet 2017, une doctorante (Stefania Maria Collura) en 3^e année de l'Université de Palerme (Italie) pendant une période de 3 mois. Le travail de recherche consistait à la commande de convertisseurs de puissance pour alimenter un électrolyseur. A travers ce stage de recherche, des premières collaborations ont pu voir le jour entre l'Université de Palerme, le CNR Italien (équivalent du CNRS) et l'équipe GREEN de Longwy. Afin de conclure ce projet de recherche, la doctorante a effectué un second séjour entre le 1^{er} septembre et le 1^{er} octobre 2017. Le banc de test expérimental a été réalisé sur le site de Longwy. Le travail réalisé pendant ces deux périodes a été valorisé dans trois revues internationales [GCS17, CGV⁺19, ACD⁺20]. Les travaux de thèse de la doctorante sur la commande des électrolyseurs ont par ailleurs été récompensés par la section italienne IEEE (ABB IEEE) en Septembre 2018 concernant les nouveaux défis techniques dans le domaine de l'énergie

et de l'industrie.

Dans l'objectif de consolider ces premières collaborations avec le CNR Italien (suite au suivi de la doctorante Italienne, Stefania Maria Collura), j'ai travaillé en étroite collaboration avec le Professeur Gianpaolo Vitale sur deux thématiques de recherche :

- Électronique de puissance associée aux électrolyseurs PEM. Cette thématique de recherche a été développée dans le cadre d'une thèse que j'ai co-encadré entre octobre 2017 et septembre 2020 (thèse de Vittorio Guida). Ce début de collaboration a mené à plusieurs publications dans des revues internationales [GSV20, GV20b, YGP⁺20a, GGVD20] et conférences internationales [V. 19, GV19b, VCG21].
- Modélisation et développement d'émulateurs des électrolyseurs PEM. Les premiers travaux de recherche effectués ont permis d'être valorisés dans des revues et conférences internationales [GV19a, GV18, GV20a, YGH⁺21].

En parallèle, j'ai pu collaborer avec des collègues de l'Université de Khemis Miliana (Algérie) et du GREEN de Nancy sur la faisabilité d'un réfrigérateur basé sur une pile à combustible. Cette collaboration a conduit à un article de revue [ARB⁺20]. De plus, d'autres travaux de recherche avec des collègues de l'Université du Pacifique Sud située aux îles Fidji, l'Université de Picardie Jules Verne à Amiens et l'Ecole Polytechnique de Turin (Italie), portant sur le diagnostic des défauts d'interrupteurs de puissance des convertisseurs de puissance pour électrolyseurs utilisant l'intelligence artificielle, ont mené à deux articles de conférences internationales [CCG⁺18, KKC⁺21]. Des collaborations avec des collègues thaïlandais de KMUTNB ont pu être initiées suite à l'accueil et l'encadrement d'un étudiant thaïlandais en master, Burin YODWONG. Ce dernier a initié en Octobre 2019 une thèse en co-tutelle que je co-encadre. Cette collaboration a conduit à la publication de plusieurs articles de revues internationales [YGKP19, MTY⁺20, YTGB20, YGP⁺20c, YGP⁺20a, TPG⁺20, TMG⁺21, YGP⁺20b, TMP⁺20, BTG20, TMP⁺21, GNMP⁺22, TMN⁺21, SPG⁺21, YGH⁺21] et conférences internationales [GYKP18, GYK⁺19, MYT⁺19b, YMT⁺19, MYT⁺19a, YGK⁺21]. Certains des articles ont été réalisés en collaboration avec des enseignants-chercheurs de l'Université de Pitesti (Roumanie) et du laboratoire LEMTA (laboratoire énergétique et mécanique théorique appliquée) de l'Université de Lorraine.

En plus de ces collaborations, j'entretiens une collaboration étroite avec le Mexique et plus particulièrement avec le CICY qui a permis le lancement d'une thèse en octobre 2018. Les travaux de collaboration qui portent sur la modélisation mathématique des électrolyseurs en tenant compte des conditions de fonctionnement en dynamique (lorsque l'électrolyseur est couplé à une source d'énergie renouvelable) ont déjà conduit à la publication de plusieurs articles de revues internationales [AHGRG20, AHGRGS20, AHGRGS21a, AHGRGS21b].

Au cours de l'année 2019, j'ai été lauréat de deux programmes de recherche « Découverte Chine » et « Jeunes Talents France-Chine », financés par Campus France et l'ambassade de France de Pékin. Grâce à ces programmes, j'ai réalisé deux séjours de recherche, le premier entre le 9 et le 17 juillet 2019 et le second entre le 24 octobre et 2 novembre 2019 à l'Université de Southwest Jiaotong de Chengdu. J'ai pu donner des séminaires sur mes activités de recherche conduites à Longwy adressés aux étudiants et aux enseignants-chercheurs. Des discussions ont eu lieu pour développer une coopération internationale sur des questions liées au déploiement du stockage de l'énergie en hydrogène.

De plus, dans le cadre du programme Erasmus+, j'ai eu l'opportunité d'accueillir deux doctorantes Ukrainiennes de KPI pendant 5 mois (septembre 2020-janvier 2021) et de séjourner à

KPI en novembre 2020 pendant une semaine. Les travaux de recherche étaient focalisés sur la commande de convertisseur de puissance pour des applications de soudage par résistance électrique où des pics d'énergie sont exigés sur de très courts instants. Ces pics sont fournis grâce à l'utilisation de supercondensateurs rechargés par des batteries. Un banc expérimental a pu être développé pour valider les travaux de recherche. Ces séjours de recherche ont permis d'initier une collaboration avec les enseignants-chercheurs de KPI qui va se poursuivre via une thèse en cotutelle initiée en octobre 2021.

La synthèse des doctorants que j'ai pu accueillir en stage recherche dans le cadre de leurs thèses est donnée dans la Table 1.3.

TABLE 1.3 – Synthèse des doctorants invités.

| Période | Étudiant | Sujet | Publications |
|---|------------------|--|--------------|
| Du 01/09/20 au 31/01/21 | Yuliia KOZHUSHKO | charging devices of hybrid energy storage systems with improved functionality and energy efficiency | RICL : 1 |
| Du 01/09/20 au 31/01/21 | Tetiana KARBIVKA | improvement of technical-economic and energy parameters of power converters with modular structure for resistance welding | RICL : 1 |
| Du 12/04 au 15/07/17, du 01/09 au 01/10/17 | Stefania COLLURA | realization of a DC-DC converter at high voltage ratio and development of control laws for a hydrogen production pathway based on a wind turbine | RICL : 3 |

Enfin, ces nombreuses collaborations internationales m'ont permis de donner plusieurs séminaires au cours de ces dernières années. La synthèse des séminaires est reportée dans la Table 1.4.

TABLE 1.4 – Synthèse des invitations.

| Période | Lieu | Sujet | Financement |
|---------|--|---|-------------|
| 2021 | Projet SMAGRINET (session en ligne), Ukraine | Electrolyzer and Fuel Cell : The Key Technologies for the Development of Smart Grid | SMAGRINET |
| 2021 | Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi (RUS), Thaïlande | Modeling and Control of PEM Electrolyzer | CRCT |

TABLE 1.4 – Synthèse des invitations (suite).

| Période | Lieu | Sujet | Financement |
|---------|--|---|---|
| 2021 | The 24 th International Annual Symposium on Computational Science and Engineering (ANSCSE24), Thaïlande | Cell Voltage Static-Dynamic Mathematical Modelling of a Proton Exchange Membrane Electrolyzer | CRCT |
| 2020 | Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute (KPI), Ukraine | Modeling and Control of PEM Electrolyzer | Erasmus+ |
| 2019 | Southwest Jiaotong University (SWJTU), Chengdu (Chine) | Optimal control of DC-DC converters for PEM electrolyzers : energy efficiency, hydrogen production, dynamic model of electrolyzer | Jeunes Talents France-Chine (Campus France) |
| 2019 | Southwest Jiaotong University (SWJTU), Chengdu (Chine) | Modeling and Power Electronics : Investigation of PEM Electrolyzer System | Découverte Chine (Campus France) |
| 2019 | King Mongkut's University of Technology North Bangkok (KMUTNB), Thaïlande | Optimal control of DC-DC converters for PEM electrolyzers : energy efficiency, hydrogen production, dynamic model of electrolyzer | KMUTNB |
| 2019 | King Mongkut's University of Technology North Bangkok (KMUTNB), Thaïlande | Modeling and Power Electronics : Investigation of PEM Electrolyzer System | KMUTNB |
| 2018 | Rajamangala University of Technology (RUT) international conference Trang, Thaïlande | Power electronics : the key technologies for electrolyzer integration within multi-source systems based on renewable energy sources | RUT |
| 2018 | King Mongkut's University of Technology North Bangkok (KMUTNB), Thaïlande | Electrolyzers and Fuel cells : the key technologies within multi-source systems based on renewable energy sources | KMUTNB |

TABLE 1.4 – Synthèse des invitations (suite).

| Période | Lieu | Sujet | Financement |
|---------|---|---|-------------|
| 2018 | Università degli studi di Palermo, Italie | Electrolyzers and Fuel cells : the key technologies within multi-source systems based on renewable energy sources | GREEN |
| 2017 | Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY), Merida, Mexique | Power Converters : the key technologies within multi-source systems based on renewable energy sources | GREEN |

1.2.5 Participation à des jurys de thèse et comités de sélection

J'ai participé à deux jurys de thèse en tant qu'examinateur dont un descriptif est donné ci-dessous :

- Jury de thèse international : j'ai pu accueillir au cours de l'année 2017 une doctorante Italienne, Stefania Maria Collura pendant une période de 4 mois (voir Table 1.3). J'ai été invité par les encadrants de la doctorante à son jury de thèse en tant qu'examinateur en Mars 2018 à l'Université de Palerme. Son sujet de thèse porte sur : « contrôle de la conversion de l'énergie électrique dans les micro-réseaux intelligents ».
- Jury de thèse national : j'ai participé à un jury de thèse à l'UTBM à Belfort en tant qu'examinateur pour évaluer la thèse de M. Huan Li sur le sujet : « minimisation de la consommation d'énergie des véhicules hybrides à pile à combustible ». La soutenance de thèse a eu lieu à l'UTBM de Belfort le 7 Décembre 2018.

En outre, en tant que co-encadrant de thèse, j'ai participé à la soutenance de thèse de mon doctorant Vittorio GUIDA le 29 septembre 2020 et également de mon doctorant Ángel Mauricio HERNÁNDEZ GÓMEZ en mars 2022.

Par ailleurs, j'ai eu l'opportunité d'évaluer la thèse de master d'un étudiant Vishal CHARAN de l'Université du Pacifique Sud (USP, Suva, îles Fidji) sur le sujet suivant « innovative mpc control of grid interfaced power electronic converters ».

Enfin, j'ai fait partie de 5 comités de sélection à l'IUT de Longwy (2018-2022) pour le recrutement d'un ATER au sein du département GEII et rattaché au laboratoire GREEN. J'ai pu étroitement travailler avec les ATER sur les modules d'enseignement et les activités de recherche.

1.2.6 Congé recherche dans le cadre d'un CRCT

1.2.6.1 Contexte de la demande

Le laboratoire GREEN entretient une relation étroite de coopération depuis 20 ans avec KMUTNB, et en particulier avec l'institut de recherche Franco-Thaï. Plusieurs projets communs ont pu déjà voir le jour entre les deux équipes de recherche, notamment des projets PHC (partenariat Hubert Curien) et des thèses de doctorat destinées à de jeunes chercheurs thaïlandais.

En résumé, cette collaboration a déjà mené à 9 thèses soutenues, plus de 50 articles de revues, et plus de 70 articles de conférences. La majorité des doctorants thaïlandais diplômés en France ont obtenu par la suite un poste d'enseignant-chercheur dans leur université d'origine, et continuent d'être très actifs en recherche. Ces collaborations en recherche sont axées sur les chaînes de conversion électromécaniques, et sur la gestion d'énergie des systèmes multi-sources incluant des sources d'énergie renouvelables, piles à combustible et des systèmes de stockage.

C'est dans le cadre de ce partenariat entre les deux institutions de recherche que j'ai eu l'opportunité d'accueillir un étudiant thaïlandais pour un stage de recherche d'un mois entre novembre et décembre 2017 (voir Table 1.2). Le sujet de stage portait sur une thématique de recherche en pleine émergence, à savoir la gestion d'énergie des systèmes multi-sources basés sur des sources d'énergie renouvelables, un stockage classique de type « batteries » et un stockage tampon de l'énergie sous forme d'hydrogène (incluant un électrolyseur, un stockage, et une pile à combustible).

Cette première coopération entre l'équipe GREEN de l'IUT de Longwy et l'Université King Mongkut a permis la publication d'un premier article dans une conférence internationale IEEE [GYKP18].

1.2.6.2 Projet de recherche

A la suite de cette première expérience enrichissante, j'ai été invité à plusieurs reprises entre Avril 2018 et Août 2019 en tant que « professeur invité » à l'institut de recherche Franco-Thai de KMUTNB. Pendant ces courts séjours (deux semaines maximum), j'ai donné plusieurs séminaires pour diffuser mes travaux de recherche autour des électrolyseurs (voir Table 1.4).

En outre, notre collaboration a permis le développement de nouveaux bancs de test incluant de nouvelles structures candidates de conversion d'énergie combinées à un émulateur d'électrolyseur [YGH⁺21]. Cet émulateur a été développé de telle sorte à reproduire le comportement dynamique de l'électrolyseur sans utiliser ce dernier à des fins expérimentales. C'est la première fois qu'un émulateur d'électrolyseur est utilisé pour cet objectif. Ces nouveaux travaux ont permis d'être valorisés via plusieurs publications.

Avec mes collègues thaïlandais, j'ai déposé un projet de financement de thèse en co-tutelle auprès de l'ambassade de France de Bangkok via le projet « Franco-Thai scholarship program ». Le projet a été accepté en mai 2019 et une thèse en cotutelle a été initiée depuis le 1^{er} octobre 2019 avec l'étudiant qui avait réalisé son stage de master à l'IUT de Longwy fin 2017 (voir Table 1.1). Le sujet de thèse porte sur le développement d'un convertisseur DC-DC haute puissance faible tension pour répondre aux problématiques des électrolyseurs.

Étant donné que le doctorant thaïlandais passe la moitié de l'année en France (octobre-mars) puis en Thaïlande (avril-septembre), j'ai fait une demande d'un semestre de CRCT pendant la période mars-août 2021 et qui m'a été accordé par le CNU. En effet, durant cette période, le doctorant était en Thaïlande pour conclure sa deuxième année en thèse, et je souhaitais être présent pour porter en avant et renforcer mes collaborations en recherche avec mes collègues Thaïlandais (co-encadrants du doctorant Thaïlandais). Ce projet de recherche s'est particulièrement intéressé à l'étude des interactions entre les électrolyseurs et les convertisseurs de puissance. Dans la littérature actuelle, un bon nombre d'articles se sont intéressés soit à la modélisation des électrolyseurs ou bien à la commande des convertisseurs. Toutefois, très peu de travaux ont été rapportés sur les interactions entre les électrolyseurs et les convertisseurs de puissance.

La compréhension de ces interactions et de ces effets est cruciale afin d'optimiser les performances de l'électrolyseur (rendement, production d'hydrogène) mais aussi sa fiabilité à long terme pour éviter son remplacement prématuré, alors que les électrolyseurs de type PEM sont

relativement coûteux dû à l'utilisation de matériaux onéreux pour permettre les réactions chimiques (iridium, platine). Ces travaux de recherche sont pertinents comparés à la littérature existante dans le cadre des activités de recherche du GREEN, et permettront une meilleure conception des convertisseurs de puissance au niveau industriel (architecture, commande) pour optimiser les performances de l'électrolyseur.

1.2.7 Rayonnements scientifiques

Comme indiqué dans la section 1.2.4, j'entretiens d'étroites collaborations avec plusieurs équipes de recherche internationales (Chine, Colombie, îles Fidji, Italie, Mexique, Thaïlande, Ukraine) qui ont été enrichies au fil des années via des publications, des projets de recherche, des séminaires, des cours, et également par l'accueil de doctorants à l'IUT de Longwy. Par ailleurs, d'un point de vue national, je travaille également avec des enseignants-chercheurs de l'Université de Picardie Jules Verne (application de l'intelligence artificielle pour le diagnostic de défauts des convertisseurs DC-DC pour électrolyseurs), et du LEMTA (contrôle et stabilité des systèmes électriques hybrides).

Comme l'IUT de Longwy héberge quatre autres équipes de recherche dont le CEREFIGE (centre européen de recherche en économie financière et gestion des entreprises), le CRAN (centre de recherche en automatique de Nancy), le 2L2S (laboratoire lorrain de sciences sociales) et le LERMAB, des collaborations avec ces différentes équipes se sont créées naturellement. Les collaborations avec le LERMAB ont été introduites dans la sous-section 1.2.3.2 via les stages de master (modélisation thermique des électrolyseurs PEM) encadrés mutuellement. Concernant le CRAN, je collabore avec l'équipe COSyNL (Commande et Observation des Systèmes Non-Linéaires) sur le développement des lois de commande des électrolyseurs alcalins et PEM tenant compte des modèles dynamiques de ces derniers. Ces travaux ont pu être valorisés dans une revue internationale [MGZR21]. Avec le CEREFIGE et le 2L2S en collaboration avec le CRAN, un projet interdisciplinaire a été lancé et porte sur l'alimentation en énergie des véhicules électriques (bornes électriques ou bornes à hydrogène) tenant compte des critères techniques et sociétaux (ce projet est discuté à la fin de ce chapitre).

En outre, pour faire le lien entre l'industrie et la recherche, je collabore avec plusieurs entreprises nationales et internationales :

- GREEN Tech Innovations (Metz) : je collabore avec l'entreprise dans le cadre du projet SMART-VIE (partie Réseau intelligent appliqué à la ville), qui a été lancé depuis 2020 et cofinancé par la région Grand Est : éclairage autonome intelligent, internet de objets, mix énergétique, panneaux solaires. Ce projet réunit des enseignants-chercheurs du CRAN de l'IUT de Longwy. En outre, depuis septembre 2021, un projet d'expérimentation intitulé "Solar E-Light+/E-NRJ TECH" a été initié et en coopération avec la mairie de Lexy (54), l'entreprise ENGIE et la start-up Green Tech Innovations avec le soutien de la Région Grand Est au travers du dispositif GrandTesteur porté par Grand E-Nov+. L'objectif du projet est de développer une plateforme expérimentale pour tester en conditions réelles des électrolyseurs alcalin et PEM alimentés par une source photovoltaïque, et les coupler avec d'autres solutions hybrides de stockage de l'énergie (batteries, supercondensateurs, condensateur lithium ion).
- John Cockerill (Belgique) : depuis Décembre 2020, en tant que responsable de l'équipe GREEN de l'IUT de Longwy, je collabore avec l'entreprise John Cockerill (spécialiste des électrolyseurs alcalins) pour un transfert de technologie de mes activités de recherche, en particulier le développement d'émulateurs d'électrolyseurs qui permettra de tester de

nouvelles architectures de conversion et les lois de commande associées sans utiliser un réel électrolyseur qui pourrait être endommagé au cours d'expérimentations.

- Shandong Saikesaisi Hydrogen Energy CO., LTD (Chine) : l'entreprise conçoit et fabrique des systèmes électrolyseurs alcalins et PEM. Mes activités de recherche sur la modélisation et le contrôle des électrolyseurs les intéressent pour optimiser les performances de l'électrolyseur (rendement, production d'hydrogène) mais aussi sa fiabilité à long terme pour éviter son remplacement prématuré.

Concernant mes activités de relecture, je suis très actif dans l'évaluation d'articles de revues internationales dans mes thématiques de recherche, comme par exemple :

- IEEE (IEEE Transactions on Power Electronics, IEEE Transactions on Industrial Electronics, IEEE Transactions on Industrial Informatics, IEEE Transactions on Transportation Electrification) ;
- Elsevier (International Journal of Hydrogen Energy, Journal of Energy Storage, Journal of Power Sources) ;
- MDPI (Applied Sciences, Catalysts, Electronics, Energies, Hydrogen, Journal of Low Power Electronics and Applications, Machines, Materials, Processes, Sensors, Sustainability, World Electric Vehicle Journal).

Par ailleurs, j'ai été éditeur invité de cinq numéros spéciaux dans des revues internationales dont quatre de l'éditeur MDPI, Clean Technologies, Electronics, Membranes et Sustainability, et une gérée par KMUTNB, intitulée *Applied Science and Engineering Progress*, en lien avec mes activités de recherche. Dans le cadre de la conférence internationale IEEE EEEIC à Gênes (Italie) du 11 au 14 juin 2019, une session technique spéciale intitulée «Power converters for fuel cells and electrolyzers» a été proposée avec mon collègue Gianpaolo VITALE. Un descriptif des cinq numéros spéciaux proposés dans des revues internationales est donné ci-dessous :

- (i) Clean Technologies : le numéro spécial s'intitule "hydrogen economy technologies" et a été proposé en collaboration avec Gianpaolo VITALE (chercheur au conseil national de recherche italienne et professeur à l'université de Palerme (Italie)).
- (ii) Electronics : le numéro spécial s'intitule "advances in energy conversion system" et a été proposé en collaboration avec Michel ZASADZINSKI du CRAN de l'équipe COSyNL. Ce numéro spécial permet de connecter les thématiques de recherche des deux équipes, d'un côté le contrôle et la modélisation des systèmes avec le CRAN, et de l'autre côté les systèmes de conversion d'énergie avec le GREEN.
- (iii) Membranes : le numéro spécial s'intitule "modeling, degradation study, failures diagnosis and faulty operating management of Electrolyzers" et a été proposé en collaboration avec Georgios Papakonstantinou (chercheur à l'institut Max Planck de Magdeburg (Allemagne)).
- (iv) Sustainability : le numéro spécial s'intitule "advances in sustainable electrical engineering" et a été proposé en collaboration avec Phatiphath Thounthong (professeur à KMUTNB (Thaïlande)).
- (v) Applied Science and Engineering Progress : le numéro spécial s'intitule "advances in control of power electronics and electric drives" et a été proposé en collaboration avec Phatiphath Thounthong (professeur à KMUTNB (Thaïlande)). Ce numéro spécial est dédié à Prof.

Dr. Panarit SETHAKUL (enseignant-chercheur à KMUTNB) pour avoir créé et renforcé au fil des années la collaboration internationale académique entre KMUTNB et l'Université de Lorraine.

En plus de ces activités, je suis membre de différents comités éditoriaux de revues internationales dont une synthèse est donnée dans la Table 1.5.

TABLE 1.5 – Synthèse de mes rôles dans différents comités éditoriaux.

| Revue | Rôle |
|---|---------------------------------------|
| Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature (TKEA) | membre du comité éditorial |
| European Journal of Electrical Engineering (EJEE) | éditeur associé |
| Clean Technologies | membre du comité éditorial |
| Electronics | membre du comité des numéros spéciaux |
| Energies | membre du comité d'évaluation |
| Membranes | membre du comité des numéros spéciaux |

Enfin, depuis Octobre 2018, dans le cadre de la fête de la science organisée chaque année à l'IUT de Longwy, j'anime des ateliers autour de la production d'hydrogène via l'électrolyse de l'eau et du stockage de l'énergie électrique. Cet événement s'adresse à des élèves d'écoles primaires, de collèges et de lycées à proximité de l'IUT de Longwy. Compte-tenu de la situation sanitaire au cours de l'année 2020, la fête de la science ne s'est pas déroulée à l'IUT de Longwy comme les années passées, mais directement dans différentes écoles primaires autour de l'IUT de Longwy.

1.3 Activités pédagogiques

Depuis mon recrutement à l'IUT de Longwy, j'enseigne au sein du département GEII. J'interviens plus particulièrement en 1^{re} et 2^e année de DUT GEII (remplacé par le bachelor universitaire de technologie (BUT) depuis septembre 2021) et dans les licences professionnelles BDMS (bâtiment durable et mobilité soutenable) et SARII (systèmes automatisés, réseaux, et informatique industrielle). Concernant la réforme du BUT, j'ai participé à sa mise en place au sein de l'IUT de Longwy, en particulier sur l'internationalisation de la formation (enseignements en anglais et mobilité virtuelle chez les partenaires Erasmus) et le développement d'une situation d'apprentissage et d'évaluation (SAE) sur la conception et la réalisation d'un mini amplificateur audio. Mes activités d'enseignement s'articulent autour de trois points principaux qui sont l'enseignement, l'encadrement d'étudiants lors de stages en entreprise, et de projets tutorés en lien avec la recherche. J'ai enseigné dans des domaines très divers (capteurs et mesures, électronique de puissance, électrotechnique, stockage de l'énergie, systèmes électroniques, technologies hydrogène, thermodynamique, variation de vitesse des machines électriques). Je suis par ailleurs responsable de plusieurs modules (énergies renouvelables et stockage de l'énergie, systèmes électroniques, technologies hydrogène) et de la salle de travaux pratiques de la LP BDMS (production et stockage de l'énergie électrique). D'ailleurs, dans l'objectif de promouvoir la formation de li-

cence professionnelle BDMS, j'ai eu l'opportunité de participer à l'écriture de deux articles dans la revue des départements GEII des IUT ; un portant sur l'utilisation de maquettes d'éoliennes en GEII [Gui18] et l'autre sur la production d'hydrogène par électrolyse de l'eau [Gui19]. De plus, j'ai pu intervenir dans deux vidéos de promotion des formations de licences professionnelles BDMS et SARII. Mes activités d'enseignement sont détaillées dans la Table 1.6. En tenant compte de mes activités d'enseignements et de l'encadrement de stagiaires et d'étudiants en projets tutorés, le service total annuel est d'environ 290 HEQTD (heures équivalentes TD). La répartition des activités d'enseignement sur une année universitaire est donnée sur la Figure 1.3.

TABLE 1.6 – Synthèse des activités d'enseignement.

| Période | Niveau | Module | Nature |
|-----------|--|---|---------------------------------|
| 2017 | LP BDMS | capteurs et mesures | Cours (4h), TD (4h) et TP (24h) |
| 2020-.... | LP SARII | électricité et électrotechnique industrielle | Cours, TD (8h) et TP (24h) |
| 2016-.... | DUT GEII 1 ^{re} année | énergie : réseaux électriques | TD (18h) et TP (12h) |
| 2016-.... | DUT GEII 2 ^e année | énergie : conversions d'énergie | TD (18h) et TP (24h) |
| 2019-.... | DUT GEII 2 ^e année | énergies renouvelables et stockage de l'énergie | Cours (4h), TD (4h) et TP (10h) |
| 2016-.... | DUT GEII 1 ^e année | systèmes électroniques | TP (24h) |
| 2016-.... | DUT GEII 2 ^e année | systèmes électroniques | Cours (8h) et TD (14h) |
| 2019-.... | LP BDMS | technologies hydrogène | Cours (4h), TD (4h) et TP (12h) |
| 2016-.... | LP BDMS | thermodynamique | Cours (8h), TD (8h), et TP (4h) |
| 2018-.... | DUT GEII 2 ^e année | variation de vitesse | TP (24h) |
| 2021-.... | BUT GEII 1 ^e année | SAE | TD et TP (30h) |
| 2016-.... | DUT GEII 2 ^e année, LP BDMS, LP SARII | suivi de stagiaires | 30 HEQTD |
| 2016-.... | DUT GEII 1 ^e année et 2 ^e année, LP BDMS, LP SARII | suivi d'étudiants en projet tutoré | 60 HEQTD |

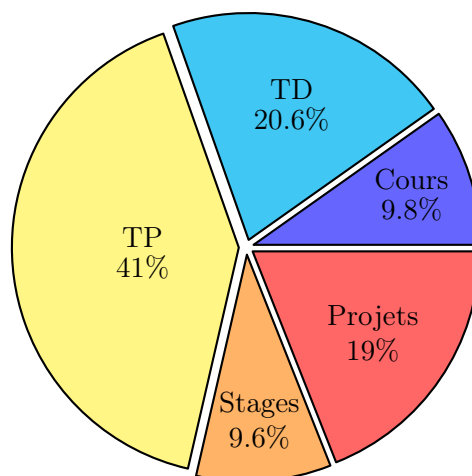


FIGURE 1.3 – Répartition des activités d'enseignement sur une année universitaire.

1.4 Activités administratives

L'IUT Henri Poincaré de Longwy, composante de l'Université de Lorraine, est l'un des huit IUT lorrains. Il se situe au carrefour de la Belgique et du Luxembourg, et à une trentaine de kilomètres de l'Allemagne. Il accueille des étudiants depuis 1969 au sein de trois départements : GEA (gestion des entreprises et des administrations), GEII, et MT2E (métiers de la transition et de l'efficacité énergétiques). Concernant les formations, l'IUT propose 3 BUT, 7 licences professionnelles, et 3 diplômes universitaires. Par ailleurs, comme indiqué précédemment, l'IUT héberge 5 équipes de recherche dont le CEREFIGE, le CRAN, le 2L2S, le LERMAB, et enfin le GREEN (installé depuis septembre 2016). L'organigramme de l'IUT de Longwy est donné sur la Figure 1.4.

Afin d'assurer sa fonction de formation d'un enseignement supérieur technologique, l'IUT est composé de plusieurs conseils :

- conseil de l'institut ;
- conseil scientifique ;
- conseil de direction.

En se basant sur cet organigramme, la structure de l'IUT est la suivante :

- un service commun regroupant la direction, les services administratifs généraux et les services techniques centraux ;
- les trois départements GEA, GEII et MT2E ;
- des services plus spécialisés rattachés aux départements ou à la direction.

Le conseil de l'institut est composé de trente membres dont neuf membres extérieurs, 12 enseignants par collège (chargés d'enseignement, professeurs agrégés, maîtres de conférences et professeurs des universités), trois personnels administratifs et techniques, et enfin six usagers. Il

définit la politique générale de l'IUT et propose toute proposition pour son application, particulièrement en ce qui concerne les points suivants :

- élection du directeur de l'IUT ;
- programmes d'enseignement et de recherche ;
- avis sur les contrats exécutés par l'IUT, les effectifs d'étudiants et sur la nomination des chefs de département ;
- vote du budget et approbation du compte financier ;
- élaboration ou modification du règlement intérieur et des statuts ;
- relations extérieures, particulièrement internationales.

Le conseil scientifique a pour rôle de traiter toutes les questions relatives aux activités de recherche au sein de l'IUT ; tandis que le conseil de direction concerne la prise en charge de la vie courante de l'IUT, et l'étude pratique des modalités de mise en œuvre des décisions du conseil de l'institut.

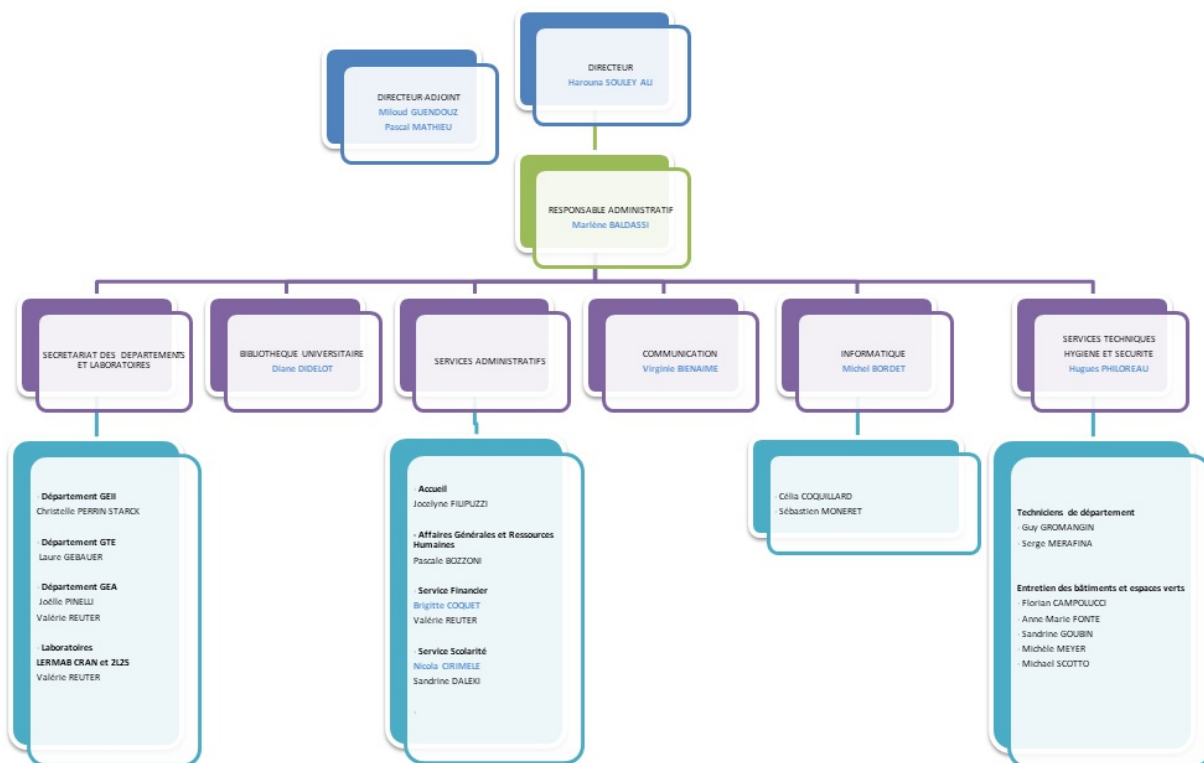


FIGURE 1.4 – Organigramme de fonctionnement de l'IUT de Longwy.

Depuis mon arrivée à l'IUT de Longwy, j'ai été impliqué dans plusieurs activités administratives dont un descriptif est donné ci-dessous :

- membre du conseil de direction (2018-actuellement) et du conseil de l'institut (2018-2021) à l'IUT de Longwy ;
- comité d'organisation du colloque international Energie et Ville du Futur (EVF 2017, Longwy) et de la conférence ISEF (International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering) à Nancy (août 2019). Ces deux congrès ont réuni une centaine de participants ;
- comité d'organisation du symposium de génie électrique (SGE) à Nancy (juillet 2018) et du colloque pédagogique national des départements GEII à l'IUT de Longwy (mai 2019) qui ont réuni environ une centaine de participants ;
- responsable des stages (2017-actuellement) au département GEII de l'IUT de Longwy (environ 120 étudiants). En l'absence de directeur des relations industrielles au sein de l'IUT de Longwy (voir Figure 1.4), je m'occupe en particulier des relations industrielles, de la diffusion des offres de stage, de l'envoi des conventions de stage, et de la planification et l'organisation des soutenances. En outre, j'ai contribué à l'écriture d'un carnet de stage (synthétisant toutes les informations essentielles) à destination des étudiants, au développement des mobilités internationales dans le cadre de stages (Chine, Danemark, Italie, Norvège), et à l'organisation de forums étudiants/entreprises pour les recherches de stage ;
- accueil de doctorants et étudiants étrangers (Colombie, Italie, Mexique, Thaïlande, Ukraine) pour des stages de recherche au sein du laboratoire GREEN (voir Tables 1.1, 1.2 et 1.3).

1.5 Projets et productions scientifiques

1.5.1 Projets nationaux et internationaux

Tout d'abord, j'ai participé à 6 projets nationaux (PN) synthétisés dans la Table 1.7 et décrits ci-dessous. Deux ont été financés par la fédération de recherche Jacques Villiermaux (FJV) et le pôle scientifique EMPP (Énergie, Mécanique, Procédés, Produits) de l'Université de Lorraine dont fait partie le GREEN. Un troisième a été financé dans le cadre du CPER (contrat de plan état-région), deux projets de collaboration avec le CRAN et le dernier par l'Université de Lorraine via un projet interdisciplinaire. Les financements obtenus grâce à ces projets ont permis de développer la plateforme expérimentale GREEN sur le site de l'IUT de Longwy (décrite en sous-section 1.2.2.4) et d'alimenter différentes problématiques scientifiques traitées dans le chapitre 2 synthétisant mes activités de recherche. En outre, la réalisation de maquettes expérimentales a permis de valider des modèles d'électrolyseur ainsi que des lois de commande associées à l'électronique de puissance pour alimenter des électrolyseurs. Enfin, la finalité de ces projets est de créer une synergie entre toutes les équipes de recherche hébergées sur le site de l'IUT de Longwy pour soutenir et renforcer des collaborations naissantes.

Je présente ci-dessous les projets nationaux auxquels j'ai participé, leurs descriptions résumées et leurs valorisations associées à des publications.

TABLE 1.7 – Synthèse des projets nationaux.

| Référence | Période | Projet | Rôle | Montant |
|-----------|-----------|---|---------|----------|
| [PN1] | 2018 | investissements jeunes chercheurs (pôle scientifique EMPP) | porteur | 10.000 € |
| [PN2] | 2018-2019 | projets collaboratifs jeunes-chercheurs (FJV et pôle scientifique EMPP) | porteur | 6.000 € |
| [PN3] | 2018-2020 | contrat de plan état-région (CPER) | porteur | 15.000 € |
| [PN4] | 2021 | actions incitatives du CRAN | porteur | 5.650 € |
| [PN5] | 2021 | projet collaboratif du CRAN | porteur | 10.000 € |
| [PN6] | 2021-2022 | projet interdisciplinaire (Université de Lorraine) | porteur | 20.000 € |

[PN1] : Ce projet d’investissement jeune chercheur a été proposé pour équiper la plateforme expérimentale GREEN d’un système temps-réel de prototypage rapide dSPACE MicroLabBox. L’objectif est d’implémenter des lois de contrôle pour la commande des électrolyseurs et des stratégies de gestion d’énergie des systèmes multi-sources incluant des sources d’énergies renouvelables, des systèmes de stockage et des technologies d’hydrogène (électrolyseur, réservoir de stockage et pile à combustible).

[PN2] : Ce projet intitulé "Intégration de la Domotique au Bâtiment Bois (IDBBois)" a été proposé avec des collègues du LERMAB à l’IUT de Longwy dans l’objectif d’initier une coopération inter-laboratoire. Elle est motivée par le fait que les deux équipes de recherche sont hébergées sur le même site et de la complémentarité des disciplines et des thématiques de recherche. Dans le cadre de ce projet, il a été proposé d’intégrer un système de pilotage et d’optimisation sur les systèmes de chauffage et de ventilation de l’éco-chalet bois située sur site. Un suivi expérimental en cours permettra d’appréhender les besoins hygrothermiques du chalet. Les données collectées détermineront les algorithmes nécessaires à mettre en œuvre pour optimiser le fonctionnement des équipements énergétiques. La stratégie de commande prendra en compte les paramètres influents du bâtiment : sa structure, ses occupants, son environnement et la météorologie.

[PN3] : La proposition de ce projet a été motivée par le fait que l’équipe de recherche GREEN est relativement jeune dû à une installation récente sur le site de l’IUT de Longwy (septembre 2016). En conséquence, dans l’objectif de développer des activités de recherche GREEN sur site, il était crucial de demander un financement via le CPER pour l’achat de matériels afin d’équiper la plateforme expérimentale. Avec les équipements achetés, plusieurs bancs expérimentaux ont pu être réalisés et ont permis de valoriser plusieurs travaux de recherche sur différentes problématiques dans différentes publications scientifiques [ACD⁺20, AHGRGS20, AHGRGS21a, CCG⁺18, CGV⁺19, GGVD20, GSV20, GV18, GV19a, GV19b, GV20a, GV20b, V. 19, YGP⁺20b, KKC⁺21].

[PN4] : Dans le cadre des actions incitatives du CRAN, un projet collaboratif a été proposé dans le but d’obtenir un budget pour l’acquisition de nouveaux matériels (ordinateur, système de prototypage temps-réel). Comme les activités de recherche du GREEN font appel à des com-

pétences en automatique, plus particulièrement pour les aspects contrôle/commande et tolérance aux défauts électriques (diagnostic, contrôles tolérants aux défauts), la collaboration s'est créée naturellement entre les deux équipes autour de l'utilisation de l'hydrogène dans le cadre des énergies renouvelables et du stockage de l'énergie. L'objectif du projet est de réaliser une plateforme expérimentale conjointe qui permet de caractériser des électrolyseurs alcalins et PEM (en vue de leurs modélisations et d'une comparaison de leurs performances) et de tester des stratégies de commande pour les convertisseurs de puissance associés aux électrolyseurs. Grâce à la plateforme expérimental développé, des premiers travaux de recherche ont pu être valorisés dans deux revues internationales [GGZR22, MGZR21].

[PN5] : En continuité du projet [PN4], un projet collaboratif avec des enseignants-chercheurs du CRAN a été proposé concernant le développement d'une plateforme microgrid multi-sources combinant un stockage de l'énergie sous forme d'hydrogène et électrochimique (supercondensateur, condensateur lithium-ion). Ce projet s'intéresse en particulier à la commande et à fiabilité des convertisseurs de puissance interfaçant les sources d'énergie et de stockage à un bus continu. En effet, ces convertisseurs sont considérés comme les maillons faibles de la chaîne d'énergie et tout défaut électrique peut conduire à une réduction drastique des performances du système. En outre, les convertisseurs de puissance jouent un rôle clé dans la stabilité du système. Une mauvaise conception du contrôle pourrait conduire à des oscillations et à l'instabilité du système. C'est pourquoi, une attention particulière doit être portée à l'architecture des convertisseurs de puissance, son contrôle, et également à sa disponibilité en cas de défaillances électriques. Ce projet a permis d'équiper la plateforme GREEN d'un banc de supercondensateurs (130 F, 62 V), une source d'alimentation DC pour émuler une source d'énergie, et enfin des réservoirs de stockage solide basse pression de l'hydrogène. Cette plateforme est valorisée à la fois sur les sites internet du CRAN et du GREEN.

[PN6] : Ce projet interdisciplinaire intitulé "alimentation en énergie d'un véhicule électrique : bornes à hydrogène ou bornes électriques, critères techniques versus critères sociétaux. Quel modèle décisionnel adopter ? (AVEHE)" a été proposé pour créer une synergie des équipes de recherche hébergées (CEREFIGE, CRAN, GREEN, et 2L2S) sur le site de Longwy autour de différentes problématiques techniques, sociétales et économiques. Ce projet s'intéresse en particulier aux bornes électriques et aux bornes à hydrogène pour alimenter des véhicules électriques dans un contexte de réduction de l'empreinte carbone dans le secteur du transport. Il a pour finalité de croiser dans une approche unifiée les différentes problématiques évoquées ci-dessus et de construire des outils interdisciplinaires d'aide à la prise de décision pour le choix de la borne de recharge.

En parallèle de ces projets nationaux, j'ai également participé à 6 projets internationaux (PI) résumés dans la Table 1.8 et décrits ci-dessous. Deux ont été financés par Campus France pour des séjours de recherche en Chine et un troisième par l'Union Européenne dans le cadre d'un projet dont plusieurs universités européennes étaient impliquées. Ensuite, un quatrième a été financé par KMUTNB dans le cadre d'un projet de recherche entre les enseignants-chercheurs du GREEN et de l'institut de recherche franco-Thaï de KMUTNB. Un cinquième a été financé par le programme LUE (Lorraine Université d'Excellence) Widen Horizons de l'Université de Lorraine dans le cadre de mon semestre de CRCT en Thaïlande. Enfin, le dernier projet a été financé dans le cadre du programme ECOS Nord Colombie pour initier une collaboration avec des enseignants-chercheurs Colombiens de l'Universidad Industrial de Santander. Les financements issus de ces projets m'ont beaucoup apporté pour la réalisation de projets de séjours en Chine, Colombie et

Thaïlande au cours de ces dernières années. Par ailleurs, ils ont contribué très fortement à initier et enrichir des nouvelles collaborations fructueuses sur les aspects pédagogiques et de recherche (Colombie, Chine, Universités Européennes) et à renforcer les coopérations existantes avec la Thaïlande avec de nouveaux projets communs et publications scientifiques.

J'expose ci-dessous les projets internationaux auxquels j'ai participé, leurs descriptions résumées et leurs valorisations associées à des publications.

TABLE 1.8 – Synthèse des projets internationaux.

| Référence | Période | Projet | Rôle | Montant |
|-----------|---------------------|---|-------------|-----------|
| [PI1] | 2019 | découverte Chine (Campus France) | porteur | 2.400 € |
| [PI2] | 2019 | jeunes talents France-Chine (Campus France) | porteur | 2.500 € |
| [PI3] | 2019-2021 (30 mois) | SMAGRINET (financement Commission Européenne dans le cadre du programme Horizon 2020-Recherche et Innovation) | Participant | 350.000 € |
| [PI4] | 2020-2021 | KMUTNB international research partnerships : electrical engineering thai-french research center (EE-TFRC) | porteur | 20.000 € |
| [PI5] | 2021 | programme LUE Widen Horizons | porteur | 6.000 € |
| [PI6] | 2021-2024 | projet ECOS Nord Colombie | porteur | 20.000 € |

[PI1] : Le projet "Découverte Chine" a pour vocation de permettre à de jeunes chercheurs Français de faire un état des lieux des activités de recherche menées en Chine sur leurs thématiques. Ce programme de recherche m'a permis de prendre contact avec deux enseignants-chercheurs de l'Université SouthWest Jiaotong (SWJTU) de Chengdu, travaillant sur deux thématiques de recherche différentes. J'ai pu visiter le laboratoire TPL (state key laboratory of traction power) et le Laboratoire NEEC (national rail transit electrification and automation engineering technique research center). Le choix de cette université n'est pas dû au hasard car l'équipe "supraconductivité" du GREEN collabore avec le laboratoire TPL, en particulier sur les trains dits *MAGLEV* qui utilisent la sustentation magnétique pour se déplacer, sans aucun contact avec les rails qui les guident. De l'autre côté, le laboratoire NEEC se rapproche le plus de mes activités de recherche conduites à l'IUT de Longwy car l'équipe de recherche travaille essentiellement sur la pile à combustible et son application dans les micro-réseaux électriques autonomes. Comme indiqué dans la sous-section 1.2.4, ce séjour en Chine m'a permis de donner un séminaire sur mes activités de recherche conduites à Longwy et d'échanger avec les enseignants-chercheurs pour de futures collaborations. En outre, durant ce séjour, j'ai pu rencontrer les attachés scientifiques du consulat Français de Chengdu pour leur parler de ces projets de collaborations.

[PI2] : Le projet "jeunes talents France-Chine" a pour objectif de permettre à de jeunes talents Français de se déplacer en Chine pour effectuer une mission d'expertise sur leurs activités de recherche. Suite à mon précédent déplacement à Chengdu réalisé en 2019 dans le cadre du programme «découverte Chine», j'ai décidé d'y retourner dans le cadre de ce nouveau programme.

Ce choix est motivé par le fait que j'avais déjà noué des contacts forts avec les équipes de recherche TPL et NEEC. Pendant ce deuxième séjour, j'ai pu donner un séminaire et échanger avec les enseignants-chercheurs du laboratoire NEEC sur le développement d'une coopération scientifique. En complémentarité de nos activités de recherche, un projet de coopération scientifique entre nos deux institutions de recherche a été proposé concernant l'échange de jeunes chercheurs (doctorants en particulier) dans le cadre du programme de recherche « Xu Guangqi 2020 ». Cette première coopération entre les deux instituts de recherche s'intéresse particulièrement au diagnostic des défauts pouvant se produire au sein des systèmes pile à combustible et électrolyseur. Pour ce dernier, ce thème de recherche reste encore inexploité dans la littérature, et c'est l'une des raisons qui nous a motivé à proposer ce projet de coopération dans le cadre du programme de recherche « Xu Guangqi 2020 ». Malheureusement, en raison de la pandémie de Covid-19 apparue au cours de cette année, les projets de ce programme n'ont pas été évalués. Toutefois, ce projet de collaboration reste dans des perspectives futures.

[PI3] : Le projet SMAGRINET (smart grid competence hub for boosting research, innovation and educational capacities for energy transition) vise à créer un pôle de compétences du réseau électrique intelligent dit *smart grid* abordant le domaine des systèmes énergétiques intelligents et flexibles avec interrelations énergie renouvelable et stockage d'énergie pour renforcer la capacité des universités européennes à s'engager avec l'industrie et les acteurs sociétaux et pour répondre aux défis de la transition énergétique. Ce projet réunit un consortium de neuf partenaires Européens dont l'Université de Technologie de Talinn (Estonie, coordinateur du projet), l'Université de Ljubljana (Slovénie), l'Université Technique de Dresden (Allemagne), l'entreprise GLOBAZ S.A.(Portugal), l'entreprise Civitta (Estonie), l'Université de Technologie de Kaunas (Lituanie), l'Université Technique de Berlin (Allemagne), l'entreprise Eesti Elektritööstuse Liit (Estonie), et enfin l'Université de Lorraine dont des enseignants-chercheurs du GREEN et du ERPI (équipe de recherche sur les processus innovatifs) sont impliqués. Les principaux objectifs de ce projet sont décrits ci-dessous :

- (i) l'objectif stratégique à long terme du projet est de développer une génération de chercheurs et d'ingénieurs équipés pour développer, améliorer et déployer de nouvelles technologies énergétiques, et être en mesure de répondre aux défis de la transition énergétique ;
- (ii) objectif direct : créer un pôle de compétences en smart grid pour améliorer les capacités des universités Européennes en matière de recherche énergétique, innovation et éducation et engagement avec l'industrie, les villes, les régions et d'autres acteurs sociétaux clés ;
- (iii) objectif opérationnel : mettre à jour, développer et mettre en œuvre une capacité de programme constructif pour stimuler la recherche, l'innovation et l'éducation pour la transition énergétique.

Dans le cadre de ce projet, j'ai eu l'opportunité de donner une conférence sur l'intégration des technologies hydrogène (electrolyseur, stockage, pile à combustible) dans des smart grid à des chercheurs ukrainiens de l'université *O.M.Beketov National University of Urban Economy* et des salariés de l'entreprise ukrainienne *National Power Company "UkrEnegro"* (voir Table 1.4).

[PI4] : Comme souligné dans la sous-section 1.2.6, le laboratoire GREEN entretient d'étroites et pérennes collaborations avec les enseignants-chercheurs de l'institut de recherche Franco-Thaï de KMUTNB. C'est dans ce contexte qu'un projet de collaboration entre les deux équipes de recherche a été proposé pour le programme KMUTNB international research partnerships : electrical engineering thai-french research center (EE-TFRC). Le financement issu de ce projet collaboratif a deux objectifs :

- (i) permettre de soutenir les déplacements des enseignants-chercheurs du GREEN et de l'institut de recherche Franco-Thaï de KMUTNB ;
- (ii) financer de nouveaux équipements pour le développement d'une plateforme expérimentale commune.

Les thématiques de recherche s'orientent vers la modélisation, la commande et la stabilité des microgrid pour des applications stationnaires et embarquées. Ces systèmes incluent des piles à combustible, des électrolyseurs, des systèmes de stockage de l'énergie et de l'électronique de puissance. Ce projet a mené à plusieurs publications [MTY⁺20, YTGB20, TPG⁺20, TMG⁺21, TMP⁺20, TMP⁺21, GNMP⁺22, TMN⁺21]. Par ailleurs, en 2020, en collaboration avec le LEMTA et l'équipe de recherche de l'institut de recherche Franco-Thaï de KMUTNB, un projet de création d'un laboratoire de recherche commun dans le cadre du programme "UL-International Research Partnerships (IRP)" a été accepté. Ce projet se base sur trois thématiques de recherche (l'hydrogène comme vecteur d'énergie, les chaînes de traction des véhicules électriques, et enfin les microgrid autonomes). Ce projet permettra de contribuer à l'accueil d'étudiants et de doctorants de KMUTNB ainsi qu'au financement de la plateforme expérimentale commune.

[PI5] : Le programme LUE Widen Horizons synchronisé aux demandes de CRCT a pour objectif d'accompagner les projets de mobilité des personnels permanents des établissements du consortium LUE, en les aidant à couvrir les frais annexes de leur projet de mobilité temporaire vers un laboratoire externe au site lorrain. C'est dans le cadre de ce programme que j'ai déposé un projet couplé avec ma demande de CRCT pour financer en partie mon séjour de six mois en Thaïlande (billets d'avion, logement, et nourriture). Pendant mon CRCT, plusieurs publications ont pu voir le jour [GNMP⁺22, SPG⁺21, YGH⁺21, YGK⁺21, KYS⁺21].

[PI6] : Le programme ECOS Nord Colombie a pour objectif de financer sur une période de 3 ans des séjours en France et en Colombie d'enseignants-chercheurs et doctorants. Ce projet a été proposé entre des enseignants-chercheurs de l'Universidad Industrial de Santander et de l'Université de Lorraine (GREEN de l'IUT de Longwy, et le laboratoire matériaux optiques, photonique et systèmes (LMOPS) de l'IUT de Thionville-Yutz). Il est intitulé "Design and evaluation of power converters and their control system for the integration of photovoltaic and hydrogen-based energy to the grid". Il se concentre sur l'amélioration de l'efficacité et de la fiabilité des convertisseurs de puissance pour des applications d'énergies renouvelables incluant l'énergie photovoltaïque et le vecteur hydrogène (piles à combustible et électrolyseurs PEM). Basé sur les compétences des enseignants-chercheurs impliqués et des travaux de recherche disponibles dans la littérature, le but du projet est de développer des méthodes originales de détection de défauts et de contrôles tolérants aux défauts appliqués à des systèmes électrolyseurs PEM afin d'optimiser leurs fiabilités et leurs disponibilités. Ces objectifs sont cruciaux pour permettre à ces technologies de se développer à grande échelle. Compte-tenu de la situation sanitaire en 2021 dû à la pandémie de Covid-19, aucun déplacement n'a pu avoir lieu entre la Colombie et la France. En conséquence, une partie du budget du projet alloué pour 2021 a été débloqué pour acheter une bouteille de stockage solide basse pression de l'hydrogène afin de développer une plateforme de tests avec les électrolyseurs. Divers séjours d'enseignants-chercheurs et de doctorants sont prévus pour 2022 pour porter en avant ce projet.

1.5.2 Publications

Depuis ma thèse de doctorat, toutes les productions pédagogiques et scientifiques sont référencées dans cette section et sont classées par catégorie comme suit :

- (i) revues internationales à comité de lecture (RICL);
- (ii) revues nationales à comité de lecture (RNCL);
- (iii) revues pédagogiques à comité de lecture (RPCL);
- (iv) conférences internationales à comité de lecture (CICL);
- (v) conférences nationales à comité de lecture (CNCL).
- (vi) article de vulgarisation scientifique (AVS).

La synthèse et la répartition des productions scientifiques par catégorie sont données respectivement dans la Table 1.9 et la Figure 1.5.

TABLE 1.9 – Synthèse des productions scientifiques par catégorie.

| Catégorie | Nombre | Répartition |
|--------------|-----------|--------------|
| RICL | 37 | 54.4 % |
| RNCL | 1 | 1.5 % |
| RPCL | 2 | 3 % |
| CICL | 22 | 32.3 % |
| CNCL | 5 | 7.3 % |
| AVS | 1 | 1.5 % |
| Total | 68 | 100 % |

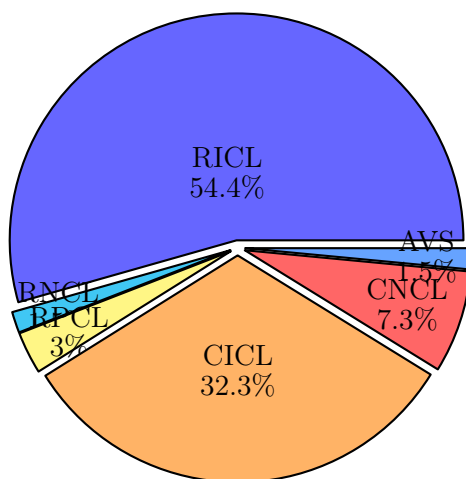


FIGURE 1.5 – Répartition des productions pédagogiques et scientifiques par catégorie.

1.5.2.1 Articles dans des revues internationales à comité de lecture (RICL)

[GGM⁺15] D. Guilbert, A. Gaillard, A. Mohammadi, A. N'Diaye, and A. Djerdir. Investigation of the interactions between proton exchange membrane fuel cell and interleaved DC/DC boost converter in case of power switch faults. *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 40, no. 1, **2015**, pp. 519-537.

- [GGG⁺15] D. Guilbert, M. Guarisco, A. Gaillard, A. N'Diaye, and A. Djerdir. FPGA based fault-tolerant control on an interleaved DC/DC boost converter for fuel cell electric vehicle applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 40, no. 45, **2015**, pp. 15815-15822.
- [GGND16] D. Guilbert, A. Gaillard, A. N'Diaye, and A. Djerdir. Power switch failures tolerance and remedial strategies of a 4-leg floating interleaved DC/DC boost converter for photovoltaic/fuel cell applications. *Renewable Energy*, vol. 90, **2016**, pp. 14-27.
- [GNGD16] D. Guilbert, A. N'Diaye, A. Gaillard, and A. Djerdir. Fuel cell systems reliability and availability enhancement by developing a fast and efficient power switch open-circuit fault detection algorithm in interleaved DC/DC boost converter topologies. *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 41, no. 34, **2016**, pp. 15505-15517.
- [GNLD17] D. Guilbert, A. N'Diaye, P. Lubberda, and A. Djerdir. Fuel Cell Lifespan Optimization by Developing a Power Switch Fault-Tolerant Control in a Floating Interleaved Boost Converter. *Fuel Cells*, vol. 17, no. 2, **2017**, pp. 196-209.
- [GCS17] D. Guilbert, SM. Collura, and A. Scipioni. DC/DC converter topologies for electrolyzers : State-of-the-art and remaining key issues. *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 38, **2017**, pp. 23966-23985.
- [GNGD19] D. Guilbert, A. N'Diaye, A. Gaillard, and A. Djerdir. Reliability improvement of a floating interleaved DC/DC boost converter in a PV/fuel cell stand-alone power supply. *EPE Journal*, vol. 29, no. 2, **2019**, pp. 49-63.
- [CGV⁺19] SM. Collura, D. Guilbert, G. Vitale, M. Luna, F. Alonge, F. D'Ippolito, and A. Scipioni. Design and experimental validation of a high voltage ratio DC/DC converter for proton exchange membrane electrolyzer applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 44, no. 14, **2019**, pp. 7059-7072.
- [GV19a] D. Guilbert, and G. Vitale. Dynamic Emulation of a PEM Electrolyzer by Time Constant Based Exponential Model. *Energies*, vol. 12, no. 4, **2019**, 750.
- [GGD19] V. Guida, D. Guilbert, and B. Douine. Literature Survey of Interleaved DC-DC Step-Down Converters for Proton Exchange Membrane Electrolyzer Applications. *Transactions on Environment and Electrical Engineering*, vol. 3, no. 1, **2019**, 33-43.
- [YGKP19] B. Yodwong, D. Guilbert, W. Kaewmanee, and M. Phattanasak. Energy Efficiency Based Control Strategy of a Three-Level Interleaved DC-DC Buck Converter Supplying a Proton Exchange Membrane Electrolyzer. *Electronics*, vol. 8, no. 9, **2019**, 933.
- [GSV20] D. Guilbert, D. Sorbera, and G. Vitale. A stacked interleaved DC-DC buck converter for proton exchange membrane electrolyzer applications : Design and experimental validation. *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 1, **2020**, pp. 906-914.
- [GV20b] D. Guilbert, and G. Vitale. Improved Hydrogen-Production-Based Power Management Control of a Wind Turbine Conversion System Coupled with Multistack Proton Exchange Membrane Electrolyzers. *Energies*, vol. 13, no. 5, **2020**, 1239.
- [MTY⁺20] P. Mungporn, P. Thounthong, B. Yodwong, C. Ekkaravarodome, A. Billsalam, S. Pierfederici, D. Guilbert, B. Nahid-Mobarakeh, N. Bizon, Z. Shah, S. Khomfoi,

- P. Kumam, and P. Burikham. Modeling and Control of Multiphase Interleaved Fuel-Cell Boost Converter Based on Hamiltonian Control Theory for Transportation Applications. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 6, no. 2, **2020**, pp. 519-529.
- [ARB⁺20] B. Abderezzak, D. Rekioua, R. Binns, K. Busawon, M. Hinaje, B. Douine, and D. Guilbert. Technical feasibility assessment of a PEM fuel cell refrigerator system. *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 19, **2020**, pp. 11211-11219.
- [ACD⁺20] F. Alonge, SM. Collura, F. D'Ippolito, D. Guilbert, M. Luna, and G. Vitale. Design of a robust controller for DC/DC converter-electrolyzer systems supplied by WECSs subject to highly fluctuating wind speed. *Control Engineering Practice*, vol. 98, **2020**, 104383.
- [AHGRG20] Á. Hernández-Gómez, V. Ramirez, and D. Guilbert. Investigation of PEM electrolyzer modeling : Electrical domain, efficiency, and specific energy consumption. *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 29, **2020**, pp. 14625-14639.
- [YTGB20] B. Yodwong, P. Thounthong, D. Guilbert, and N. Bizon. Differential Flatness-Based Cascade Energy/Current Control of Battery/Supercapacitor Hybrid Source for Modern e-Vehicle Applications. *Mathematics*, vol. 8, no. 5, **2020**, 704.
- [YGP⁺20c] B. Yodwong, D. Guilbert, M. Phattanasak, W. Kaewmanee, M. Hinaje, and G. Vitale. Proton Exchange Membrane Electrolyzer Modeling for Power Electronics Control : A Short Review. *C*, vol. 6, no. 2, **2020**, 29.
- [YGP⁺20a] B. Yodwong, D. Guilbert, M. Phattanasak, W. Kaewmanee, M. Hinaje, and G. Vitale. AC-DC Converters for Electrolyzer Applications : State of the Art and Future Challenges. *Electronics*, vol. 9, no. 6, **2020**, 912.
- [TPG⁺20] P. Thounthong, M. Phattanasak, D. Guilbert, N. Takorabet, S. Pierfederici, B. Nahid-Mobarakkeh, N. Bizon, and P. Kumam. Differential Flatness Based-Control Strategy of a Two-Port Bidirectional Supercapacitor Converter for Hydrogen Mobility Applications. *Energies*, vol. 13, no. 11, **2020**, 2794.
- [GGVD20] V. Guida, D. Guilbert, G. Vitale, and B. Douine. Design and Realization of a Stacked Interleaved DC-DC Step-Down Converter for PEM Water Electrolysis with Improved Current Control. *Fuel Cells*, vol. 20, no. 3, **2020**, pp. 307-315.
- [AHGRGS20] Á. Hernández-Gómez, V. Ramirez, D. Guilbert, and B. Saldivar. Development of an adaptive static-dynamic electrical model based on input electrical energy for PEM water electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 38, **2020**, pp. 18817-18830.
- [YGP⁺20b] B. Yodwong, D. Guilbert, M. Phattanasak, W. Kaewmanee, M. Hinaje, and G. Vitale. Faraday's Efficiency Modeling of a Proton Exchange Membrane Electrolyzer Based on Experimental Data. *Energies*, vol. 13, no. 8, **2020**, 4792.
- [TMP⁺20] P. Thounthong, P. Mungporn, D. Guilbert, N. Takorabet, S. Pierfederici, B. Nahid-Mobarakkeh, Y. Hu, N. Bizon, Y. Huangfu, and P. Kumam. Adaptive Control of Fuel Cell Converter Based on a New Hamiltonian Energy Function for Stabilizing the DC Bus in DC Microgrid Applications. *Mathematics*, vol. 8, no. 11, **2020**, 2035.
- [BTG20] N. Bizon, P. Thounthong, and D. Guilbert. Efficient Operation of the Hybrid

- Power System Using an Optimal Fueling Strategy and Control of the Fuel Cell Power Based on the Required Power Tracking Algorithm. *Sustainability*, vol. 12, no. 22, **2020**, 9690.
- [TMG⁺21] P. Thounthong, P. Mungporn, D. Guilbert, N. Takorabet, S. Pierfederici, B. Nahid-Mobarakeh, Y. Hu, N. Bizon, Y. Huangfu, and P. Kumam. Design and control of multiphase interleaved boost converters-based on differential flatness theory for PEM fuel cell multi-stack applications. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 124, **2021**, 106346.
- [AHGRGS21a] Á. Hernández-Gómez, V. Ramirez, D. Guilbert, and B. Saldivar. Cell voltage static-dynamic modeling of a PEM electrolyzer based on adaptive parameters : Development and experimental validation. *Renewable Energy*, vol. 163, **2021**, pp. 1508-1522.
- [MGZR21] R. Maamouri, D. Guilbert, M. Zasadzinski, and H. Rafaralahy. Proton exchange membrane water electrolysis : Modeling for hydrogen flow rate control. *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 11, **2021**, pp. 7676-7700.
- [TMP⁺21] P. Thounthong, P. Mungporn, S. Pierfederici, D. Guilbert, N. Takorabet, B. Nahid-Mobarakeh, Y. Hu, N. Bizon, Y. Huangfu, P. Kumam, and P. Burikham. Robust Hamiltonian-Energy Control Based on Lyapunov Function for Four-Phase Parallel Fuel Cell Boost Converter for DC Microgrid Applications. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 12, no. 3, **2021**, pp. 1500-1511.
- [YGH⁺21] B. Yodwong, D. Guilbert, M. Hinaje, M. Phattanasak, W. Kaewmanee, and G. Vitale. Proton Exchange Membrane Electrolyzer Emulator for Power Electronics Testing Applications. *Processes*, vol. 9, no. 3, **2021**, 498.
- [AHGRGS21b] Á. Hernández-Gómez, V. Ramirez, D. Guilbert, and B. Saldivar. Self-Discharge of a Proton Exchange Membrane Electrolyzer : Investigation for Modeling Purposes. *Membranes*, vol. 11, no. 6, **2021**, 379.
- [TMN⁺21] P. Thounthong, P. Mungporn, B. Nahid-Mobarakeh, N. Bizon, S. Pierfederici, D. Guilbert. Improved Adaptive Hamiltonian Control Law for Constant Power Load Stability Issue in DC Microgrid : Case Study for Multiphase Interleaved Fuel Cell Boost Converter. *Sustainability*, vol. 13, no. 14, **2021**, 8093.
- [SPG⁺21] S. Sriprang, N. Poonnoy, D. Guilbert, B. Nahid-Mobarakeh, N. Takorabet, N. Bizon, P. Thounthong. Design, Modeling, and Differential Flatness Based Control of Permanent Magnet-Assisted Synchronous Reluctance Motor for e-Vehicle Applications. *Sustainability*, vol. 13, no. 17, **2021**, 9502.
- [GV21] D. Guilbert, G. Vitale. Hydrogen as a Clean and Sustainable Energy Vector for Global Transition from Fossil-Based to Zero-Carbon. *Clean Technologies*, vol. 3, no. 4, **2021**, 881-909.
- [GNMP⁺22] D. Guilbert, B. Nahid-Mobarakeh, S. Pierfederici, N. Bizon, P. Mungporn, P. Thounthong. Comparative Study of Adaptive Hamiltonian Control Laws for DC Microgrid Stabilization : An Fuel Cell Boost Converter. *Applied Science and Engineering Progress*, vol. 15, no. 13, **2022**, 5540.
- [GGZR22] F. Gambou, D. Guilbert, M. Zasadzinski, and H. Rafaralahy. A Comprehensive Survey of Alkaline Electrolyzer Modeling : Electrical Domain and Specific Electrolyte

Conductivity. *Energies*, vol. 15, no. 9, **2022**, 3452.

1.5.2.2 Article dans une revue nationale à comité de lecture (RNCL)

[GGND13b] D. Guilbert, A. Gaillard, A. N'Diaye, and A. Djerdir. Comparaison de topologies de convertisseurs DC/DC entrelacées en cas de défauts d'interrupteurs de puissance pour véhicule électrique à pile à combustible. *La Revue 3E.I.*, no. 74, **2013**, pp. 49-57.

1.5.2.3 Articles dans des revues pédagogiques à comité de lecture (RPCL)

[Gui18] D. Guilbert. Retour d'expérience sur l'utilisation de maquettes d'éoliennes en GEII. *Revue des départements Génie Électrique & Informatique Industrielle des Instituts Universitaires de Technologie*, no. 92, **2018**.

[Gui19] D. Guilbert. Production d'hydrogène par électrolyse de l'eau : son stockage et sa valorisation à travers une pile à combustible. *Revue des départements Génie Électrique & Informatique Industrielle des Instituts Universitaires de Technologie*, no. 93, **2019**.

1.5.2.4 Articles dans des conférences internationales à comité de lecture (CICL)

[GGND13a] D. Guilbert, A. Gaillard, A. N'Diaye, and A. Djerdir. Energy efficiency and fault tolerance comparison of DC/DC converters topologies for fuel cell electric vehicles. In *2013 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, **2013**, pp. 1-7.

[GMG⁺13] D. Guilbert, A. Mohammadi, A. Gaillard, A. N'Diaye, and A. Djerdir. Interactions between fuel cell and DC/DC converter for fuel cell electric vehicle applications : Influence of faults. In *IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, **2013**, pp. 912-917.

[MGG⁺13] A. Mohammadi, D. Guilbert, A. Gaillard, D. Bouquain, D. Khaburi, and A. Djerdir. Faults diagnosis between PEM fuel cell and DC/DC converter using neural networks for automotive applications. In *IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, **2013**, pp. 8186-8191.

[HHC⁺13] C. Higel, F. Harel, D. Candusso, S. Faivre, A. Ravey, D. Guilbert, A. N'Diaye, D. Bouquain, A. Djerdir, and A. Gaillard. Part 1 : Mobypost vehicle's powertrain modeling, simulation and sizing. In *5th Conference on Fundamentals and Development of Fuel Cells (FDFC 2013)*, **2013**.

[FRG⁺13] S. Faivre, A. Ravey, D. Guilbert, A. N'Diaye, A. Gaillard, D. Bouquain, A. Djerdir, C. Higel, F. Harel, and D. Candusso. Part 2- Mobypost vehicle's powertrain design and experimental validation. In *5th Conference on Fundamentals and Development of Fuel Cells (FDFC 2013)*, **2013**.

[GGND15b] D. Guilbert, A. Gaillard, A. N'Diaye, and A. Djerdir. Power Switch Fault-Tolerant Control of a floating Interleaved Boost Converter for Fuel Cell Electric Vehicles. In *6th International Conference on Fundamentals and Development of Fuel Cells (FDFC 2015)*, **2015**.

- [GGND15a] D. Guilbert, A. Gaillard, A. N'Diaye, and A. Djerdir. Fault-tolerant control for PEMFC and its DC/DC converter. In *2015 5th International Youth Conference on Energy (IYCE)*, **2015**, pp. 1-6.
- [GGD18] V. Guida, D. Guilbert, and B. Douine. Candidate Interleaved DC-DC Buck Converters for Electrolyzers : State-of-the-Art and Perspectives. In *2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I CPS Europe)*, **2018**, pp. 1-6.
- [GV18] D. Guilbert, and G. Vitale. Experimental Validation of an Equivalent Dynamic Electrical Model for a Proton Exchange Membrane Electrolyzer. In *2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I CPS Europe)*, **2018**, pp. 1-6.
- [CCG⁺18] G. Cirrincione, M. Cirrincione, D. Guilbert, A. Mohammadi, and V. Randazzo. Power Switch Open-Circuit Fault Detection in an Interleaved DC/DC Buck Converter for Electrolyzer Applications by Using Curvilinear Component Analysis. In *2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, **2018**, pp. 2221-2225.
- [GYKP18] D. Guilbert, B. Yodwong, W. Kaewmanee, and M. Phattanasak. Power converters for hybrid renewable energy systems with hydrogen buffer storage : A short review. In *2018 International Conference on Smart Grid (icSmartGrid)*, **2018**, pp. 28-33.
- [V. 19] V. Guida, D. Guilbert, G. Vitale, and B. Douine. Control of a synchronous stack interleaved DC-DC buck converter for proton exchange membrane electrolyzer applications. In *8th International Conference on Fundamentals and Development of Fuel Cells (FDFC 2019)*, **2019**.
- [GV19b] D. Guilbert, and G. Vitale. Optimal Hydrogen Production from Direct Coupled Variable Speed Wind Generator with a Stacked Interleaved Buck converter. In *2019 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2019 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I CPS Europe)*, **2019**, pp. 1-6.
- [GYK⁺19] D. Guilbert, B. Yodwong, W. Kaewmanee, M. Phattanasak, and M. Hinaje. Hydrogen Flow Rate Control of a Proton Exchange Membrane Electrolyzer. In *2019 Research, Invention, and Innovation Congress (RI2C)*, **2019**, pp. 1-6.
- [MYT⁺19b] P. Mungporn, B. Yodwong, P. Thounthong, B. Nahid-Mobarakeh, N. Takorabet, D. Guilbert, P. Kumam, N. Bizon, and C. Kaewprapha. Model-Free Control of Multiphase Interleaved Boost Converter for Fuel Cell/Reformer Power Generation. In *2019 Research, Invention, and Innovation Congress (RI2C)*, **2019**, pp. 1-6.
- [YMT⁺19] B. Yodwong, P. Mungporn, P. Thounthong, B. Nahid-Mobarakeh, N. Takorabet, D. Guilbert, N. Bizon, P. Kumam, and C. Kaewprapha. Model Based Control of Battery/Supercapacitor Hybrid Source for Modern e-Vehicle. In *2019 Research, Invention, and Innovation Congress (RI2C)*, **2019**, pp. 1-7.
- [MYT⁺19a] P. Mungporn, B. Yodwong, P. Thounthong, C. Ekkaravarodome, A. Bilsalam, B. Nahid-Mobarakeh, S. Pierfederici, D. Guilbert, N. Bizon, S. Khomfoi, P. Kumam,

- Z. Shah, P. Burikham, and C. Kaewprapha. Study of Hamiltonian Energy Control of Multiphase Interleaved Fuel Cell Boost Converter. In *2019 Research, Invention, and Innovation Congress (RI2C)*, **2019**, pp. 1-6.
- [GV20a] D. Guilbert, and G. Vitale. Variable Parameters Model of a PEM Electrolyzer Based Model Reference Adaptive System Approach. In *2020 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2020 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I CPS Europe)*, **2020**, pp. 1-6.
- [YGK⁺21] B. Yodwong, D. Guilbert, W. Kaewmanee, M. Phattanasak, M. Hinaje, and G. Vitale. Modified Sliding Mode-Based Control of a Three-Level Interleaved DC-DC Buck Converter for Proton Exchange Membrane Water Electrolysis. In *2021 Research, Invention, and Innovation Congress (RI2C)*, **2021**, pp. 1-6.
- [KYS⁺21] W. Kaewmanee, B. Yodwong, S. Sikkabut, M. Phattanasak, and D. Guilbert. A New Low-Cost Hardware-In-The-Loop Simulator for Control of Power Electronics Systems Laboratory. In *2021 Research, Invention, and Innovation Congress (RI2C)*, **2021**, pp. 1-6.
- [KKC⁺21] R. Kumar, S. Kumar, G. Cirrincione, M. Cirrincione, D. Guilbert, K. Ram, and A. Mohammadi. Power Switch Open-Circuit Fault-Diagnosis Based on a Shallow Long-Short Term Memory Neural Network : Investigation of an Interleaved Buck Converter for Electrolyser applications. In *The Thirteenth Annual Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, **2021**, pp. 1-6.
- [VCG21] G. Vitale, F. Castaldi, D. Guilbert. Design of a LLC Resonant Converter for Powering a PEM Electrolyzers. In *19th International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'21), Almeria (Spain), 28th to 30th July 2021*, **2021**, pp. 1-7.

1.5.2.5 Articles dans des conférences nationales à comité de lecture (CNCL)

- [Gui14] D. Guilbert. Dimensionnement des composants magnétiques d'un convertisseur DC/DC boost entrelacé tolérant aux défauts pour des applications véhicule électrique à pile à combustible. In *Conférence des jeunes chercheurs en génie électrique (JCGE'14)*, **2014**, pp. 1-9.
- [GGND14] D. Guilbert, A. Gaillard, A. N'Diaye, and A. Djerdir. Diagnostic de défaut d'un convertisseur DC/DC boost entrelacé pour véhicules électriques à pile à combustible. In *Symposium de génie électrique (SGE 2014)*, **2014**, pp. 1-10.
- [GNL⁺16] D. Guilbert, A. N'Diaye, P. Luberda, A. Gaillard, and A. Djerdir. Amélioration de la fiabilité d'un convertisseur DC/DC boost entrelacé flottant pour des systèmes pile à combustible et photovoltaïques. In *Symposium de génie électrique (SGE 2016)*, **2016**, pp. 1-10.
- [GS18] D. Guilbert, and A. Scipioni. Validation expérimentale d'un modèle dynamique électrique d'un électrolyseur de type PEM pour des applications électronique de puissance. In *Symposium de génie électrique (SGE 2018)*, **2018**, pp. 1-10.
- [GGSD18] V. Guida, D. Guilbert, A. Scipioni, and B. Douine. Convertisseurs DC-DC buck entrelacés candidats pour électrolyseurs : état de l'art et perspectives. In *Symposium de génie électrique (SGE 2018)*, **2018**, pp. 1-10.

1.5.2.6 Article de vulgarisation scientifique (AVS)

[Gui21] D. Guilbert. Comment l'hydrogène peut contribuer à stocker l'électricité à grande échelle. *The Conversation*, **2021**.

Chapitre 2

Synthèse des travaux de recherche

Sommaire

| | | |
|------------|--|------------|
| 2.1 | Introduction | 42 |
| 2.2 | Modélisation statique/dynamique des électrolyseurs PEM | 44 |
| 2.2.1 | Modèle électrique équivalent du stack de l'électrolyseur et détermination des paramètres | 45 |
| 2.2.2 | Modélisation mathématique des paramètres du modèle électrique équivalent (stack de l'électrolyseur) | 55 |
| 2.2.3 | Modélisation mathématique des paramètres du modèle électrique équivalent d'une cellule d'électrolyseur | 66 |
| 2.3 | Conception et développement d'un émulateur d'électrolyseur PEM | 80 |
| 2.4 | Électronique de puissance et sa commande associées à l'électrolyseur PEM | 92 |
| 2.5 | Conclusion | 110 |

2.1 Introduction

De nos jours, 96% de l'hydrogène global produit proviennent de l'utilisation des énergies fossiles via le reformage à la vapeur du gaz naturel ; tandis que la production d'hydrogène par électrolyse de l'eau ne représente que 4% [KH19]. Cette différence notable peut s'expliquer par le fait que le coût de production de l'hydrogène via l'utilisation d'énergies fossiles est plus faible comparé au processus d'électrolyse de l'eau. En effet, le coût des électrolyseurs disponibles sur le marché est très onéreux et également le coût de l'électricité. Toutefois, la production d'hydrogène basée sur les énergies fossiles, communément appelée *hydrogène gris*, présente plusieurs inconvénients en termes de pureté du gaz (très faible) et de génération de gaz à effet de serre (comme le dioxyde de carbone, environ 15.5 kg d'équivalent CO₂/kg d'hydrogène) [KH19]. Toutefois, un processus de capture, de l'utilisation, et du stockage des émissions de dioxyde de carbone est actuellement en phase de développement pour réduire l'empreinte carbone de la production d'hydrogène à partir de sources fossiles [GV21]. Pour faire face à l'utilisation intensive et à l'épuisement des ressources d'énergies fossiles, le processus d'électrolyse de l'eau combiné à des sources d'énergies renouvelables (éolien, photovoltaïque, hydraulique) et nucléaires est considéré comme une solution attractive et prometteuse pour répondre aux besoins en hydrogène [CFMS13, FP20, GV21].

Les sources d'énergies renouvelables couplées à l'électrolyse de l'eau s'inscrivent dans le développement de filières de production d'hydrogène respectueuses de l'environnement pour se substituer à la production d'hydrogène basée sur des énergies fossiles. L'électrolyse de l'eau a l'avantage de générer de l'hydrogène à haute pureté mais présente un bon nombre d'inconvénients d'un point de vue de leur coût (électrolyseur, coût de l'électricité) et de leur rendement [GV21, KH19]. Pour cette raison, le rendement, le coût des systèmes électrolyseur et de l'électricité restent des préoccupations majeures pour le déploiement de ce processus à grande échelle [GCS17, KH19]. L'électrolyse de l'eau consiste à utiliser l'électricité provenant du réseau ou de sources d'énergies renouvelables pour séparer l'eau pure en hydrogène et oxygène. Il est important de souligner que l'hydrogène généré via l'électrolyse de l'eau peut mener à la réduction de l'empreinte carbone, dépendant fortement de la source d'énergie utilisée. D'une part, l'électricité du réseau n'est pas toujours une source d'énergie idéale pour alimenter les électrolyseurs étant donné que la majeure partie de l'électricité est générée par des centrales électriques polluantes (centrales à charbon ou à gaz). D'autre part, les sources d'énergies renouvelables offrent une solution viable à long terme pour répondre à la demande croissante d'énergie et pour produire un carburant *vert* pour décarboner le secteur du transport et de l'industrie [CS19, UGS12, YGP⁺20a].

Actuellement, des pays tels que l'Islande, le Costa Rica, et la Norvège, utilisent une large part d'électricité produite par des centrales hydroélectriques, géothermiques, photovoltaïques, et des fermes éoliennes. Cependant, en employant des sources d'énergies renouvelables, des discontinuités en production d'énergie dites *intermittences* sont généralement rencontrées. Par conséquent, le stockage de l'énergie sous forme d'hydrogène joue un rôle primordial dans la continuité de production d'énergie. En effet, deux scénarios peuvent apparaître ; le premier consiste à stocker le surplus d'énergie des sources en hydrogène via l'électrolyse de l'eau en périodes de faible demande d'énergie ; tandis que le second exploite l'énergie stockée en hydrogène lors de fortes demandes pour compenser le manque de production des sources. Ainsi, le stockage tampon de l'énergie en hydrogène permet de garantir un équilibre entre la production et la consommation d'énergie [GCS17, YGP⁺20a]. Dans les systèmes de production d'hydrogène basés sur des sources d'énergies renouvelables, l'hydrogène produit et stocké peut être valorisé via plusieurs applications (Figure 2.1). Certaines d'entre elles sont bien connues et d'autres prometteuses en phase de développement et de recherche. Un descriptif est donné ci-dessous [Apo20, BS18, YGP⁺20a] :

- **Industrie** : l'hydrogène peut être utilisé dans différents procédés industriels tels que la chimie (synthèse d'ammoniac, production de méthanol), la métallurgie (travail des métaux, aciers au carbone) et l'électronique (fabrication de semi-conducteurs).
- **Conversion d'électricité en gaz** (communément nommé *Power-to-Gas (P2G)*) : ce procédé consiste à convertir l'hydrogène via le processus de méthanation en gaz naturel *vert* pour être injecté dans des pipelines et installations souterraines. Cela représente une capacité de stockage alternatif, qui peut être employée où et quand c'est nécessaire et rend le système électrique plus flexible.

Tandis que ces deux applications sont bien connues et sont couramment utilisées de nos jours, les applications attractives et prometteuses telles que le transport et le stockage de l'énergie sont en pleine émergence et commencent à s'installer dans le paysage national et international. Ces applications sont détaillées ci-dessous [GCS17, YGP⁺20a, GV21] :

- **Transport** : pour décarboner ce secteur responsable en grande partie du réchauffement climatique, l'hydrogène pourra être utilisé comme un carburant propre (en considérant la production locale d'hydrogène via le processus d'électrolyse de l'eau associé à des sources d'énergies renouvelables) pour alimenter des piles à combustible. Des constructeurs automobiles (en majeure partie asiatiques) ont déjà développé des véhicules électriques alimentés par des piles à combustible tels que Toyota (modèle Mirai), Hyundai (modèle Nexa), et Honda (modèle Clarity). En plus des véhicules électriques, l'hydrogène est considéré pour le transport ferroviaire (*Coradia iLint* d'Alstom circulant en Allemagne), le transport maritime (*Energy Observer* intégrant une production d'hydrogène in situ via des éoliennes à axe verticale et des panneaux photovoltaïques couplés à des électrolyseurs), et le transport aérien (la compagnie Airbus envisage le développement de trois concepts d'avions commerciales (turboprop, turbofan, et blended-wing body) à hydrogène d'ici 2035).
- **Stockage de l'énergie électrique** : pour pallier aux phénomènes d'intermittence des sources d'énergies renouvelables, le surplus d'énergie en période de faibles besoins est converti en hydrogène via l'électrolyse de l'eau, puis utilisé via une pile à combustible pour équilibrer le réseau en cas de besoins importants en énergie.

Actuellement, quatre technologies d'électrolyseur existent dépendant de leur électrolyte et de leur transport d'ions : alcaline [DOMSP19], membrane échangeuse de protons (communément appelé *Proton Exchange Membrane (PEM)*) [KH19], solide oxyde (SO) [SSC13], et plus récemment la technologie membrane échangeuse d'anions (connue sous le terme *Anion Exchange Membrane (AEM)*) [VB18]. Les technologies alcalines et PEM sont disponibles sur le marché ; tandis que les technologies AEM et SO sont toujours en phase de recherche et développement avant d'être introduites progressivement sur le marché. Bien que la technologie alcaline soit mature et peu coûteuse (en raison de l'utilisation de matériaux moins onéreux pour les catalyseurs), elle présente de nombreux inconvénients en termes de densités de courant ($0.2 - 0.7 \text{ A.cm}^{-2}$), de maintenance (pouvant aller jusqu'à 60 h par an) en raison d'une solution liquide de l'électrolyte, et de flexibilité en raison d'une plage de charge partielle limitée (15 - 100 %) [GGZR22]. De l'autre côté, les électrolyseurs alcalins sont caractérisés par une réponse lente du système aux fonctionnements dynamiques, particulièrement important pour l'éolien. La réponse lente est due à l'électrolyte liquide utilisé (basé sur de l'hydroxyde de potassium (KOH)), ralentissant le mouvement des ions hydroxyde de la cathode à l'anode. Par conséquent, les électrolyseurs alcalins ne permettent pas d'absorber l'énergie durant les phases transitoires [GV21]. C'est pourquoi, cette technologie est souvent connectée au réseau électrique, fonctionnant en conséquence en régime statique.

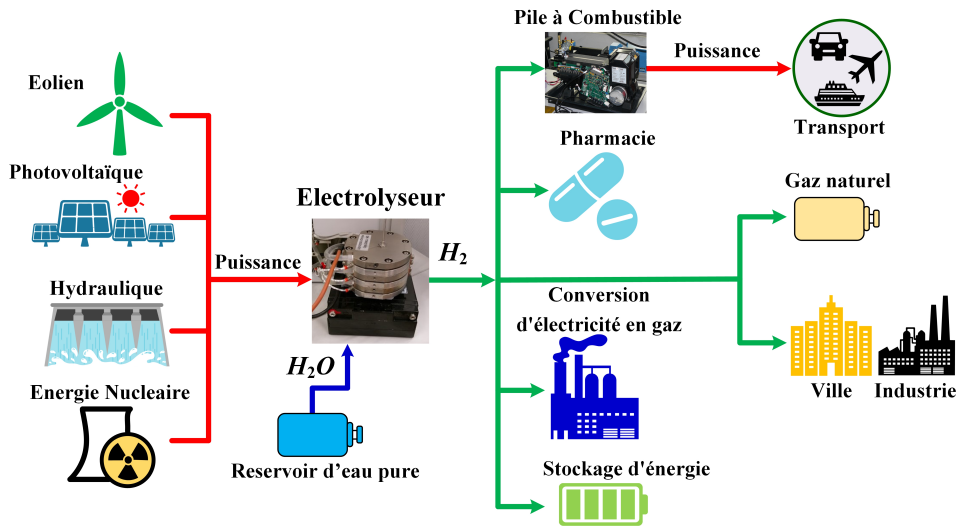


FIGURE 2.1 – Vue d’ensemble des applications basées sur l’électrolyse de l’eau alimentée par des sources d’énergies renouvelables et nucléaires.

Comparée à la technologie alcaline, la technologie PEM offre d’une part une haute densité de courant (environ 2 A.cm^{-2}), une meilleure compacité, une faible empreinte carbone et maintenance (environ 8 h par an), un haut rendement, une membrane très mince ($25 - 254 \mu\text{m}$), un fonctionnement en haute pression, une réponse rapide et des fonctionnements dynamiques, la rendant adaptée lors de son couplage avec des sources d’énergies renouvelables [GGZR22]. D’autre part, l’inconvénient principal est son coût relativement élevé en raison de l’utilisation de matériaux nobles (iridium, platine) à l’anode et à la cathode. Néanmoins, cette technologie exige beaucoup moins de maintenance sur une base annuelle qu’une technologie alcaline (les coûts de maintenance sont de 2,5 à 3 plus bas que ceux de la technologie alcaline) dû à l’utilisation d’un électrolyte polymère solide [GV21]. C’est pourquoi, la technologie PEM est considérée dans ces travaux de recherche.

En s’appuyant sur la Figure 2.1, les travaux de recherche synthétisés dans ce chapitre couvrent principalement la modélisation de l’électrolyseur PEM tenant compte des fonctionnements dynamiques et l’électronique de puissance interfaçant les sources d’énergies renouvelables et l’électrolyseur PEM et sa commande. Les premiers travaux initiés sur la modélisation dynamique des électrolyseurs PEM ont conduit à la conception et le développement d’un premier émulateur *physique* permettant d’expérimenter de nouvelles structures de conversion candidates et leurs commandes pour contrôler des électrolyseurs PEM. L’émulateur permet d’éviter l’utilisation d’un vrai électrolyseur PEM qui pourrait être dégradé au cours d’expérimentations (ces dégradations sont discutées dans ce chapitre). La synthèse des travaux de recherche est décomposée en trois parties étroitement liées :

- Modélisation statique/dynamique des électrolyseurs PEM.
- Conception et développement d’un émulateur d’électrolyseur PEM.
- Electronique de puissance et sa commande associée à l’électrolyseur PEM.

2.2 Modélisation statique/dynamique des électrolyseurs PEM

Comme pour la pile à combustible, la modélisation de l’électrolyseur est cruciale pour reproduire son comportement réel suivant les conditions de fonctionnement (statiques et dynamiques)

mais également pour le développement des stratégies de contrôle du convertisseur de puissance associé [MGZR21, GV19a]. En effet, l'électrolyseur doit être connecté à un convertisseur de puissance pour être correctement alimenté, et un modèle électrique équivalent est requis pour simuler et tester l'ensemble convertisseur-électrolyseur, évitant par conséquent l'utilisation du système réel. Dans la littérature, de nombreux articles [AWG15, ASB11, ELDP⁺18, GVEU12, GKM⁺10, KA11, KE19, LL09, LSA⁺18, MSC09, NCB08, NCC⁺09, OBB16, RTS⁺14, SMC09, TBB18, TGL⁺18, TFA⁺19, WB19] et des articles de review [AHGRG20, FP20, OBB17, RTKH16] ont été reportés sur la modélisation des électrolyseurs PEM. Toutefois, comme souligné dans un travail de synthèse sur les modèles existants des électrolyseurs PEM [AHGRG20], les phénomènes dynamiques sont généralement négligés comme leurs modélisations. Partant de ce constat, de nombreux travaux ont été réalisés et valorisés dans différentes conférences [GS18, GV18, GV20a] et revues [AHGRGS20, AHGRGS21a, GV19a]. Ces travaux ont apporté une réelle contribution sur cette thématique comparée à la littérature existante et ont contribué fortement aux renforcements de nouvelles thématiques comme le développement d'émulateur d'électrolyseur PEM (discuté dans la section 2.3) et de lois de contrôle à l'électronique de puissance associée à l'électrolyseur (présenté dans la section 2.4). Sur l'aspect modélisation des électrolyseurs PEM, les principales contributions sont résumées ci-dessous :

- (i) proposition d'un modèle électrique équivalent pour modéliser le stack de l'électrolyseur et détermination des paramètres pour une plage de fonctionnement spécifique ;
- (ii) développement de modèles mathématiques permettant de déterminer suivant les conditions de fonctionnement les paramètres du modèle électrique équivalent (stack de l'électrolyseur) ;
- (iii) développement de modèles mathématiques permettant de déterminer suivant les conditions de fonctionnement les paramètres du modèle électrique équivalent d'une cellule d'électrolyseur (prise en considération de possibles dégradations sur les cellules).

Ces trois contributions sont présentées de façon claire et concise dans les prochaines sous-sections.

2.2.1 Modèle électrique équivalent du stack de l'électrolyseur et détermination des paramètres

Tout d'abord, avant de proposer un modèle électrique équivalent, il est crucial d'étudier les dynamiques d'un électrolyseur commercial PEM. Dans cet objectif, un banc expérimental a été réalisé au sein du laboratoire GREEN de l'IUT de Longwy et est illustré sur la Figure 2.2. Ce banc est composé des éléments suivants : (1) un PC portable avec un panneau de contrôle virtuel pour piloter la source d'alimentation DC, (2) une source d'alimentation DC, (3) un oscilloscope 4 voies, (4) un réservoir d'eau pure, (5) un électrolyseur commercial PEM, (6) une sonde de courant pour mesurer le courant d'alimentation de l'électrolyseur, et enfin (7) une sonde de tension pour mesurer la tension de l'électrolyseur. Les données techniques de l'électrolyseur commercial PEM NMH2 1000 de l'entreprise Allemande HELIOCENTRIS[®] sont fournies dans la Table 2.1. Il est important de souligner que l'électrolyseur commercial utilisé pour cette étude a été développé à des fins pédagogiques et non de recherche. Par conséquent, le système électrolyseur inclue une partie électronique de puissance composée d'un redresseur monophasé non-commandé (diodes) et d'un convertisseur DC-DC abaisseur de tension comme montré sur la Figure 2.3. Dans cette étude, seul le stack de l'électrolyseur est considéré et est connecté directement à une source d'alimentation DC externe comme le montre la Figure 2.2 [GV19a]. Le stack d'électrolyseur est composé d'un électrolyte polymère solide basé sur du Nafion, un polymère fluoré fabriqué par

l'entreprise DuPont®. L'épaisseur de l'électrolyte est très mince (environ $25 \mu m$), conduisant à des pertes ohmiques plus faibles. Les catalyseurs à l'anode et à la cathode sont basés respectivement sur de l'iridium et du platine; tandis que les collecteurs de courant à l'anode et à la cathode sont faits respectivement en titane (en raison du potentiel élevé à l'anode) et en carbone (dû à un faible potentiel à la cathode) [YGP⁺20c]. Étant donné que les réservoirs de stockage de l'hydrogène sont basés sur un stockage solide avec des hydrures métalliques (non montrés dans la Figure 2.2), la pression de sortie de l'hydrogène a été fixée à 10.5 bar.

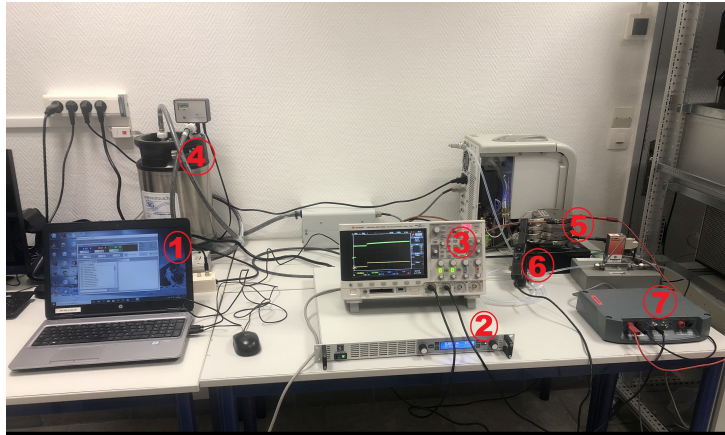


FIGURE 2.2 – Banc de test pour la caractérisation statique/dynamique d'un électrolyseur commercial PEM.

TABLE 2.1 – Données techniques de l'électrolyseur PEM.

| Paramètre | Valeur | Unité |
|---|--------|-------------------------------------|
| Puissance électrique nominale | 400 | W |
| Tension nominale du stack | 8 | V |
| Plage de courant | 0-50 | A |
| Pression de sortie max | 10.5 | bar |
| Nombre de cellules | 3 | - |
| Section active | 50 | cm^2 |
| Plage de débit d'hydrogène à STP (Température et Pression Standard, $20^{\circ}C$ et 1 bar) | 0-1 | slpm (litre standard par minute) |

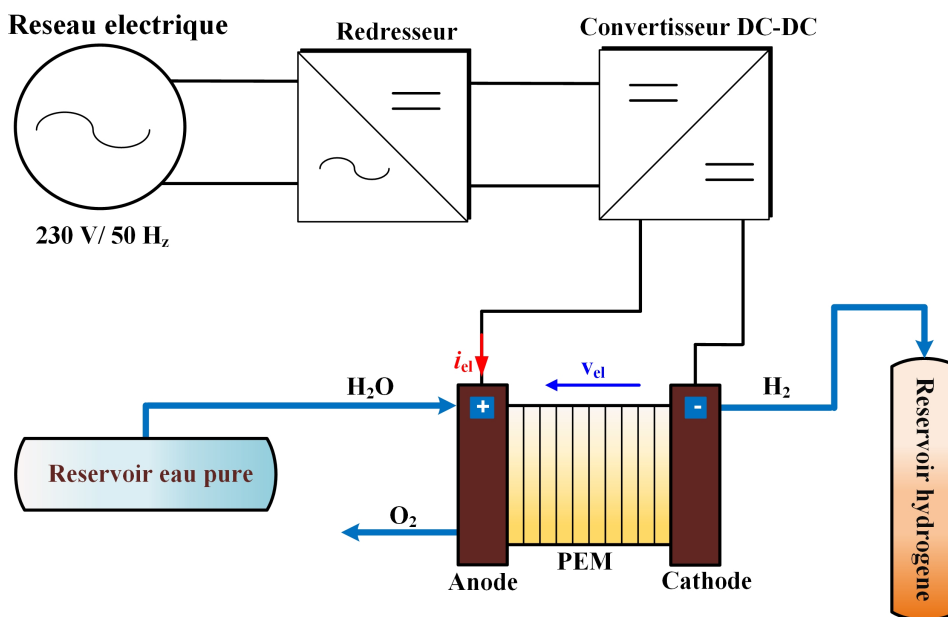


FIGURE 2.3 – Système électrolyseur avec son électronique de puissance.

En utilisant le banc de test développé (Figure 2.2), des essais expérimentaux ont été réalisés afin de montrer la réponse de l'électrolyseur lorsqu'il est soumis à des profils de courant dynamiques. Les premiers résultats sont montrés sur les Figures 2.4 et 2.5. Il peut être observé que l'électrolyseur PEM peut répondre très rapidement aux sollicitations dynamiques. Une réponse dynamique est l'une des caractéristiques les plus importantes pour les électrolyseurs lorsque ces derniers sont couplés à des sources d'énergies renouvelables. En effet, comme ces sources présentent un caractère intermittent très important lié aux conditions météorologiques, les électrolyseurs PEM doivent offrir une haute flexibilité en répondant aux sollicitations dynamiques, permettant d'absorber l'énergie véhiculée pendant les phases transitoires. Il faut souligner également que l'électrolyseur présente différentes dynamiques fortement dépendante du point de fonctionnement, en l'occurrence le courant à l'entrée de l'électrolyseur. A faible courant, les dynamiques sont plus rapides ; tandis ces dernières peuvent être plus lentes lorsque le courant augmente. En effet, le temps requis pour stabiliser la réponse en tension de l'électrolyseur en raison du déplacement des charges à l'intérieur de l'anode et de la cathode s'allonge d'autant plus que le courant augmente. Par ailleurs, la Figure 2.5 laisse clairement apparaître la limite de fonctionnement de l'électrolyseur lorsque le courant atteint sa tension nominale (environ 8 V) avec une chute soudaine de la tension. Ce fonctionnement anormal de l'électrolyseur est dû à de possibles dégradations (discutées dans cette section). Les dynamiques de l'électrolyseur sont gouvernées par deux phénomènes transitoires : (1) lenteur de la réaction d'évolution de l'oxygène à l'anode, et (2) rapidité de la réaction d'évolution de l'hydrogène à la cathode.

Pour cette raison, un modèle précis dont les paramètres seraient variables (pour tenir compte des différents points de fonctionnement) est exigé. Dans cette sous-section, un modèle à paramètres constants est proposé ainsi qu'une méthode pour déterminer les paramètres. L'identification des paramètres a été optimisée pour une plage de courant spécifique. En continuité de ce travail, dans les prochaines sous-sections, les paramètres sont adaptatifs en fonction du point de fonctionnement, en considérant soit le stack ou bien la cellule.

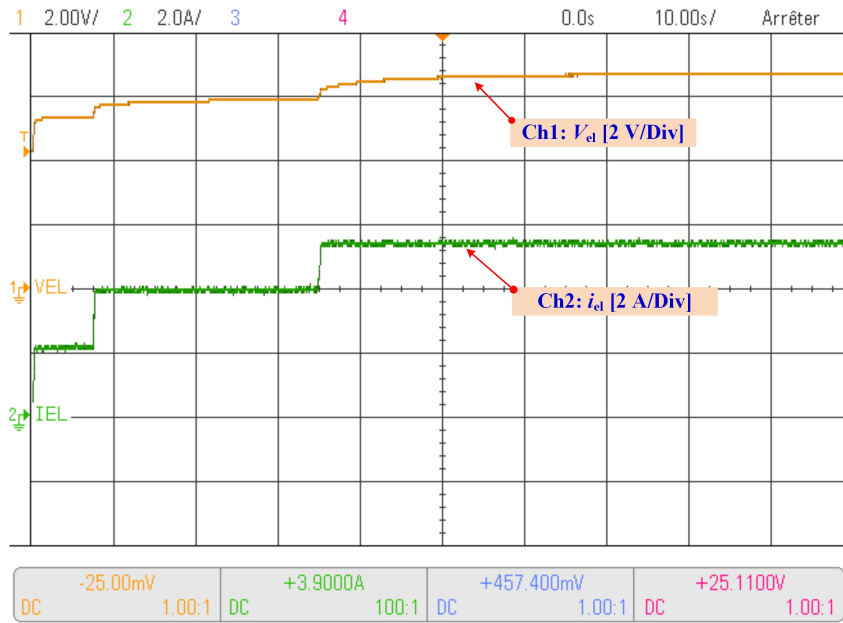


FIGURE 2.4 – Essai 1 : réponse en tension de l'électrolyseur.

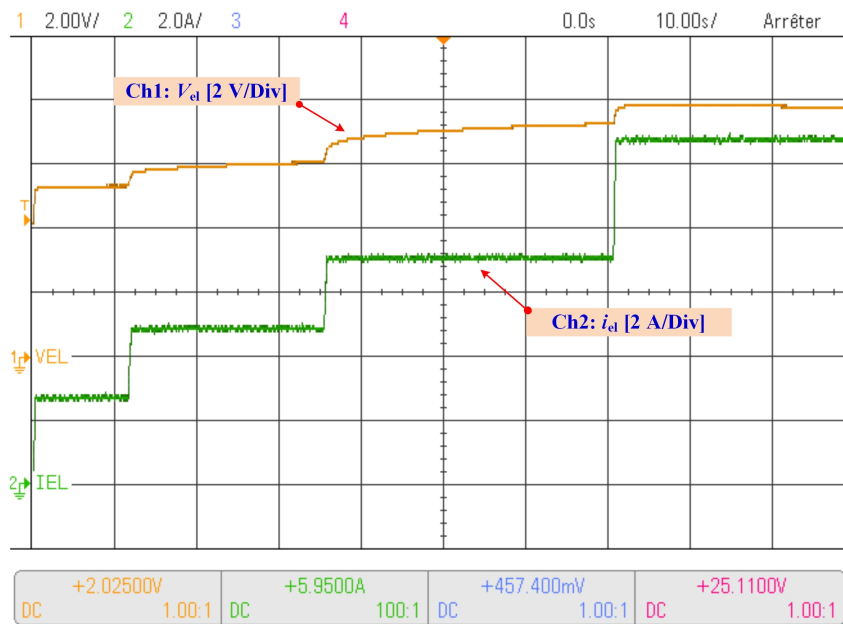


FIGURE 2.5 – Essai 2 : réponse en tension de l'électrolyseur.

Dans ce travail, le modèle électrique équivalent illustré sur la Figure 2.6 a été considéré. Ce dernier est bien connu pour modéliser le domaine électrique de la pile à combustible ainsi que les cinétiques chimiques des électrodes [FTAM07, HRN⁺12]. Pour l'électrolyseur, il a été considéré dans plusieurs publications antérieures sans toutefois proposer une méthode pour déterminer les paramètres du modèle [ATMS18, dW09, SBB19]. Dans le modèle, les deux branches RC représentent les surtensions d'activation et les cinétiques chimiques à l'anode (R_2C_2) et à la cathode (R_1C_1). La source de tension V_{int} représente la tension réversible (ou tension circuit-ouvert) de l'électrolyseur, et la résistance R_{int} modélise les pertes ohmiques à la membrane (les autres pertes ohmiques provenant des électrodes et des plaques bipolaires sont généralement incluses dans ces

pertes). Les condensateurs double couche (C_1 et C_2) représentent l'interface entre électrode et électrolyte et leurs valeurs peuvent être considérées égales en se basant sur l'approche présentée dans [HRN⁺12] pour une pile à combustible PEM et validée expérimentalement. Par contre, les résistances (R_1 et R_2) diffèrent pour obtenir deux constantes de temps à l'anode et la cathode différentes. La résistance R_2 modélise l'énergie de Gibbs et les pertes joule à l'anode; tandis que la résistance R_1 les pertes joule à la cathode [GV19a]. Toutefois, ce modèle électrique ne considère pas le phénomène de diffusion des gaz, principalement causé par la diffusion des gaz dans les électrodes. Les équations du modèle sont données dans des précédentes publications [AHGRGS20, AHGRGS21a, GV19a].

Les paramètres du modèle équivalent ont été obtenus sur la base des données expérimentales. La première étape est de caractériser l'électrolyseur en conditions statiques, permettant d'identifier la tension réversible V_{int} et la valeur de la somme des résistances (R_1 , R_2 , et R_{int}). Ensuite, les constantes de temps du modèle sont identifiées et calculées par une régression linéaire de type *moindres carrés*.

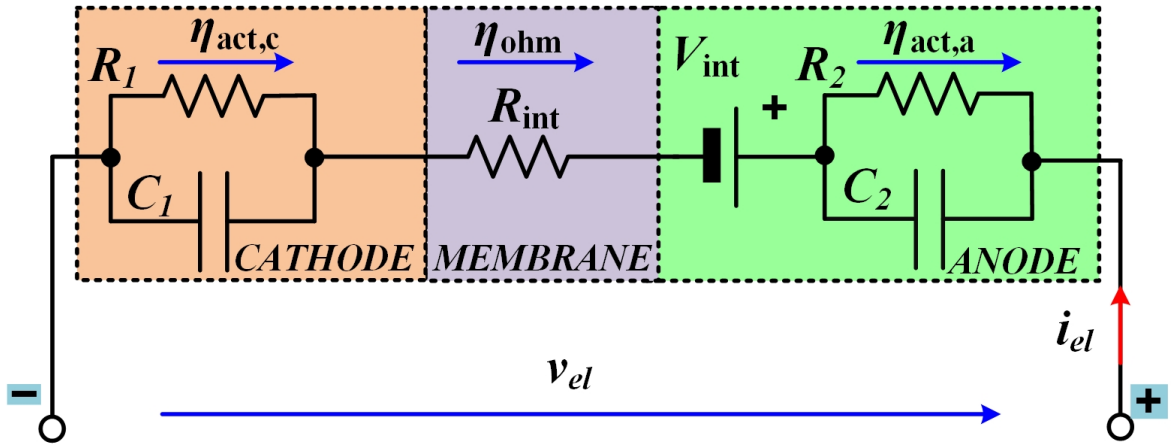


FIGURE 2.6 – Modèle électrique équivalent de l'électrolyseur.

A partir du banc expérimental développé (Figure 2.2), des tests ont été réalisés pour obtenir une base de données à partir de laquelle des informations cruciales sur le comportement dynamique de l'électrolyseur peuvent être extraites. En particulier, l'électrolyseur a été alimenté par un profil de courant dynamique. Un exemple de test de l'électrolyseur montrant le profil de courant et la réponse en tension, est représenté sur la Figure 2.7. Dans cet essai, après la mise sous tension, le courant a été augmenté de 2.4 à 5.8 A à $t = 17$ s; la durée du test est égale à 50 s pour observer la fin du régime transitoire. Les valeurs de la tension et du courant à la fin de chaque transitoire ont été exploitées pour identifier la caractéristique statique après une régression linéaire sur ces données. La caractéristique statique de l'électrolyseur a été déterminée par un algorithme de régression linéaire de type *moindres carrés*, dont l'approche est donnée dans [GV19a]. Cette dernière est illustrée sur la Figure 2.8. S'appuyant sur la régression linéaire reposant sur les données expérimentales, la résistance totale interne (R_{tot}) a été estimée par la pente et la tension réversible (V_{int}) en extrapolant la ligne droite. Les valeurs suivantes ont été obtenues : $V_{\text{int}} = 4.38$ V, $R_{\text{tot}} = 0.441$ Ω . En s'appuyant sur la Figure 2.7, les considérations suivantes peuvent être faites. La résistance de la membrane R_{int} peut être déterminée en considérant la réponse après et avant la brusque variation de la valeur du courant et à la fin des transitoires. Dans l'hypothèse où la capacité équivalente est assez élevée, de sorte qu'après la variation du courant, la chute de tension n'apparaisse seulement qu'aux bornes de R_{int} , la tension mesurée

avant la variation de courant à $t=0^-$ représente la tension réversible V_{int} .

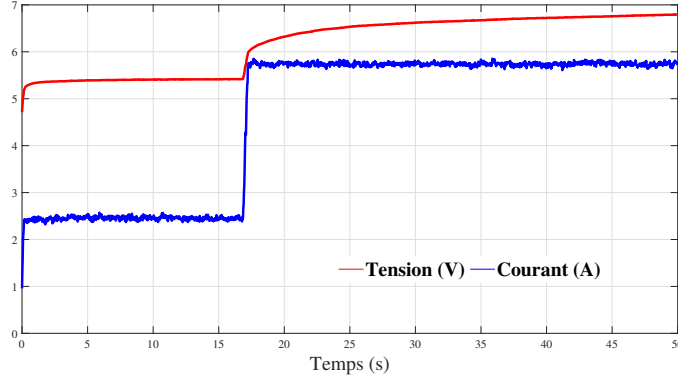


FIGURE 2.7 – Exemple de réponse en tension de l'électrolyseur suivant le profil de courant.

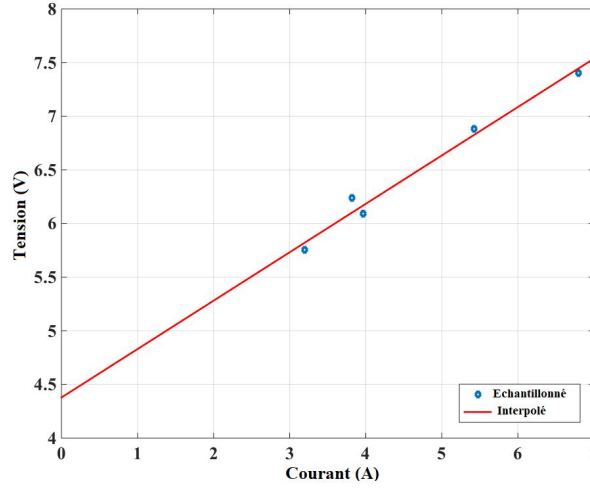


FIGURE 2.8 – Caractéristique statique obtenue par régression linéaire.

La résistance de la membrane R_{int} peut être calculée en considérant la tension après la variation de courant à $t = 0^+$:

$$R_{\text{int}} = \frac{V_{t=0^+} - V_{\text{int}}}{i_{t=0^+}} \quad (2.1)$$

Quand tous les transitoires sont finis, la tension de l'électrolyseur est proportionnelle au courant d'alimentation, leur rapport permet de déterminer la résistance totale équivalente R_{tot} :

$$R_{\text{tot}} = \frac{V_{t \rightarrow \infty} - V_{\text{int}}}{i_{t \rightarrow \infty}} \quad (2.2)$$

A la fin des phases transitoires, la tension aux bornes du stack de l'électrolyseur est donnée par le produit entre le courant et la résistance totale R_{tot} ; donnant ainsi une contrainte aux résistances R_1 et R_2 :

$$R_1 + R_2 = R_{\text{tot}} - R_{\text{int}} \quad (2.3)$$

Les valeurs des résistances R_1 et R_2 peuvent être déduites sur la base des constantes de temps identifiées par le modèle dynamique en admettant que les deux capacités équivalentes (C_1

et C_2) sont égales. A partir des données de la Figure 2.7, les valeurs suivantes du modèle ont été obtenues :

$$R_{\text{int}} = 0.088\Omega, R_{\text{tot}} = 0.441\Omega, V_{\text{int}} = 4.38V \quad (2.4)$$

Afin d'identifier le modèle dynamique, les phases transitoires ont été considérées. Comme souligné précédemment, il est possible de remarquer qu'il existe deux transitoires exponentiels correspondant à deux constantes de temps différentes. Les constantes de temps ont été déterminées via l'utilisation d'un algorithme de régression linéaire de type *moindres carrés* [GV19a]. Dans le cas sous étude, avec un choix approprié de l'origine temporelle, la réponse en tension de l'électrolyseur peut être approximée comme :

$$v(t) = (V_0 - V_\infty) \exp\left(\frac{-t}{\tau}\right) + V_\infty \quad (2.5)$$

où V_0 est la valeur de la tension à l'instant $t=0+$, V_∞ est la valeur de la tension à la fin de la phase transitoire ($t \rightarrow \infty$), et τ est la constante de temps de la fonction exponentielle. L'équation (2.5) peut être réécrite de telle sorte :

$$\gamma = \alpha X + \beta \quad (2.6)$$

où :

$$\begin{cases} \gamma(t) = \log(V_\infty - v(t)); & X = t \\ \alpha = \frac{-1}{\tau}; & \beta = \log(V_\infty - V_0). \end{cases}$$

Les coefficients à estimer sont α et β . L'estimation est effectuée à la fois sur la courbe exponentielle mesurée au début du transitoire et sur l'autre montrant le transitoire le plus lent. La première identification donne les constantes de temps de la réaction à l'anode et la dernière correspond à la réaction à la cathode.

Afin de minimiser l'effet du bruit sur les mesures, un filtrage est effectué par un algorithme de moyenne glissante sur 20 échantillons. Un zoom des deux transitoires ainsi que des données filtrées sont représentés sur la Figure 2.9.

Le vecteur des données échantillonnées contient 2000 échantillons; pour identifier les deux constantes de temps, les intervalles [677-695] et [800-1960] ont été pris en considération comme un compromis entre un nombre approprié de données à traiter et la courbe exponentielle à estimer. Les valeurs suivantes des constantes de temps ont été obtenues par un algorithme de régression linéaire de type *moindres carrés* :

$$\tau_1 = 1.304s, \tau_2 = 11.848s \quad (2.7)$$

En considérant les contraintes (2.3) et (2.7), et en admettant l'hypothèse que les valeurs des condensateurs sont égales, les valeurs suivantes des résistances et capacités équivalentes ont pu être estimées :

$$\begin{cases} R_1 = 0.035\Omega; & C_1 = 37.26F \\ R_2 = 0.318\Omega; & C_2 = 37.26F \end{cases}$$

Il est important de souligner que la valeur estimée des capacités est élevée comparée aux valeurs reportées pour les modèles de pile à combustible PEM (entre 0.4 et 4 F) [HRN⁺12, St16]. Dans ces références, les auteurs ont démontré que les piles à combustible PEM peuvent être modélisées par le même circuit électrique équivalent avec des valeurs de capacités faibles puisque les cinétiques chimiques sont plus rapides avec des constantes de temps de l'ordre de la milliseconde. Par comparaison, en nous appuyant sur les résultats trouvés précédemment (équation (2.7)), les constantes de temps à l'anode et à la cathode de l'électrolyseur sont de l'ordre de la seconde.

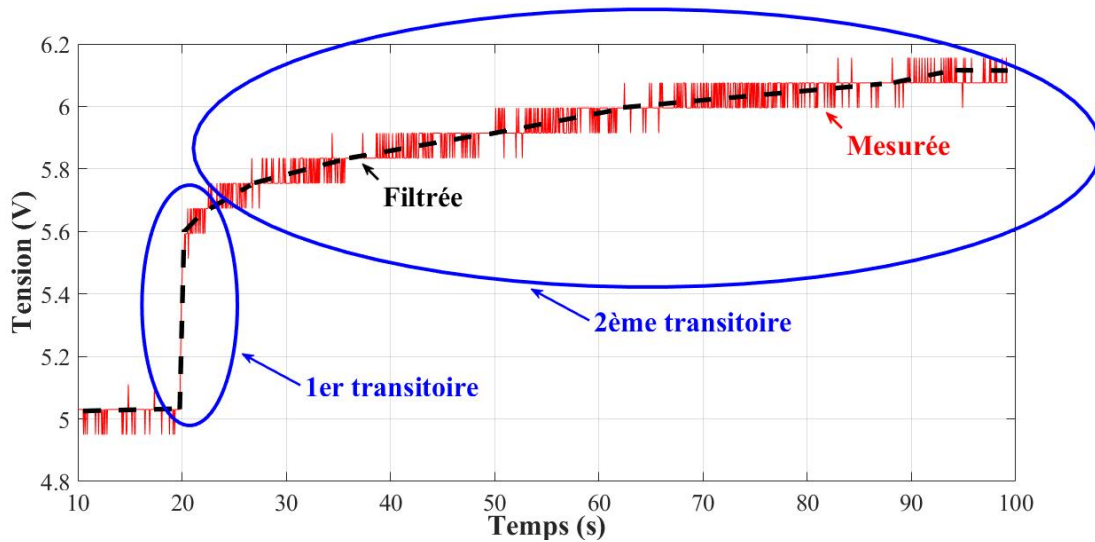


FIGURE 2.9 – Zoom sur les transitoires avec les courbes exponentielles.

Le circuit équivalent montré sur la Figure 2.6 avec ses paramètres a été implémenté dans l'environnement PLECS[®]. Les données obtenues par simulation ont été comparées avec celles obtenues expérimentalement afin de valider le modèle. Par exemple, un transitoire mesuré dans lequel le courant d'alimentation passe d'abord de 2,25 à 4 A à $t = 30$ s puis à 7 A à $t = 110$ s a été considéré. Le transitoire a une durée égale de 200 s. Sur la Figure 2.10, les résultats de simulation sont comparés aux données expérimentales et au modèle statique traditionnel dans lequel les effets capacitifs sont négligés. On peut noter que la courbe représentant la tension pendant les transitoires convient mieux aux données expérimentales par rapport au modèle statique.

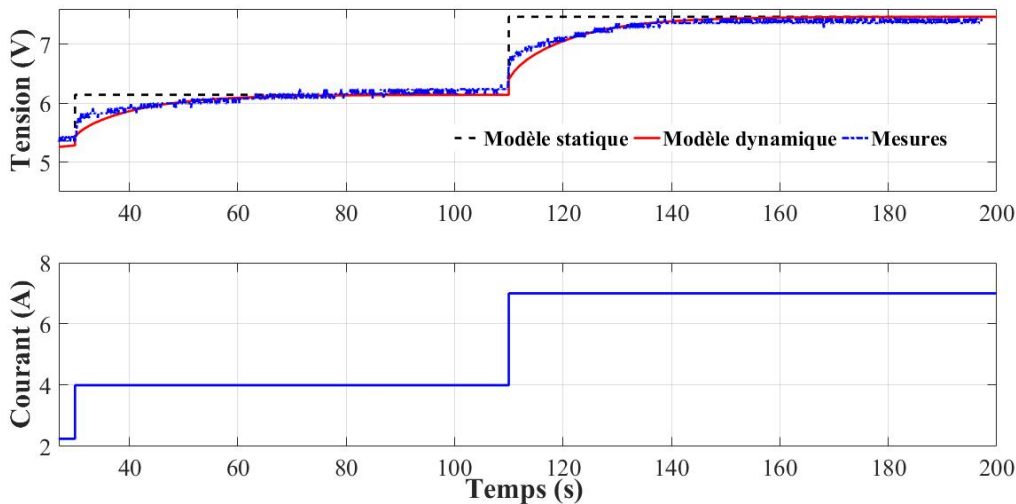


FIGURE 2.10 – Comparaison des données expérimentales avec le modèle statique et dynamique.

L'erreur entre les données expérimentales et le modèle dynamique (exprimée en %) est montrée sur la Figure 2.11 où il peut être noté que le modèle dynamique montre une erreur maximale égale à environ 4 % alors que le pourcentage d'erreur donné par le modèle statique augmente jusqu'à 15 %. Sur la Figure 2.12, les surtensions à la cathode, à l'anode et au niveau de la membrane sont illustrées avec le profil de courant. La Figure 2.13 reproduit le bilan de puissance en considérant les pertes de puissance dans la cathode, dans l'anode, dans la membrane et la

puissance convertie en hydrogène.

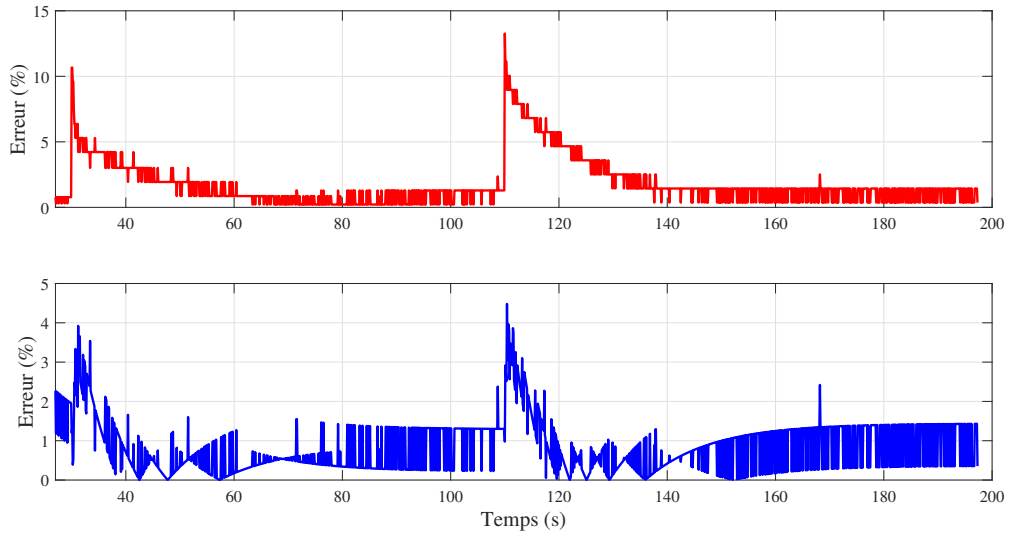


FIGURE 2.11 – Erreur obtenue en comparant les mesures expérimentales avec le modèle statique (haut), avec le modèle dynamique (bas).

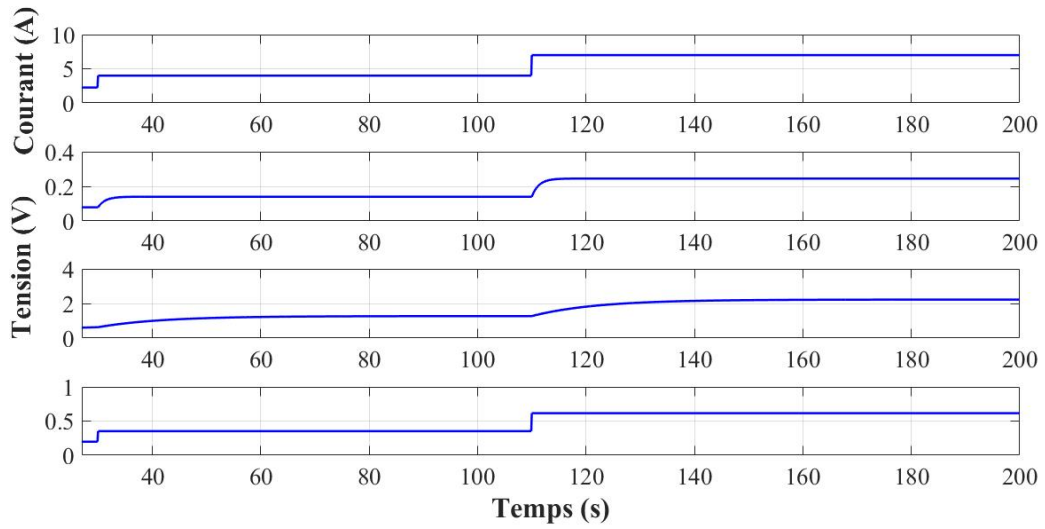


FIGURE 2.12 – (1) profil de courant, (2) surtension à la cathode, (3) surtension à l'anode, (4) surtension à la membrane.

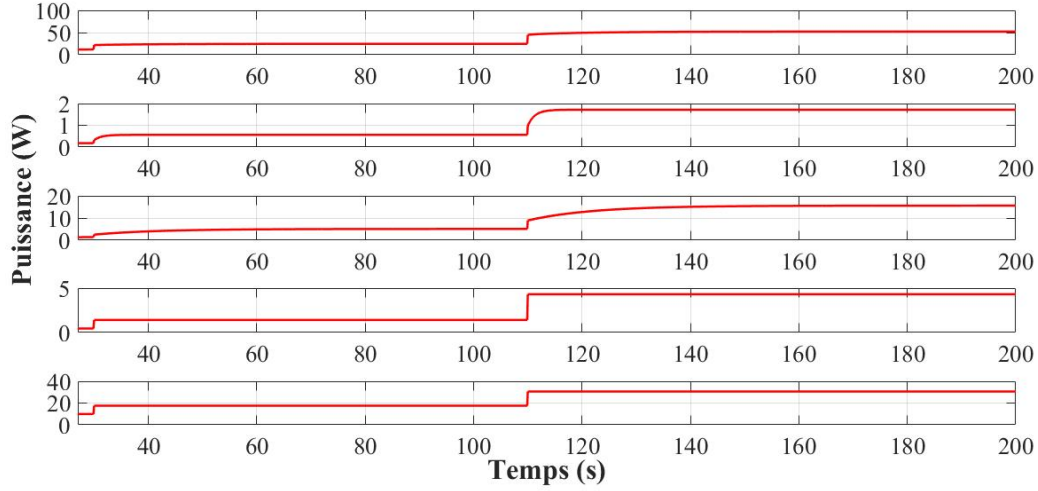


FIGURE 2.13 – Bilan de puissance au sein de l'électrolyseur : (1) puissance électrique fournie, (2) pertes dans la cathode, (3) pertes dans l'anode, (4) pertes dans la membrane, (5) puissance convertie en hydrogène.

Finalement, à partir du modèle équivalent électrique, le rendement de l'électrolyseur peut être estimé par la relation suivante :

$$\eta = \frac{P_{H_2}}{P_{el}} = \frac{V_{\text{int}} I_{el}}{V_{\text{int}} I_{el} + I_{el}^2 (R_1 + R_2 + R_{\text{int}})} \quad (2.8)$$

où P_{H_2} est la puissance convertie en hydrogène et P_{el} est la puissance électrique fournie à l'électrolyseur. La puissance convertie en hydrogène est obtenue par le produit entre la tension V_{int} et le courant I_{el} ; tandis que les pertes sont calculées par le carré du courant multiplié par la somme des résistances de l'anode, de la cathode et de la membrane. Puisque les pertes sont quadratiques avec le courant et alors que la puissance convertie en hydrogène est linéaire avec le courant, le rendement global diminue avec le courant. La courbe de rendement est donnée sur la Figure 2.14.

Il est important de souligner que cette courbe de rendement ne tient pas compte de l'effet de la température. En effet, comme il a déjà été souligné dans la littérature [TBB18, CFS21], la température influe sur les surtensions d'activation et ohmiques. Plus la température est élevée, plus ces surtensions diminuent. En conséquence, comme le rendement est inversement proportionnel à la tension du stack de l'électrolyseur, un fonctionnement en haute température permet de gagner en points de rendement [CFS21]. Des travaux en collaboration avec le laboratoire LERMAB (voir 1.2.3.2) sont en cours afin de déterminer avec précision les points de rendement gagnés lorsqu'un électrolyseur PEM fonctionne à haute température.

Pour conclure sur ce travail, la méthode présentée permet de déterminer les paramètres du modèle électrique équivalent sur une plage de fonctionnement spécifique. Les résultats obtenus sont prometteurs et permettent de donner une bonne approximation du comportement réel de l'électrolyseur. Toutefois, comme souligné dans cette sous-section, les paramètres du modèle ne peuvent pas être considérés constants étant donné que la réponse de l'électrolyseur dépend fortement des conditions de fonctionnement. Dans l'objectif d'augmenter la fiabilité du modèle à reproduire les cinétiques chimiques de l'électrolyseur, les deux prochaines sous-sections explorent l'utilisation de modèles mathématiques permettant d'estimer les paramètres du modèle en temps réel suivant le point de fonctionnement. Deux approches sont particulièrement mises en avant,

la modélisation du stack et d'une cellule pour prendre en compte d'éventuelles dégradations pouvant se produire pendant le fonctionnement de l'électrolyseur.

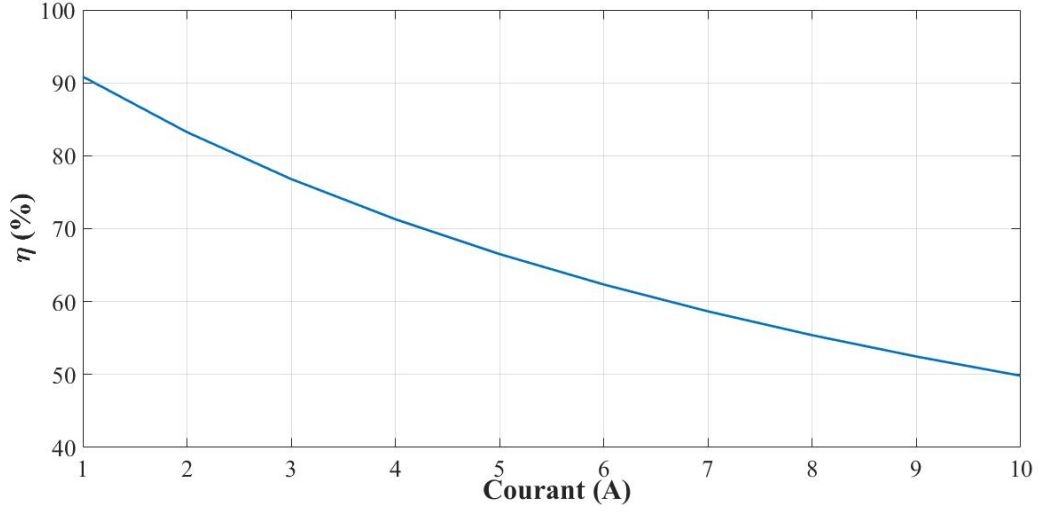


FIGURE 2.14 – Rendement de l'électrolyseur.

2.2.2 Modélisation mathématique des paramètres du modèle électrique équivalent (stack de l'électrolyseur)

Les travaux présentés dans cette sous-section et la suivante sont issus du fruit de la collaboration avec le CICY dans le cadre de la thèse de M. Ángel Mauricio HERNÁNDEZ GÓMEZ (présentée dans le chapitre 1). Ces travaux s'inscrivent dans la continuité des travaux reportés dans [GV19a] concernant la modélisation dynamique des électrolyseurs PEM. En effet, ils se focalisent sur le développement de modèles mathématiques pour estimer en temps réel suivant le point de fonctionnement les paramètres du modèle. Cette nouvelle approche permet d'accroître la fiabilité du modèle à reproduire le comportement réel de l'électrolyseur pendant les phases dynamiques. Dans cette sous-section, la modélisation du stack est considérée.

A partir du modèle équivalent présenté sur la Figure 2.6, la tension du stack de l'électrolyseur V_{el} peut être exprimée par la somme de la tension réversible et des surtensions :

$$V_{el} = V_{int} + \eta_{act} + \eta_{ohm} \quad (2.9)$$

où V_{int} est la tension réversible, η_{act} , et η_{ohm} , sont respectivement les surtensions d'activation et ohmique.

Comme le circuit équivalent est composé de deux branches RC pour modéliser les réactions à l'anode et à la cathode, la surtension d'activation η_{act} est donnée par l'expression suivante :

$$\eta_{act} = \eta_{act,c} + \eta_{act,a} \quad (2.10)$$

où les équations dynamiques pour $\eta_{act,a}$ et $\eta_{act,c}$ sont exprimées par :

$$\frac{d\eta_{act,c}}{dt} = \frac{1}{C_1} i_{el} - \frac{1}{\tau_1} \eta_{act,c}, \quad (2.11a)$$

$$\frac{d\eta_{act,a}}{dt} = \frac{1}{C_2} i_{el} - \frac{1}{\tau_2} \eta_{act,a}, \quad (2.11b)$$

où i_{el} est le courant de l'électrolyseur en $[A]$, C_1 et C_2 sont les capacités respectives à la cathode et à l'anode en $[F]$. Les constantes de temps électriques τ_1 et τ_2 en $[s]$ gouvernant les cinétiques chimiques sont des variables suivant les conditions de fonctionnement à l'entrée de l'électrolyseur. Enfin, une résistance permet de modéliser la membrane (surtension ohmique) :

$$\eta_{ohm} = i_{el}R_{int} \quad (2.12)$$

où R_{int} est la résistance équivalente de la membrane donnée en $[\Omega]$.

Les résistances équivalentes R_1 et R_2 sont estimées basées sur les surtensions d'activation et le courant d'entrée de l'électrolyseur. Elles sont également liées aux constantes de temps τ_1 et τ_2 .

$$\tau_1 = C_1R_1 = C_1 \left(\frac{\eta_{act,c}}{i_{el}} \right), \quad (2.13a)$$

$$\tau_2 = C_2R_2 = C_2 \left(\frac{\eta_{act,a}}{i_{el}} \right). \quad (2.13b)$$

Afin d'obtenir une solution complète du modèle en tension de l'électrolyseur, il est nécessaire de résoudre les équations (2.11a) et (2.11b). De là, la solution est calculée pour (2.11a) et la solution de l'équation (2.11b) est analogue. Ensuite, en appliquant la transformée de Laplace à l'équation (2.11a), l'expression suivante est obtenue :

$$zL[\eta_{act,c}] - \eta_{act,c}(0) = \frac{\int_0^\infty \exp[-zt]i_{el}dt}{C_1} - \frac{L[\eta_{act,c}]}{\tau_1} \quad (2.14)$$

où $\eta_{act,c}(0)$ est la valeur initiale de $\eta_{act,c}$. La transformée $L[\eta_{act,c}]$ est donnée par :

$$L[\eta_{act,c}] = \left(\frac{\tau_1}{z\tau_1 + 1} \right) \left(\frac{\int_0^\infty \exp[-zt]i_{el}dt}{C_1} + \eta_{act,c}(0) \right). \quad (2.15)$$

Par conséquent, en appliquant la transformée inverse, nous obtenons :

$$\eta_{act,c} = \left(\frac{\tau_1}{C_1} \right) L^{-1} \left[\frac{\int_0^\infty \exp[-zt]i_{el}dt}{z\tau_1 + 1} \right] + \eta_{act,c}(0) \exp \left[\frac{-t}{\tau_1} \right]. \quad (2.16)$$

Dans ce travail, la fonction du courant i_{el} est déterminée par une fonction en échelon :

$$i_{el} = \begin{cases} A_1 & \text{if } t < t_c, \\ A_2 & \text{if } t \geq t_c, \end{cases} \quad (2.17)$$

où les termes A_1 et A_2 sont des constantes en $[A]$ et t_c est le temps quand l'entrée A_1 change à l'entrée A_2 exprimé en $[s]$. Ainsi, en utilisant l'équation (2.17) comme une fonction de i_{el} et en appliquant le second théorème de translation de Laplace à l'équation (2.16), $\eta_{act,c}$ devient :

$$\eta_{act,c}(t) = \begin{cases} \left(\frac{\tau_1}{C_1} \right) f_1(t) + g_1(t) & \text{if } t < t_c, \\ \left(\frac{\tau_1}{C_1} \right) \left[(A_2 - A_1) \left(1 - \exp\left[\frac{t_c - t}{\tau_1} \right] \right) + f_1(t) \right] + g_1(t) & \text{if } t \geq t_c, \end{cases} \quad (2.18)$$

et pour $\eta_{act,a}$:

$$\eta_{act,a}(t) = \begin{cases} \left(\frac{\tau_2}{C_2}\right) f_2(t) + g_2(t) & \text{if } t < tc, \\ \left(\frac{\tau_2}{C_2}\right) \left[(A_2 - A_1) \left(1 - \exp\left[\frac{tc-t}{\tau_2}\right]\right) + f_2(t) \right] + g_2(t) & \text{if } t \geq tc, \end{cases} \quad (2.19)$$

où

$$\begin{aligned} f_1(t) &= A_1 \left(1 - \exp\left[\frac{-t}{\tau_1}\right]\right), & f_2(t) &= A_1 \left(1 - \exp\left[\frac{-t}{\tau_2}\right]\right) \\ g_1(t) &= \eta_{act,c}(0) \exp\left[\frac{-t}{\tau_1}\right], & g_2(t) &= \eta_{act,a}(0) \exp\left[\frac{-t}{\tau_2}\right]. \end{aligned}$$

De là, le modèle statique-dynamique en tension de l'électrolyseur peut être exprimé par :

$$V_{el}(t) = V_{int} + i_{el}(t)R_{int} + \eta_{act}(t) \quad (2.20)$$

Partant de cette analyse, les paramètres de l'équation (2.20) sont estimés. Ces paramètres sont ; V_{int} , R_{int} , $\eta_{act,c}(0)$, $\eta_{act,a}(0)$, C_1 , C_2 , R_1 , R_2 , τ_1 , et τ_2 . En utilisant la loi d'Ohm, $\eta_{act,c}(0)$ et $\eta_{act,a}(0)$ sont obtenus comme :

$$\eta_{act,c}(0) = R_1 i_{el}, \quad \eta_{act,a}(0) = R_2 i_{el}. \quad (2.21)$$

Les paramètres R_1 and R_2 peuvent être identifiés en termes de C_1 , C_2 , τ_1 , et τ_2 par les équations (2.13a) et (2.13b). Pour faciliter la construction du modèle, les capacités de ce dernier sont considérées égales $C_1 = C_2$, comme pour l'étude précédente [GV19a, HRN⁺12]. Pour calculer les cinq paramètres restants, le comportement de l'électrolyseur pour différents points de fonctionnement doit être analysé.

Tout d'abord, la courbe statique tension-courant est montrée sur la Figure 2.15. Comme il peut être observé, à partir d'un courant de 7 A (c'est à dire à une densité de courant de $0.14 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$), la tension du stack de l'électrolyseur reste constante à 8 V. Bien que ce phénomène de "saturation" n'a pas encore été reporté dans la littérature, quelques pistes d'explication peuvent être données en se basant sur des travaux préliminaires sur la pile à combustible. Comme mis en valeur sur la Figure 2.3, le système électrolyseur est composé d'électronique de puissance pour alimenter ce dernier avec une faible tension. L'utilisation d'un redresseur et d'un convertisseur DC-DC conduit à la génération d'ondulations de courant basse et haute fréquence. Par exemple, l'ondulation de courant basse fréquence est générée par le redresseur (environ 100 Hz pour une fréquence de réseau de 50 Hz); tandis que le convertisseur DC-DC génère une ondulation de courant haute fréquence (environ 20 kHz dans notre cas). Les ondulations de courant basse et haute fréquence, et la réponse de l'électrolyseur en tension sont illustrées sur la Figure 2.16. Ces dernières années, beaucoup de contributions ont été reportées concernant les effets des ondulations de courant sur les piles à combustible PEM [FTAM07, Gem03, WGH⁺08, ZGZ⁺19], et plus récemment sur les électrolyseurs alcalin et PEM [BGM⁺21, DABP17, KPR⁺21, cPST⁺22, SBB19, UMG⁺09]. Dans ces travaux précédents, il a été démontré que les ondulations de courant peuvent affecter la durée de vie et les performances des piles à combustible et des électrolyseurs pendant leurs fonctionnements. Par conséquent, comme l'électrolyseur étudié a été alimenté sur une longue période (en amont des travaux présentés dans ce manuscrit) par le courant de la Figure 2.16, certaines détériorations ont pu se produire; permettant d'expliquer en partie la caractéristique statique obtenue sur la Figure 2.15.

Cette problématique est rediscutée dans la prochaine sous-section pour motiver les travaux de recherche sur la modélisation des cellules de l'électrolyseur.

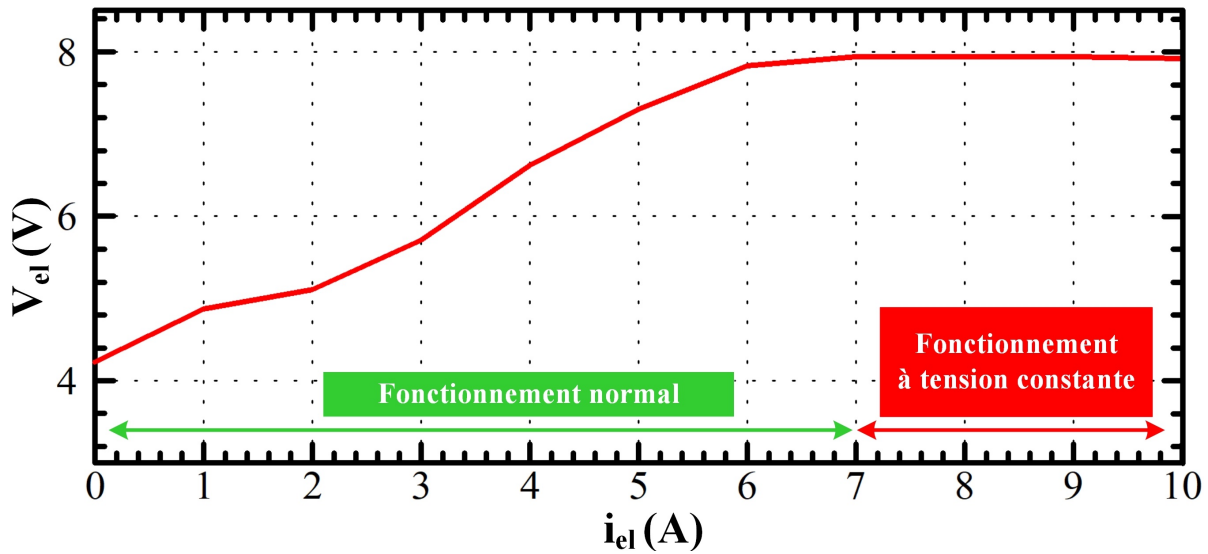


FIGURE 2.15 – Caractéristique statique tension-courant de l'électrolyseur.

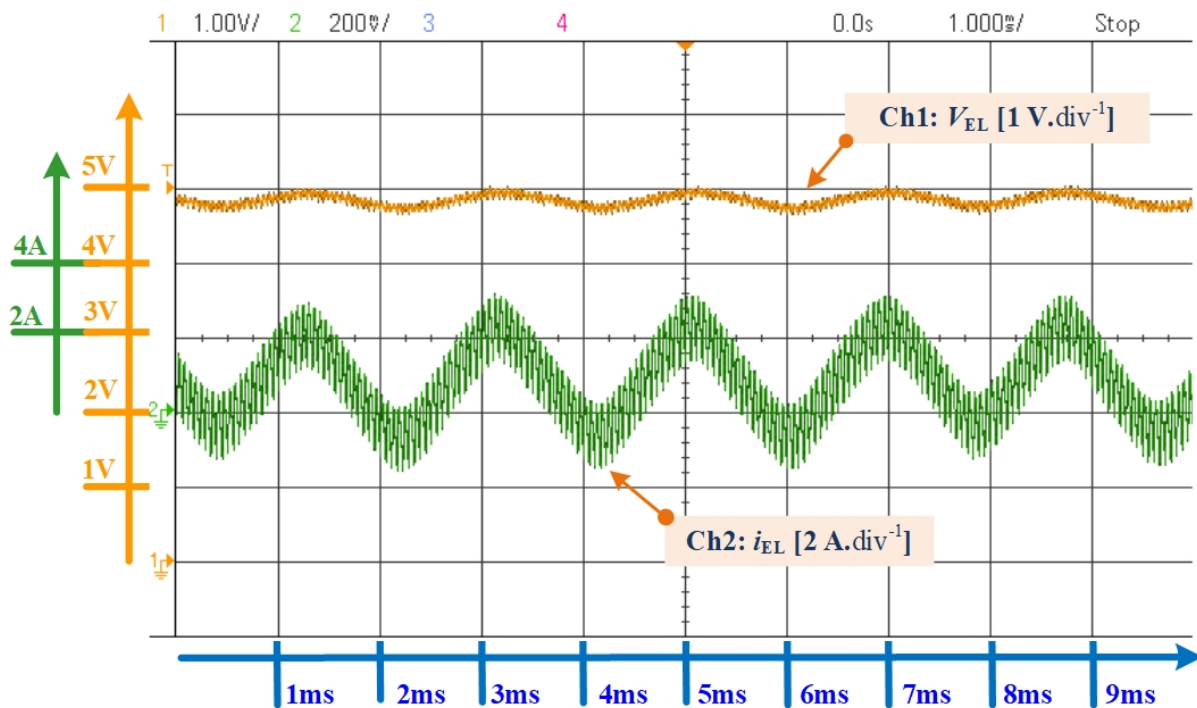


FIGURE 2.16 – Ondulation basse et haute fréquence d'un système électrolyseur PEM.

Pour l'analyse des cinétiques chimiques de l'électrolyseur, des tests ont été réalisés en augmentant le courant d'un pas de 1 A à partir de 0 A pour atteindre 8 A, et dans l'autre sens (avec le même pas de courant). Le choix d'un courant de 8 A est motivé par la caractéristique statique obtenue sur la Figure 2.15. Les résultats obtenus sont synthétisés sur les Figures 2.17 et 2.18. D'une part, sur la Figure 2.17, il peut être noté que les cinétiques chimiques sont prépondérantes

pour une plage de courant de 0 à 6 A ; alors qu'elles sont moins significatives par la suite. D'autre part, sur la Figure 2.18, un comportement similaire peut être observé. Ces résultats permettent de corroborer les résultats obtenus sur la Figure 2.15.

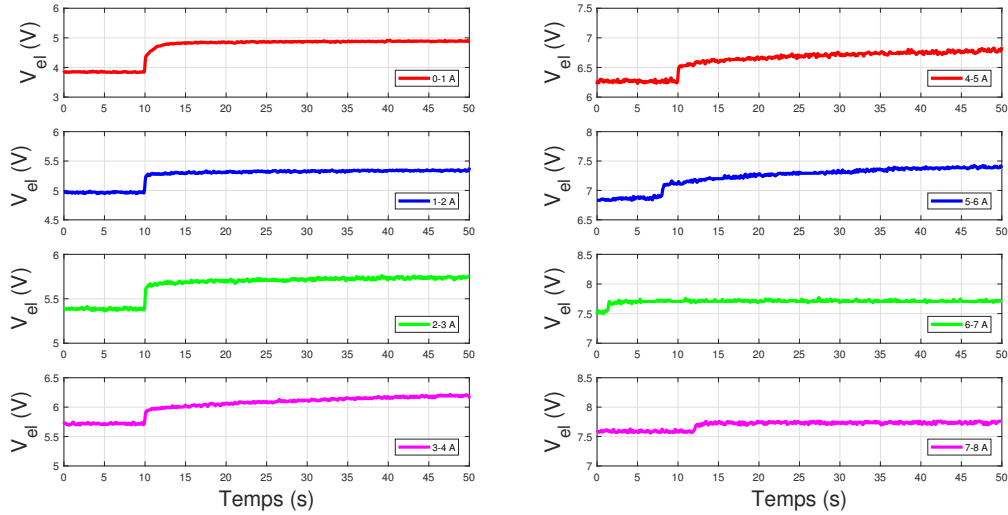


FIGURE 2.17 – Comportement de l'électrolyseur pour des profils de courant montant.

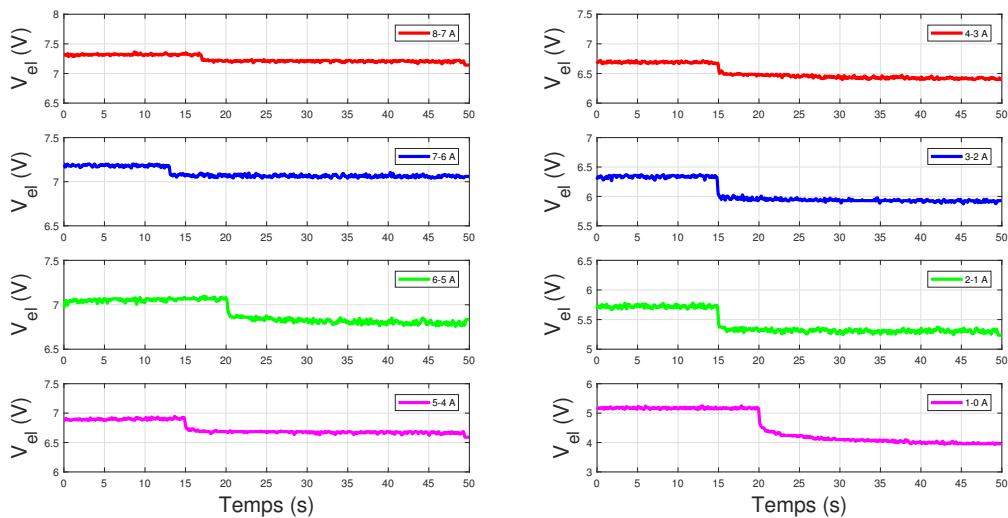


FIGURE 2.18 – Comportement de l'électrolyseur pour des profils de courant descendant.

A la suite de cette analyse, la méthode par régression linéaire de type *moindres carrés* a été employée pour calculer les équations différentielles (2.11a) et (2.11b) afin de résoudre l'équation (2.20) pour chaque essai présenté sur les Figures 2.17 et 2.18. En effet, pour chaque test, les paramètres du modèle peuvent être estimés et tracés en fonction du point de fonctionnement, à savoir le courant. Dans un premier temps, les résultats ont montré que les variations de V_{int} and R_{int} ne sont pas significatives. En conséquence, V_{int} et R_{int} peuvent être considérés comme constants, 4.32 V et 0.329 Ω respectivement, voir Figures 2.19 et 2.20.

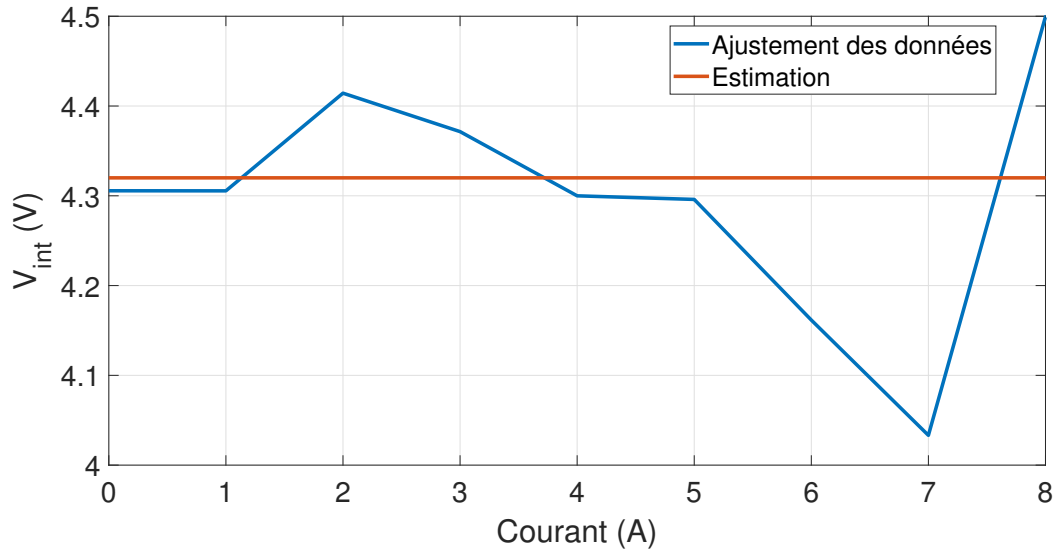


FIGURE 2.19 – Comportement et estimation du paramètre V_{int} .

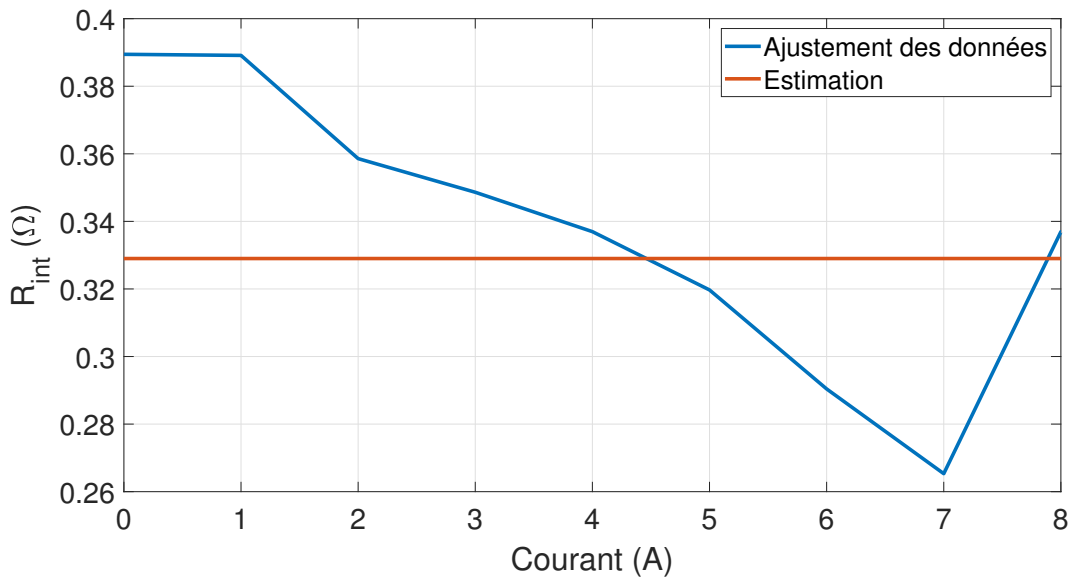
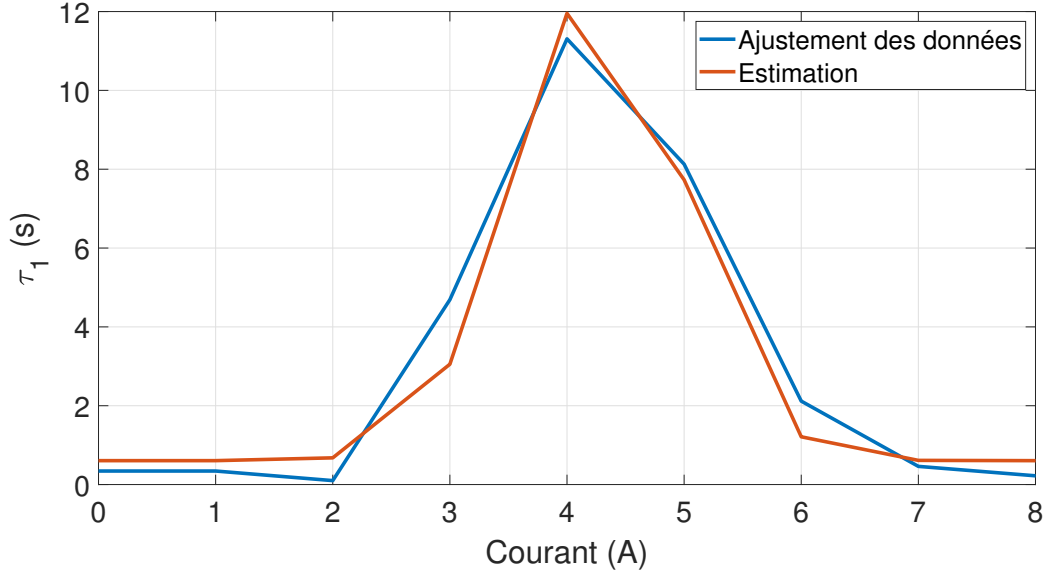
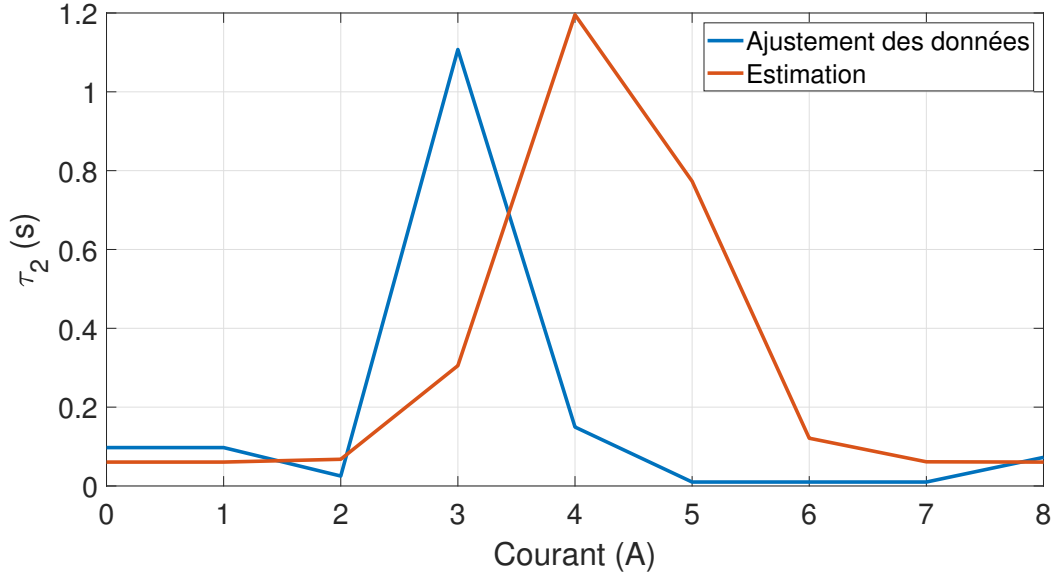


FIGURE 2.20 – Comportement et estimation du paramètre R_{int} .

Par la suite, les valeurs précédemment estimées ont été utilisées, $V_{\text{int}} = 4.32 \text{ V}$ et $R_{\text{int}} = 0.329 \text{ } \Omega$. Les résultats ont démontré que le comportement des paramètres τ_1 et τ_2 se rapproche d'une fonction gaussienne, comme l'illustre les Figures 2.21 et 2.22. De là, le paramètre τ_1 a été estimé en fonction du courant :

$$\tau_1 = 1.1562 \exp \left[\frac{-(i_{el} - 4.2672)^2}{0.09487} \right] + 0.606 \quad (2.22)$$

et le paramètre τ_2 a été estimé comme $\tau_2 = 0.1\tau_1$, et qui valide les résultats obtenus dans [GV19a] où les deux constantes de temps ont un lien de proportionnalité. La comparaison des paramètres estimés et de la variation des paramètres en fonction du courant est donnée sur les Figures 2.21 et 2.22.


 FIGURE 2.21 – Comportement et estimation du paramètre τ_1 .

 FIGURE 2.22 – Comportement et estimation du paramètre τ_2 .

Enfin, les paramètres précédemment déterminés V_{int} , R_{int} , τ_1 et τ_2 ont été réutilisés. Dans cette dernière étape, le comportement du paramètre C_1 a été analysé, qui est fortement lié à i_{el} et τ_1 . Pour cette raison, C_1 a été évalué en fonction de i_{el} et τ_1

$$C_1(i_{el}, \tau_1) = F(i_{el}, \tau_1) + H(i_{el}) \quad (2.23)$$

où

$$F(i_{el}, \tau_1) = 1.1\tau_1 (6.294 \times 10^{-6} \exp[1.6943i_{el}] + 6.3204) - 0.002 \quad (2.24)$$

$$H(i_{el}) = 1.7 \arctan[i_{el} - 2.5] - 0.7. \quad (2.25)$$

Le comportement et l'estimation du paramètre C_1 sont illustrés sur la Figure 2.23.

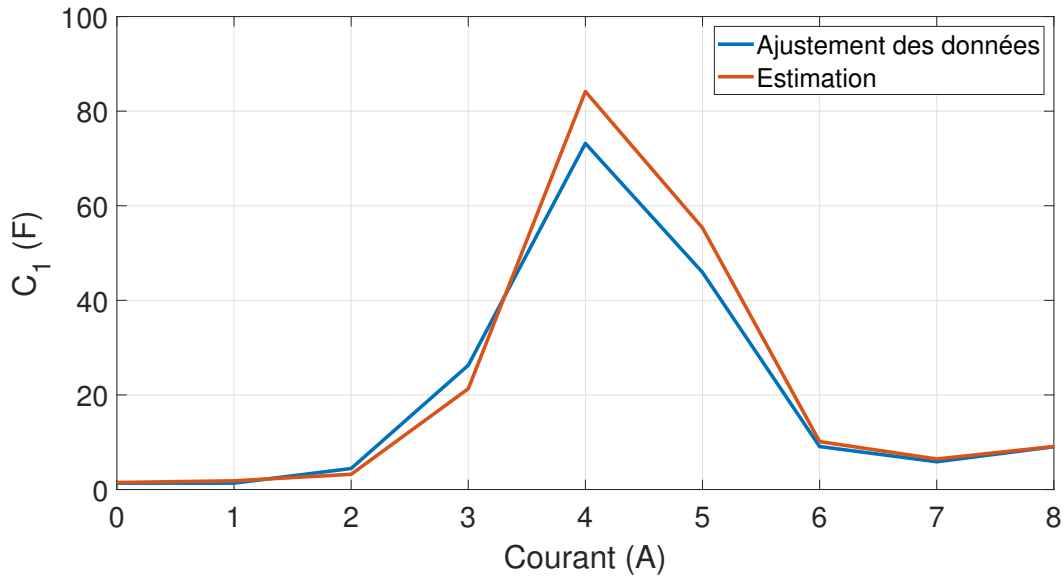


FIGURE 2.23 – Comportement et estimation du paramètre C_1 .

Partant de cette étude, le modèle développé et ses paramètres ont été testés en utilisant les données expérimentales du courant puis les résultats ont été comparés avec les données réelles pour conclure sur l'efficacité du modèle développé. Dans cet objectif d'évaluation, l'erreur relative E_r et l'erreur moyenne E_m ont été calculées pour les différents tests comme suit :

$$E_r = \left(\frac{100}{N_d} \right) \sum_{k=1}^{N_d} \left| \frac{V_{\text{exp},k} - V_{\text{sim},k}}{V_{\text{exp},k}} \right|, \quad (2.26a)$$

$$E_m = \frac{\sum_{k=1}^{N_d} |V_{\text{exp},k} - V_{\text{sim},k}|}{N_d} \quad (2.26b)$$

où N_d est le nombre de données expérimentales, $V_{\text{exp},k}$ est la valeur de la tension obtenue expérimentalement [V], $V_{\text{sim},k}$ est la valeur de tension obtenue via le modèle [V].

Les résultats de comparaison entre le modèle et les expérimentations sont donnés sur les Figures 2.24, 2.25, 2.26, 2.27, 2.28 et 2.29.

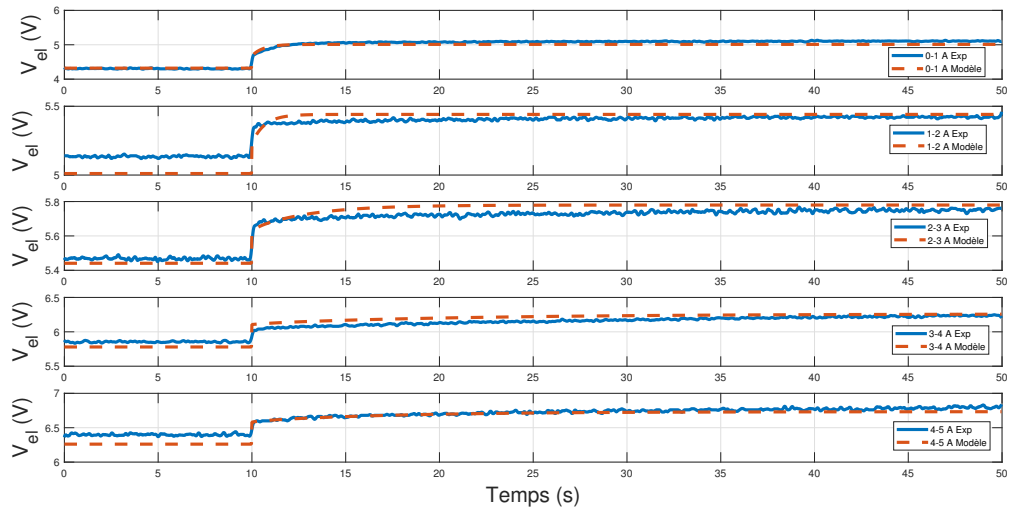


FIGURE 2.24 – Comparaison des résultats obtenus expérimentalement (ligne continue) et avec le modèle (ligne pointillée) considérant un courant de 0 à 5 A.

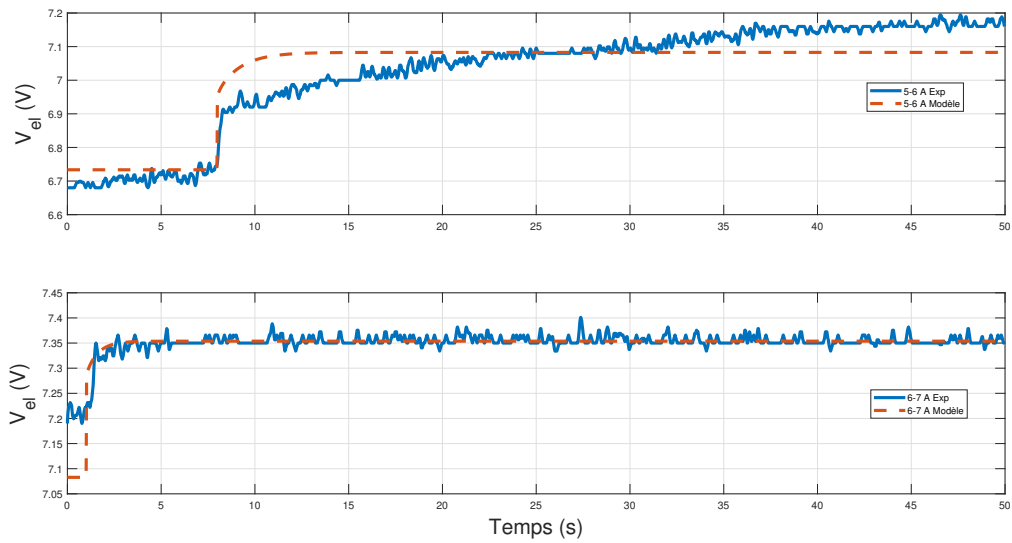


FIGURE 2.25 – Comparaison des résultats obtenus expérimentalement (ligne continue) et avec le modèle (ligne pointillée) considérant un courant de 5 à 7 A.

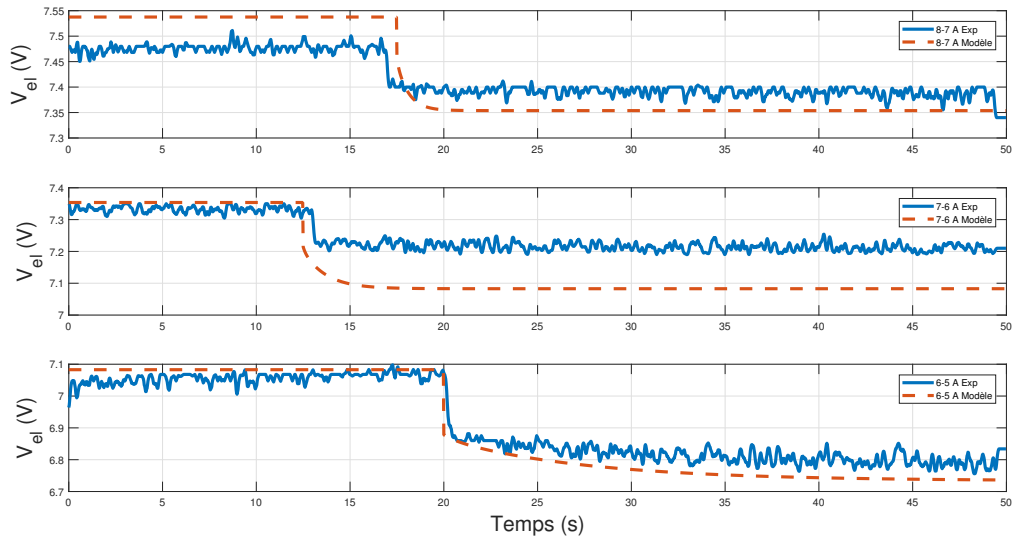


FIGURE 2.26 – Comparaison des résultats obtenus expérimentalement (ligne continue) et avec le modèle (ligne pointillée) considérant un courant de 8 à 5 A.

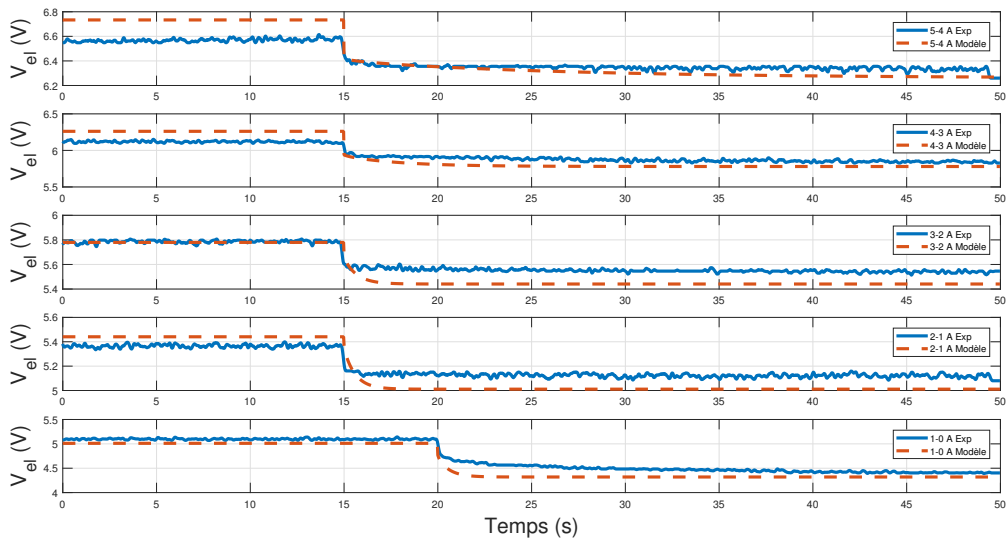


FIGURE 2.27 – Comparaison des résultats obtenus expérimentalement (ligne continue) et avec le modèle (ligne pointillée) considérant un courant de 5 à 0 A.

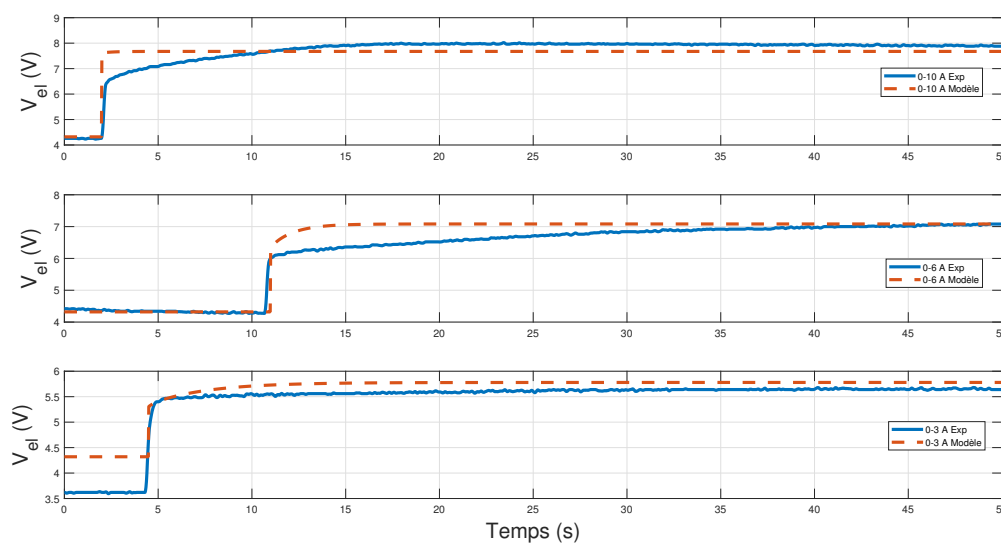


FIGURE 2.28 – Comparaison des résultats obtenus expérimentalement (ligne continue) et avec le modèle (ligne pointillée) considérant une plage de courant de 0 à 3 A, 0 à 6 A, et 0 à 10 A.

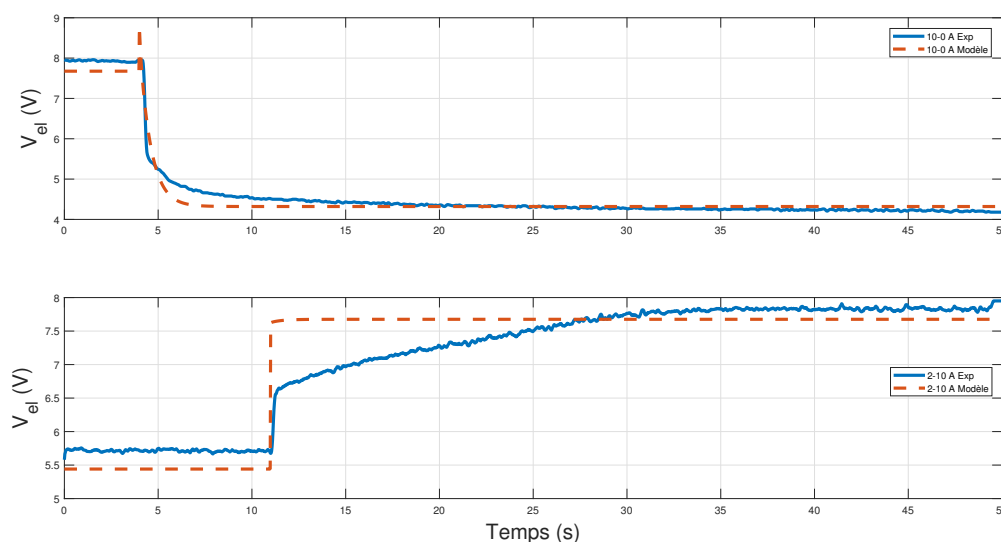


FIGURE 2.29 – Comparaison des résultats obtenus expérimentalement (ligne continue) et avec le modèle (ligne pointillée) considérant une plage de courant de 10 à 0 A, et de 2 à 10 A.

En s'appuyant sur les résultats reportés précédemment, la Table 2.2 résume les erreurs relatives et moyennes du modèle pour les différents tests réalisés. Il peut être noté que l'erreur maximale obtenue avec le modèle est égale à 0.29 V (i.e. 4.19%) correspondant à un échelon de courant de 2 à 10 A ; tandis que pour les autres tests, l'erreur moyenne est très faible (inférieure à 0.1 V). Les erreurs maximales ont été obtenues pour des larges échelons de courant (Figures 2.28 et 2.29) puisque les données expérimentales de ce tests n'ont pas été employées directement pour le modèle. De là, l'estimation des paramètres n'est pas optimale, et des erreurs entre les données expérimentales et le modèle peut être observées. En dépit de cela, le modèle développé peut donner une bonne approximation du comportement réel de l'électrolyseur.

Se basant sur ce travail préliminaire, la prochaine sous-section présente la même approche de modélisation mais pour chaque cellule de l'électrolyseur considérant de possibles dégradations introduites dans cette sous-section.

TABLE 2.2 – Synthèse des performances du modèle.

| Courant | t_c | E_r | E_m | Simulation |
|----------|--------|-------|--------|-------------|
| 0 à 1 A | 10 s | 1.3% | 0.07 V | Figure 2.24 |
| 1 à 2 A | 10 s | 0.95% | 0.05 V | |
| 2 à 3 A | 10 s | 0.66% | 0.04 V | |
| 3 à 4 A | 10 s | 0.98% | 0.06 V | |
| 4 à 5 A | 10 s | 0.88% | 0.06 V | |
| 5 à 6 A | 8 s | 0.8% | 0.06 V | Figure 2.25 |
| 6 à 7 A | 1 s | 0.18% | 0.01 V | |
| 8 à 7 A | 17.5 s | 0.66% | 0.05 V | Figure 2.26 |
| 7 à 6 A | 12.5 s | 1.42% | 0.01 V | |
| 6 à 5 A | 20 s | 0.64% | 0.04 V | |
| 5 à 4 A | 15 s | 1.29% | 0.08 V | Figure 2.27 |
| 4 à 3 A | 15 s | 1.64% | 0.1 V | |
| 3 à 2 A | 15 s | 1.47% | 0.08 V | |
| 2 à 1 A | 15 s | 1.93% | 0.1 V | |
| 1 à 0 A | 20 s | 2.7% | 0.13 V | |
| 0 à 3 A | 4.5 s | 4.2% | 0.2 V | Figure 2.28 |
| 0 à 6 A | 11 s | 3.95% | 0.25 V | |
| 0 à 10 A | 2 s | 3.9% | 0.29 V | |
| 10 à 0 A | 4 s | 2.52% | 0.12 V | Figure 2.29 |
| 2 à 10 A | 11 s | 4.19% | 0.29 V | |

2.2.3 Modélisation mathématique des paramètres du modèle électrique équivalent d'une cellule d'électrolyseur

Cette partie se focalise sur la modélisation de chaque cellule composant l'électrolyseur au lieu du stack [AHGRGS20]. Ce travail est motivé par le fait que les réponses en tension des cellules et leurs rendements peuvent subir des dégradations pendant leurs fonctionnements en raison des sollicitations dynamiques (particulièrement importantes en considérant un couplage aux sources d'énergies renouvelables) et aux ondulations de courant basse et haute fréquence de l'électronique de puissance (convertisseurs AC-DC et DC-DC) [DABP17, KRK⁺19, cPST⁺22]. Plusieurs contributions sur la dégradation des performances des électrolyseurs PEM ont été reportées dans la littérature [BAS⁺13, CMG⁺15, FFOS⁺19, KWI⁺19, MRdG⁺12, PAST⁺20]. Ces travaux ont démontré que les cellules d'électrolyseurs PEM peuvent être sujettes à des dégradations en raison des fonctionnements dynamiques et des conditions de fonctionnement

(densité de courant, température). Cependant, les effets des ondulations de courant générées par l'électronique de puissance à long terme sur les performances des électrolyseurs PEM représentent actuellement une problématique clé [KRR⁺19], même si de récents travaux ont été portés sur l'étude de l'impact des ondulations de courant sur le rendement, la consommation d'énergie pour la production d'hydrogène, et les performances [BGM⁺21, KPR⁺21, cPST⁺22]. Pour cette raison, la modélisation de chaque cellule de l'électrolyseur est cruciale pour étudier ces dégradations et les effets du vieillissement induits par les sollicitations dynamiques et les ondulations de courant de l'électronique de puissance.

En se basant sur le banc de test développé sur la Figure 2.2, des essais expérimentaux ont été réalisés pour analyser les réponses en tension des cellules de l'électrolyseur lorsqu'elles sont soumises à des échelons de courant. La première cellule correspond à celle au-dessus de l'électrolyseur, la deuxième au milieu, et la troisième en bas (voir Figure 2.2). Les résultats obtenus pour deux échelons de courant (de 0 à 10 A, et de 10 A à 0) sont illustrés sur les Figures 2.30 et 2.31. Pour les deux tests, une large échelle de temps (5 s) a été choisie pour souligner les cinétiques chimiques et le régime permanent. L'échelon de courant a été appliqué à 1.25 s (Figure 2.30) et à 2.5 s (Figure 2.31).

Pour la Figure 2.30, il peut être observé que les tensions de cellule sont caractérisées par deux différentes dynamiques, une rapide pour la troisième cellule, et une autre plus lente pour la première et deuxième cellule. En effet, pour les deux premières cellules, les cinétiques chimiques durent environ 18.75 s ; tandis que pour la troisième cellule, seulement 8.75 s. En outre, en régime permanent, les trois tensions de cellule atteignent la même valeur, environ 2.6 V, correspondant à une tension du stack de 7.8 V.

Par comparaison, pour la Figure 2.31, il peut être noté que les deux premières cellules présentent des cinétiques chimiques similaires ; alors que la troisième cellule a une cinétique chimique différente. Dans ce cas, la réponse en tension de la troisième cellule est plus lente que celle des deux premières cellules. En effet, les deux premières cellules atteignent leurs régimes permanents en 7.5 s ; tandis que la troisième cellule en 17.5 s.

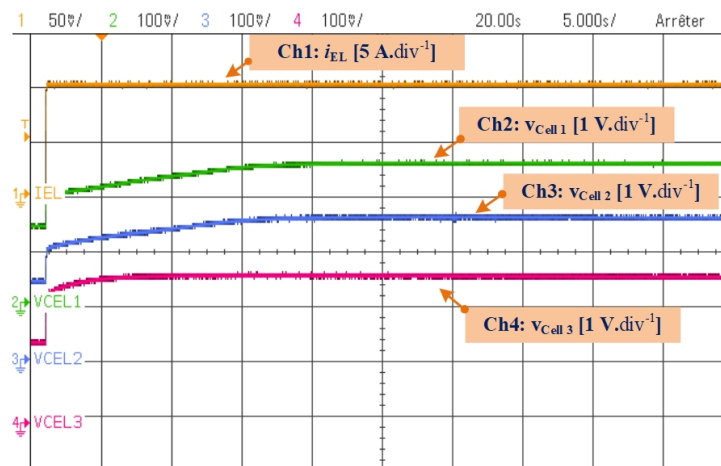


FIGURE 2.30 – Réponse de l'électrolyseur suite à un échelon de courant montant de 0 à 10 A.

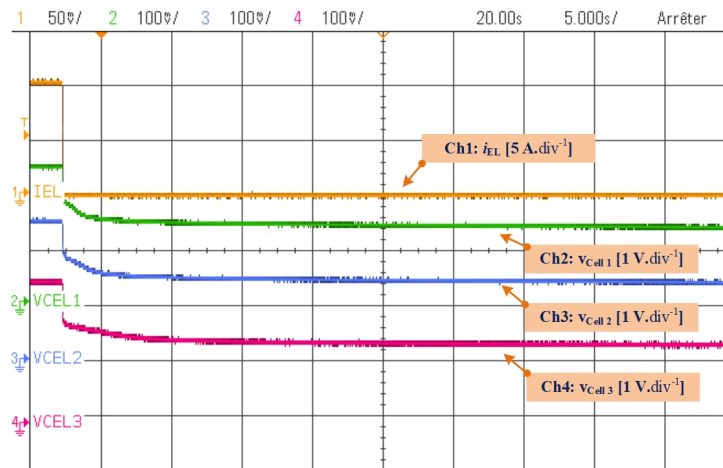


FIGURE 2.31 – Réponse de l'électrolyseur suite à un échelon de courant descendant de 10 à 0 A.

Comme introduit dans la précédente sous-section, ces différences observées dans les réponses en tension peuvent s'expliquer par le fait que certaines dégradations ont pu se produire sur une longue période de fonctionnement antérieure à la réalisation des tests expérimentaux montrés dans ce manuscrit. En effet, l'électrolyseur a été alimenté par un courant ondulé dont l'allure est illustré sur la Figure 2.16, provenant de l'électronique de puissance associée (voir Figure 2.3). Il est important de souligner que la réponse en tension de l'électrolyseur est affectée par les ondulations de courant puisque une légère ondulation à basse fréquence peut être observée (environ 0.4 V) sur la Figure 2.16. Dans les travaux [AHGRG20, GV19a], il a été mis en lumière que la valeur de la capacité équivalente double-couche est élevée comparée à celles reportées pour les piles à combustible PEM [HRN⁺12, St16]. En s'appuyant sur les travaux reportés dans [FTAM07] portant sur les interactions entre les piles à combustible PEM et les convertisseurs de puissance, les auteurs ont discuté du rôle clé de la capacité équivalente double-couche dans le filtrage des ondulations de courant générées par l'électronique de puissance. Comme la valeur de la capacité équivalente double-couche est relativement élevée, une grande partie des ondulations de courant peuvent être filtrées. Cette analyse pourrait donc expliquer le fait que l'ondulation de tension est faible malgré l'amplitude importante des ondulations de courant. Toutefois, comme reporté en conclusion des travaux dans [FTAM07], une problématique demeure, à savoir le courant maximum admissible par la capacité double-couche, permettant de garantir le filtrage de ces ondulations de courant.

Pour mettre en évidence les effets des ondulations de courant sur les performances de l'électrolyseur, la tension de cellule en régime permanent, la caractéristique statique des cellules, et le rendement en tension des cellules de l'électrolyseur ont été tracés sur les Figures 2.32, 2.33, et 2.34. La Figure 2.32 illustre la tension d'une cellule en régime permanent lorsque l'électrolyseur est alimenté par le courant de la Figure 2.16. L'ondulation de tension est d'environ 0.15 V et permet de justifier l'amplitude de 0.4 V visible sur la Figure 2.16. Ensuite, la Figure 2.33 montre la caractéristique statique des trois tensions de cellule en fonction du courant. Comme il peut être observé, les tensions de cellule montrent une disparité. Les deux premières cellules montrent une caractéristique identique ; tandis que la troisième cellule a un potentiel plus élevé. Ces observations permettent de confirmer l'analyse précédente avec les différentes réponses en tension des trois cellules (Figures 2.30 et 2.31). Malgré des premiers travaux prometteurs reportés dans [BGM⁺21, cPST⁺22] sur les effets des ondulations de courant sur les performances des électrolyseurs PEM, des travaux effectués sur les piles à combustible PEM peuvent donner une première piste d'explication sur les disparités observées entre les tensions de cellule [Ger10].

Dans ces travaux de thèse, il a été mis en évidence la large disparité entre les performances des tensions de cellule suite à l'application d'ondulations de courant (5 kHz, le courant moyen est de 110 A, et 20% d'amplitude d'ondulation). Sur la Figure 2.34, il peut être observé l'impact des ondulations de courant sur le rendement des tensions de cellules. Ce rendement est calculé en divisant la tension thermoneutre (1.48 V) par la tension de chaque cellule. Les deux premières cellules ont un rendement similaire ; tandis que la troisième cellule montre des performances dégradées en raison d'un potentiel plus élevé comparé aux autres cellules. En résumé, cette analyse permet de justifier la pertinence de réaliser une modélisation de chaque cellule de l'électrolyseur, et d'étudier en conséquence les dégradations des performances et les effets de vieillissement.

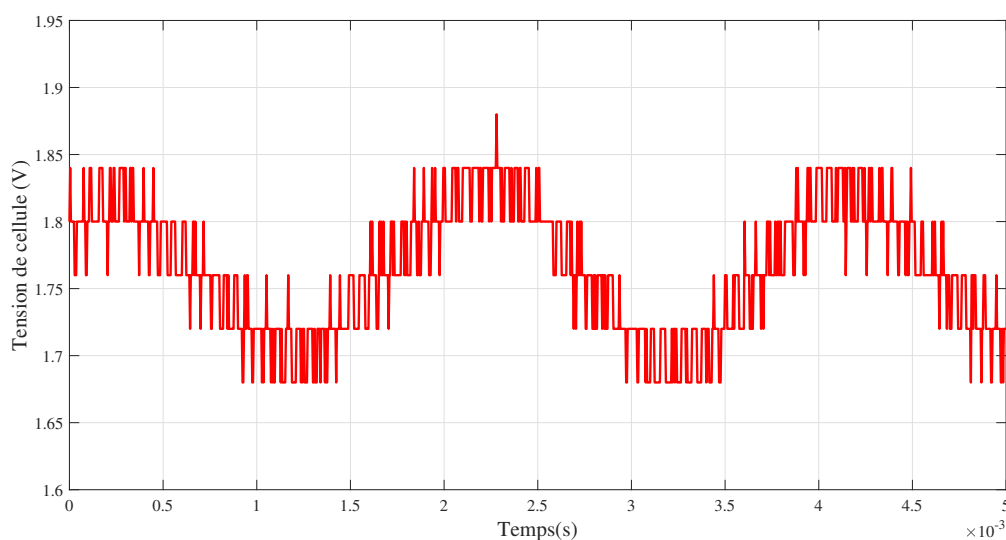


FIGURE 2.32 – Tension de cellule en régime permanent soumise à des ondulations de courant.

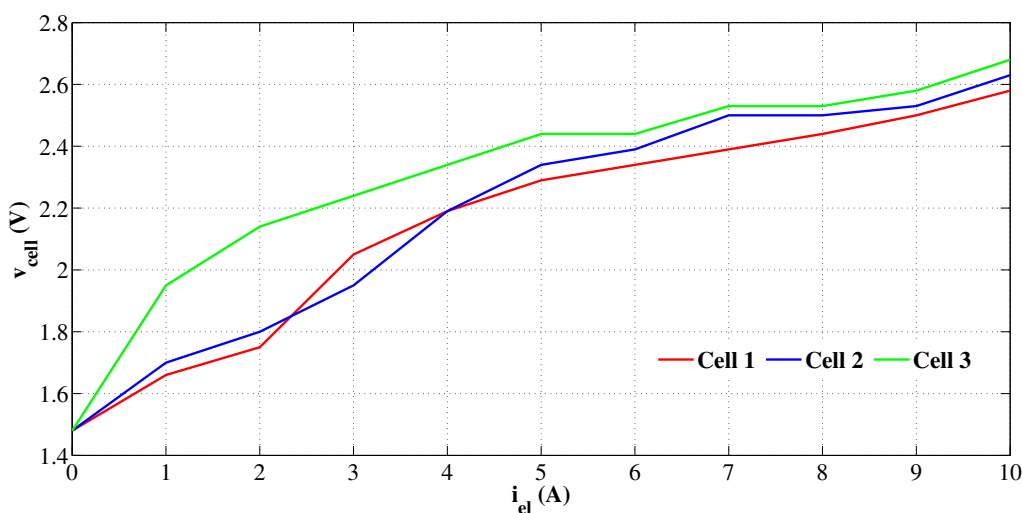


FIGURE 2.33 – Caractéristique statique des tensions de cellule.

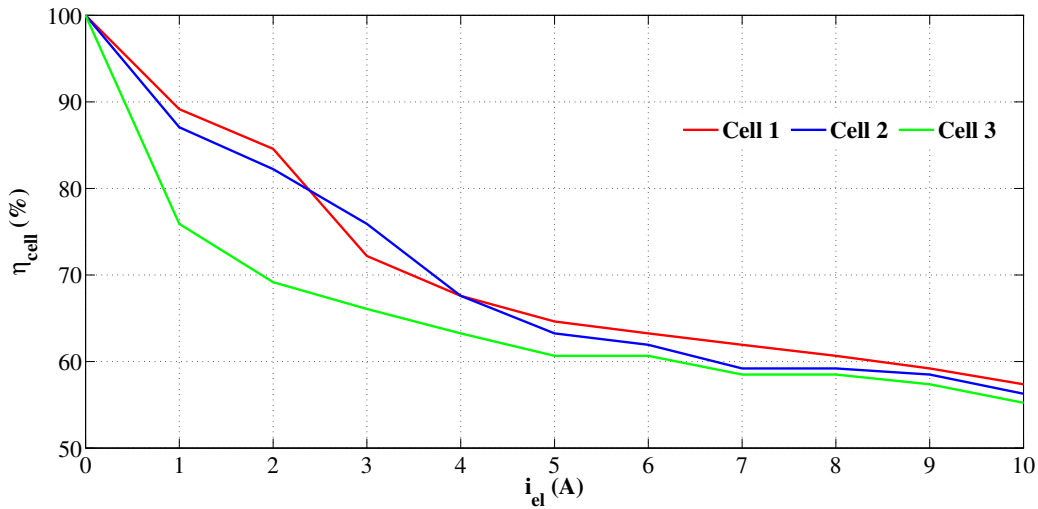


FIGURE 2.34 – Rendement des tensions de cellule en fonction du courant.

En suivant la même approche de modélisation et de détermination des paramètres (méthode par régression non-linéaire) présentée dans la sous-section précédente, les réponses en tension des trois cellules ont été analysées pendant des tests dynamiques. Chaque test consiste à appliquer un échelon de courant par pas de 1 A de 0 à 8 A et vice-versa. Les résultats obtenus pour des échelons de courant montants sont illustrés sur les Figures 2.35 et 2.36 ; alors que pour les échelons de courant descendants sur les Figures 2.37 et 2.38. Il peut être observé que les cinétiques chimiques des tensions de cellule diffèrent comme montré précédemment (Figure 2.30 et 2.31). En effet, les deux premières cellules montrent un comportement identique comparé à la troisième cellule.

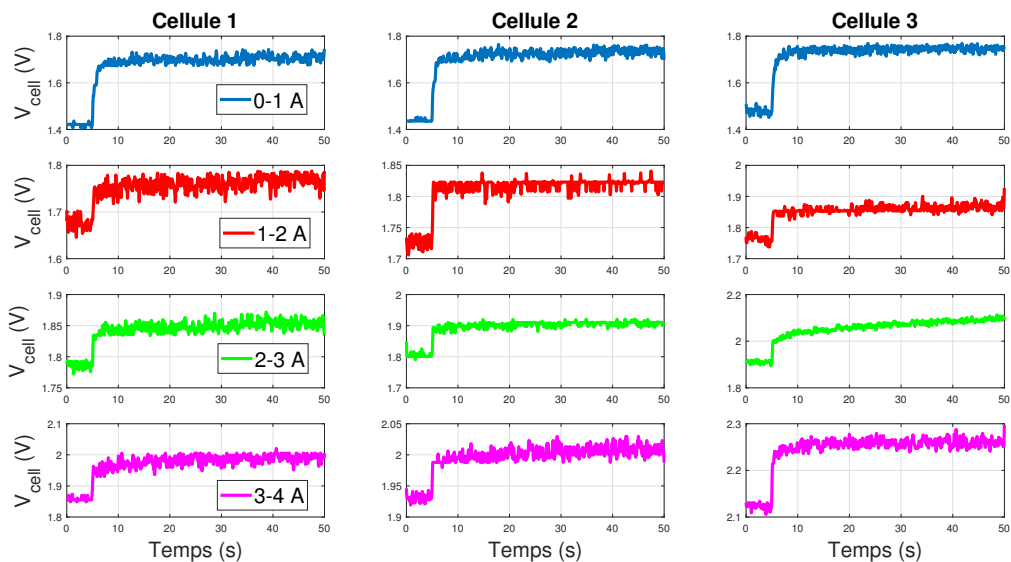


FIGURE 2.35 – Réponse en tension des cellules suite à un échelon de courant montant de 0 à 4 A.

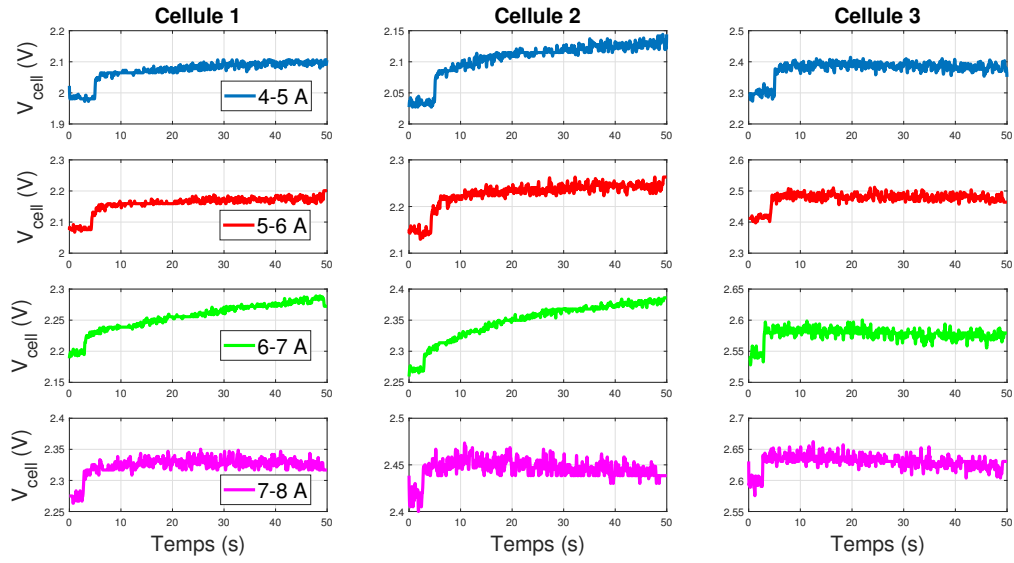


FIGURE 2.36 – Réponse en tension des cellules suite à un échelon de courant montant de 4 à 8 A.

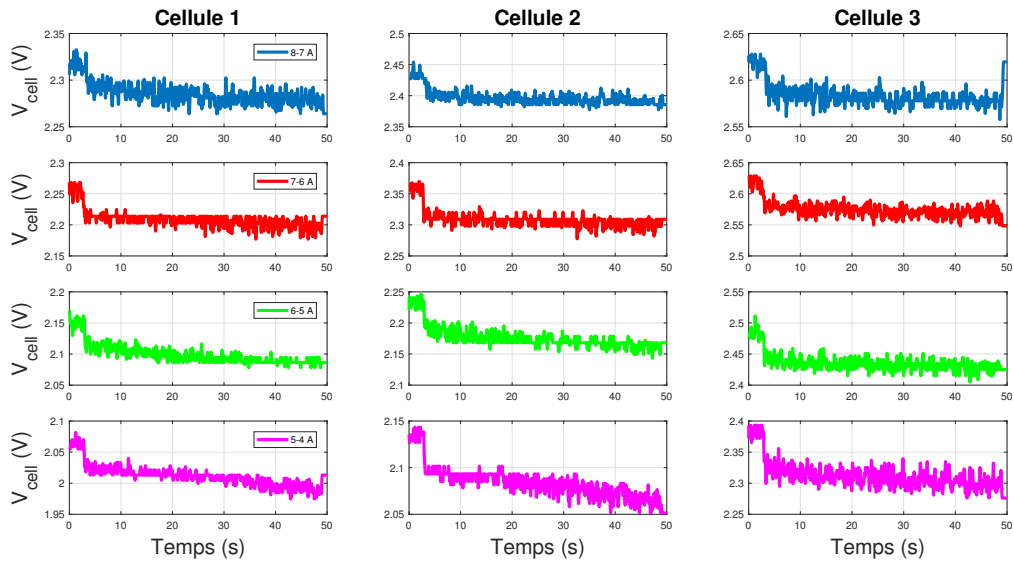


FIGURE 2.37 – Réponse en tension des cellules suite à un échelon de courant descendant de 8 à 4 A.

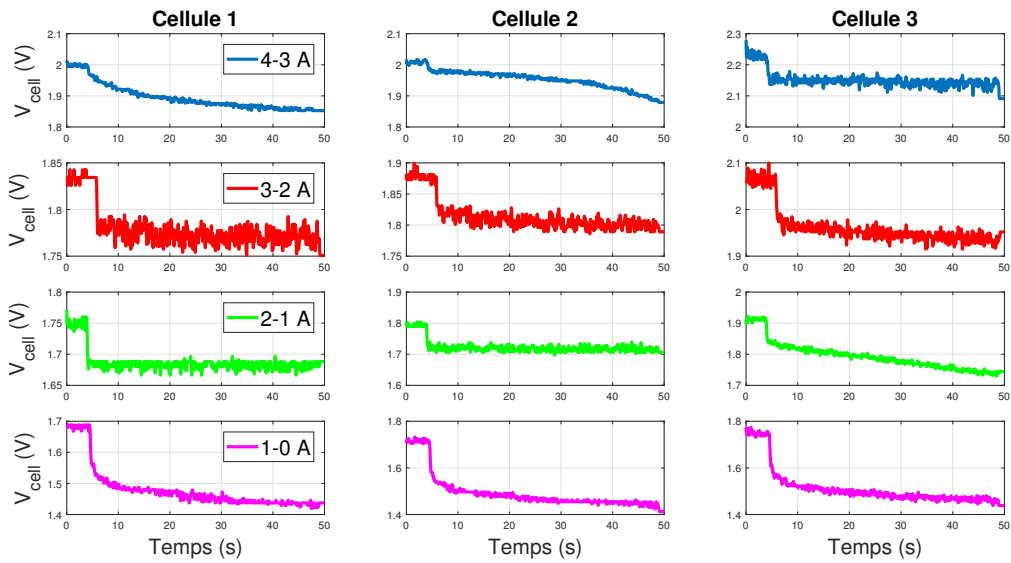


FIGURE 2.38 – Réponse en tension des cellules suite à un échelon de courant descendant de 4 à 0 A.

En se basant sur la méthode par régression non-linéaire, les résultats ont montré que les variations de V_{int} et de R_{int} ne sont pas significatives. En conséquence, V_{int} et R_{int} peuvent être considérés comme constants dans les trois cellules, $V_{\text{int}} = 1.3898 \text{ V}$ et $R_{\text{int}} = 0.1029 \Omega$ pour la cellule 1 ; $V_{\text{int}} = 1.3898 \text{ V}$ et $R_{\text{int}} = 0.1136 \Omega$ pour la cellule 2 ; $V_{\text{int}} = 1.4123 \text{ V}$ et $R_{\text{int}} = 0.1396 \Omega$ pour la cellule 3. Les résultats sont montrés sur les Figures 2.39 et 2.40.

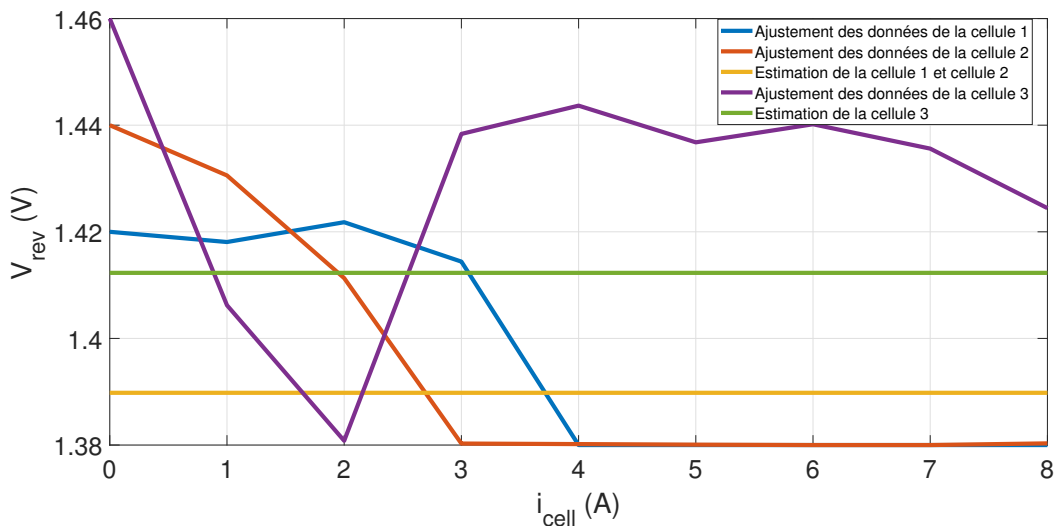
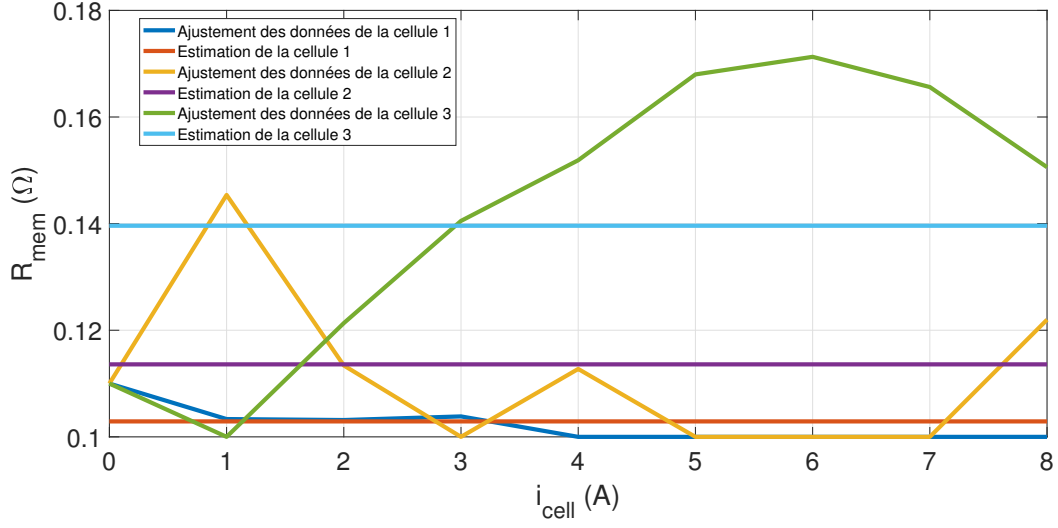


FIGURE 2.39 – Comportement et estimation du paramètre V_{int} .


 FIGURE 2.40 – Comportement et estimation du paramètre R_{int} .

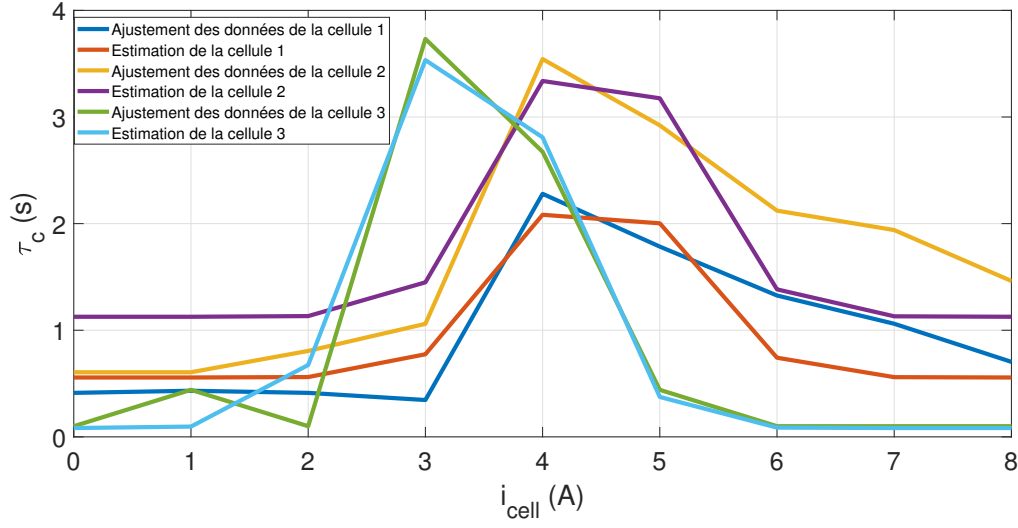
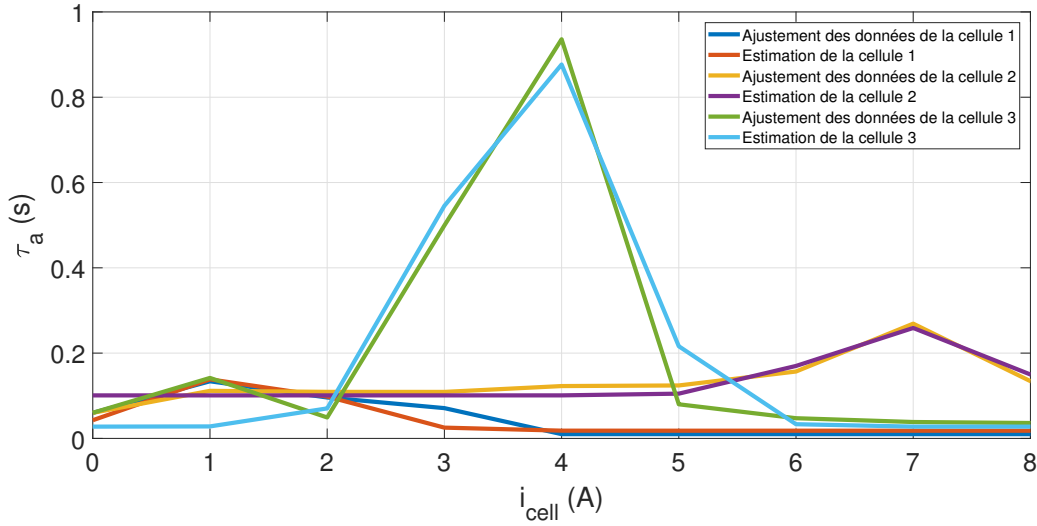
Par la suite, les paramètres précédemment estimés ont été réutilisés (V_{int} et R_{int}). Le comportement des paramètres τ_c et τ_a se rapproche d'une fonction gaussienne (comme observé dans la sous-section précédente). Par conséquent, le paramètre τ_c a été estimé comme une fonction du courant :

$$\tau_c = \begin{cases} 0.5568 \exp \left[\frac{-(i_{\text{e}\ell} - 4.4731)^2}{0.4451} \right] + 1.0048 & \text{pour la cellule 1,} \\ 1.1264 \exp \left[\frac{-(i_{\text{e}\ell} - 4.4619)^2}{0.4525} \right] + 1.4771 & \text{pour la cellule 2,} \\ 0.0827 \exp \left[\frac{-(i_{\text{e}\ell} - 3.3822)^2}{0.1465} \right] + 0.3972 & \text{pour la cellule 3.} \end{cases} \quad (2.27)$$

De la même façon, le paramètre τ_a a également été estimé en fonction du courant :

$$\tau_a = \begin{cases} 0.0181 \exp \left[\frac{-(i_{\text{e}\ell} - 1.2955)^2}{2.3718} \right] + 0.8509 & \text{pour la cellule 1,} \\ 0.1009 \exp \left[\frac{-(i_{\text{e}\ell} - 6.9142)^2}{2.1189} \right] + 0.8707 & \text{pour la cellule 2,} \\ 0.0276 \exp \left[\frac{-(i_{\text{e}\ell} - 3.7474)^2}{0.7212} \right] + 0.9825 & \text{pour la cellule 3.} \end{cases} \quad (2.28)$$

Les comportements et les estimations de τ_c et de τ_a sont montrés sur les Figures 2.41 et 2.42.


 FIGURE 2.41 – Comportement et estimation du paramètre τ_c .

 FIGURE 2.42 – Comportement et estimation du paramètre τ_a .

Enfin, les paramètres estimés V_{int} , R_{int} , τ_c et τ_a ont été réutilisés pour déterminer le paramètre C_c dépendant de i_{el} et de τ_c . De là, C_c a été estimé en fonction de i_{el} , τ_c , et de τ_a .

$$C_c(i_{\text{el}}, \tau_c, \tau_a) = F(i_{\text{el}}, \tau_c, \tau_a) + H(i_{\text{el}}) \quad (2.29)$$

où

$$F(i_{\text{el}}, \tau_c, \tau_a) = \begin{cases} (2.04\tau_c - 31.73\tau_a) \exp [0.52i_{\text{el}}] + 8.47 & \text{pour la cellule 1,} \\ (10.78\tau_c + 2.42\tau_a) \exp [0.23i_{\text{el}}] - 7.59 & \text{pour la cellule 2,} \\ (2.10\tau_c - 2.86\tau_a) \exp [0.69i_{\text{el}}] - 1.56 & \text{pour la cellule 3.} \end{cases} \quad (2.30)$$

La fonction $H(i_{el})$ a pour objectif d'estimer les erreurs entre la fonction F et les données obtenues dans l'ajustement du paramètre C_c . Bien que la fonction F fournit une bonne approximation du paramètre C_c , il est nécessaire d'améliorer la précision puisque les valeurs de C_c à faible courant i_{el} sont plus petites comparées aux valeurs de C_c à fort courant. Ainsi, la fonction H a été calculée pour chaque cellule en utilisant les séries de Fourier. Le comportement et l'estimation du paramètre C_c sont illustrés sur la Figure 2.43.

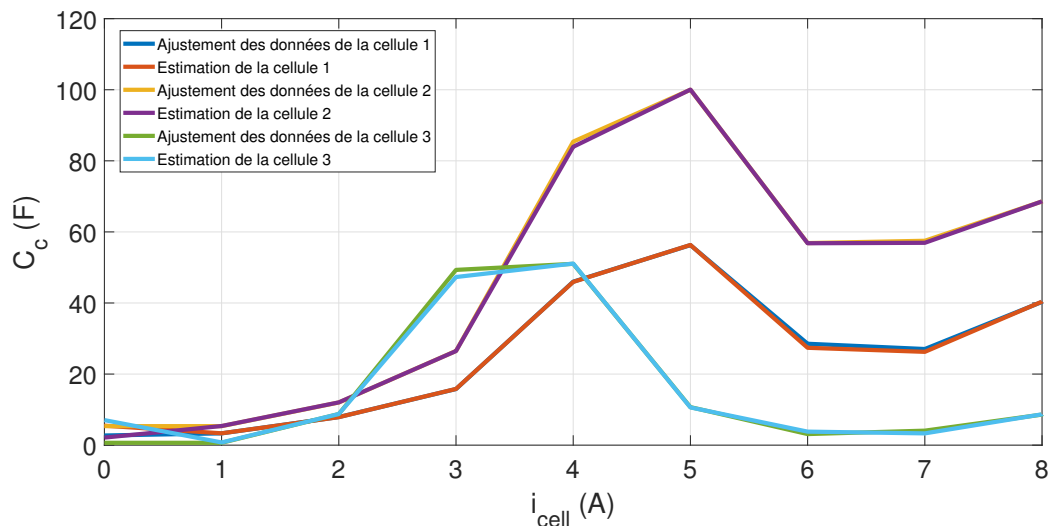


FIGURE 2.43 – Comportement et estimation du paramètre C_c .

Partant de cette étude, le modèle développé et ses paramètres ont été testé en utilisant les données expérimentales du courant puis les résultats ont été comparés avec les données réelles pour conclure sur l'efficacité du modèle développé (en se basant sur l'équation (2.26)). Les résultats de comparaison entre le modèle et les expérimentations sont donnés sur les Figures 2.44, 2.45, 2.46, 2.47, et 2.48.

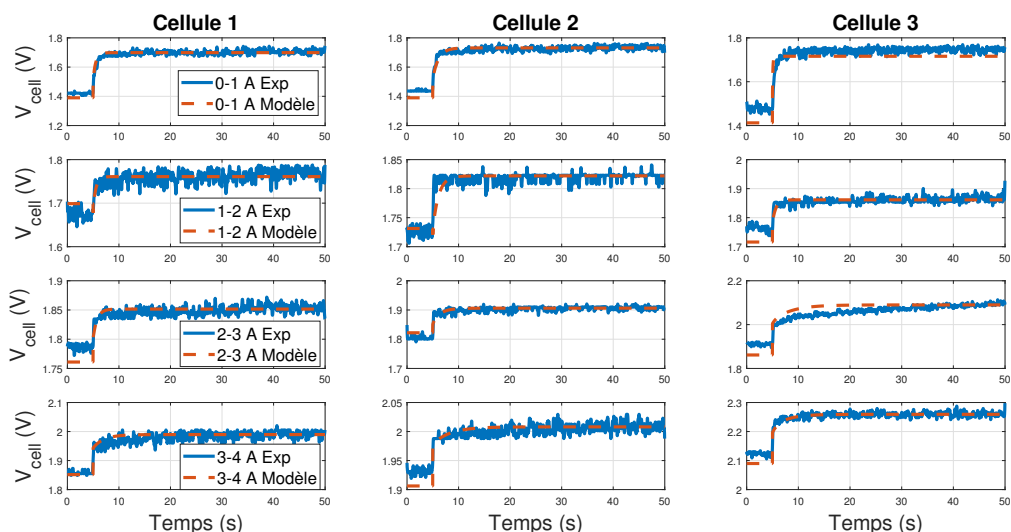


FIGURE 2.44 – Comparaison des tensions de cellule entre les expérimentations (ligne continue) et le modèle (ligne en pointillée) considérant une plage de courant de 0 à 4 A.

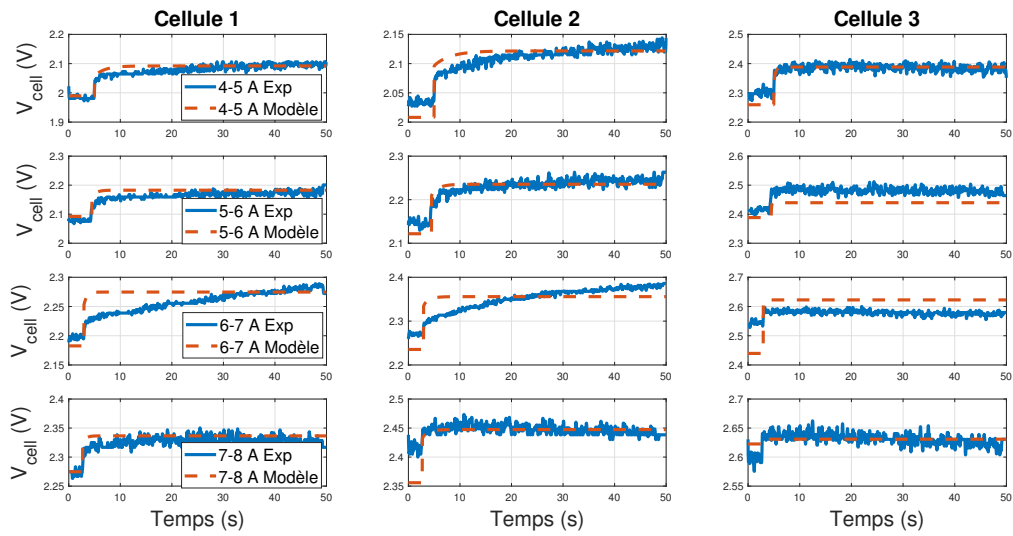


FIGURE 2.45 – Comparaison des tensions de cellule entre les expérimentations (ligne continue) et le modèle (ligne en pointillée) considérant une plage de courant de 4 à 8 A.

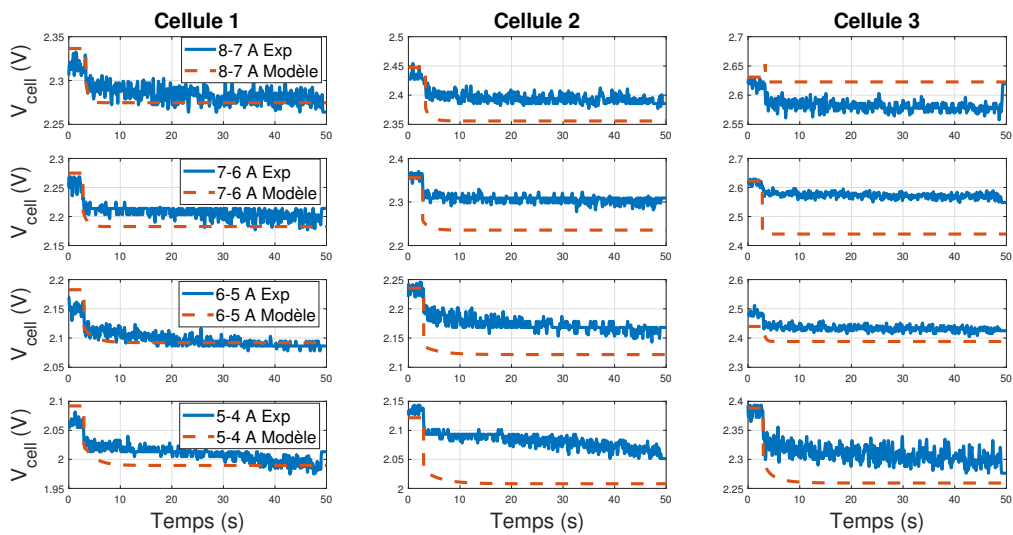


FIGURE 2.46 – Comparaison des tensions de cellule entre les expérimentations (ligne continue) et le modèle (ligne en pointillée) considérant une plage de courant de 8 à 4 A.

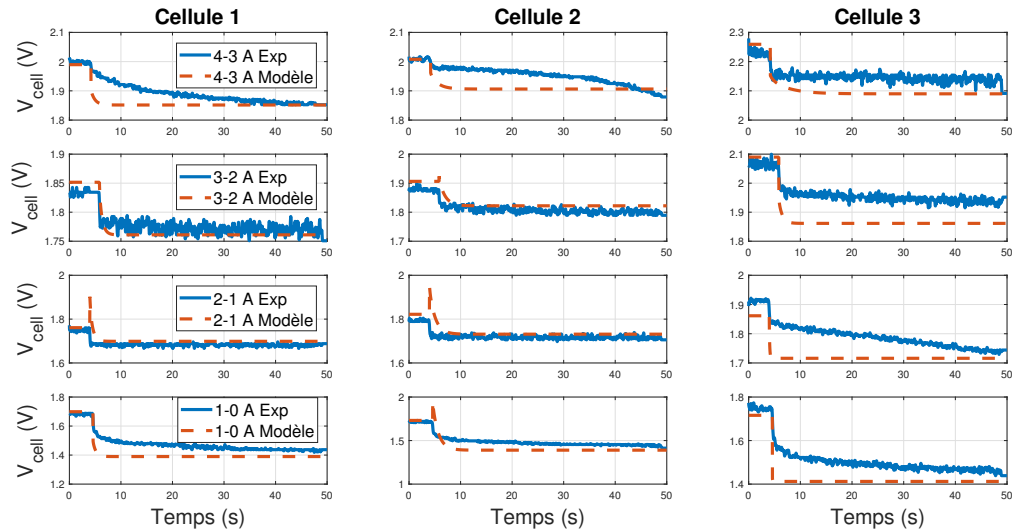


FIGURE 2.47 – Comparaison des tensions de cellule entre les expérimentations (ligne continue) et le modèle (ligne en pointillée) considérant une plage de courant de 4 à 0 A.

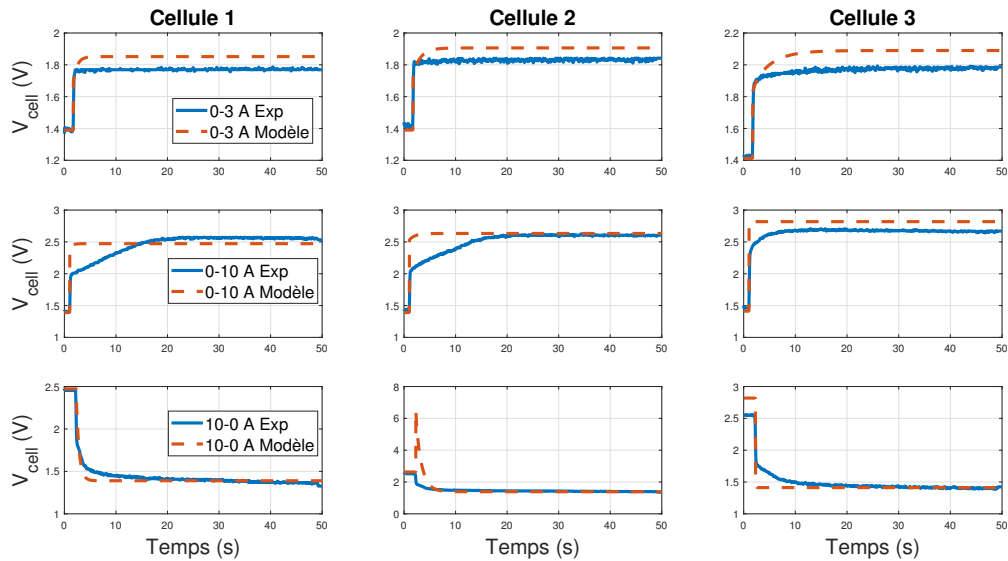


FIGURE 2.48 – Comparaison des tensions de cellule entre les expérimentations (ligne continue) et le modèle (ligne en pointillée) considérant une plage de courant de 0 à 3 A, 0 à 10 A, et 10 à 0 A.

En s'appuyant sur les résultats obtenus précédemment, les Tables 2.3, 2.4 et 2.5 synthétisent les performances du modèle pour chaque cellule en indiquant les erreurs relatives et moyennes pour chaque test. En se basant sur la Table 2.3 pour la première cellule, l'erreur moyenne maximale est égale à 0.12 V (5.37%) pour un échelon de courant de 0 à 10 A. Par comparaison, dans la Table 2.4 pour la deuxième cellule, l'erreur moyenne maximale est de 0.1 V (6.14%) pour le même échelon de courant. Enfin, dans la Table 2.5 pour la troisième cellule, l'erreur moyenne maximale est de 0.16 V (6.02%) pour le même échelon de courant. Pour les autres tests reportés (Figures 2.44, 2.45, 2.46, et 2.47), les erreurs relatives sont très petites (moins de 5 %). Comme pour les résultats de la précédente sous-section, les erreurs maximales sont obtenues pour des larges éche-

lons de courant (Figure 2.48) puisque les données expérimentales n'ont pas été exploitées pour déterminer les paramètres du modèle. En conséquence, la prédiction de la réponse de l'électrolyseur n'est pas optimale et quelques erreurs d'estimation peuvent être rencontrées. Pour conclure, la modélisation de chaque cellule de l'électrolyseur apporte une réelle contribution comparée aux modèles existants dans la littérature. En effet, ces travaux permettent de prendre en considération d'éventuelles dégradations pouvant survenir pendant le fonctionnement de l'électrolyseur (solicitations dynamiques, ondulations de courant basse et haute fréquence). Par ailleurs, les résultats obtenus permettent de valider la fiabilité du modèle à prédire le comportement réel de l'électrolyseur suivant le point de fonctionnement.

Basé sur ce travail préliminaire, il serait intéressant de prendre en compte d'autres paramètres de fonctionnement clés comme la température. En effet, la température a une forte influence sur les performances de l'électrolyseur, affectant en même temps la tension réversible, les surtensions d'activations et ohmiques [TBB18]. Plus haute est la température, plus faibles sont la tension réversible et les autres surtensions. De là, un meilleur rendement peut être obtenu. D'un point de vue des dynamiques, la montée en température affecte les surtensions d'activation conduisant à des cinétiques chimiques plus rapides. En résumé, dans le cadre de ces travaux, un changement de la température de fonctionnement affecterait les modèles développés comme seul le courant a été pris en considération. En conséquence, l'évaluation des différents paramètres du modèle basée sur la température permettrait d'améliorer sa fiabilité à reproduire les réponses réelles en tension des cellules d'électrolyseur. Ces nouveaux travaux sont en cours de développement avec l'équipe du LERMAB de l'IUT de Longwy par l'intermédiaire d'encadrements de stages Master (discutés dans le chapitre 1) et des chercheurs mexicains du CICY.

TABLE 2.3 – Synthèse des performances du modèle pour la cellule 1.

| Courant | t_c | E_r | E_m | Simulation |
|----------|--------|-------|--------|-------------|
| 0 à 1 A | 5 s | 1.94% | 0.03 V | Figure 2.44 |
| 1 à 2 A | 5 s | 1.83% | 0.03 V | |
| 2 à 3 A | 5 s | 1.00% | 0.02 V | |
| 3 à 4 A | 5 s | 1.36% | 0.03 V | |
| 4 à 5 A | 5 s | 0.96% | 0.02 V | Figure 2.45 |
| 5 à 6 A | 4.5 s | 1.06% | 0.02 V | |
| 6 à 7 A | 2.93 s | 0.80% | 0.02 V | |
| 7 à 8 A | 2.68 s | 0.84% | 0.02 V | |
| 8 à 7 A | 3.32 s | 0.89% | 0.02 V | Figure 2.46 |
| 7 à 6 A | 2.77 s | 1.33% | 0.03 V | |
| 6 à 5 A | 2.96 s | 0.66% | 0.01 V | |
| 5 à 4 A | 2.94 s | 1.20% | 0.02 V | |
| 4 à 3 A | 4.2 s | 1.62% | 0.03 V | Figure 2.47 |
| 3 à 2 A | 5.85 s | 1.17% | 0.02 V | |
| 2 à 1 A | 3.97 s | 1.11% | 0.02 V | |
| 1 à 0 A | 4.59 s | 4.38% | 0.07 V | |
| 0 à 3 A | 1.75 s | 4.39% | 0.08 V | Figure 2.48 |
| 0 à 10 A | 1.05 s | 5.37% | 0.12 V | |
| 10 à 0 A | 2.3 s | 2.67% | 0.04 V | |

TABLE 2.4 – Synthèse des performances du modèle pour la cellule 2.

| Courant | t_c | E_r | E_m | Simulation |
|----------|--------|-------|--------|-------------|
| 0 à 1 A | 5 s | 2.21% | 0.03 V | Figure 2.44 |
| 1 à 2 A | 5 s | 0.48% | 0.01 V | |
| 2 à 3 A | 5 s | 0.62% | 0.01 V | |
| 3 à 4 A | 5 s | 1.00% | 0.02 V | |
| 4 à 5 A | 5 s | 0.72% | 0.02 V | Figure 2.45 |
| 5 à 6 A | 4.5 s | 0.86% | 0.02 V | |
| 6 à 7 A | 2.93 s | 0.88% | 0.02 V | |
| 7 à 8 A | 2.68 s | 0.68% | 0.02 V | |
| 8 à 7 A | 3.32 s | 2.08% | 0.04 V | Figure 2.46 |
| 7 à 6 A | 2.77 s | 1.41% | 0.03 V | |
| 6 à 5 A | 2.96 s | 1.59% | 0.03 V | |
| 5 à 4 A | 2.94 s | 4.85% | 0.07 V | |
| 4 à 3 A | 4.2 s | 1.52% | 0.04 V | Figure 2.47 |
| 3 à 2 A | 5.85 s | 2.91% | 0.07 V | |
| 2 à 1 A | 3.97 s | 2.23% | 0.05 V | |
| 1 à 0 A | 4.59 s | 1.20% | 0.02 V | |
| 0 à 3 A | 1.75 s | 3.95% | 0.07 V | Figure 2.48 |
| 0 à 10 A | 1.05 s | 4.77% | 0.11 V | |
| 10 à 0 A | 2.3 s | 6.14% | 0.1 V | |

TABLE 2.5 – Synthèse des performances du modèle pour la cellule 3.

| Courant | t_c | E_r | E_m | Simulation |
|----------|--------|-------|--------|-------------|
| 0 à 1 A | 5 s | 2.57% | 0.04 V | Figure 2.44 |
| 1 à 2 A | 5 s | 1.03% | 0.02 V | |
| 2 à 3 A | 5 s | 1.23% | 0.03 V | |
| 3 à 4 A | 5 s | 0.69% | 0.02 V | |
| 4 à 5 A | 5 s | 1.14% | 0.03 V | Figure 2.45 |
| 5 à 6 A | 4.5 s | 1.66% | 0.04 V | |
| 6 à 7 A | 2.93 s | 1.84% | 0.05 V | |
| 7 à 8 A | 2.68 s | 0.37% | 0.01 V | |
| 8 à 7 A | 3.32 s | 2.32% | 0.05 V | Figure 2.46 |
| 7 à 6 A | 2.77 s | 4.11% | 0.08 V | |
| 6 à 5 A | 2.96 s | 3.64% | 0.07 V | |
| 5 à 4 A | 2.94 s | 4.89% | 0.07 V | |
| 4 à 3 A | 4.2 s | 1.54% | 0.04 V | Figure 2.47 |
| 3 à 2 A | 5.85 s | 4.9% | 0.13 V | |
| 2 à 1 A | 3.97 s | 1.81% | 0.04 V | |
| 1 à 0 A | 4.59 s | 1.97% | 0.05 V | |
| 0 à 3 A | 1.75 s | 5.3% | 0.1 V | Figure 2.48 |
| 0 à 10 A | 1.05 s | 6.02% | 0.16 V | |
| 10 à 0 A | 2.3 s | 3.42% | 0.06 V | |

2.3 Conception et développement d'un émulateur d'électrolyseur PEM

En continuité de ces travaux sur la modélisation de l'électrolyseur, cette section présente les travaux effectués sur le développement d'un émulateur *physique* d'électrolyseur PEM. Le développement de cet émulateur est motivé par plusieurs aspects. Le premier concerne le coût des électrolyseurs PEM comme souligné dans l'introduction de ce chapitre dû à l'utilisation de matériaux onéreux (iridium, platine) à l'anode et à la cathode. Cela représente un frein en particulier pour le test de nouvelles architectures de conversion d'énergie et de leurs commandes. Le deuxième se base sur la littérature scientifique actuelle. En effet, il apparaît clairement que cette thématique est très peu étudiée dans la littérature comme en témoignent ces rares publications [RKS⁺18, ZF09]. A titre de comparaison, le développement d'émulateurs de pile à combustible PEM a reçu plus d'attention de la part de la communauté scientifique ces dernières années comme le confirment ces nombreuses publications [GBSM11, GVRGVHMS20, MPV⁺09, RKB⁺11, SAY10]. Ces émulateurs de pile à combustible sont utiles pour évaluer les performances de convertisseurs DC-DC incluant leurs contrôles et également des stratégies de gestion d'énergie dans les micro-réseaux.

Dans les précédentes publications reportées pour les émulateurs d'électrolyseur PEM [RKS⁺18, ZF09], ces derniers sont basés essentiellement sur de l'électronique de puissance. La principale différence entre ces deux contributions est l'utilisation du convertisseur DC-DC (soit buck [RKS⁺18] ou boost [ZF09]). Il est important de souligner que ces émulateurs ne prennent en considération

que les fonctionnements statiques ; alors que les fonctionnements dynamiques sont cruciaux en considérant un couplage aux sources d'énergies renouvelables [GV19a, GSV20]. En outre, ces émulateurs comprennent à la fois le convertisseur DC-DC et son contrôle, exigeant par conséquent l'utilisation de plusieurs composants et appareils pour permettre leurs fonctionnements. De là, le coût de l'émulateur est fortement affecté.

Partant de ces observations, un émulateur *physique* d'électrolyseur PEM a été conçu et réalisé et est basé sur un circuit électrique équivalent (Figure 2.6) proposé dans un précédent travail de recherche [GV19a]. Les avantages de cet émulateur sont résumés ci-dessous [YGH⁺21] :

- réduction du nombre de composants et d'appareils ;
- faible coût (environ 200 €) ;
- prise en compte des fonctionnements statiques et dynamiques ;
- absence de signaux parasites hautes-fréquences (pouvant apparaître avec l'utilisation d'électronique de puissance) ;
- considérant que l'émulateur est alimenté par un convertisseur de puissance, les interférences mutuelles peuvent être évitées avec la production de sous-harmoniques qui ne sont pas présents dans le système réel.

Pour la conception et la réalisation de l'émulateur, les informations complètes sont reportées dans l'article [YGH⁺21] dans le cadre de la thèse de Burin YODWONG (présentée dans le chapitre 1). Par la suite, un résumé est fourni pour la réalisation de l'émulateur. La tension réversible V_{int} est obtenue par l'utilisation d'un générateur de tension qui a été dimensionné et conçu pour obtenir une valeur proche de celle désirée. Le principe du générateur de tension est illustré sur la Figure 2.49. Il est composé d'un MOSFET de puissance IRFP064, d'une diode basée sur du silicium 1N4148, et d'une résistance connectée entre le drain et la grille du MOSFET. Enfin, pour réguler la tension V_{int} lors de la variation du courant, un régulateur de tension linéaire LM317 a été employé. La résistance R_{int} a été réalisée par la mise en parallèle de trois résistances de 0.27Ω . Les résistances R_2 et R_1 ont été réalisées respectivement par la mise en parallèle de trois résistances de 1Ω et de 0.1Ω . Pour les capacités double-couche, des supercondensateurs ont été utilisés en raison de la valeur élevée de la capacité (environ $37 F$). Même si les capacités sont de même valeur à l'anode et la cathode, la configuration (série ou parallèle) des supercondensateurs dépend du potentiel à l'anode et à la cathode. En effet, puisque le potentiel à l'anode est plus important, trois supercondensateurs de $100 F$ ont été connectés en série. Pour l'équilibrage des tensions de chaque supercondensateur, une résistance a été connectée en parallèle à chaque supercondensateur. Par comparaison, pour la cathode qui présente un potentiel plus faible, un supercondensateur de $3.3 F$ et un supercondensateur de $30 F$ ont été connectés en parallèle. Enfin, deux ventilateurs ont été ajoutés à l'émulateur pour refroidir le dissipateur (utilisé pour dissiper la chaleur émises par les différentes résistances composant l'émulateur).

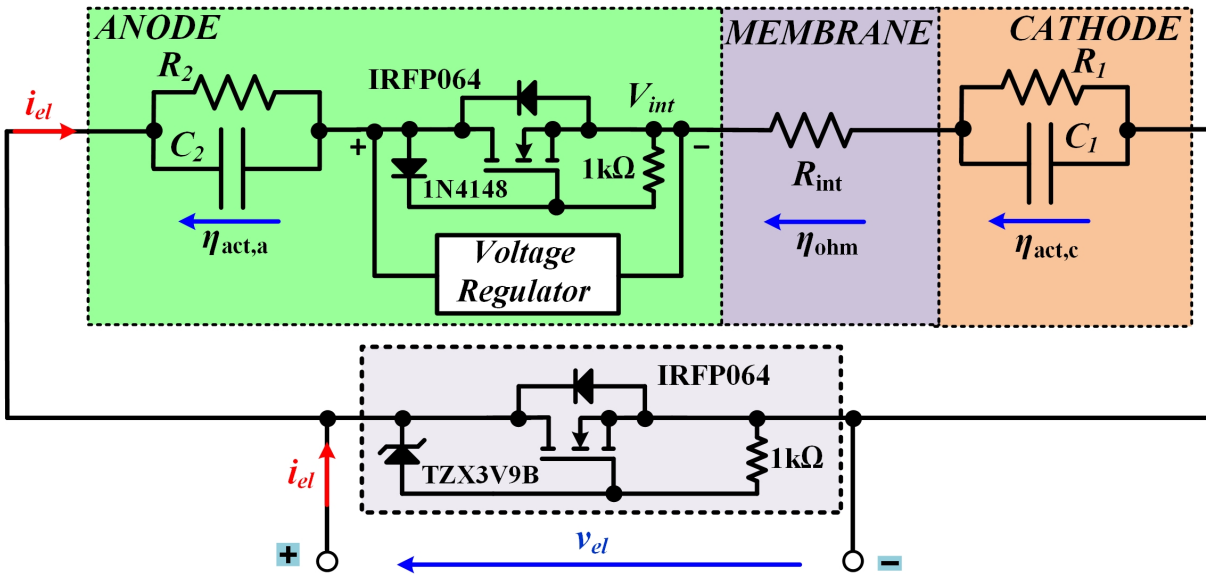


FIGURE 2.49 – Principe du générateur de tension et de la saturation de la tension de l'électrolyseur.

Dans la Table 2.6, la comparaison entre les valeurs estimées et réelles de l'émulateur est fournie. Il peut être noté que les valeurs réelles de l'émulateur sont proches des valeurs estimées. Cependant, les légères différences peuvent conduire à des erreurs dans les résultats obtenus avec l'émulateur.

TABLE 2.6 – Comparaison entre les valeurs estimées et réelles de l'émulateur.

| Paramètres | Valeurs estimées | Valeurs réelles | Erreur |
|------------|------------------|-----------------|----------------|
| R_{int} | 0.088 Ω | 0.09 Ω | 0.002 Ω |
| R_2 | 0.318 Ω | 0.333 Ω | 0.015 Ω |
| R_1 | 0.035 Ω | 0.033 Ω | 0.002 Ω |
| C_2 | 37.26 F | 33.33 F | 3.93 F |
| C_1 | 37.26 F | 33.30 F | 3.96 F |

L'émulateur développé et réalisé est montré respectivement sur les Figures 2.50 (vue de dessus) et 2.51 (vue de côté faisant clairement apparaître les supercondensateurs).

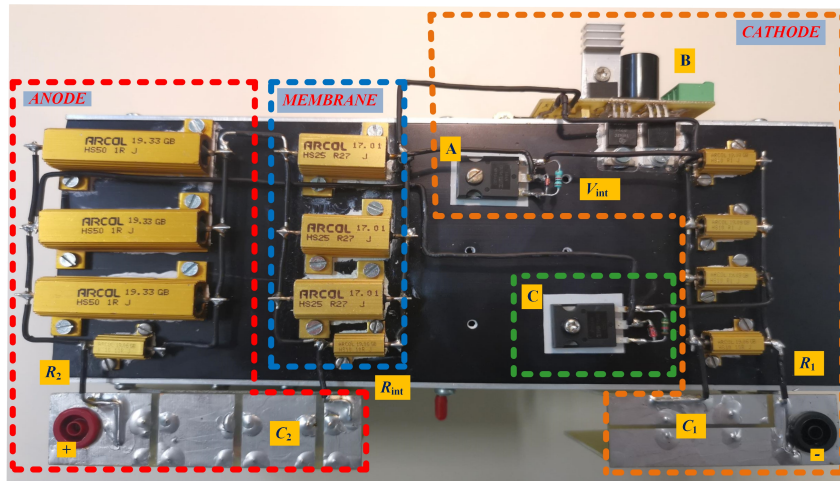


FIGURE 2.50 – Vue de dessus de l'émulateur.

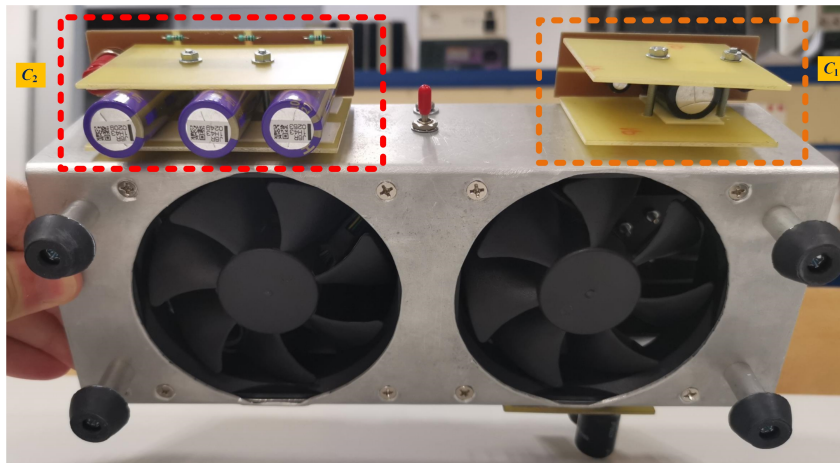


FIGURE 2.51 – Vue de côté de l'émulateur faisant apparaître les supercondensateurs.

Le circuit électronique pour générer la tension réversible V_{int} est visible sur la Figure 2.50 (voir B); tandis que le MOSFET de puissance et la diode en silicium qui complètent le circuit sont visibles sur la même figure (voir A). Par ailleurs, comme il a été souligné auparavant (voir Figure 2.15 et l'analyse fournie), la tension du stack de l'électrolyseur reste constante au-delà d'un courant de 7 A. Ce phénomène a été pris en considération en concevant l'émulateur. Pour reproduire ce phénomène, un circuit a été réalisé comprenant une diode zener et un MOSFET de puissance IRFP064 représentés sur la Figure 2.49 et visibles sur la Figure 2.50 (voir C). Le fonctionnement du circuit est détaillé dans [YGH⁺21] et le circuit n'a pas besoin d'une activation externe puisque son fonctionnement démarre lorsque la tension de l'émulateur se rapproche de 8 V, permettant de garantir une tension constante malgré l'augmentation du courant. Par contre, lorsque la tension est inférieure à cette tension, ce circuit ne perturbe pas le fonctionnement de l'émulateur, qui délivre une tension correspondante au courant fourni. Il est important de souligner que cet émulateur peut être adapté à d'autres électrolyseurs (par exemple alcalin) à des puissances différentes, qui le rend très intéressant d'un point de vue pratique pour tester de nouvelles architectures de conversion d'énergie.

Comme il a été mis en valeur dans la Table 2.6, les composants adoptés (disponibles sur le marché) pour développer l'émulateur montrent des légères différences par rapport aux vrais

valeurs. C'est pourquoi, l'erreur est analysée théoriquement en considérant les pertes de puissances en fonction des paramètres de l'électrolyseur. Le but de l'émulateur est de reproduire (a) les pertes au sein de l'électrolyseur, (b) la quantité d'hydrogène produit, et (c) les cinétiques chimiques pendant les variations de courant rapides. Les premières deux contraintes sont liées au comportement en régime permanent ; tandis que la troisième contrainte aux dynamiques de l'émulateur. En conditions statiques, les effets des deux capacités peuvent être négligés, les pertes joule P_j s'expriment par conséquent comme suit :

$$P_j = I_{el}^2(R_{int} + R_1 + R_2) \quad (2.31)$$

En admettant l'hypothèse que le courant n'est pas affecté par l'erreur étant donné que ce dernier est imposé par une source d'alimentation DC, l'erreur sur les pertes est donnée par :

$$\Delta P_j = I_{el}^2 \left[\left(\frac{\partial P_j}{\partial R_2} \right) \Delta R_2 + \left(\frac{\partial P_j}{\partial R_1} \right) \Delta R_1 + \left(\frac{\partial P_j}{\partial R_{int}} \right) \Delta R_{int} \right] = I_{el}^2 (\Delta R_2 + \Delta R_1 + \Delta R_{int}) \quad (2.32)$$

L'erreur dépend seulement des tolérances sur les résistances et peuvent être réduites en connectant en parallèle plus de résistances. En effet, en connectant n résistances en parallèle de même valeur, l'erreur est divisée par n . Dans notre cas d'étude, ces résistances ont été choisies avec une tolérance de $\Delta R = 5\%$. De plus, trois résistances en parallèle ont été adoptées pour l'anode, la cathode, et la membrane. L'erreur sur l'évaluation des pertes est donnée par :

$$\Delta P_j = \frac{I_{el}^2}{n} [\Delta R_2 + \Delta R_1 + \Delta R_{int}] = I_{el}^2 \Delta R \quad (2.33)$$

La puissance équivalente convertie en hydrogène est de :

$$P_{H_2} = V_{int} I_{el} \quad (2.34)$$

et l'erreur dépend de V_{int} :

$$\Delta P_{H_2} = I_{el} (\Delta V_{int}) \quad (2.35)$$

La tension V_{int} est assurée par le régulateur de tension LM317, qui se caractérise par une précision de régulation de la charge de 1.5%. Enfin, l'erreur sur les phases transitoires suite à des variations de courant dépend principalement du comportement à la cathode puisque la tension à l'anode reste constante au début du transitoire en raison de sa constante de temps élevée (d'une dizaine de secondes). Pour évaluer l'erreur pendant ces transitoires, le circuit électrique équivalent (Figure 2.6) est utilisé mais la branche RC à l'anode est remplacée par un générateur de tension (V_{anode}).

La tension après un échelon de courant s'exprime comme suit :

$$V_{el}(t) = V_{int} + V_{anode} + I_{el} \left[R_{int} + \left(1 - \exp \frac{-t}{R_1 C_1} \right) R_1 \right] \quad (2.36)$$

Immédiatement après la variation de courant (c'est à dire pour $t=0+$), l'erreur sur la tension dépend seulement de la résistance de la membrane :

$$V_{el} \Delta(t = 0+) = I_{el} \Delta R_{int} \quad (2.37)$$

De là, une faible erreur est attendue ; différemment durant la phase transitoire, la contribution de la cathode doit être prise en compte :

$$V_{el}(t > 0+) = I_{el} \left[\Delta R_{int} + \left| \frac{\partial V_{el}}{\partial R_1} \right| \Delta R_1 + \left| \frac{\partial V_{el}}{\partial C_1} \right| \Delta C_1 \right] \quad (2.38)$$

$$V_{el}(t > 0+) = I_{el} \left[\Delta R_{int} + \left| 1 - \left(1 + \frac{t}{R_1 C_1} \right) \exp \frac{-t}{R_1 C_1} \right| \Delta R_1 + \left| \frac{t}{C_1^2} \exp \frac{-t}{R_1 C_1} \right| \Delta C_1 \right] \quad (2.39)$$

Les deux coefficients multipliés par ΔR_1 et ΔC_1 sont montrés sur la Figure 2.52. Malgré le fait que le coefficient (en raison de la capacité) soit influencé par la haute tolérance du supercondensateur (80 % dans le cas le plus critique), il est plus faible que l'erreur de la résistance à la cathode. Une augmentation de l'erreur est attendue après 10 s une fois que l'échelon de courant se produit ; elle sera légèrement plus élevée par la non-linéarité du supercondensateur.

Après avoir conçu et réalisé l'émulateur, l'objectif à présent est d'évaluer les performances de l'émulateur en reproduisant le comportement statique-dynamique d'un électrolyseur PEM réel. De là, un banc de test a été réalisé au sein du laboratoire GREEN et est illustré sur la Figure 2.53. Le banc de test est composé des éléments suivants : (1) un PC avec un panneau de contrôle virtuel permettant de contrôler la source d'alimentation DC, (2) dSPACE control desk, (3) un oscilloscope 4 voies, (4) un système de prototypage rapide dSPACE DS1104, (5) une source d'alimentation DC, (6) une carte de mesure (tension, courant), (7) l'émulateur réalisé, (8) l'électrolyseur PEM réel, et (9) un transformateur 230 V/9 V 50 Hz. Les équations suivantes exprimant le débit d'hydrogène et le rendement de l'électrolyseur ont été implémentées dans le système dSPACE DS1104 via le logiciel Matlab/Simulink :

$$\dot{N}H_2 = \frac{\eta_F n_c i_{el}}{zF} (mol.s^{-1}) \quad (2.40)$$

$$\eta_{el} = \frac{\dot{N}H_2 \Delta H_2}{v_{el} i_{el}} \quad (2.41)$$

où η_F est le rendement de Faraday (ratio entre le volume d'hydrogène mesuré expérimentalement par le volume d'hydrogène théorique), n_c est le nombre de cellules (dans notre cas, $n_c = 3$), z est le nombre d'électrons échangés pendant la réaction (pour l'hydrogène, $z = 2$), F est la constante de Faraday ($F = 96485 C.mol^{-1}$), et enfin ΔH_2 est la capacité calorifique de l'hydrogène ($286 kJ.mol^{-1}$).

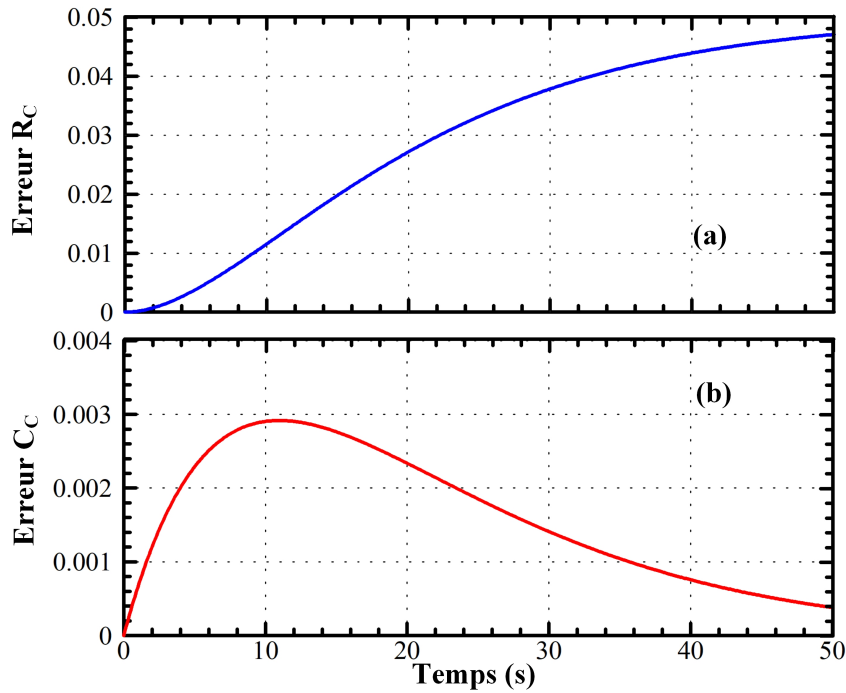


FIGURE 2.52 – (a) Erreur à la résistance de la cathode, (b) erreur à la capacité de la cathode.

Comme le rendement de Faraday est un paramètre clé dans les performances de l'électrolyseur, il a été étudié dans le cadre de la thèse de Burin YODWONG et les premiers travaux réalisés ont été valorisés dans une publication [YGP⁺20b]. Cette étude sera introduite dans le chapitre 3 concernant les perspectives de recherche.

Les équations (2.40) et (2.41) permettent d'obtenir en temps réel le débit d'hydrogène produit et le rendement via les mesures de courant i_{el} et de tension v_{el} . De la même manière, la puissance électrique est calculée via le produit entre i_{el} et v_{el} . La configuration du banc de test pour tester l'émulateur est illustré sur la Figure 2.54. L'émulateur est alimenté directement par la source d'alimentation DC (permettant de l'alimenter avec différents profils de courant) et le système de prototypage rapide dSPACE DS1104 permet de recueillir les mesures de courant et de tension de l'émulateur par l'utilisation d'une carte de mesure. Elles sont ensuite traitées par le logiciel Matlab/Simulink pour déterminer le débit d'hydrogène, le rendement et la puissance électrique. Les sorties du système de prototypage rapide dSPACE DS1104 permettent de visualiser à l'oscilloscope ces données. En outre, une interface réalisée sur le logiciel dSPACE control desk permet d'afficher les mesures et les données calculées.

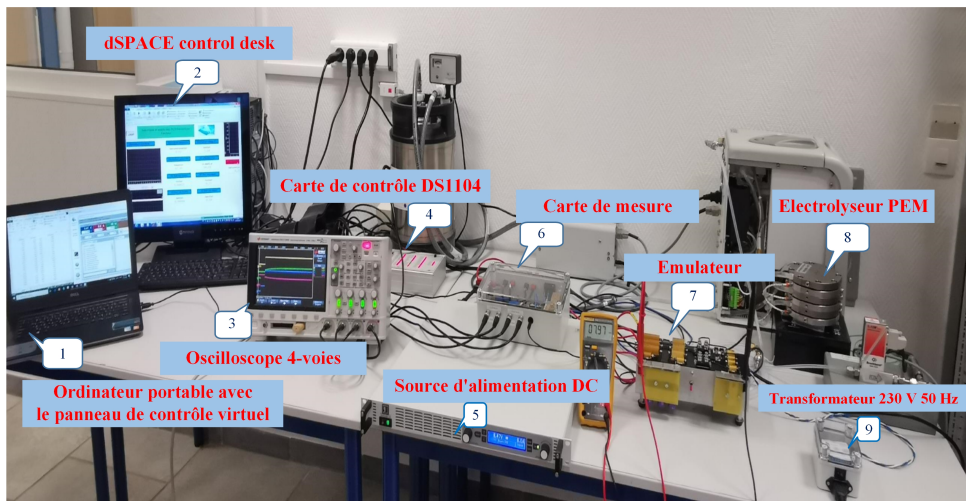


FIGURE 2.53 – Banc de test réalisé pour tester les performances de l'émulateur.

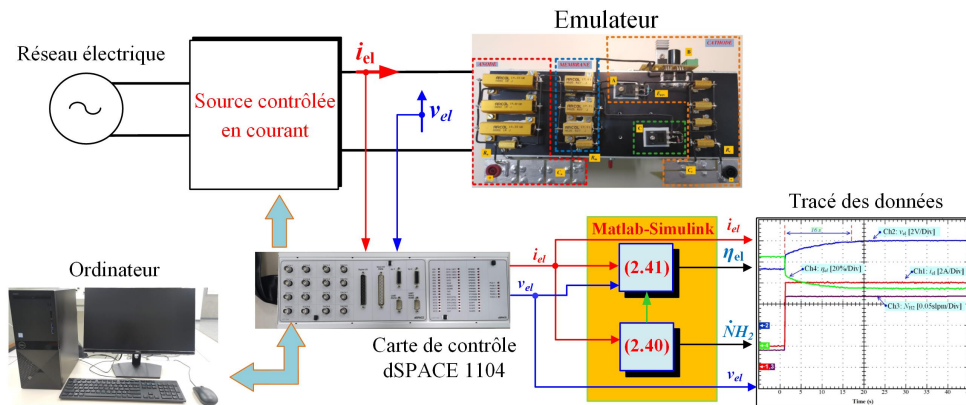


FIGURE 2.54 – Configuration du banc de test pour tester l'émulateur.

Dans un premier temps, des tests ont été réalisés pour analyser la réponse de l'émulateur suite à un échelon de courant de 2 à 8 A. Par ailleurs, le débit d'hydrogène (exprimé en litre/minute) et le rendement (exprimé en %) obtenus grâce aux mesures de courant et de tension ont été considérés. Ces résultats sont illustrés sur la Figure 2.55. Une échelle de temps de 5 s a été choisie pour souligner les dynamiques et le fonctionnement en régime permanent. Il peut être noté que la réponse en tension de l'émulateur s'approche de celle observée sur un électrolyseur réel. En outre, le régime permanent est atteint en 16 s avec une valeur de 8 V qui confirme le bon fonctionnement du circuit proposé de limitation de la tension de l'émulateur à partir d'un certain courant. En se basant sur les équations (2.40) et (2.41), lorsque le courant augmente, le débit d'hydrogène croît ; alors que le rendement diminue car il est inversement proportionnel à la tension, et donc le courant.

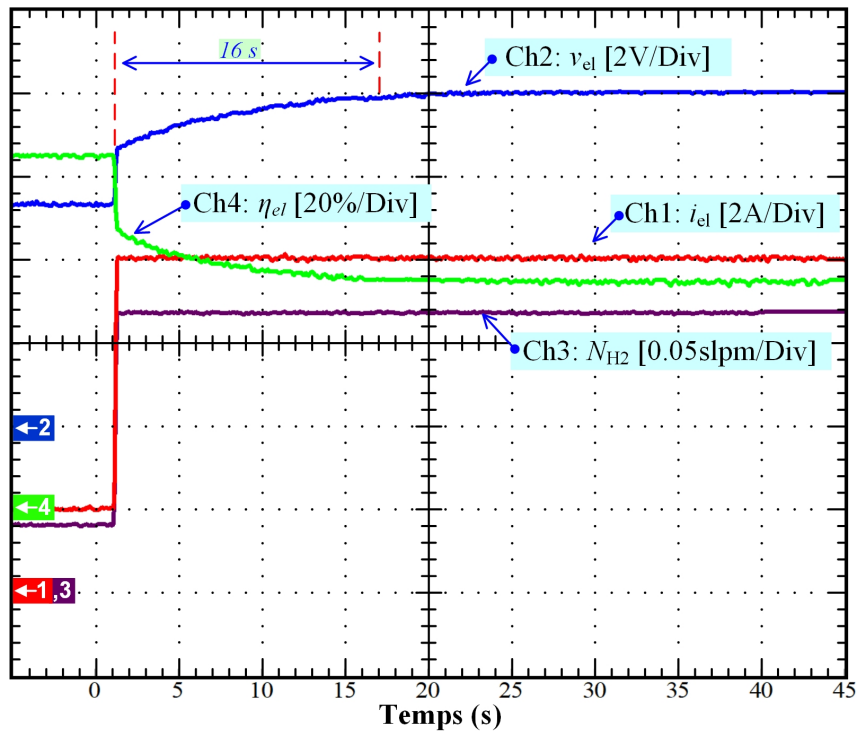


FIGURE 2.55 – Réponse de l’émulateur suite à un échelon de courant de 2 à 8 A.

Ensuite, la caractéristique statique obtenue soit avec l’émulateur ou l’électrolyseur réel a été comparée comme montrée sur la Figure 2.56. Il peut être observé que la caractéristique émulée est similaire à celle obtenue avec l’électrolyseur réel. D’ailleurs, à partir d’un courant de 7 A, la tension de l’émulateur est bien limitée à 8 V via le circuit présenté précédemment.

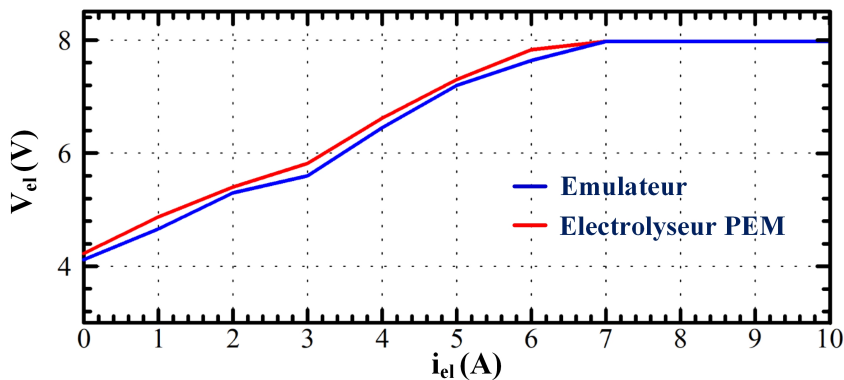


FIGURE 2.56 – Comparaison de la caractéristique statique obtenue avec l’émulateur et l’électrolyseur réel.

Enfin, la comparaison des performances dynamiques obtenues avec l’émulateur et l’électrolyseur réel est reportée sur les Figures 2.57 et 2.58. La comparaison se base sur un échelon de courant de 2 à 8 A et inverse. Pour les deux figures, l’erreur entre la réponse en tension de l’émulateur et de l’électrolyseur réel a été calculée et reportée pour évaluer l’efficacité de l’émulateur. Pour la Figure 2.57, l’erreur maximale de tension est inférieure à 0.8 V (environ 7.5 % de la valeur en régime permanent, 8 V). Les erreurs sont particulièrement visibles pendant les

phases transitoires. De l'autre côté, les valeurs de tension initiale et finale correspondent bien à l'électrolyseur réel.

Par comparaison, la tension obtenue avec l'émulateur pour un échelon de courant descendant (Figure 2.58 donne une bonne approximation de la tension obtenue avec l'électrolyseur réel. En effet, l'erreur maximale est inférieure à 0.5 V (environ 4 % de la tension en régime permanent, 8 V) et est visible en régime transitoire et permanent. Malgré les erreurs observables, l'émulateur permet de reproduire avec précision la réponse en tension d'un électrolyseur réel et le rend parfaitement adapté à son utilisation avec de l'électronique de puissance.

Comme attendu, l'erreur maximale se produit pendant les phases transitoires pour $t = 10\text{s}$ après l'échelon de courant. Ce résultat est cohérent avec l'hypothèse émise sur l'égalité des capacités et avec l'analyse théorique de l'erreur où les résultats sont visibles sur la Figure 2.52. Pour conclure sur l'efficacité de l'émulateur pour d'autres phases de fonctionnement, l'erreur maximale en % a été calculée. En outre, l'écart quadratique moyen bien connu sous le terme *root-mean-square deviation* normalisé comme n_{RMSD} (équation (2.42a)) et $CV(\text{RMSD})$ (équation (2.42b)) a été déterminé donnant une indication des différences entre les valeurs prédites par l'émulateur et les valeurs réelles de l'électrolyseur.

$$n_{\text{RMSD}} = \frac{1}{Y_{\max} - Y_{\min}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{N}} \quad (2.42a)$$

$$CV(\text{RMSD}) = \frac{1}{\bar{Y}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{N}} \quad (2.42b)$$

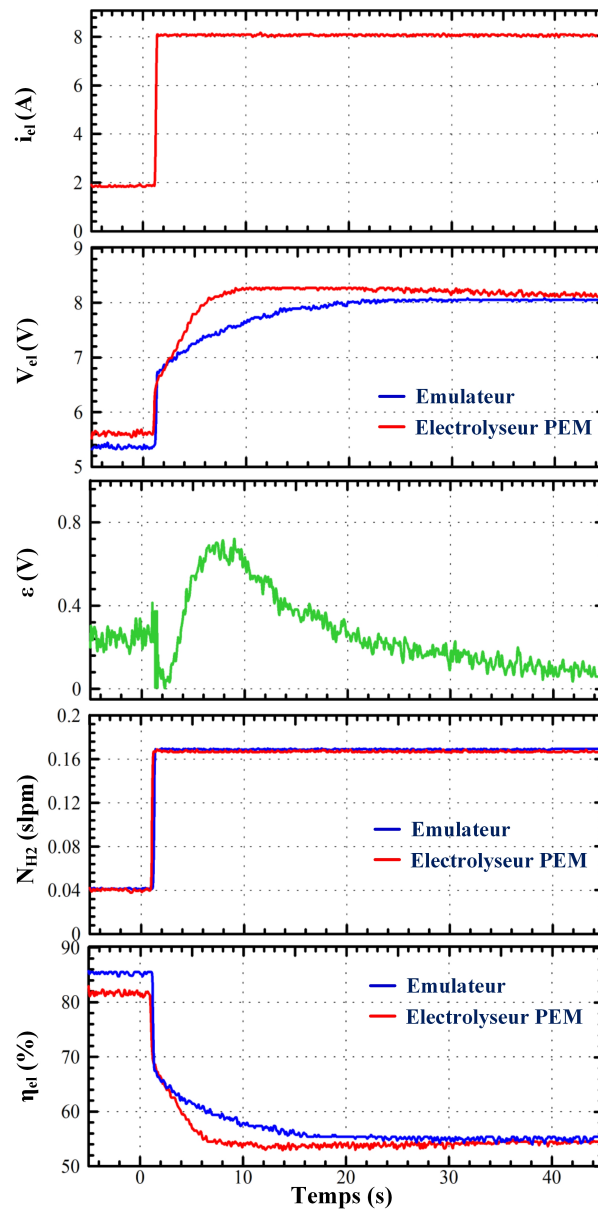


FIGURE 2.57 – Comparaison entre l’émulateur et l’électrolyseur réel pour un échelon de courant de 2 à 8 A.

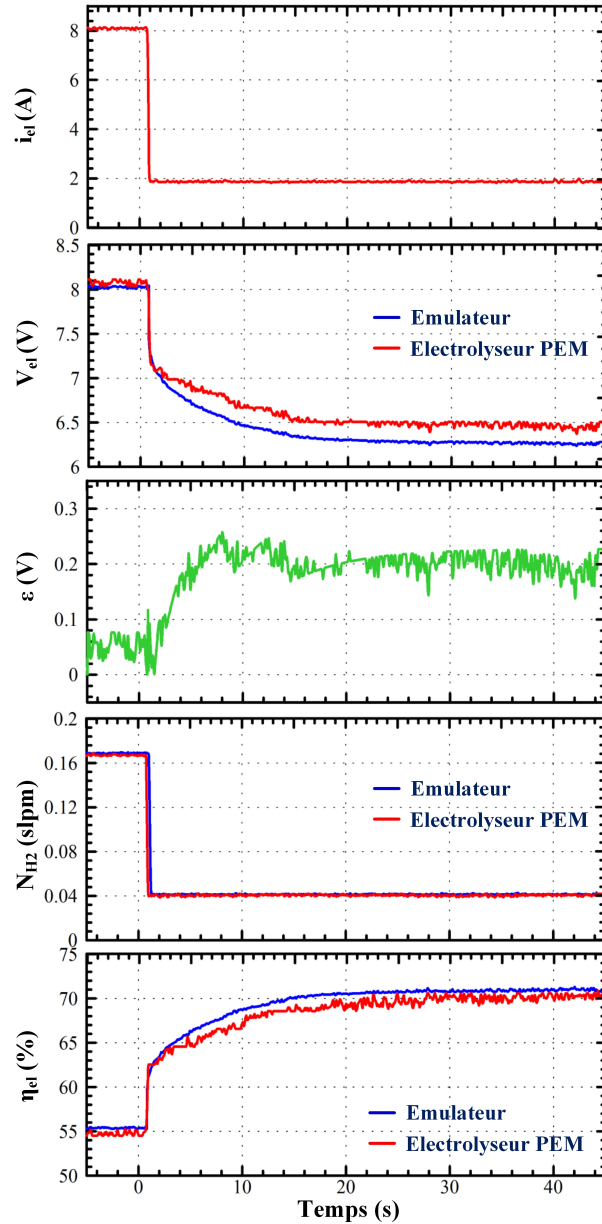


FIGURE 2.58 – Comparaison entre l'émulateur et l'électrolyseur réel pour un échelon de courant de 8 à 2 A.

Dans les équations (2.42a) et (2.42b), Y_i est la tension obtenue par l'émulateur, et \hat{Y}_i est la tension de l'électrolyseur réel. La comparaison entre les erreurs entre l'émulateur et l'électrolyseur réel est synthétisée dans la Table 2.7. Il peut être noté que l'erreur maximale est reportée pour le test de 2 à 8 A avec une valeur de 8.75 %; alors que pour les autres tests l'erreur est située entre 2.2 % et 4.3 %. Les variations du pourcentage d'erreur entre chaque test sont dues à la capacité équivalente fixe, impliquant une tendance différente, 10 s après l'application de l'échelon de courant. L'écart quadratique moyen n_{RMSD} et $CV(\text{RMSD})$ montre que les résultats les plus critiques sont obtenus pour un échelon de courant de 5 à 4 A; alors que pour les autres tests, des déviations mineures sont observées. Comme les valeurs choisies des composants pour réaliser l'émulateur sont optimisées, un bon compromis peut être obtenu et l'émulateur offre de meilleures performances contrairement à un modèle statique [GV19a].

TABLE 2.7 – Comparaison entre les erreurs de l’émulateur et de l’électrolyseur réel.

| Echelon de courant | Erreur maximale | n_{RMSD} | CV(RMSD) |
|--------------------|-----------------|-------------------|----------|
| de 2 à 8 A | 8.75 % | 0.1162 | 0.0451 |
| de 8 à 2 A | 3.125 % | 0.0948 | 0.0225 |
| de 3 à 4 A | 2.375 % | 0.2797 | 0.0204 |
| de 4 à 5 A | 3.625 % | 0.1830 | 0.0125 |
| de 5 à 6 A | 4.375 % | 0.2196 | 0.0141 |
| de 6 à 7 A | 2.867 % | 0.2268 | 0.0151 |
| de 7 à 6 A | 3.375 % | 0.1851 | 0.0113 |
| de 6 à 5 A | 2.212 % | 0.2017 | 0.0138 |
| de 5 à 4 A | 4.075 % | 0.4512 | 0.0331 |
| de 4 à 3 A | 3.125 % | 0.1861 | 0.0162 |

En conclusion, étant donné le coût onéreux d’un stack d’électrolyseur et pour éviter les dégradations sur ce dernier, cet émulateur pourrait être très utile pour tester de nouvelles architectures de convertisseurs DC-DC et les lois de contrôle associées. En effet, la conception et le contrôle des convertisseurs DC-DC sont actuellement des verrous techniques dans la diffusion des électrolyseurs PEM à grande échelle (discutés dans la dernière section de ce chapitre). L’approche proposée pour l’émulateur peut être adoptée à la fois pour émuler une cellule et le stack d’un électrolyseur. Premièrement, l’émulateur permet de représenter le comportement statique-dynamique de l’électrolyseur. Deuxièmement, le circuit auxiliaire connecté en parallèle du circuit électrique équivalent (voir Figure 2.49) peut être retiré en l’absence de saturation de la tension à partir d’une certaine valeur de courant.

2.4 Électronique de puissance et sa commande associées à l’électrolyseur PEM

Comme pour la modélisation dynamique et le développement d’émulateurs, l’électronique de puissance associée à l’électrolyseur représente également une problématique clé pour son développement. En effet, comme souligné dans un premier article traitant de l’état de l’art des convertisseurs DC-DC pour électrolyseurs [GCS17], ces derniers ont reçu moins d’attention de la communauté scientifique comparés aux convertisseurs DC-DC pour piles à combustible [KGD⁺15, WGH19]. Dépendant de la source d’énergie (éolienne, photovoltaïque, réseau électrique) et de la puissance du système, des convertisseurs AC-DC et/ou DC-DC peuvent être requis [YGP⁺20c]. En effet, les électrolyseurs alcalins et PEM nécessitent d’être alimentés avec des tensions DC (de quelques à des centaines de volt) et des courants DC (de dix à des milliers d’ampère) [CCBD22, YGP⁺20a]. En considérant une source d’énergie AC (éolienne, réseau électrique), l’utilisation d’un convertisseur AC-DC est obligatoire. Pour les applications haute puissance (rencontrées généralement pour les électrolyseurs alcalins connectés au réseau électrique [CCBD22, YGP⁺20a] d’une puissance supérieure à 1 MW), des redresseurs sont exigés, qui sont principalement basés sur deux familles : les redresseurs à thyristors et des redresseurs à diodes associés généralement avec un convertisseur DC-DC de type dévolteur (buck) [RPS⁺05, SFBW13].

Le développement de tels circuits a été rendu possible grâce à la disponibilité des composants de l'électronique de puissance fonctionnant à forte tension et fort courant comme les thyristors puis les IGBT. Comme souligné dans la littérature [KRK⁺19, SBB19], le redresseur triphasé à thyristors (bien connu sous le terme *6-pulse thyristor bridge rectifier*) et le redresseur hexaphasé à thyristors (bien connu sous le terme *12-pulse thyristor bridge rectifier*) sont généralement employés pour alimenter les électrolyseurs alcalins de forte puissance (exigeant des courants élevés) [CCBD22, YGP⁺20a]. Les deux architectures de conversion sont montrées respectivement sur les Figures 2.59 et 2.60.

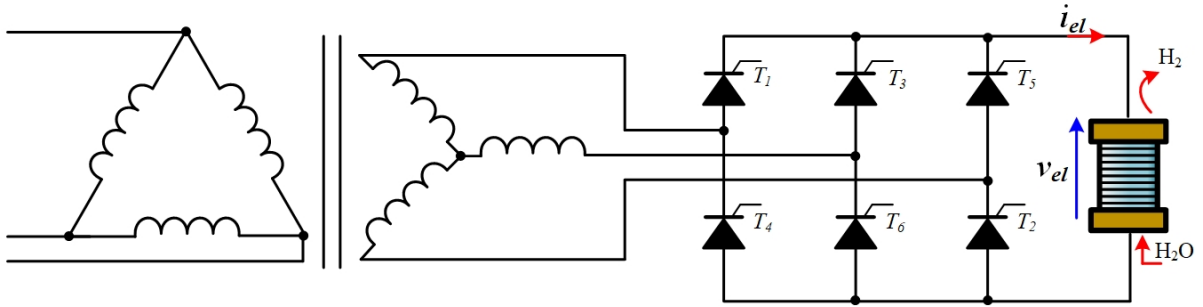


FIGURE 2.59 – Redresseur triphasé à thyristors.

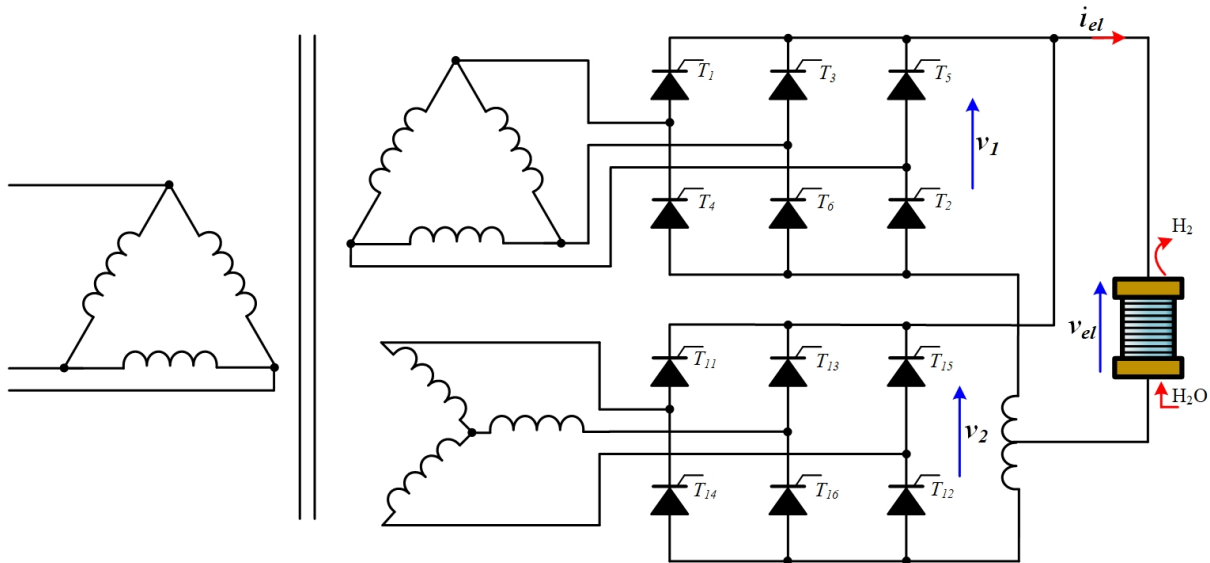


FIGURE 2.60 – Redresseur hexaphasé à thyristors.

Pour le redresseur triphasé à thyristors, malgré qu'il offre un haut rendement, il présente deux inconvénients principaux, à savoir la qualité de l'énergie et les ondulations de courant. En effet, la génération de puissance réactive est directement liée à l'angle d'amorçage des thyristors. En augmentant l'angle d'amorçage (permettant de contrôler la tension de l'électrolyseur, et donc du courant), le contenu harmonique se dégrade et conduisant à la réduction drastique du facteur de puissance du système. En se basant sur les travaux reportés dans [SBB19], cette topologie a un facteur d'ondulation élevé, entre 14 et 71%, dépendant fortement de la plage de charge. Dans [KPR⁺21, KRK⁺19, SBB19], les auteurs ont démontré que les ondulations de courant augmentent la consommation d'énergie spécifique (rapport entre l'énergie consommée et le volume d'hydrogène produit), signifiant qu'une quantité d'hydrogène moindre est produite pour une même quantité d'énergie consommée. Les ondulations de courant ont aussi une influence sur

la qualité de l'hydrogène produit [SBB19]. Pour améliorer la qualité de l'énergie et la réduction des ondulations de courant, différentes solutions sont discutées dans [YGP⁺20a]. Une des solutions consiste à utiliser un redresseur hexaphasé à thyristors. Les deux convertisseurs triphasés à thyristors peuvent être connectés soit en série ou bien en parallèle pour répondre aux besoins de l'électrolyseur en courant et en tension. En s'appuyant sur les travaux reportés dans [SBB19], le facteur d'ondulation est beaucoup plus faible, et est compris entre 3.2 et 4.8% dépendant de la plage de charge. Ainsi, la consommation d'énergie spécifique est plus faible et la qualité de l'hydrogène produit est meilleure. Toutefois, il est important de souligner que malgré cette diminution, la consommation d'énergie spécifique reste toujours supérieure à celle obtenue avec un courant purement continu.

Dans le cadre de cette HDR, l'étude est portée sur l'électronique de puissance associée à un électrolyseur PEM de basse puissance (environ 400 W). Elle concerne particulièrement les travaux de Vittorio GUIDA, de Burin YODWONG (thèses présentées dans le chapitre 1) mais également de travaux personnels en collaboration avec l'Université de Palerme et le CNR Italien. Pour les applications basse puissance, les redresseurs triphasés à diodes couplés à des convertisseurs DC-DC sont les plus appropriés. Cette configuration permet d'améliorer la qualité de l'énergie et de réduire l'ondulation de courant, même si cette dernière problématique est toujours d'actualité [BGM⁺21, KRK⁺19, YGP⁺20a]. Comme indiqué dans cette synthèse des convertisseurs DC-DC pour électrolyseurs [GCS17], les convertisseurs DC-DC généralement utilisés sont le buck [cIOA14, ZF09] et les topologies isolées (half-bridge, full-bridge, push-pull, multi-résonnant) [BA12, GBC⁺10, CGV⁺19, VCG21, ZVB19]. Plus récemment, des convertisseurs DC-DC entrelacés [GGD19] et DCX [CRH⁺21], ainsi que des redresseurs triphasés de type buck [CAP⁺22, YGP⁺20a] ont été proposés pour interfacer les électrolyseurs PEM, permettant d'apporter de nouvelles contributions dans cette thématique. Comme pour les piles à combustible, les convertisseurs DC-DC pour électrolyseurs doivent répondre à de nombreuses problématiques dont une synthèse est donnée ci-dessous [GCS17] :

- Haut rendement.
- Faible coût.
- Faibles interférences électromagnétiques.
- Faible gain de conversion en tension.
- Ondulations de courant réduites pour optimiser la durée de vie de l'électrolyseur tout en réduisant la consommation d'énergie spécifique.
- Haute fiabilité pour assurer une continuité de service en cas de défauts électriques.

Pour répondre en partie à ces problématiques, l'intérêt des activités de recherche en électronique de puissance pour électrolyseurs s'est porté sur les convertisseurs DC-DC entrelacés [GCS17, GGD19]. En particulier, deux topologies ont été étudiées : la topologie entrelacée dite *Stacked Interleaved Buck converter (SIBC)* et la topologie entrelacée buck trois niveaux, bien connue sous le terme *three-level interleaved buck converter*.

La première topologie étudiée (SIBC) est représentée sur la Figure 2.61. Cette topologie a été introduite pour la première fois dans [WH08] puis étudiée pour les applications électrolyseur PEM dans [GGVD20, GSV20]. Contrairement à une topologie entrelacée classique [GGVD20], un condensateur supplémentaire C_s est utilisé entre la première et la deuxième phase pour bloquer la composante continue du courant circulant à travers la seconde phase. Dans ce cas, seule la composante AC du courant circule à travers la seconde phase. Les couples d'interrupteurs (S_1 et S_4 , S_2 et S_3) sont pilotés en opposition (au lieu de 180° pour une topologie entrelacée classique à deux phases). De là, les composantes alternatives du courant dans chaque phase s'annulent,

et seul le courant continu traverse l'électrolyseur quelque soit le point de fonctionnement (indépendamment de la valeur du rapport cyclique). Comme souligné auparavant, un électrolyseur traversé par un courant purement continu permettra d'accroître sa fiabilité et de diminuer sa consommation d'énergie spécifique [BGM⁺21, DABP17, KPR⁺21]. Le chronogramme de fonctionnement du SIBC est donné sur la Figure 2.62.

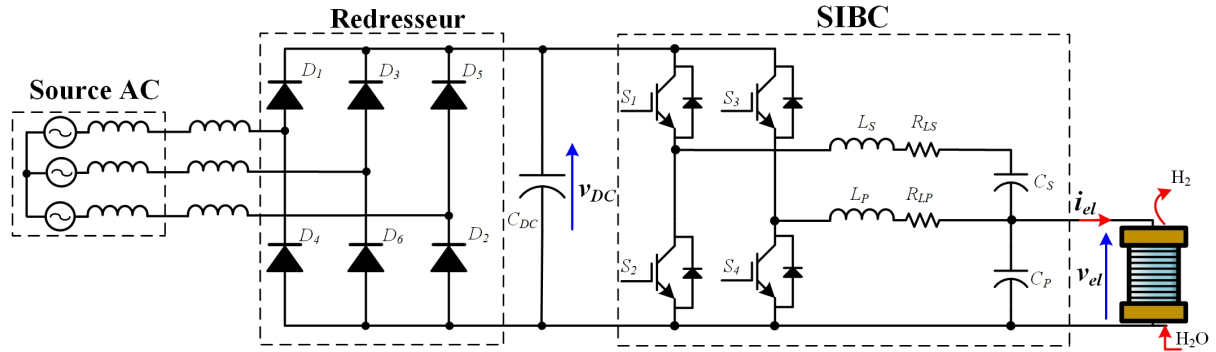


FIGURE 2.61 – Redresseur triphasé à diodes connecté au SIBC.

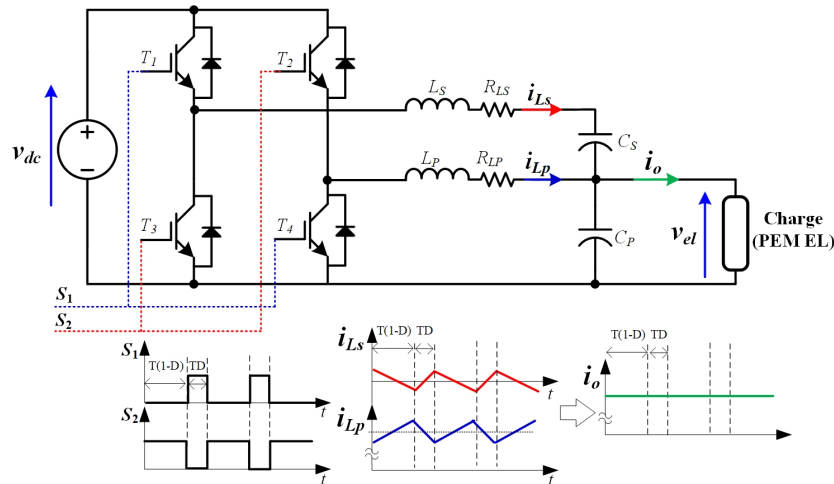


FIGURE 2.62 – SIBC et son chronogramme de fonctionnement.

Sur l'aspect énergétique, les diodes sont remplacées par des interrupteurs de puissance, MOSFET (approprié pour les basses puissances) ou IGBT pour la montée en puissance. En effet, en utilisant des interrupteurs de puissance au lieu des diodes, des points de rendement peuvent être gagnés en raison de pertes par conduction plus faibles (dûes à une résistance plus faible). Enfin, sur l'aspect fiabilité, en cas de défaut sur le bras de compensation (L_s et C_s), le convertisseur continue de fonctionner comme un convertisseur buck, mais avec une ondulation de courant plus élevée. Dans la Figure 2.62, la charge du SIBC est représentée par un simple dipôle. Comme souligné dans [YGP⁺20c] traitant de la modélisation des électrolyseurs pour des objectifs de contrôle, un modèle résistif ou statique (association d'une résistance équivalente et d'une source de tension) est généralement employé pour décrire le comportement de l'électrolyseur en fonction du courant. Bien que ce soit une bonne modélisation pour un grand nombre d'applications ; dans le cas des électrolyseurs PEM couplés à des sources d'énergie renouvelables, le comportement de l'électrolyseur ne peut pas être approximé par un simple modèle comme il a été souligné dans [GV19a]. En effet, compte tenu des brusques variations des conditions de fonctionnement pour

ces sources, le comportement dynamique de l'électrolyseur PEM doit être pris en considération et analysé pour des objectifs de contrôle [GSV20, MGZR21].

Pour apporter une nouvelle contribution à l'existant [YGP⁺20c], le modèle adopté pour l'électrolyseur PEM est représenté sur la Figure 2.63. Ce modèle est simplifié comparé au modèle équivalent proposé dans [GV19a] (Figure 2.6). En effet, seule la branche RC lente a été considérée car les cinétiques chimiques de l'électrolyseur sont principalement gouvernées par les réactions à l'anode et de ce fait, les cinétiques chimiques à la cathode peuvent être négligées.

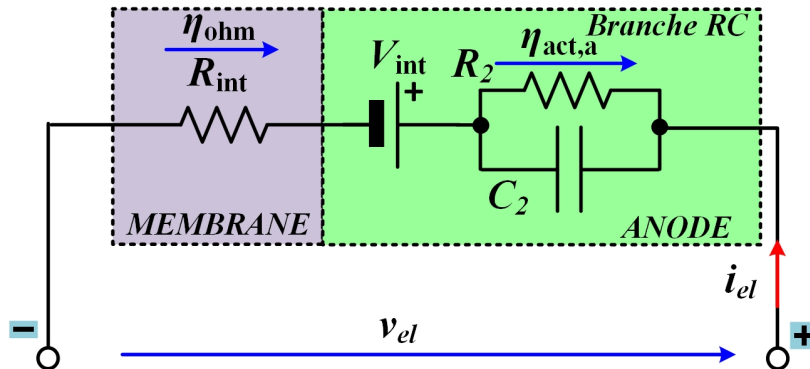


FIGURE 2.63 – Modèle simplifié considéré d'un électrolyseur PEM.

Ce modèle a été considéré dans des travaux de recherche reportés dans [GGVD20, GSV20, MGZR21] pour développer des lois de contrôle. Dans [GSV20], le contrôle de la tension de l'électrolyseur est étudié via l'utilisation d'un correcteur proportionnel intégral (PI) associé à une action anticipative (connue sous le terme *feedforward action*); tandis que dans [GGVD20], le courant de l'électrolyseur est contrôlé via un correcteur PI à séquençement de gain (bien connu sous le terme *gain scheduling*) associé à une action anticipative. Par comparaison, les travaux reportés dans [MGZR21] s'intéressent à la comparaison des performances avec un contrôle en tension ou bien en courant de l'électrolyseur. Dans ce cas, des lois de contrôle de type proportionnel intégrale dérivé (PID) ont été développées. Comme indiqué dans [MGZR21], le choix de la valeur de la tension ou du courant à réguler est guidé par les objectifs à atteindre, comme par exemple la maximisation du volume d'hydrogène produit [GSV20] ou l'optimisation du rendement global de l'ensemble convertisseur-électrolyseur [GGVD20]. Pour développer ces lois de contrôle, il est crucial de déterminer dans un premier temps la fonction de transfert de l'ensemble convertisseur-électrolyseur [MGZR21]. Dans [GSV20], la fonction de transfert a été déterminée soit en considérant un modèle résistif (généralement adopté dans la littérature) ou bien le modèle dynamique donné sur la Figure 2.63. Les réponses indicielles et les diagrammes de Bode pour ces deux fonctions de transfert sont tracés sur les Figures 2.64 et 2.65.

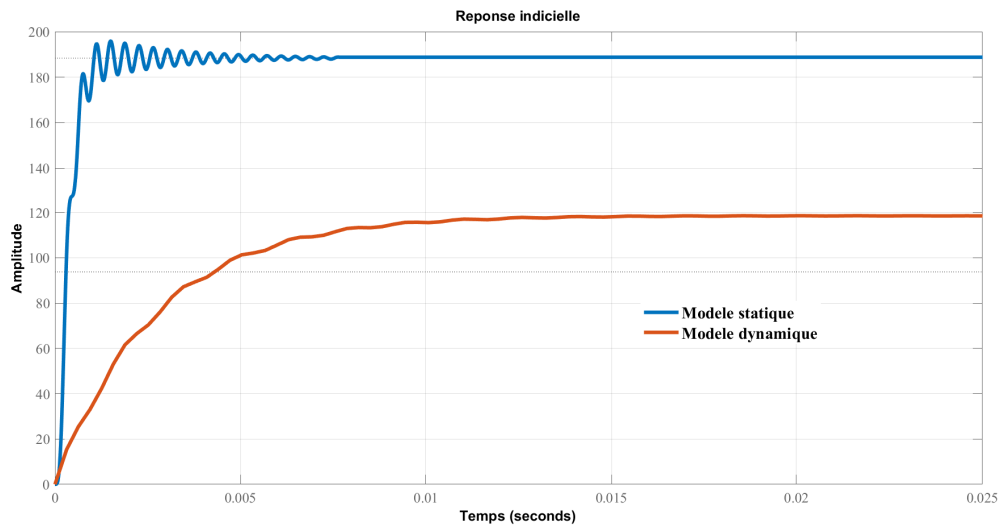


FIGURE 2.64 – Réponses indicielles en considérant un modèle résistif ou dynamique.

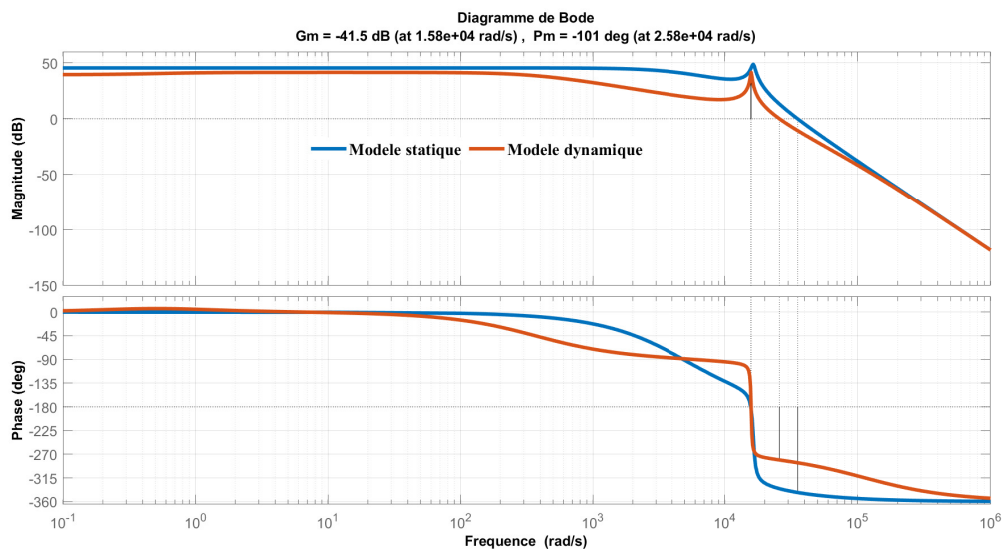


FIGURE 2.65 – Diagrammes de Bode en considérant un modèle résistif ou dynamique.

En s'appuyant sur la Figure 2.64, il peut être noté que les deux réponses indicielles diffèrent fortement puisque la réaction à l'anode rend le système plus lent comparé au comportement ne considérant que le modèle résistif de l'électrolyseur. En considérant le modèle résistif, la réponse est beaucoup plus rapide avec des oscillations cohérentes avec la présence de pôles conjugués complexes dans la fonction de transfert ; alors que pour le modèle dynamique, une réponse amortie est obtenue en raison de la présence de pôles négatifs [GSV20]. Pour les diagrammes de Bode représentés sur la Figure 2.65, le pic de résonance est introduit par la présence de la phase de compensation incluant L_s - C_s . Même si ce pic montre une plus faible amplitude en gain en considérant un modèle dynamique, une rotation de phase brusque est à noter. En résumé, les différentes réponses indicielles démontrent que l'adoption d'un modèle résistif pourrait conduire à une mauvaise conception du contrôleur. En effet, le diagramme de Bode avec le modèle statique montre un gain plus élevé par rapport au modèle dynamique. Cela implique une réponse avec

dépassement, nécessitant une correction qui aggraverait les dynamiques. De l'autre côté, la vraie réponse du système correspond au modèle dynamique dans lequel aucun dépassement est à noter. Cela signifie que la dynamique renforce la stabilité du système ; pour cette raison, il est crucial d'en tenir compte. Enfin, les critères à prendre en compte dans le développement des lois de contrôle concernent en particulier la stabilité et les dépassements qui pourraient endommager l'électrolyseur [GSV20].

Pour valider les performances du convertisseur SIBC et des lois de contrôle développées dans [GGVD20, GSV20, MGZR21], un banc de test a été développé et est montré sur la Figure 2.66.

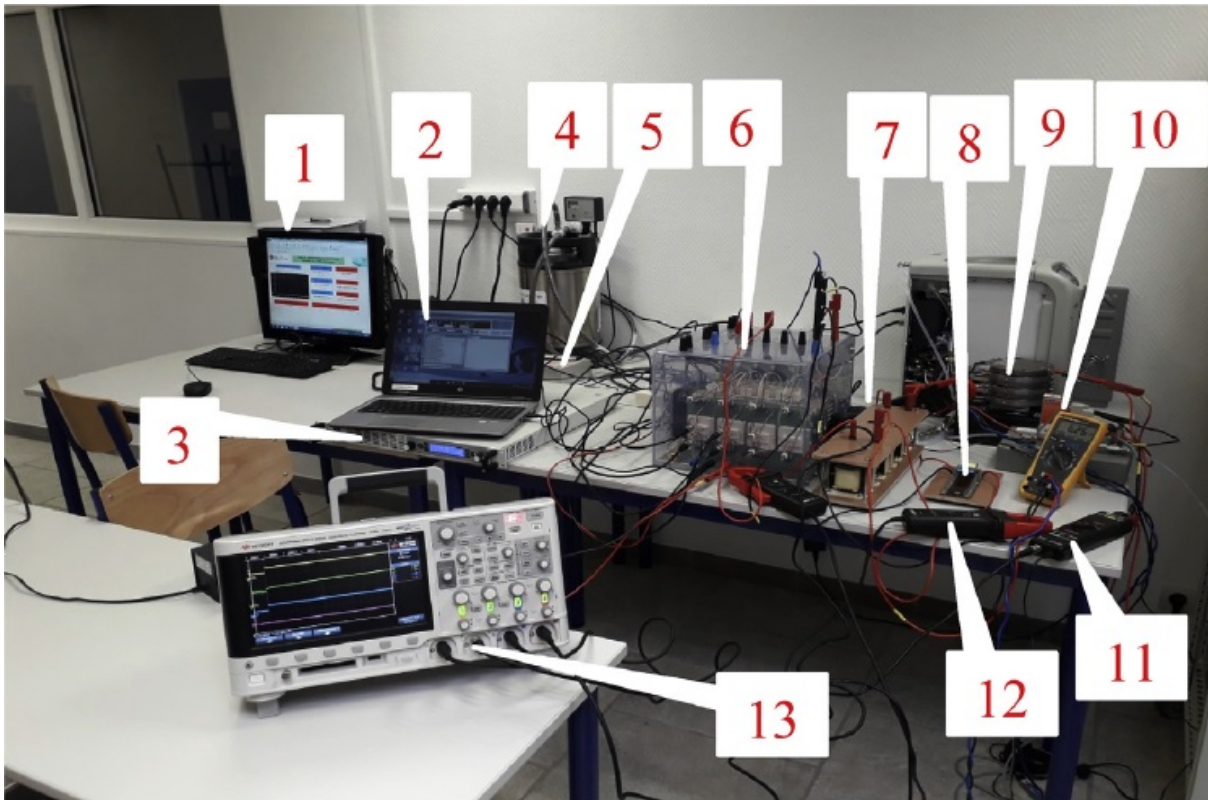


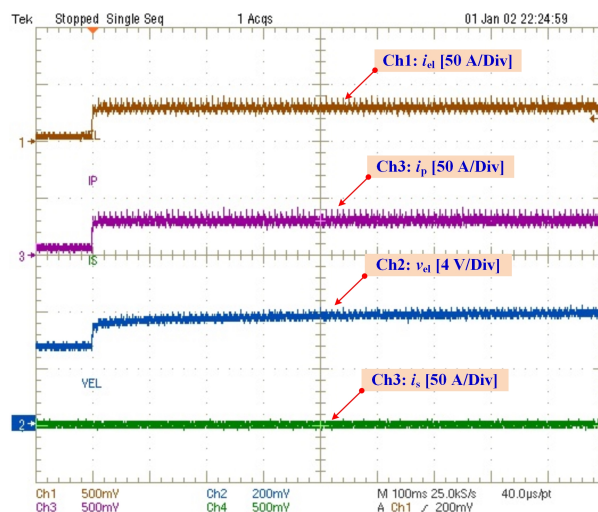
FIGURE 2.66 – Banc de test développé avec le SIBC.

Le banc de test est composé des éléments suivants : (1) logiciel ControlDesk dSPACE, (2) interface de contrôle de la source d'alimentation DC, (3) source d'alimentation DC, (4) réservoir d'eau pure, (5) carte de contrôle dSPACE 1104, (6) bloc convertisseur SEMISTACK IGBT, (7) inductances (L_p , L_s), (8) condensateurs (C_p , C_s), (9) électrolyseur PEM, (10) débitmètre hydrogène, (11) sonde de tension, (12) pince de courant, et (13) oscilloscope. Le convertisseur SIBC a été réalisé via l'utilisation du bloc convertisseur SEMISTACK IGBT. Les algorithmes de contrôle des différents travaux de recherche [GGVD20, GSV20, MGZR21] ont été implémentés dans le logiciel Matlab/Simulink puis transférés vers la carte de contrôle dSPACE 1104. Pour piloter les IGBT via les cartes driver, une carte d'interface est utilisée pour convertir les signaux de commande de dSPACE (0-5 V) en signaux de 0-15 V adaptés pour les cartes driver. Les données techniques du convertisseur SIBC sont données dans la Table 2.8.

TABLE 2.8 – Données techniques du convertisseur SIBC.

| Paramètre | Valeur | Unité |
|---------------------------------------|---------|-----------|
| Inductance, L_p | 400 | μH |
| Inductance, L_s | 400 | μH |
| Résistances parasites, R_p et R_s | 66 | $m\Omega$ |
| Condensateur, C_p | 100 | μF |
| Condensateur, C_s | 10 | μF |
| Fréquence de commutation | 20 | kHz |
| Tension d'entrée, V_{dc} | 100-200 | V |

Les résultats obtenus pour la régulation en tension [GSV20] sont donnés sur les Figures 2.67 et 2.68 avec deux échelles de temps différentes (100 et 400 ms). Dans ce cas, la tension est régulée à 8 V pour optimiser la production d'hydrogène. Dans ces essais, la tension de l'électrolyseur varie de 6 à 8 V . Il peut être noté que la tension aux bornes de l'électrolyseur montre une constante de temps rapide dû au convertisseur SIBC et une constante de temps plus lente en raison de la réaction à l'anode. Ce phénomène est particulièrement visible sur la Figure 2.68 présentant une base de temps plus longue. Par ailleurs, il est important de souligner que la variation du courant de l'électrolyseur i_{el} est soutenue seulement par le courant i_p , et non par le courant i_s comme sa composante continue est nulle comme indiqué précédemment. Comme souligné en conclusion des travaux reportés dans [MGZR21], il est préférable de contrôler le courant plutôt que la tension de l'électrolyseur. En effet, le courant présente une plage de fonctionnement plus large (de 0 à 50 A) comparée à la plage de tension beaucoup plus faible (de 4.4 à 8 V). Par ailleurs, l'électrolyseur a subi des dégradations avant d'initier ces tests (voir Figure 2.15). C'est pourquoi, pour permettre un meilleur contrôle des performances de l'électrolyseur, le courant doit être choisi comme variable de régulation [GGVD20].


 FIGURE 2.67 – Résultats obtenus avec une base de temps de 100 ms .

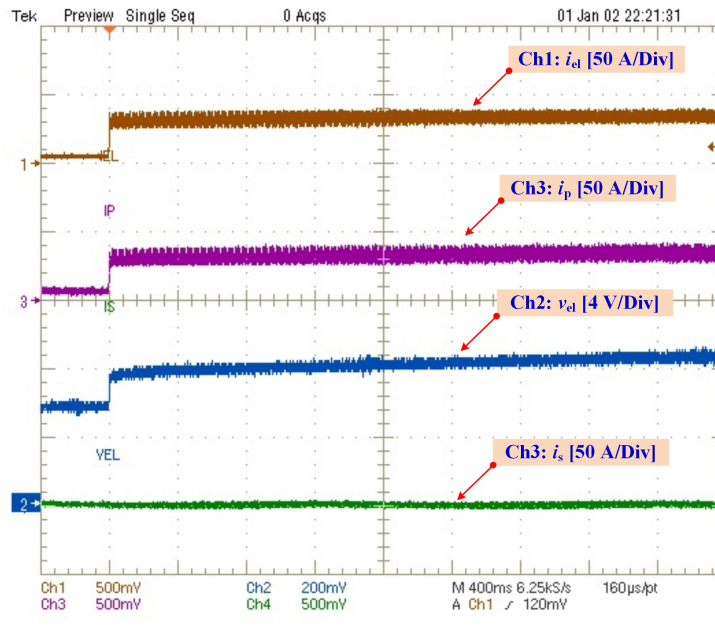


FIGURE 2.68 – Résultats obtenus avec une base de temps de 400 ms.

Les résultats obtenus concernant le contrôle du courant de l'électrolyseur pour optimiser le rendement de l'ensemble SIBC-électrolyseur sont donnés sur les Figures 2.69 et 2.70 avec deux échelles de temps différentes (10 ms et 2 s). En se basant sur l'analyse du rendement de SIBC-électrolyseur, le point de fonctionnement optimal est obtenu pour un courant d'électrolyseur de 10 A. Il peut être observé que le contrôle en courant permet d'offrir de bonnes performances tout en optimisant le rendement entre le convertisseur SIBC et l'électrolyseur. Comme pour les résultats précédents, les résultats montrent la constante de temps lente de l'anode (particulièrement visible sur la Figure 2.70) où un certain temps est nécessaire avant d'atteindre le régime permanent.

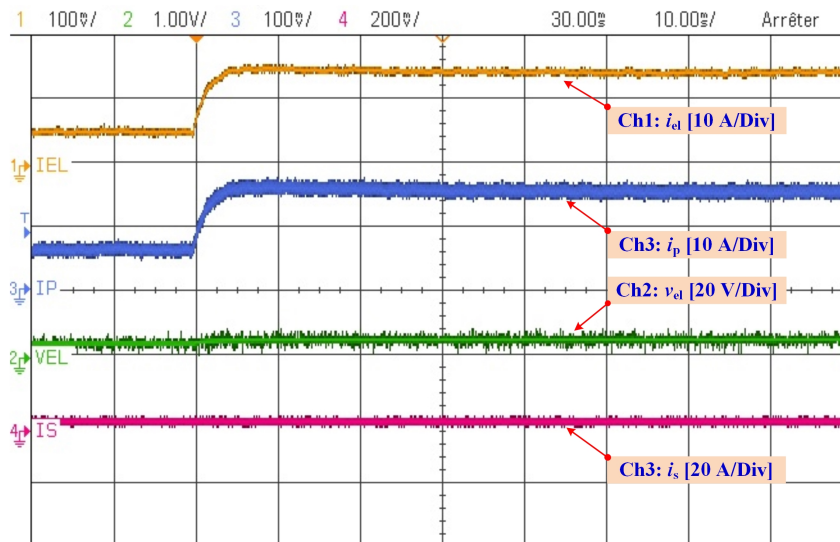


FIGURE 2.69 – Résultats obtenus avec une base de temps de 10 ms.

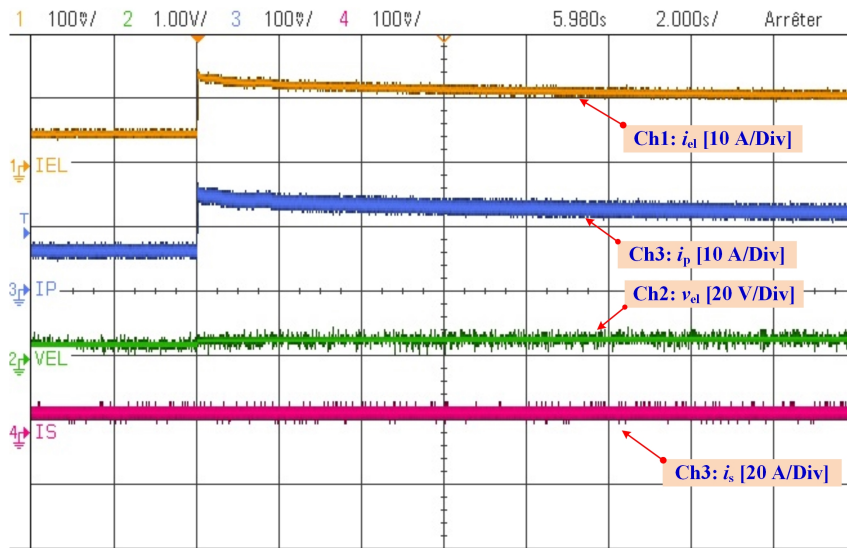


FIGURE 2.70 – Résultats obtenus avec une base de temps de 2 s.

Enfin, pour conclure sur ce convertisseur SIBC, une mesure en régime permanent a été réalisée en considérant seulement les composantes alternatives du courant et de la tension de l'électrolyseur. L'échelle du temps est choisie à $50 \mu s.div^{-1}$ pour évaluer les ondulations au regard de la fréquence de commutation ($20 kHz$). Les résultats sont illustrés sur la Figure 2.71. Il apparaît clairement que les ondulations de courant sont nulles, contribuant à justifier le choix de ce convertisseur pour des applications électrolyseurs. Il permettra en effet d'optimiser la consommation d'énergie spécifique sans générer de pertes supplémentaires [BGM⁺21]. Les ondulations de tension résiduelles (environ 2 %) sont dues principalement aux phases de commutation des interrupteurs de puissance.

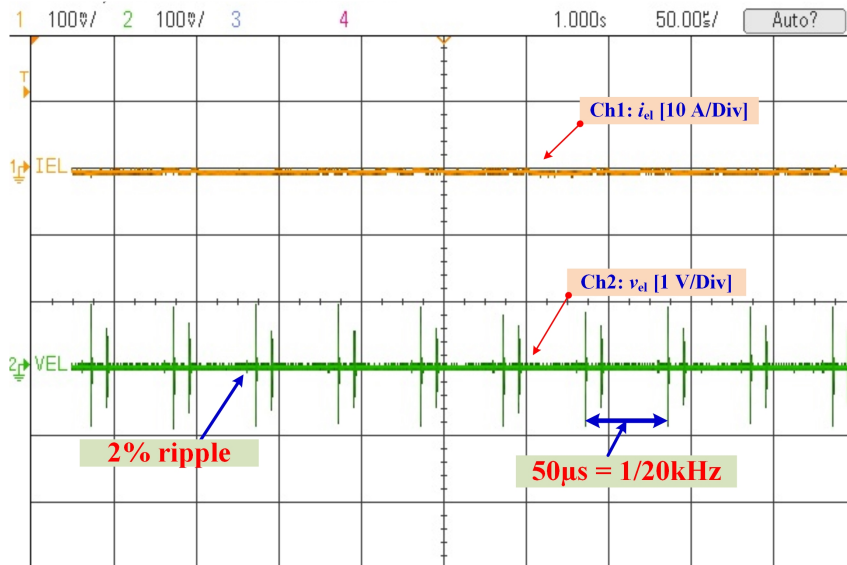


FIGURE 2.71 – Ondulations de courant et en tension de l'électrolyseur.

La deuxième topologie étudiée (topologie entrelacée buck trois niveaux) est illustrée sur la Figure 2.72. Cette topologie a été introduite pour la première fois dans [IHM06] puis étudiée pour les applications électrolyseur PEM dans le cadre de la thèse de Burin YODWONG [YGKP19,

YGK⁺21]. Comme montré sur la Figure 2.73, ce convertisseur est basé sur la version non flottante (partie supérieure) et la version flottante (partie inférieure) du convertisseur buck, connectées en parallèle. En conséquence, le rapport de conversion en tension peut être amélioré comparé à une topologie buck et les topologies entrelacées classiques. A l'entrée du convertisseur, la présence de deux condensateurs (C_1 et C_2) permet d'atténuer les contraintes de tension sur les composants de l'électronique de puissance. D'ailleurs, les tensions de ces deux condensateurs (V_{C_1} et V_{C_2}) doivent être équilibrées pendant les phases transitoires pour protéger les composants de l'électronique de puissance [YGK⁺21]. En outre, pour permettre une commutation au zéro du courant (bien connu sous le terme *zero-current switching (ZCS)*), deux inductances auxiliaires ($L_0/2$) ont été ajoutées. De là, le rendement peut être amélioré en réduisant les pertes par conduction et par commutation. Pour résumer, les avantages principaux de cette topologie sont donnés ci-dessous :

- Faible gain de conversion en tension (particulièrement bien adapté pour les applications haute puissance).
- Rendement amélioré.
- Augmentation de la puissance nominale du convertisseur grâce à la technique entrelacée et à la fonction ZCS.
- Ondulations de courant réduites (optimisation de la consommation d'énergie spécifique).
- Disponibilité en cas de défaillances des interrupteurs de puissance.
- Volume réduit des composants passifs.

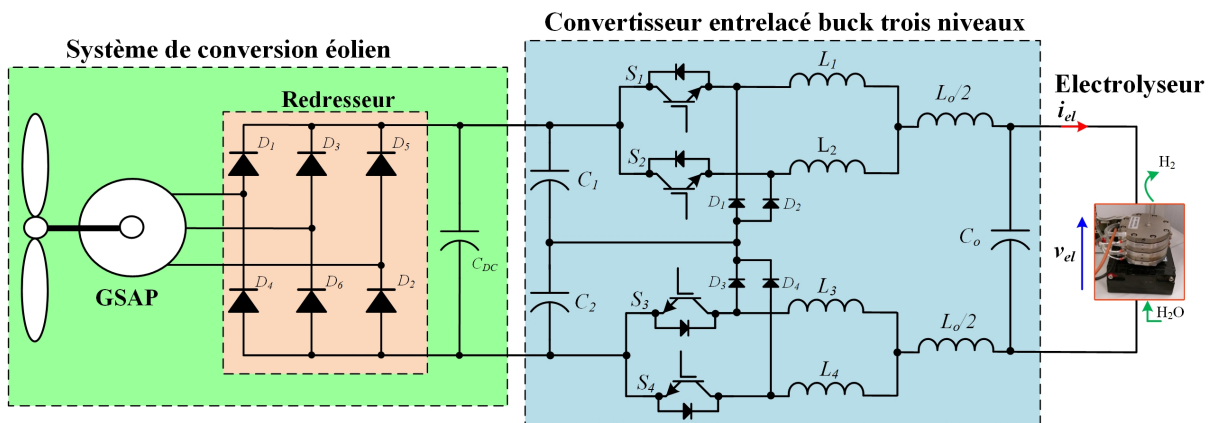


FIGURE 2.72 – Redresseur triphasé à diodes connecté au convertisseur entrelacé buck trois niveaux.

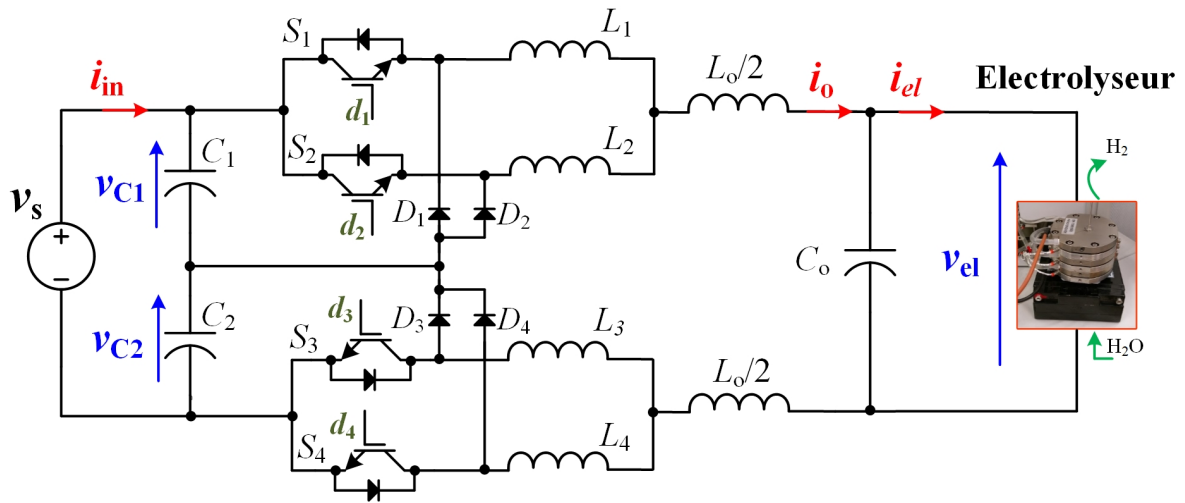


FIGURE 2.73 – Convertisseur entrelacé buck trois niveaux alimentant un électrolyseur PEM.

Comme pour la topologie précédente étudiée, ce convertisseur a été contrôlé à la fois en tension pour optimiser le rendement de l'ensemble convertisseur-électrolyseur [YGKP19] et en courant pour gérer le volume d'hydrogène produit [YGK+21]. Dans les deux cas, le modèle équivalent de l'électrolyseur donné sur la Figure 2.63 a été considéré pour le développement des lois de contrôle.

Dans l'objectif d'évaluer l'efficacité des lois de contrôle développées, une plateforme expérimentale a été réalisée à KMUTNB comme illustrée sur la Figure 2.74 pendant mon CRCT en 2021. Les paramètres du convertisseur sont résumés dans la Table 2.9.

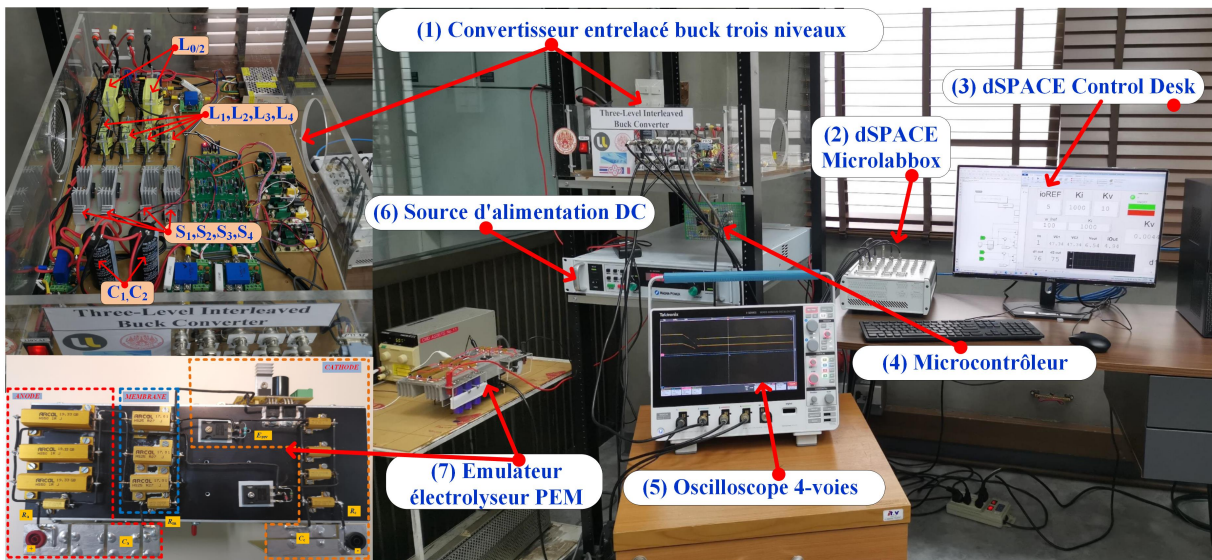


FIGURE 2.74 – Plateforme expérimentale développée à KMUTNB.

TABLE 2.9 – Données techniques du convertisseur entrelacé buck trois niveaux.

| Paramètres | Valeurs | Unités |
|--------------------------------------|---------|---------|
| Tension d'entrée, V_s | 75-200 | V |
| Tension de l'électrolyseur, V_{el} | 8 | V |
| Condensateurs d'entrée, $C_1 = C_2$ | 4400 | μF |
| Inductances, $L_1 = L_2 = L_3 = L_4$ | 200 | μH |
| Inductances, $L_0/2$ | 1100 | μH |
| Condensateur de sortie, C_0 | 3300 | μF |
| Fréquence de commutation | 10 | kHz |

La plateforme expérimentale se compose des éléments suivants : (1) le convertisseur entrelacé buck trois niveaux développé, (2) une source d'alimentation DC programmable, (3) une carte temps-réel dSPACE MicroLabBox DS1202, (4) un microcontrôleur, (5) un émulateur d'électrolyseur, (6) le logiciel Control Desk, et (7) un oscilloscope 4-voies. La source d'alimentation programmable permet d'émuler le système éolien incluant la partie redresseur ; tandis que l'électrolyseur est remplacé par l'émulateur développé dans [YGH⁺21]. Une faible fréquence de commutation a été choisie pour diminuer les pertes par commutation, permettant d'optimiser le rendement du convertisseur. Les lois de contrôle développés (contrôleur PI pour le contrôle en tension [YGKP19], et contrôle mode glissant modifié pour le contrôle en courant [YGK⁺21]) ont été réalisées dans l'environnement Matlab[®]-Simulink. Ensuite, ces programmes ont été implémentés dans la carte temps-réel dSPACE MicroLabBox DS1202. Toutefois, le déphasage des signaux de commande PWM des quatre interrupteurs de puissance ne peut pas être réalisé via la carte temps-réel dSPACE MicroLabBox DS1202. C'est pourquoi, un microcontrôleur est utilisé pour réceptionner ces signaux de commande PWM et ensuite les déphaser comme exigé par le convertisseur (180° entre S_1 et S_2 , S_3 et S_4). Une représentation schématique de cette implémentation est montrée sur la Figure 2.75.

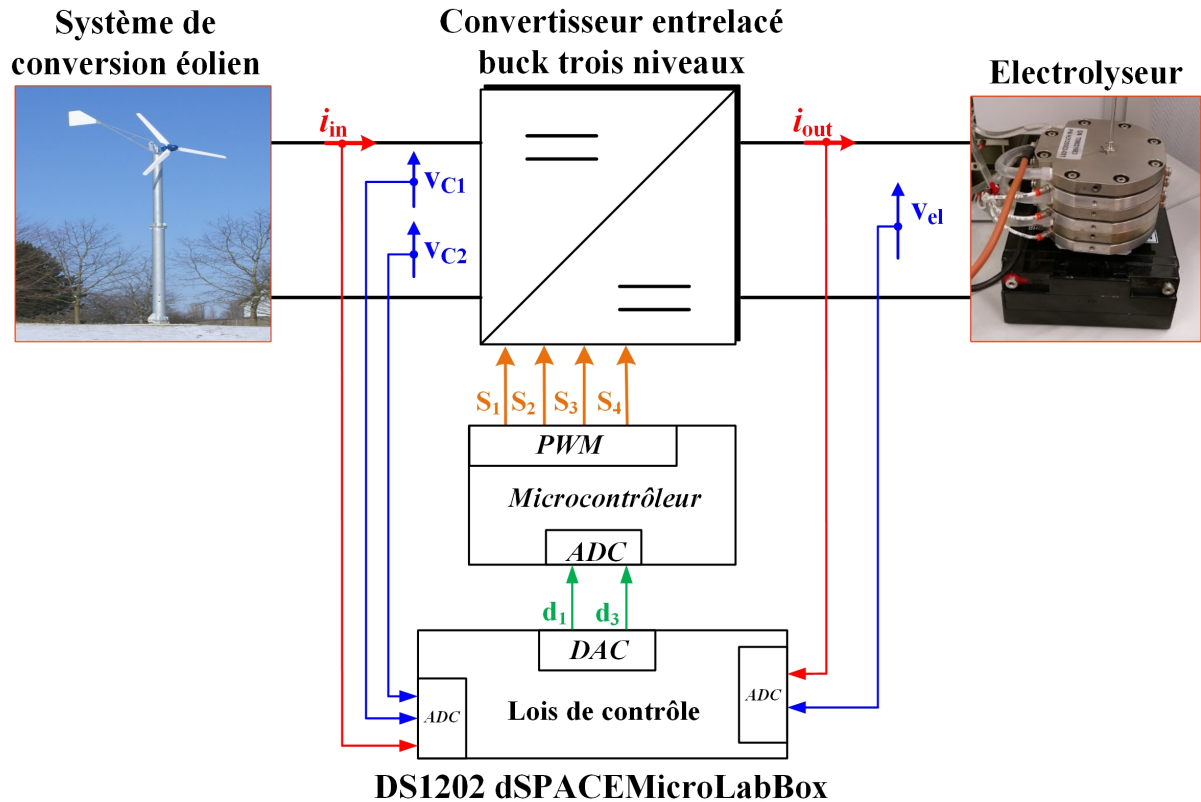


FIGURE 2.75 – Représentation schématique de l'implémentation des lois de contrôle.

Les résultats obtenus pour la régulation en tension [YGKP19] sont donnés sur les Figures 2.76 et 2.77. Après une étude approfondie, la tension est régulée à 6 V pour optimiser le rendement de l'ensemble convertisseur-électrolyseur (un rendement de 72 % est obtenu). Les résultats sur les Figures 2.76 et 2.77 ont été obtenus lors de sollicitations dynamiques. Le premier test a consisté à modifier la tension à l'entrée du convertisseur de 75 à 150 V ; tandis que pour le deuxième test, la tension varie de 150 à 100 V.

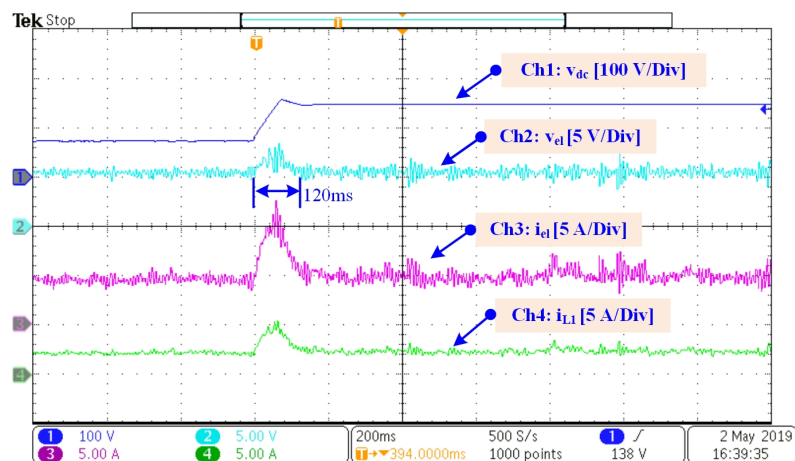


FIGURE 2.76 – Test en dynamique avec une variation de la tension du bus DC de 75 à 150 V.

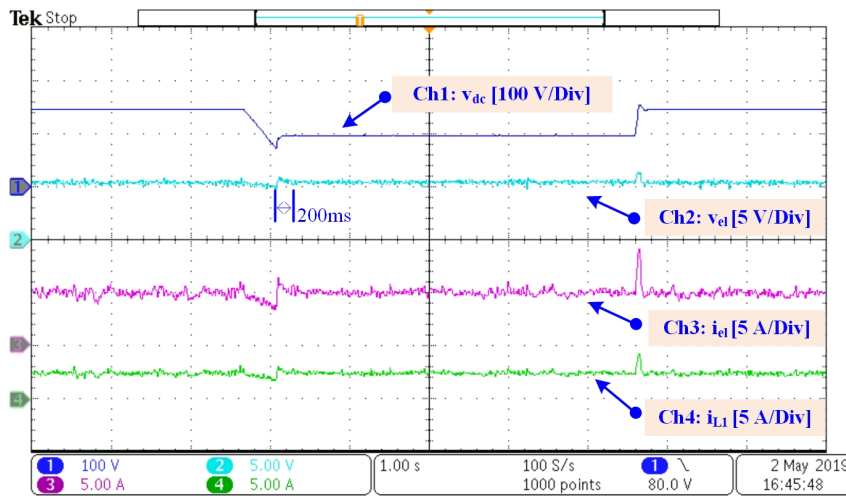


FIGURE 2.77 – Test en dynamique avec une variation de la tension du bus DC de 150 à 100 V.

En se basant sur ces résultats, il apparaît que le contrôleur développé offre de bonnes performances dynamiques d’un point de vue des réponses transitoires et des dépassements. En effet, après une brusque variation de la valeur de la tension du bus DC, le système permet d’atteindre son régime permanent en moins de 0.2 s. La Figure 2.76 représente un fonctionnement critique puisque la variation de tension est de 75 V au lieu de 50 V pour la Figure 2.77. C’est pourquoi, les dépassements sont plus importants : 3 V pour la tension de l’électrolyseur, et 7 A et 3 A respectivement pour le courant de l’électrolyseur et le courant d’une phase du convertisseur. Le dépassement en courant de l’électrolyseur est conséquent en raison de l’utilisation d’une unique boucle de régulation en tension. Toutefois, comme l’électrolyseur fonctionne à un point de fonctionnement en dessous de la valeur nominale de tension, ces dépassements n’ont aucun impact sur la fiabilité de l’électrolyseur [YGKP19].

Comme indiqué précédemment, la présence de deux condensateurs à l’entrée du convertisseur ajoute des contraintes supplémentaires à prendre en considération d’un point de vue du contrôle. Pour éviter tout stress supplémentaire sur les composants de puissance (pouvant entraîner des défaillances et des pertes de rendement), les tensions aux bornes de ces deux condensateurs doivent être équilibrées pendant les phases transitoires. C’est pourquoi, des tests ont été réalisés pour vérifier que les deux condensateurs sont bien équilibrés pendant les phases dynamiques. Les résultats sont montrés sur la Figure 2.78. Des variations de tension du bus DC de 150 à 100 V et vice-versa ont été prises en considération. Comme il peut être observé, les deux condensateurs ne souffrent pas de déséquilibre durant les phases dynamiques, contribuant aux performances du convertisseur.

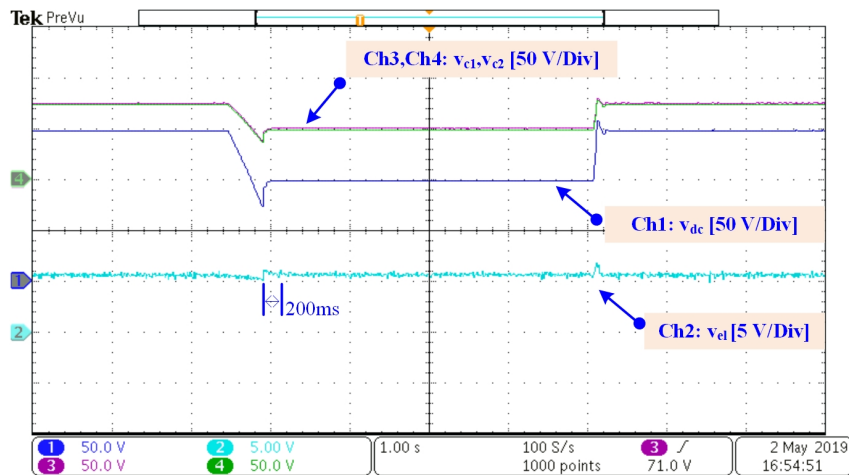


FIGURE 2.78 – Équilibre des condensateurs d'entrée.

Enfin, dans la continuité de ce travail préliminaire, les travaux suivants ont porté sur le contrôle du courant permettant de gérer plus facilement le volume d'hydrogène produit via l'utilisation d'un contrôleur de type mode glissant [YGK⁺21]. Le choix de ce contrôleur est motivé par le fait que l'électrolyseur peut fonctionner à différents points de fonctionnement et par conséquent, il est crucial de garantir des performances optimales malgré les perturbations (variation de la tension du bus DC, changement du point de fonctionnement pour répondre à un besoin spécifique en hydrogène). Il est important de souligner que le contrôle développé dans [YGK⁺21] diffère des contrôles mode glissant proposés dans la littérature puisque il inclut deux nouvelles variables comme les tensions aux bornes des condensateurs d'entrée (V_{C_1} et V_{C_2}). De là, cela permet de garantir l'équilibre constant de ces deux tensions pendant les phases dynamiques. En conclusion, ce contrôle mode glissant modifié permet d'offrir de meilleures performances que les contrôleurs classiques mode glissant.

Les résultats obtenus avec ce contrôleur sont donnés sur les Figures 2.79, 2.80 et 2.81. Les Figures 2.79 et 2.80 montrent la réponse et la référence du courant de l'électrolyseur, et de la tension de l'électrolyseur et celle aux bornes du condensateur C_1 à la suite d'un changement de point de fonctionnement respectivement de 3 à 10 A, et de 10 à 3 A à une tension du bus DC constante de 150 V. En se basant sur les résultats obtenus, il peut être noté que le courant de l'électrolyseur suit parfaitement sa référence. La Figure 2.80, quant à elle, montre la réponse du courant et de la tension de l'électrolyseur lorsqu'une brusque variation de la tension du bus DC se produit (de 150 à 100 V) ; alors que la référence du courant est fixée à 10 A. Il peut être observé que le courant et la tension de l'électrolyseur ne sont pas affectés par le changement brutale de la tension du bus DC. En outre, les tensions d'entrée V_{C_1} et V_{C_2} sont équilibrées pendant les phases transitoires grâce au contrôleur proposé.

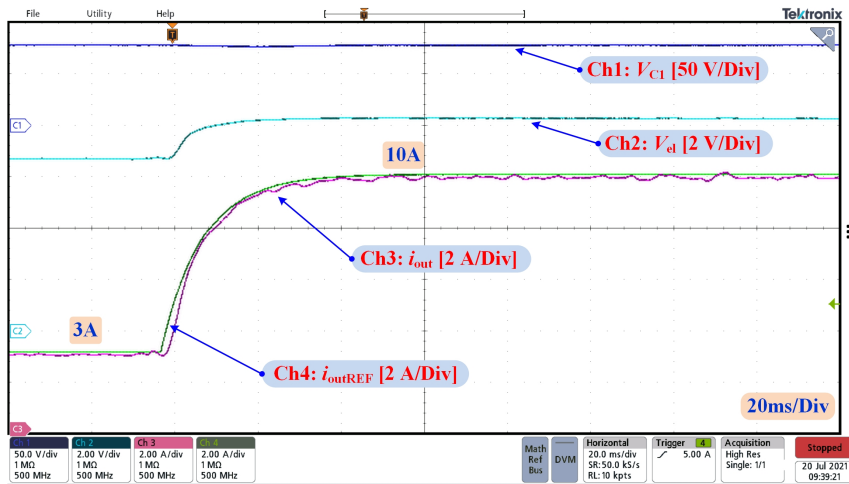


FIGURE 2.79 – Résultats expérimentaux pour un changement de courant de référence de 3 à 10 A.

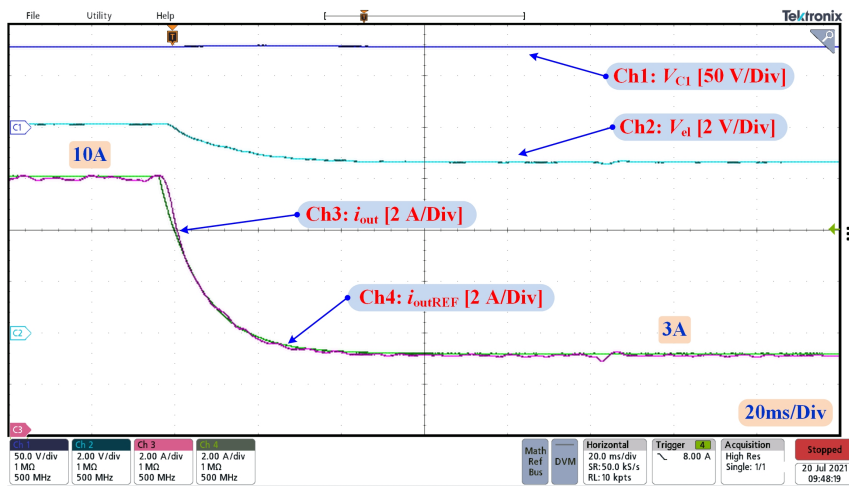


FIGURE 2.80 – Résultats expérimentaux pour un changement de courant de référence de 10 à 3 A.

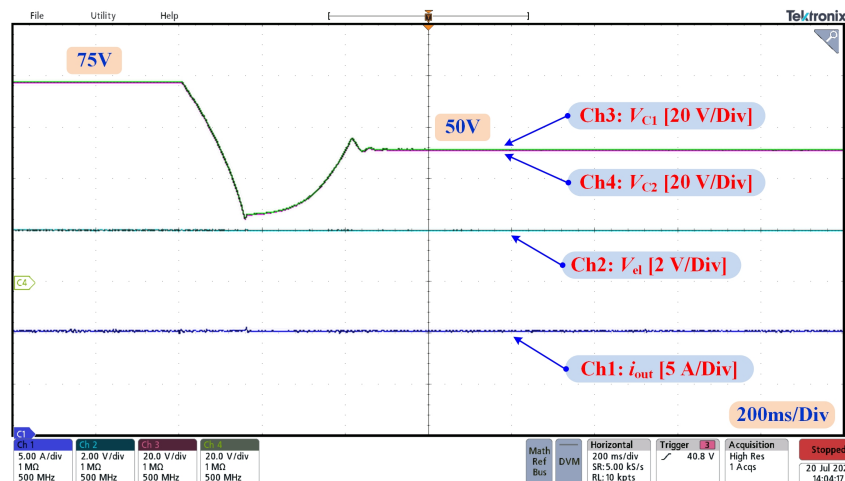


FIGURE 2.81 – Résultats expérimentaux pour une variation de tension du bus DC de 150 à 100 V.

Enfin, comme pour la topologie SIBC, il est important d'évaluer les ondulations de courant générées par ce convertisseur pour garantir la fiabilité de l'électrolyseur. La Figure 2.82 illustre les ondulations de courant et de tension de l'électrolyseur en régime permanent lorsque la tension du bus DC est fixée à 160 V. En s'appuyant sur les résultats obtenus, il apparaît clairement que les ondulations de courant et de tension sont négligeables, permettant d'optimiser la consommation d'énergie spécifique sans l'ajout de pertes supplémentaires causées par les ondulations de courant.

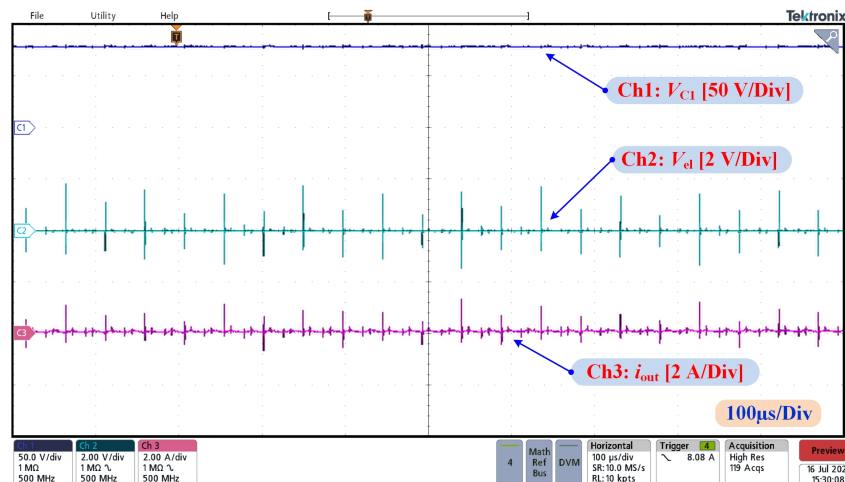


FIGURE 2.82 – Ondulations de courant et de tension en régime permanent.

2.5 Conclusion

En s'appuyant sur la littérature existante, il a été démontré que les thématiques de recherche (modélisation dynamique, émulateur et l'électronique de puissance) traitées dans ce chapitre 2 sont très peu développées. C'est pourquoi, les travaux de recherche conduits via l'encadrement des doctorants sur ces différentes thématiques ont apporté de réelles contributions à l'existant. Le cœur de ces travaux de recherche concerne en particulier la modélisation des électrolyseurs PEM tenant compte de leurs cinétiques chimiques lorsqu'ils sont couplés à des sources d'énergies renouvelables, dites dynamiques. En effet, ces travaux de modélisation ont permis de nourrir d'autres thématiques, tout aussi importantes, comme le développement d'un émulateur d'électrolyseur PEM et également le développement de lois de contrôle pour l'électronique de puissance associée à l'électrolyseur. En conclusion, ces travaux de recherche préliminaires sont prometteurs et ouvrent la voie à de nouvelles perspectives pour enrichir ces thématiques de recherche, comme par exemple la caractérisation et la modélisation dynamique des électrolyseurs alcalins, la montée en puissance des convertisseurs de puissance pour alimenter des électrolyseurs de forte puissance, et également le développement de nouveaux émulateurs d'électrolyseurs plus performants.

Dans le prochain et dernier chapitre de ce manuscrit d'HDR, des perspectives pédagogiques et de recherche à court, moyen et long termes sont données permettant de tracer de nouvelles lignes directrices pour ma carrière professionnelle.

Chapitre 3

Perspectives à moyen et long terme

Sommaire

| | | |
|------------|--|------------|
| 3.1 | Introduction | 112 |
| 3.2 | Perspectives pédagogiques et administratives | 112 |
| 3.3 | Perspectives de recherche à moyen et long terme | 113 |
| 3.3.1 | Développement d'architectures d'électrolyseurs multi-stack | 113 |
| 3.3.2 | Gestion d'énergie des systèmes multi-sources incluant un stockage d'énergie sous forme d'hydrogène | 115 |
| 3.3.3 | Association hydrogène et éléments supraconducteurs pour le génie électrique | 117 |
| 3.4 | Conclusion | 119 |

3.1 Introduction

Après avoir présenté dans les chapitres précédents mon curriculum vitæ détaillé ainsi qu'une synthèse de mes activités de recherche conduites depuis mon recrutement, ce troisième et dernier chapitre se focalise sur les perspectives à moyen (d'ici 5 ans) et long terme (d'ici 10 ans et plus) de mes activités à la fois pour la pédagogie et la recherche. Ces perspectives s'inscrivent directement dans la continuité de mes activités pédagogiques, administratives et de recherche. Pour la partie pédagogique et administrative, la prise de nouvelles fonctions (directeur des relations internationales, responsable de formation licence ou master) est envisagée. Pour la recherche, cela concerne en particulier la poursuite d'activités de recherche sur les électrolyseurs (dont des travaux préliminaires sont présentés et discutés dans ce chapitre) et le développement d'activités de recherche sur le couplage hydrogène/supraconducteurs. D'ailleurs, ce couplage hydrogène/supraconducteurs est actuellement envisagé par le constructeur Airbus dans le déploiement d'avions zéro-émission dont l'hydrogène liquide sera refroidie par l'association supraconducteurs/cryogénie. Enfin, comme il a pu être souligné à la fois dans le chapitre 1 et le chapitre 2, les collaborations locales (au sein de l'IUT de Longwy), nationales et internationales ont joué, et continuent de jouer un rôle central dans le développement et le renforcement des activités de recherche autour du stockage de l'énergie et de l'hydrogène, en général. C'est pourquoi, une attention est donnée dans ce chapitre sur ces collaborations pour les pérenniser.

3.2 Perspectives pédagogiques et administratives

Après avoir été le responsable des stages du département GEII pendant de nombreuses années qui m'a beaucoup apporté tant sur le plan personnel que professionnel, je souhaiterais à l'avenir occuper d'autres responsabilités toutes aussi importantes telles que responsable des relations internationales et également de formations (BUT, licence, master). La responsabilité des relations internationales s'inscrit naturellement dans la continuité de ma précédente fonction de responsable des stages. En effet, tout au long de ces dernières années, j'ai eu l'opportunité de nouer de nombreux contacts à l'étranger (Chine, Danemark, Italie, Norvège, Finlande, Ukraine) qui ont permis l'échange d'étudiants pour des stages. En outre, dans le cadre du programme Erasmus+, j'ai eu l'occasion d'accueillir des doctorants italiens et ukrainiens pour des stages en recherche. Cela a permis d'initier de nouvelles collaborations sur des sujets de recherche en pleine émergence. De là, plusieurs publications communes ont pu voir le jour (voir 1.2.4) et une thèse en co-tutelle a pu être initiée en octobre 2021 entre le laboratoire GREEN et Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute (KPI). En servant comme responsable des relations internationales, ces collaborations pourront être renforcées et de nouvelles coopérations pourront naître tant sur la pédagogie que la recherche.

Enfin, mon objectif à moyen terme est d'être le responsable d'une formation, comme par exemple le BUT, une licence ou bien un master. Je souhaiterais apporter mes compétences et mon ouverture à l'international dans le contenu pédagogique de la formation ainsi que de contribuer à la réussite des étudiants à différents niveaux (mobilité internationale, pédagogique, projet professionnel).

3.3 Perspectives de recherche à moyen et long terme

Cette section a pour objectif de présenter de façon synthétique et concise les perspectives de recherche à moyen et long terme. Certaines thématiques de recherche ont déjà été introduites dans des publications et constituent un socle solide pour les développer davantage. Les perspectives s'articulent autour de trois thèmes qui sont :

- (i) Développement d'architectures d'électrolyseurs multi-stack.
- (ii) Gestion d'énergie des systèmes multi-sources incluant un stockage d'énergie sous forme d'hydrogène.
- (iii) Association hydrogène et éléments supraconducteurs pour le génie électrique.

3.3.1 Développement d'architectures d'électrolyseurs multi-stack

En couplant des systèmes de conversion éoliens (à la fois onshore et offshore) aux électrolyseurs PEM, les architectures multi-stack ont beaucoup à offrir, particulièrement du point de vue de la gestion d'énergie [GV20b]. Le système éolien comprend une génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP) et d'un redresseur triphasé à diodes. La topologie entrelacée dite *Stacked Interleaved Buck converter (SIBC)* introduite dans 2.4 a été choisie pour interfacier le système éolien et l'architecture d'électrolyseurs multi-stack. D'ailleurs, deux différentes configurations peuvent être utilisées telles que l'architecture série (voir Figure 3.1) et l'architecture parallèle (voir Figure 3.2) [MBG⁺14]. En s'appuyant sur la Figure 3.1, suivant la puissance disponible du système éolien, cette dernière peut être partagée entre les électrolyseurs PEM via l'utilisation d'interrupteurs (SW_1 , SW_2 , SD_{el1} , SD_{el2}) et de diodes de type bypass (D_{el1} , D_{el2}). En outre, les interrupteurs (SW_1 , SW_2) peuvent être utiles pour isoler un stack d'électrolyseur défectueux ; tandis que les interrupteurs (SD_{el1} , SD_{el2}) sont employés pour dévier la trajectoire du courant des électrolyseurs si un des stacks d'électrolyseurs est défectueux. Les diodes, quant à elles, ont été choisies pour supporter le courant des électrolyseurs pour éviter leurs destructions. De là, les diodes bypass peuvent garantir une continuité de service du système multi-stack. Cependant, la simplicité de l'architecture mène à ses faiblesses.

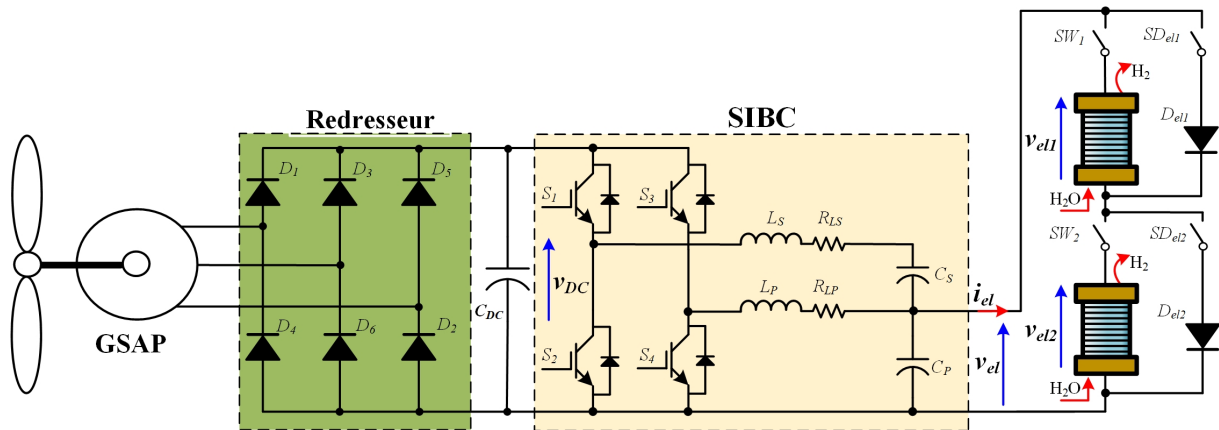


FIGURE 3.1 – Architecture série d'électrolyseurs multi-stack.

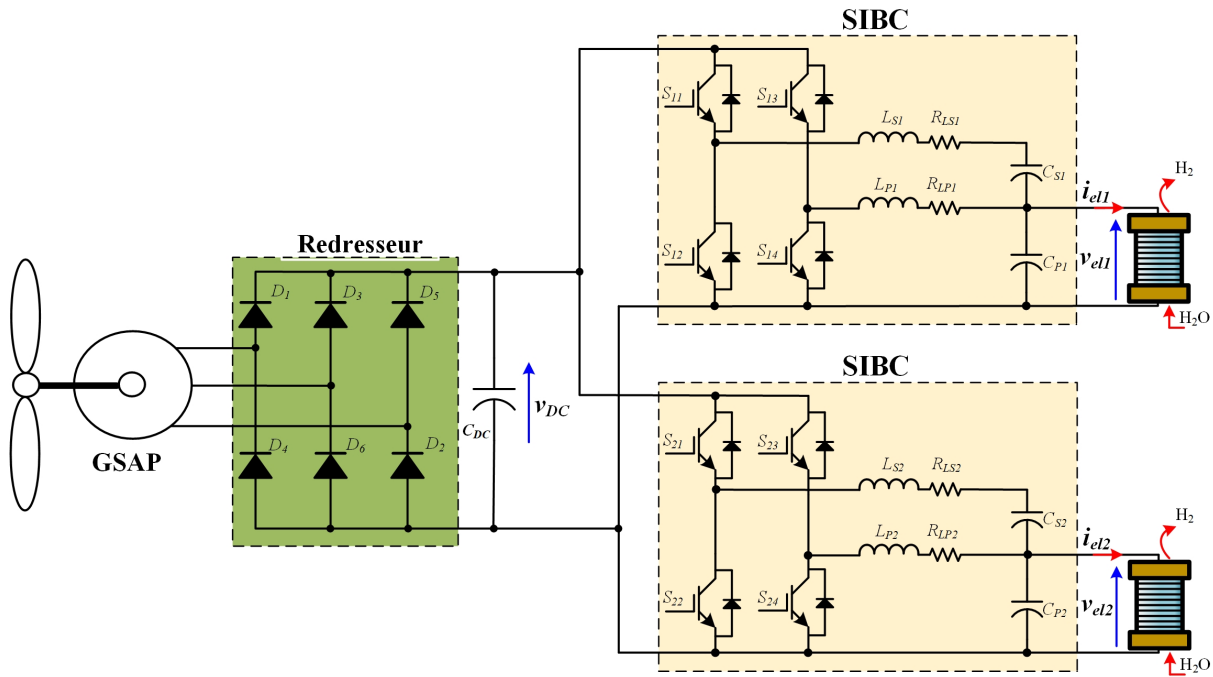


FIGURE 3.2 – Architecture parallèle d'électrolyseurs multi-stack.

En effet, les électrolyseurs PEM ne peuvent pas être contrôlés séparément et l'efficacité énergétique du convertisseur DC-DC sera plus faible en raison de l'augmentation de la tension aux bornes des électrolyseurs. Toutefois, en choisissant d'autres architectures de conversion DC-DC, comme le convertisseur entrelacé buck trois niveaux (présenté dans 2.4), une meilleure efficacité énergétique pourra être obtenue en raison de son gain de conversion en tension faible. En comparaison, l'architecture parallèle (Figure 3.2) permet de contrôler chaque stack d'électrolyseur via son convertisseur DC-DC connecté au bus DC. Dans ce cas, l'efficacité énergétique des convertisseurs DC-DC est optimisée. Cependant, cette architecture est plus coûteuse en raison de l'utilisation de plusieurs convertisseurs DC-DC pour contrôler chaque stack d'électrolyseur [MBG⁺14]. Cette architecture a été explorée dans un premier travail préliminaire reporté dans [GV20b]. Suivant la puissance disponible, les convertisseurs DC-DC sont contrôlés de telle sorte à alimenter les électrolyseurs à puissance nominale permettant d'optimiser à la fois la production d'hydrogène et l'efficacité énergétique.

En continuité de ces travaux de recherche, il serait intéressant d'explorer l'utilisation de nouveaux composants d'électronique de puissance (carbure de silicium (SiC) et nitrure de gallium (GaN)) dans les convertisseurs de puissance contribuant à des dynamiques plus rapides et l'amélioration de l'efficacité énergétique. Ces travaux permettront de renforcer la collaboration avec les chercheurs de l'université de Palerme (Italie) et du conseil national de recherche (CNR) italien. Pour finir, en couplant les deux architectures multi-stack (pour tirer profit des avantages de chacune), de nouvelles stratégies de gestion d'énergie pourront être élaborées avec les enseignants-chercheurs du laboratoire CRAN de l'IUT de Longwy pour optimiser les performances de l'ensemble du système. Cela ne pourra que fortifier cette coopération entre les deux équipes.

Par ailleurs, en septembre 2021, un premier site de production d'hydrogène vert par électrolyse de l'eau alimenté par des fermes éoliennes locales et de l'eau de mer a été inauguré à Bouin (Vendée) par l'entreprise nantaise Lhyfe. Les électrolyseurs utilisés proviennent de l'entreprise

norvégienne NEL. D'ailleurs, cette entreprise propose la plus grande puissance de stack (environ 2 MW) avec un débit d'hydrogène pouvant atteindre $5000 \text{ Nm}^3/\text{h}$ [YGP⁺20a]. Ce site a une capacité de production initiale de 300 kg/jour d'hydrogène, avec une perspective de passer à une production de 1000 kg/jour. Il pourra alimenter en hydrogène différentes stations de recharge dans la région. En s'appuyant sur la production journalière en hydrogène et qu'un véhicule électrique à hydrogène nécessite un plein d'au moins 6 kg, l'unité de production pourra satisfaire la fourniture en hydrogène de 50 véhicules. En continuité de ce premier site de production, d'autres projets d'implémentation sont en perspective comme un site de production offshore au large de la commune Le Croisic d'ici 2022. Les systèmes d'architectures d'électrolyseurs multi-stack présentés s'inscrivent parfaitement dans le développement de ces sites de production. En effet, le couplage des électrolyseurs permettra de monter en puissance et de produire davantage d'hydrogène qu'avec l'utilisation d'un seul stack qui est limité actuellement à 2 MW. Les travaux prometteurs présentés dans [GV20b] pourraient être appliqués pour gérer de façon efficace les électrolyseurs suivant la production d'énergie des éoliennes onshores et offshores.

3.3.2 Gestion d'énergie des systèmes multi-sources incluant un stockage d'énergie sous forme d'hydrogène

Comme il a été mentionné dans la sous-section 1.2.6, j'ai travaillé étroitement avec des collègues thaïlandais de KMUTNB et des collègues du LEMTA de l'Université de Lorraine. La thématique de recherche se concentre sur la gestion d'énergie des systèmes multi-sources (piles à combustible, batteries, supercondensateurs) pour faire face aux problèmes de stabilité des réseaux DC [TMG⁺21, TMN⁺21]. Ces trois dispositifs sont complémentaires dans ces systèmes et leurs utilisations permettent de tirer profit de leurs bénéfices en termes de densité d'énergie (batteries et pile à combustible) et de puissance (supercondensateur) [GYKP18]. Ces travaux de recherche ne sont pas traités dans le chapitre 2 car ils sont en dehors du thème de cette HDR centrée sur la modélisation et le contrôle des électrolyseurs PEM. Toutefois, compte tenu de l'importance de ce thème de recherche dans la collaboration entre le GREEN et les enseignants-chercheurs de KMUTNB, il est crucial de développer des pistes de recherche qui ne feront que consolider cette fructueuse collaboration. La piste principale est d'intégrer une chaîne de production-stockage-valorisation de l'hydrogène [GYKP18] dans un système multi-sources (voir Figure 3.3).

En complément d'autres systèmes de stockage (batteries, supercondensateurs, volant d'inertie), l'énergie en surplus provenant de sources d'énergies renouvelables pourra être utilisée pour produire de l'hydrogène via l'électrolyseur. Ensuite, une fois l'hydrogène stocké, il pourra être valorisé via une pile à combustible pour compléter les autres sources d'énergie et garantir une certaine stabilité du réseau DC suivant la demande d'énergie. Cette stabilité ne pourra être assurée que par le développement de nouvelles stratégies de gestion d'énergie robustes. Par ailleurs, en concevant ces stratégies de gestion d'énergie, il est important de considérer différents aspects résumés ci-dessous :

- Dégradations des performances des électrolyseurs en raison de l'électronique de puissance [BGM⁺21, cPST⁺22] et des sollicitations dynamiques [PAST⁺20]. Une partie de ces dégradations peut être réduite en utilisant des architectures de conversion d'énergie adaptées comme celles présentées dans la section 2.4 et également en couplant les électrolyseurs avec des nouveaux systèmes de stockage d'énergie prometteurs.
- Dégradations des performances des piles à combustible pour des raisons comparables aux électrolyseurs [FTAM07, Ger10].
- État de charge des réservoirs d'hydrogène tenant compte du volume stocké [GYK⁺19].

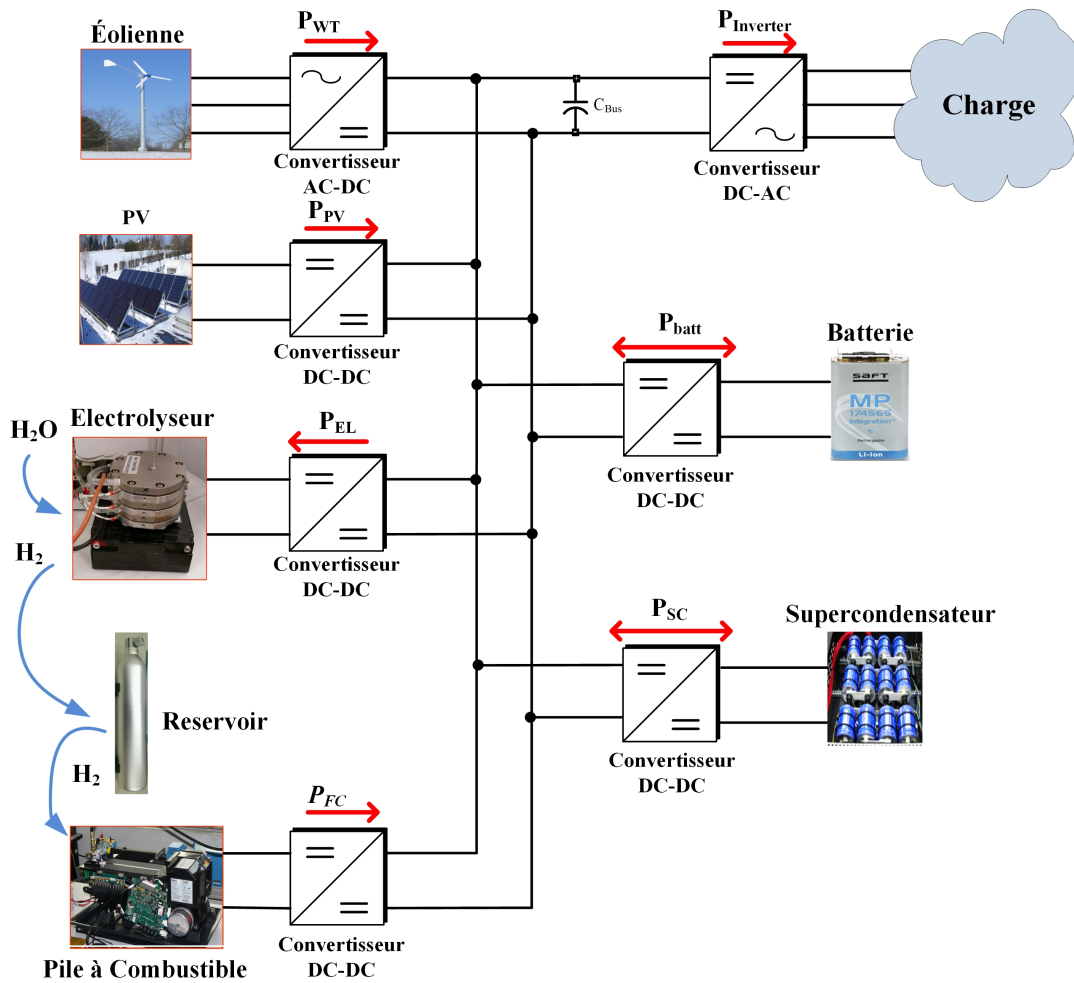


FIGURE 3.3 – Système multi-sources intégrant une chaîne de production-stockage-valorisation de l’hydrogène.

Par ailleurs, l’électronique de puissance joue un rôle clé dans la montée en puissance, dans les performances, et dans la fiabilité de ces systèmes multi-sources à architecture DC. C’est pourquoi, une attention particulière doit être portée aux architectures de conversion d’énergie. De là, les topologies entrelacées ont beaucoup à apporter sur ces différentes problématiques.

La piste secondaire concerne la gestion de fonctionnement de l’électrolyseur suivant la consommation d’hydrogène de la pile à combustible. Une vue d’ensemble du système et de sa gestion sont illustrées sur la Figure 3.4. La consommation d’hydrogène est estimée à partir de la mesure du courant de la pile à combustible (i_{FC}). Cette estimation associée aux données de la pile à combustible (nombre de cellules (n_{FC})) et de l’électrolyseur (nombre de cellules (n_{EL})) et du rendement de Faraday (η_F) permettent d’évaluer la référence de l’électrolyseur (i_{EL-REF}) pour sa commande.

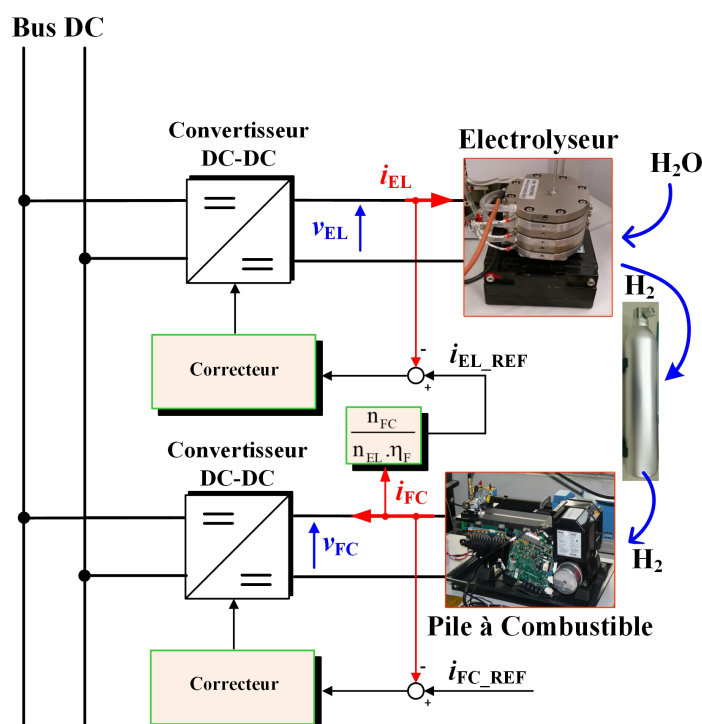


FIGURE 3.4 – Gestion du fonctionnement de l'électrolyseur suivant la consommation d'hydrogène de la pile à combustible.

3.3.3 Association hydrogène et éléments supraconducteurs pour le génie électrique

Les activités de recherche conduites au GREEN s'articulent autour de deux thématiques principales qui sont :

- Chaînes de conversion électromécaniques (sources et charges électrochimiques, électronique de puissance, actionneurs électriques, interaction avec le réseau) ;
- Supraconductivité appliquée au génie électrique (caractérisation des pertes, cryo-aimants et leurs applications, moteurs supraconducteurs, limiteurs de courant).

Mes activités de recherche présentées dans le chapitre 2 autour des électrolyseurs s'inscrivent dans la première thématique. Les enseignants-chercheurs de l'axe «Supraconductivité appliquée au génie électrique» travaillent en particulier sur deux aspects, qui sont la modélisation et la caractérisation, et les applications en génie électrique. Les applications ciblées sont diverses et variées comme le développement d'actionneurs supraconducteurs (moteurs et générateurs électriques, accouplements magnétiques, et les limiteurs de courant de court-circuit), les cryo-aimants (pouvant générer des champs magnétiques importants dans un espace restreint), et enfin les limiteurs supraconducteurs de courant de court-circuit (modélisation et intégration dans les réseaux électriques). En raison de l'expérience acquise et des compétences de cette équipe de recherche, les enseignants-chercheurs travaillent en étroite collaboration avec des entreprises dans le secteur aéronautique telles que SAFRAN sur différents projets et sur des thèses CIFRE.

Le secteur aéronautique (transport de passagers et de fret, opérations militaires) représente entre 2 et 2.5% des émissions globales de gaz à effet de serre. Étant donné que le transport des passagers est toujours en extension, la compagnie Airbus envisage de développer d'ici 2035 des avions à zéro-émission alimentés en hydrogène (turboprop, turbofan, et blended-wing body). Les moteurs modifiés de turbines à gaz seront alimentés via la combustion de l'hydrogène. L'utilisation d'hydrogène liquide a été adoptée pour propulser ces avions. En effet, l'hydrogène sous forme liquide présente une densité énergétique volumique plus élevée (8 MJ/L) comparée à celle d'un stockage sous pression communément utilisé pour les véhicules électriques. Cependant, pour maintenir l'hydrogène sous forme liquide, il est nécessaire de le stocker à -252.8°C . Pour atteindre cet objectif, Airbus est actuellement en train de développer le système ASCEND (Advanced Superconducting & Cryogenic Experimental powertrain Demonstrator). Le but principal de ce système est de prouver la faisabilité et l'application d'une chaîne d'énergie supraconductrice et de fournir des recommandations pour des applications aéronautiques. L'utilisation de technologies supraconductrices et cryogéniques permet de diviser par deux le poids des composants et les pertes électriques. Une représentation du système ASCEND est donnée sur la Figure 3.5. Les enseignants-chercheurs de l'équipe « Supraconductivité appliquée au génie électrique » travaillent sur ce sujet de recherche avec l'entreprise SAFRAN.

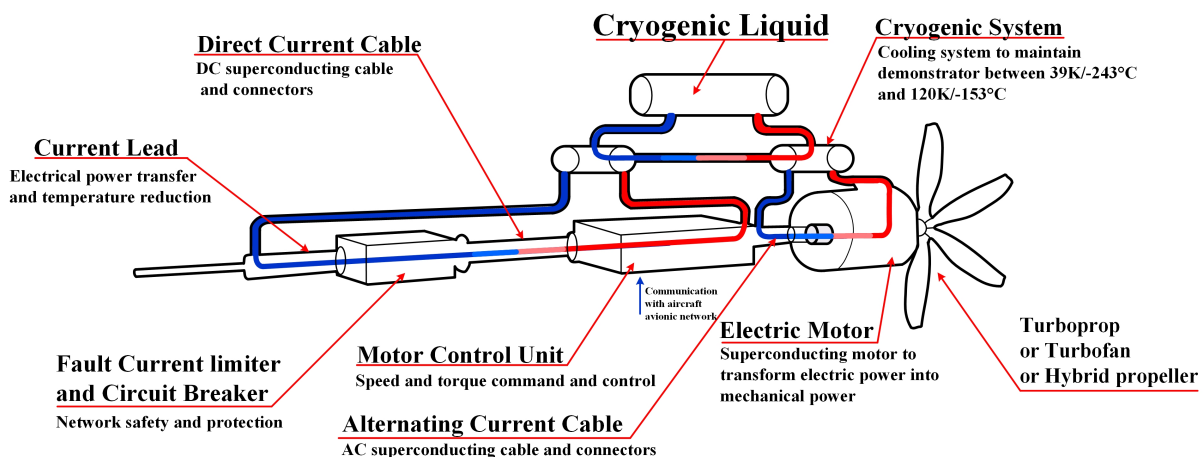


FIGURE 3.5 – Principe de fonctionnement du concept ASCEND pour la propulsion des avions zéro-émission à hydrogène.

L'association de l'hydrogène et des éléments supraconducteurs a déjà été explorée par les enseignants-chercheurs des deux axes de recherche concernant l'alimentation d'une bobine supraconductrice (alimentation en courant continu avec une tension quasi nulle) par une cellule de pile à combustible PEM dont la particularité est de produire une très faible tension [HBLD13]. En continuité de ces travaux préliminaires et dans le cadre de la collaboration avec SAFRAN sur le concept ASCEND, il serait intéressant d'exploiter la plateforme de production-stockage-valorisation de l'hydrogène développée sur le site de l'IUT de Longwy (voir Figure 3.6).

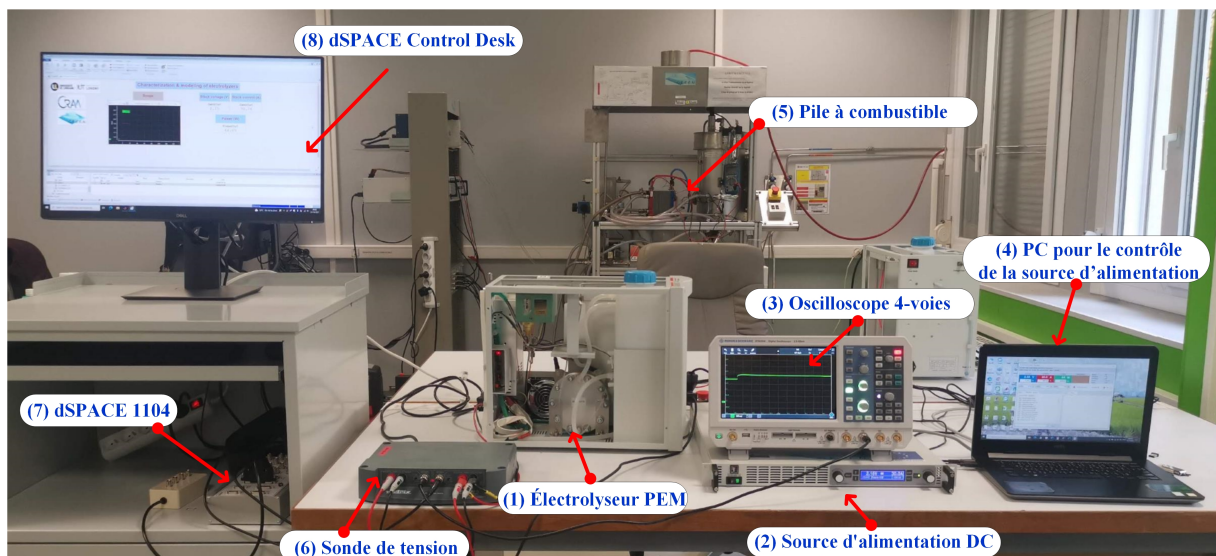


FIGURE 3.6 – Plateforme expérimentale hydrogène au laboratoire GREEN de l'IUT de Longwy.

En effet, cette plateforme pourra être utilisée pour la production d'hydrogène vert à partir de sources d'énergie renouvelables. L'IUT possède deux éoliennes et des panneaux solaires qui pourront être exploités dans cet objectif. Combinant l'hydrogène produit et les technologies de cryogénie, l'hydrogène pourra être conservé sous forme liquide. L'hydrogène liquide pourra être utilisé pour refroidir les composants électriques d'une chaîne de conversion d'énergie (par exemple, une éolienne), réduisant en conséquence les pertes électriques. De plus, les matériaux supraconducteurs pourront être maintenus à très faible température et contribuer à l'amélioration de la densité de puissance et de l'efficacité énergétique du système.

3.4 Conclusion

Ce troisième et dernier chapitre avait pour but de présenter des perspectives pédagogiques et de recherche suite à mon HDR. Les perspectives d'enseignement s'orientent en particulier sur la prise de nouvelles fonctions avec des responsabilités plus larges comme les relations internationales et également la gestion de formations comme le BUT, les licences professionnelles et de master. En ce qui concerne la recherche, les perspectives à moyen et long terme s'inscrivent directement en continuité de mes travaux présentés et synthétisés dans ce manuscrit. Ces dernières s'articulent autour de trois thématiques principales, à savoir le développement et la commande d'architectures d'électrolyseurs multi-stack, la gestion d'énergie des systèmes multi-sources incluant une chaîne d'énergie avec les technologies hydrogène (électrolyseur, réservoir de stockage, et pile à combustible) tenant compte de la dégradation des performances des appareils et de l'état de charge des réservoirs de stockage, et enfin l'association supraconductivité et hydrogène qui permettra d'installer de nouvelles coopérations motivantes entre les deux équipes de recherche des deux axes "chaînes de conversion électromécaniques" et "supraconductivité appliquée au génie électrique".

Bibliographie

- [ACD⁺20] Francesco Alonge, Stefania Maria Collura, Filippo D’Ippolito, Damien Guilbert, Massimiliano Luna, and Gianpaolo Vitale. Design of a robust controller for DC/DC converter-electrolyzer systems supplied by WECSs subject to highly fluctuating wind speed. *Control Engineering Practice*, 98 :104383, 2020.
- [AHGRG20] Ángel Hernández-Gómez, Victor Ramirez, and Damien Guilbert. Investigation of PEM electrolyzer modeling : Electrical domain, efficiency, and specific energy consumption. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(29) :14625 – 14639, 2020.
- [AHGRGS20] Ángel Hernández-Gómez, Victor Ramirez, Damien Guilbert, and Belem Saldivar. Development of an adaptive static-dynamic electrical model based on input electrical energy for PEM water electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(38) :18817 – 18830, 2020.
- [AHGRGS21a] Ángel Hernández-Gómez, Victor Ramirez, Damien Guilbert, and Belem Saldivar. Cell voltage static-dynamic modeling of a PEM electrolyzer based on adaptive parameters : Development and experimental validation. *Renewable Energy*, 163 :1508–1522, 2021.
- [AHGRGS21b] Ángel Hernández-Gómez, Victor Ramirez, Damien Guilbert, and Belem Saldivar. Self-Discharge of a Proton Exchange Membrane Electrolyzer : Investigation for Modeling Purposes. *Membranes*, 11(6) :379, 2021.
- [Apo20] Dimitrios Apostolou. Optimisation of a hydrogen production - storage - re-powering system participating in electricity and transportation markets. a case study for Denmark. *Applied Energy*, 265 :114800, 2020.
- [ARB⁺20] B. Abderezzak, D. Rekioua, R. Binns, K. Busawon, M. Hinaje, B. Douine, and D. Guilbert. Technical feasibility assessment of a PEM fuel cell refrigerator system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(19) :11211–11219, 2020.
- [ASB11] A. Awasthi, K. Scott, and S. Basu. Dynamic modeling and simulation of a proton exchange membrane electrolyzer for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(22) :14779 – 14786, 2011.
- [ATMS18] P. Ayivor, J. Torres, M. V. Meijden, and B. Stouwie. Modelling of large size electrolyzer for electrical grid stability studies in real time digital simulation. *Semantic scholar*, pages 1 – 8, 2018.
- [AWG15] Z. Abdin, C. J. Webb, and E. MacA. Gray. Modelling and simulation of a proton exchange membrane (PEM) electrolyser cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(39) :13243 – 13257, 2015.

- [BA12] A. Blinov and A. Andrijanoviš. New DC/DC Converter for Electrolyser Interfacing with Stand-Alone Renewable Energy System. *Electrical, Control and Communication Engineering*, 1 :24–29, 2012.
- [BAS⁺13] A. Di Blasi, L. Andaloro, S. Siracusano, N. Briguglio, G. Brunaccini, A. Stassi, A.S. Aricò, and V. Antonucci. Evaluation of materials and components degradation of a PEM electrolyzer for marine applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(18) :7612 – 7615, 2013.
- [BGM⁺21] Henning P.C. Buitendach, Rupert Gouws, Christiaan A. Martinson, Carel Minnaar, and Dmitri Bessarabov. Effect of a ripple current on the efficiency of a PEM electrolyser. *Results in Engineering*, 10 :100216, 2021.
- [BS18] Alexander Buttler and Hartmut Spliethoff. Current status of water electrolysis for energy storage, grid balancing and sector coupling via power-to-gas and power-to-liquids : A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82 :2440 – 2454, 2018.
- [BTG20] Nicu Bizon, Phatiphat Thounthong, and Damien Guilbert. Efficient Operation of the Hybrid Power System Using an Optimal Fueling Strategy and Control of the Fuel Cell Power Based on the Required Power Tracking Algorithm. *Sustainability*, 12(22), 2020.
- [CAP⁺22] Quentin Combe, Alireza Abasian, Serge Pierfederici, Mathieu Weber, and Stéphane Dufour. Control of a Three-Phase Current Source Rectifier for H₂ Storage Applications in AC Microgrids. *Energies*, 15(7) :2436, 2022.
- [CCBD22] Mengxing Chen, Shih-Feng Chou, Frede Blaabjerg, and Pooya Davari. Overview of Power Electronic Converter Topologies Enabling Large-Scale Hydrogen Production via Water Electrolysis. *Applied sciences*, 12(4) :1906, 2022.
- [CCG⁺18] G. Cirrincione, M. Cirrincione, D. Guilbert, A. Mohammadi, and V. Randazzo. Power Switch Open-Circuit Fault Detection in an Interleaved DC/DC Buck Converter for Electrolyzer Applications by Using Curvilinear Component Analysis. *2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, pages 2221–2225, 2018.
- [CFMS13] M. Carmo, D. L. Fritz, J. Mergel, and D. Stolten. A comprehensive review on PEM water electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(12) :4901 – 4934, 2013.
- [CFS21] Aruna Chandrasekar, Damian Flynn, and Eoin Syron. Operational challenges for low and high temperature electrolyzers exploiting curtailed wind energy for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(57) :28900–28911, 2021.
- [CGV⁺19] Stefania Maria Collura, Damien Guilbert, Gianpaolo Vitale, Massimiliano Luna, Francesco Alonge, Filippo D’Ippolito, and Angel Scipioni. Design and experimental validation of a high voltage ratio DC/DC converter for proton exchange membrane electrolyzer applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(14) :7059–7072, 2019.
- [cIOA14] Mustafa Ergin Şahin, Halil İbrahim Okumuş, and Mehmet Timur Aydemir. Implementation of an electrolysis system with DC/DC synchronous buck converter. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(13) :6802–6812, 2014.

-
- [CMG⁺15] M. Chandesris, V. Médeau, N. Guillet, S. Chelghoum, D. Thoby, and F. Fouda-Onana. Membrane degradation in PEM water electrolyzer : Numerical modeling and experimental evidence of the influence of temperature and current density. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(3) :1353 – 1366, 2015.
- [cPST⁺22] François Parache, Henri Schneider, Christophe Turpin, Nicolas Richet, Olivier Debellemanières, Éric Bru, Anh Thao Thieu, Caroline Bertail, and Christine Marot. Impact of Power Converter Current Ripple on the Degradation of PEM Electrolyzer Performances. *Membranes*, 12(2) :109, 2022.
- [CRH⁺21] Diego Concha, Hugues Renaudineau, Matías S. Hernández, Ana M. Llor, and Samir Kouro. Evaluation of DCX converters for off-grid photovoltaic-based green hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021.
- [CS19] Marcelo Carmo and Detlef Stolten. Chapter 4 - energy storage using hydrogen produced from excess renewable electricity : Power to hydrogen. In Paulo Emilio V. de Miranda, editor, *Science and Engineering of Hydrogen-Based Energy Technologies*, pages 165 – 199. Academic Press, 2019.
- [DABP17] Zsolt Dobó and Árpád Bence Palotás. Impact of the current fluctuation on the efficiency of Alkaline Water Electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(9) :5649 – 5656, 2017.
- [DOMSP19] M. David, C. Ocampo-Martínez, and R. Sánchez-Peña. Advances in alkaline water electrolyzers : A review. *Journal of Energy Storage*, 23 :392 – 403, 2019.
- [dW09] F. da Costa Lopes and E. H. Watanabe. Experimental and theoretical development of a PEM electrolyzer model applied to energy storage systems. In *2009 Brazilian Power Electronics Conference*, pages 775 – 782, 2009.
- [ELDP⁺18] Manuel Espinosa-López, Christophe Darras, Philippe Poggi, Raynal Glises, Philippe Baucour, André Rakotondrainibe, Serge Besse, and Pierre Serre-Combe. Modelling and experimental validation of a 46 kW PEM high pressure water electrolyzer. *Renewable Energy*, 119 :160 – 173, 2018.
- [FFOS⁺19] Steffen Henrik Frensch, Frédéric Fouda-Onana, Guillaume Serre, Dominique Thoby, Samuel Simon Araya, and Søren Knudsen Kær. Influence of the operation mode on PEM water electrolysis degradation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(57) :29889 – 29898, 2019.
- [FP20] D.S. Falcão and A.M.F.R. Pinto. A review on PEM electrolyzer modelling : Guidelines for beginners. *Journal of Cleaner Production*, 261 :121184, 2020.
- [FRG⁺13] S. Faivre, A. Ravey, D. Guilbert, A. N’Diaye, A. Gaillard, D. Bouquain, A. Djerdir, C. Higel, F. Harel, and D. Candusso. Part 2- Mobypost vehicle’s powertrain design and experimental validation. *5th Conference on Fundamentals and Development of Fuel Cells (FDFC 2013)*, 2013.
- [FTAM07] G. Fontes, C. Turpin, S. Astier, and T. A. Meynard. Interactions between fuel cells and power converters : Influence of current harmonics on a fuel cell stack. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 22(2) :670 – 678, 2007.
- [GBC⁺10] A. Garrigós, J.M. Blanes, J.A. Carrasco, J.L. Lizán, R. Beneito, and J.A. Molina. 5 kW DC/DC converter for hydrogen generation from photovoltaic sources. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(12) :6123–6130, 2010.
- [GBSM11] F. Gao, B. Blunier, M. G. Simões, and A. Miraoui. PEM Fuel Cell Stack Modeling for Real-Time Emulation in Hardware-in-the-Loop Applications. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 26(1) :184–194, 2011.

- [GCS17] Damien Guilbert, Stefania Maria Collura, and Angel Scipioni. DC/DC converter topologies for electrolyzers : State-of-the-art and remaining key issues. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(38) :23966–23985, 2017.
- [Gem03] Randall S. Gemmen. Analysis for the Effect of Inverter Ripple Current on Fuel Cell Operating Condition . *Journal of Fluids Engineering*, 125(3) :576 – 585, 2003.
- [Ger10] Mathias Gerard. *Fuel cell/System interaction study to optimize a fuel cell generator : -fuel cell/compressor interactions- -fuel cell/electrical converter interactions-*. Theses, Université de Franche-Comté, October 2010.
- [GGD18] V. Guida, D. Guilbert, and B. Douine. Candidate Interleaved DC-DC Buck Converters for Electrolyzers : State-of-the-Art and Perspectives. *2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I CPS Europe)*, pages 1–6, 2018.
- [GGD19] Vittorio Guida, Damien Guilbert, and Bruno Douine. Literature Survey of Interleaved DC-DC Step-Down Converters for Proton Exchange Membrane Electrolyzer Applications. *Transactions on Environment and Electrical Engineering*, 3(1) :33–43, 2019.
- [GGG⁺15] Damien Guilbert, Michael Guarisco, Arnaud Gaillard, Abdoul N’Diaye, and Abdesslem Djerdir. FPGA based fault-tolerant control on an interleaved DC/DC boost converter for fuel cell electric vehicle applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(45) :15815–15822, 2015.
- [GGM⁺15] Damien Guilbert, Arnaud Gaillard, Ali Mohammadi, Abdoul N’Diaye, and Abdesslem Djerdir. Investigation of the interactions between proton exchange membrane fuel cell and interleaved DC/DC boost converter in case of power switch faults. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(1) :519–537, 2015.
- [GGND13a] D. Guilbert, A. Gaillard, A. N’Diaye, and A. Djerdir. Energy efficiency and fault tolerance comparison of DC/DC converters topologies for fuel cell electric vehicles. *2013 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, pages 1–7, 2013.
- [GGND13b] Damien Guilbert, Arnaud Gaillard, Abdoul N’Diaye, and Abdesslem Djerdir. Comparaison de topologies de convertisseurs DC/DC entrelacés en cas de défauts d’interrupteur de puissance pour véhicule électrique à pile à combustible. *La Revue 3E.I.*, (74) :49–57, 2013.
- [GGND14] D. Guilbert, A. Gaillard, A. N’Diaye, and A. Djerdir. Diagnostic de défaut d’un convertisseur DC/DC boost entrelacé pour véhicules électriques à pile à combustible. *Symposium de Génie Electrique (SGE 2014)*, pages 1–10, 2014.
- [GGND15a] D. Guilbert, A. Gaillard, A. N’Diaye, and A. Djerdir. Fault-tolerant control for PEMFC and its DC/DC converter. *2015 5th International Youth Conference on Energy (IYCE)*, pages 1–6, 2015.
- [GGND15b] D. Guilbert, A. Gaillard, A. N’Diaye, and A. Djerdir. Power Switch Fault-Tolerant Control of a floating Interleaved Boost Converter for Fuel Cell Electric Vehicles. *6th International Conference on Fundamentals and Development of Fuel Cells (FDFC 2015)*, 2015.

-
- [GGND16] Damien Guilbert, Arnaud Gaillard, Abdoul N’Diaye, and Abdesslem Djerdir. Power switch failures tolerance and remedial strategies of a 4-leg floating interleaved DC/DC boost converter for photovoltaic/fuel cell applications. *Renewable Energy*, 90 :14–27, 2016.
- [GGSD18] V. Guida, D. Guilbert, A. Scipioni, and B. Douine. Convertisseurs DC-DC buck entrelacés candidats pour électrolyseurs : état de l’art et perspectives. *Symposium de Génie Electrique (SGE 2018)*, pages 1–10, 2018.
- [GGVD20] V. Guida, D. Guilbert, G. Vitale, and B. Douine. Design and Realization of a Stacked Interleaved DC-DC Step-Down Converter for PEM Water Electrolysis with Improved Current Control. *Fuel Cells*, 20(3) :307–315, 2020.
- [GGZR22] Frank Gambou, Damien Guilbert, Michel Zasadzinski, and Hugues Rafaralahy. A Comprehensive Survey of Alkaline Electrolyzer Modeling : Electrical Domain and Specific Electrolyte Conductivity. *Energies*, 15(9) :3452, 2022.
- [GKM⁺10] S. A. Grigoriev, A. A. Kalinnikov, P. Millet, V. I. Poremsky, and V. N. Fateev. Mathematical modeling of high-pressure PEM water electrolysis. *Journal of Applied Electrochemistry*, 40(5) :921 – 932, 2010.
- [GMG⁺13] D. Guilbert, A. Mohammadi, A. Gaillard, A. N’Diaye, and A. Djerdir. Interactions between fuel cell and DC/DC converter for fuel cell electric vehicle applications : Influence of faults. *IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pages 912–917, 2013.
- [GNGD16] Damien Guilbert, Abdoul N’Diaye, Arnaud Gaillard, and Abdesslem Djerdir. Fuel cell systems reliability and availability enhancement by developing a fast and efficient power switch open-circuit fault detection algorithm in interleaved DC/DC boost converter topologies. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(34) :15505–15517, 2016.
- [GNGD19] Damien Guilbert, Abdoul N’Diaye, Arnaud Gaillard, and Abdesslem Djerdir. Reliability improvement of a floating interleaved DC/DC boost converter in a PV/fuel cell stand-alone power supply. *EPE Journal*, 29(2) :49–63, 2019.
- [GNL⁺16] D. Guilbert, A. N’Diaye, P. Lubberda, A. Gaillard, and A. Djerdir. Amélioration de la fiabilité d’un convertisseur DC/DC boost entrelacé flottant pour des systèmes pile à combustible et photovoltaïques. *Symposium de Génie Electrique (SGE 2016)*, pages 1–10, 2016.
- [GNLD17] D. Guilbert, A. N’Diaye, P. Lubberda, and A. Djerdir. Fuel Cell Lifespan Optimization by Developing a Power Switch Fault-Tolerant Control in a Floating Interleaved Boost Converter. *Fuel Cells*, 17(2) :196–209, 2017.
- [GNMP⁺22] Damien Guilbert, Babak Nahid-Mobarakeh, Serge Pierfederici, Nicu Bizon, Pongsiri Mungporn, and Phatiphat Thounthong. Comparative Study of Adaptive Hamiltonian Control Laws for DC Microgrid Stabilization : An Fuel Cell Boost Converter. *Applied Science and Engineering Progress*, 15(3) :5540, 2022.
- [GS18] D. Guilbert and A. Scipioni. Validation expérimentale d’un modèle dynamique électrique d’un électrolyseur de type PEM pour des applications électronique de puissance. *Symposium de Génie Electrique (SGE 2018)*, pages 1–10, 2018.
- [GSV20] Damien Guilbert, Dario Sorbera, and Gianpaolo Vitale. A stacked interleaved DC-DC buck converter for proton exchange membrane electrolyzer applications : Design and experimental validation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(1) :906 – 914, 2020.

- [Gui14] D. Guilbert. Dimensionnement des composants magnétiques d'un convertisseur DC/DC boost entrelacé tolérant aux défauts pour des applications véhicule électrique à pile à combustible. *Conférence des jeunes chercheurs en génie électrique (JCGE'14)*, pages 1–9, 2014.
- [Gui18] Damien Guilbert. Retour d'expérience sur l'utilisation de maquettes d'éoliennes en GEII. *Revue des départements Génie Electrique & Informatique Industrielle des Instituts Universitaires de Technologie*, (92), 2018.
- [Gui19] Damien Guilbert. Production d'hydrogène par électrolyse de l'eau : son stockage et sa valorisation à travers une pile à combustible. *Revue des départements Génie Electrique & Informatique Industrielle des Instituts Universitaires de Technologie*, (93), 2019.
- [Gui21] D. Guilbert. Comment l'hydrogène peut contribuer à stocker l'électricité à grande échelle. *The Conversation*, 2021.
- [GV18] D. Guilbert and G. Vitale. Experimental validation of an equivalent dynamic electrical model for a proton exchange membrane electrolyzer. *2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I CPS Europe)*, pages 1 – 6, 2018.
- [GV19a] D. Guilbert and G. Vitale. Dynamic emulation of a PEM electrolyzer by time constant based exponential model. *Energies*, 12(4) :750, 2019.
- [GV19b] D. Guilbert and G. Vitale. Optimal Hydrogen Production from Direct Coupled Variable Speed Wind Generator with a Stacked Interleaved Buck converter. *2019 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2019 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I CPS Europe)*, pages 1–6, 2019.
- [GV20a] D. Guilbert and G. Vitale. Variable Parameters Model of a PEM Electrolyzer Based Model Reference Adaptive System Approach. *2020 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2020 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I CPS Europe)*, pages 1–6, 2020.
- [GV20b] Damien Guilbert and Gianpaolo Vitale. Improved Hydrogen-Production-Based Power Management Control of a Wind Turbine Conversion System Coupled with Multistack Proton Exchange Membrane Electrolyzers. *Energies*, 13(5), 2020.
- [GV21] Damien Guilbert and Gianpaolo Vitale. Hydrogen as a Clean and Sustainable Energy Vector for Global Transition from Fossil-Based to Zero-Carbon. *Clean Technologies*, 3(4) :881–909, 2021.
- [GVEU12] R. García-Valverde, N. Espinosa, and A. Urbina. Simple PEM water electrolyser model and experimental validation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(2) :1927 – 1938, 2012.
- [GVRGVHMS20] Pedro Martín García-Vite, Brenda Lizeth Reyes-García, Cynthia Lucero Valdez-Hernández, and A.L. Martínez-Salazar. Microcontroller-based emulation of a PEM fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(26) :13767–13776, 2020.

-
- [GYK⁺19] D. Guilbert, B. Yodwong, W. Kaewmanee, M. Phattanasak, and M. Hinaje. Hydrogen Flow Rate Control of a Proton Exchange Membrane Electrolyzer. *2019 Research, Invention, and Innovation Congress (RI2C)*, pages 1–6, 2019.
- [GYKP18] D. Guilbert, B. Yodwong, W. Kaewmanee, and M. Phattanasak. Power converters for hybrid renewable energy systems with hydrogen buffer storage : A short review. *2018 International Conference on Smart Grid (icSmartGrid)*, pages 28–33, 2018.
- [HBLD13] Melika Hinaje, Kévin Berger, Jean Lévêque, and Bernard Davat. Alimentation d’une bobine supraconductrice par une pile à combustible H₂/O₂ (PEM). *Journées plénières du GDR PACS, "Piles à Combustible, Systèmes"*, pages p. 16, id. S–1, 2013.
- [HHC⁺13] C. Higel, F. Harel, D. Candusso, S. Faivre, A. Ravey, D. Guilbert, A. N’Diaye, D. Bouquain, A. Djerdir, and A. Gaillard. Part 1 : Mobyost vehicle’s power-train modeling, simulation and sizing. *5th Conference on Fundamentals and Development of Fuel Cells (FDFC 2013)*, 2013.
- [HRN⁺12] M. Hinaje, S. Rael, P. Noiying, D. A. Nguyen, and B. Davat. An equivalent electrical circuit model of proton exchange membrane fuel cells based on mathematical modelling. *Energies*, 5(8) :2724 – 2744, 2012.
- [IHM06] M. Ilic, B. Hesterman, and D. Maksimovic. Interleaved zero current transition three-level buck converter. In *Twenty-First Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2006. APEC '06.*, pages 7 pp.–, 2006.
- [KA11] M. Kolhe and O. Atlam. Empirical electrical modeling for a proton exchange membrane electrolyzer. In *2011 International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices*, pages 131 – 134, 2011.
- [KE19] M. KOUNDI and H. EL FADIL. Mathematical modeling of PEM electrolyzer and design of a voltage controller by the smpwm approach. In *2019 International Conference on Power Generation Systems and Renewable Energy Technologies (PGSRET)*, pages 1 – 6, 2019.
- [KGD⁺15] Abdelfatah Kolli, Arnaud Gaillard, Alexandre De Bernardinis, Olivier Bethoux, Daniel Hissel, and Zoubir Khatir. A review on DC/DC converter architectures for power fuel cell applications. *Energy Conversion and Management*, 105 :716–730, 2015.
- [KH19] S. S. Kumar and V. Himabindu. Hydrogen production by PEM water electrolysis – a review. *Materials Science for Energy Technologies*, 2(3) :442 – 454, 2019.
- [KKC⁺21] R. Kumar, S. Kumar, G. Cirrincione, M. Cirrincione, D. Guilbert, K. Ram, and A. Mohammadi. Power Switch Open-Circuit Fault-Diagnosis Based on a Shallow Long-Short Term Memory Neural Network : Investigation of an Interleaved Buck Converter for Electrolyser applications. *The Thirteenth Annual Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, pages 1–6, 2021.
- [KPR⁺21] Joonas Koponen, Anton Poluektov, Vesa Ruuskanen, Antti Kosonen, Markku Niemelä, and Jero Ahola. Comparison of thyristor and insulated-gate bipolar transistor -based power supply topologies in industrial water electrolysis applications. *Journal of Power Sources*, 491 :229443, 2021.

- [KRK⁺19] J. Koponen, V. Ruuskanen, A. Kosonen, M. Niemelä, and J. Ahola. Effect of converter topology on the specific energy consumption of alkaline water electrolyzers. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 34(7) :6171 – 6182, 2019.
- [KWI⁺19] F.N. Khatib, Tabbi Wilberforce, Oluwatosin Ijaodola, Emmanuel Ogungbemi, Zaki El-Hassan, A. Durrant, J. Thompson, and A.G. Olabi. Material degradation of components in polymer electrolyte membrane PEM electrolytic cell and mitigation mechanisms : A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 111 :1 – 14, 2019.
- [KYS⁺21] W. Kaewmanee, B. Yodwong, S. Sikkabut, M. Phattanasak, and D. Guilbert. A New Low-Cost Hardware-In-The-Loop Simulator for Control of Power Electronics Systems Laboratory. *2021 Research, Invention, and Innovation Congress (RI2C)*, pages 1–6, 2021.
- [LL09] M. E. Lebbal and S. Lecoeuche. Identification and monitoring of a PEM electrolyser based on dynamical modelling. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(14) :5992 – 5999, 2009.
- [LSA⁺18] V. Liso, G. Savoia, S. S. Araya, G. Cinti, and S. K. Kaer. Modelling and experimental analysis of a polymer electrolyte membrane water electrolysis cell at different operating temperatures. *Energies*, 11(12) :3273, 2018.
- [MBG⁺14] N. Marx, L. Boulon, F. Gustin, D. Hissel, and K. Agbossou. A review of multi-stack and modular fuel cell systems : Interests, application areas and on-going research activities. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(23) :12101–12111, 2014.
- [MGG⁺13] A. Mohammadi, D. Guilbert, A. Gaillard, D. Bouquain, D. Khaburi, and A. Djerdir. Faults diagnosis between PEM fuel cell and DC/DC converter using neural networks for automotive applications. *IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pages 8186–8191, 2013.
- [MGZR21] Rebah Maamouri, Damien Guilbert, Michel Zasadzinski, and Hugues Rafaralahy. Proton exchange membrane water electrolysis : Modeling for hydrogen flow rate control. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(11) :7676–7700, 2021.
- [MPV⁺09] Giuseppe Marsala, Marcello Pucci, Gianpaolo Vitale, Maurizio Cirrincione, and Abdellatif Miraoui. A prototype of a fuel cell PEM emulator based on a buck converter. *Applied Energy*, 86(10) :2192–2203, 2009.
- [MRdG⁺12] P. Millet, A. Ranjbari, F. de Guglielmo, S.A. Grigoriev, and F. Auprêtre. Cell failure mechanisms in PEM water electrolyzers. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(22) :17478 – 17487, 2012.
- [MSC09] F. Marangio, M. Santarelli, and M. Cali. Theoretical model and experimental analysis of a high pressure PEM water electrolyser for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(3) :1143 – 1158, 2009.
- [MTY⁺20] P. Mungporn, P. Thounthong, B. Yodwong, C. Ekkaravarodome, A. Bilsalam, S. Pierfederici, D. Guilbert, B. Nahid-Mobarakeh, N. Bizon, Z. Shah, S. Khomfoi, P. Kumam, and P. Burikham. Modeling and Control of Multi-phase Interleaved Fuel-Cell Boost Converter Based on Hamiltonian Control

-
- Theory for Transportation Applications. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 6(2) :519–529, 2020.
- [MYT⁺19a] P. Mungporn, B. Yodwong, P. Thounthong, C. Ekkaravarodome, A. Bilsalam, B. Nahid-Mobarakeh, S. Pierfederici, D. Guilbert, N. Bizon, S. Khomfoi, P. Kumam, Z. Shah, P. Burikham, and C. Kaewprapha. Study of Hamiltonian Energy Control of Multiphase Interleaved Fuel Cell Boost Converter. *2019 Research, Invention, and Innovation Congress (RI2C)*, pages 1–6, 2019.
- [MYT⁺19b] P. Mungporn, B. Yodwong, P. Thounthong, B. Nahid-Mobarakeh, N. Takorabet, D. Guilbert, P. Kumam, N. Bizon, and C. Kaewprapha. Model-Free Control of Multiphase Interleaved Boost Converter for Fuel Cell/Reformer Power Generation. *2019 Research, Invention, and Innovation Congress (RI2C)*, pages 1–6, 2019.
- [NCB08] J. Nie, Y. Chen, and R. F. Boehm. Numerical modeling of two-phase flow in a bipolar plate of a PEM electrolyzer cell. In : *ASME 2008 International mechanical engineering congress and exposition. American Society of Mechanical Engineers*, 10 :783 – 788, 2008.
- [NCC⁺09] J. Nie, Y. Chen, S. Cohen, B. D. Carter, and R. F. Boehm. Numerical and experimental study of three-dimensional fluid flow in the bipolar plate of a PEM electrolysis cell. *International Journal of Thermal Sciences*, 48(10) :1914 – 1922, 2009.
- [OBB16] P. Olivier, C. Bourasseau, and B. Bouamama. Modelling, simulation and analysis of a PEM electrolysis system. *IFAC-PapersOnLine*, 49(12) :1014 – 1019, 2016. 8th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management and Control MIM 2016.
- [OBB17] P. Olivier, C. Bourasseau, and Pr. B. Bouamama. Low-temperature electrolysis system modelling : A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78 :280 – 300, 2017.
- [PAST⁺20] Georgios Papakonstantinou, Gerardo Algara-Siller, Detre Teschner, Tanja Vidaković-Koch, Robert Schlögl, and Kai Sundmacher. Degradation study of a proton exchange membrane water electrolyzer under dynamic operation conditions. *Applied Energy*, 280 :115911, 2020.
- [RKB⁺11] D. Rezzak, F. Khoucha, M. Benbouzid, A. Kheloui, and A. Mamoune. A DC-DC converter-based PEM fuel cell system emulator. *2011 International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*, pages 1–6, 2011.
- [RKS⁺18] V. Ruuskanen, J. Koponen, T. Sillanpää, K. Huoman, A. Kosonen, M. Niemelä, and J. Ahola. Design and implementation of a power-hardware-in-loop simulator for water electrolysis emulation. *Renewable Energy*, 119 :106 – 115, 2018.
- [RPS⁺05] J.R. Rodriguez, J. Pontt, C. Silva, E.P. Wiechmann, P.W. Hammond, F.W. Santucci, R. Alvarez, R. Musalem, S. Kouro, and P. Lezana. Large current rectifiers : State of the art and future trends. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 52(3) :738–746, 2005.
- [RTKH16] A. H. A. Rahim, A. S. Tijani, S. K. Kamarudin, and S. Hanapi. An overview of polymer electrolyte membrane electrolyzer for hydrogen production : Modeling and mass transport. *Journal of Power Sources*, 309 :56 – 65, 2016.

- [RTS⁺14] A. H. A. Rahim, A. S. Tijani, F. H. Shukri, S. Hanapi, and K. I. Sainan. Mathematical modelling and simulation analysis of PEM electrolyzer system for hydrogen production. In *3rd IET International Conference on Clean Energy and Technology (CEAT) 2014*, pages 1 – 7, 2014.
- [SAY10] A. S. Samosir, M. Anwari, and A. H. M. Yatim. A simple PEM fuel cell emulator using electrical circuit model. *2010 Conference Proceedings IPEC*, pages 881–885, 2010.
- [SBB19] Friedrich-W. Speckmann, Steffen Bintz, and Kai Peter Birke. Influence of rectifiers on the energy demand and gas quality of alkaline electrolysis systems in dynamic operation. *Applied Energy*, 250 :855 – 863, 2019.
- [SFBW13] J. Solanki, N. Fröhleke, J. Böcker, and P. Wallmeier. Comparison of Thyristor-Rectifier with Hybrid Filter and Chopper-Rectifier for High-Power, High-Current Application. 2013.
- [SMC09] M. Santarelli, P. Medina, and M. Cali. Fitting regression model and experimental validation for a high-pressure PEM electrolyzer. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(6) :2519 – 2530, 2009.
- [SPG⁺21] Songklod Sriprang, Nitchamon Poonnoy, Damien Guilbert, Babak Nahid-Mobarakeh, Nouredine Takorabet, Nicu Bizon, and Phatiphat Thounthong. Design, Modeling, and Differential Flatness Based Control of Permanent Magnet-Assisted Synchronous Reluctance Motor for e-Vehicle Applications. *Sustainability*, 13(17), 2021.
- [SSC13] J. P. Stempien, Q. Sun, and S. H. Chan. Solid oxide electrolyzer cell modeling : A review. *Journal of Power Technologies*, 93(4) :216 – 246, 2013.
- [St16] Cinda Luz Sandoval torres. *Contrôle d’une source d’énergie hybride : Pile à combustible-Supercondensateur*. Theses, Ecole nationale supérieure d’arts et métiers - ENSAM ; Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (Cuernavaca, Mor., México), December 2016.
- [TBB18] Alhassan Salami Tijani, Nur Afiqah Binti Kamarudin, and Fatin Athirah Binti Mazlan. Investigation of the effect of charge transfer coefficient (CTC) on the operating voltage of polymer electrolyte membrane (PEM) electrolyzer. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(19) :9119 – 9132, 2018.
- [TFA⁺19] Somayeh Toghyani, Soheil Fakhradini, Ebrahim Afshari, Ehsan Baniasadi, Mohammad Yaghoub Abdollahzadeh Jamalabadi, and Mostafa Safdari Shadloo. Optimization of operating parameters of a polymer exchange membrane electrolyzer. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(13) :6403 – 6414, 2019.
- [TGL⁺18] G. Tjarks, A. Gibelhaus, F. Lanzerath, M. Müller, A. Bardow, and D. Stolten. Energetically-optimal PEM electrolyzer pressure in power-to-gas plants. *Applied Energy*, 218 :192 – 198, 2018.
- [TMG⁺21] Phatiphat Thounthong, Pongsiri Mungporn, Damien Guilbert, Nouredine Takorabet, Serge Pierfederici, Babak Nahid-Mobarakeh, Yihua Hu, Nicu Bizon, Yigeng Huangfu, and Poom Kumam. Design and control of multiphase interleaved boost converters-based on differential flatness theory for PEM fuel cell multi-stack applications. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 124 :106346, 2021.

-
- [TMN⁺21] P. Thounthong, P. Mungporn, B. Nahid-Mobarakeh, N. Bizon, S. Pierfederici, and D. Guilbert. Improved Adaptive Hamiltonian Control Law for Constant Power Load Stability Issue in DC Microgrid : Case Study for Multiphase Interleaved Fuel Cell Boost Converter. *Sustainability*, 13(14) :8093, 2021.
- [TMP⁺20] Phatiphat Thounthong, Pongsiri Mungporn, Serge Pierfederici, Damien Guilbert, and Nicu Bizon. Adaptive Control of Fuel Cell Converter Based on a New Hamiltonian Energy Function for Stabilizing the DC Bus in DC Microgrid Applications. *Mathematics*, 8(11), 2020.
- [TMP⁺21] P. Thounthong, P. Mungporn, S. Pierfederici, D. Guilbert, N. Takorabet, B. Nahid-Mobarakeh, Y. Hu, N. Bizon, Y. Huangfu, P. Kumam, and P. Burikham. Robust Hamiltonian-Energy Control Based on Lyapunov Function for Four-Phase Parallel Fuel Cell Boost Converter for DC Microgrid Applications. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 12(3) :1500–1511, 2021.
- [TPG⁺20] Phatiphat Thounthong, Matheepot Phattanasak, Damien Guilbert, Nouredine Takorabet, Serge Pierfederici, Babak Nahid-Mobarakeh, Nicu Bizon, and Poom Kumam. Differential Flatness Based-Control Strategy of a Two-Port Bidirectional Supercapacitor Converter for Hydrogen Mobility Applications. *Energies*, 13(11), 2020.
- [UGS12] A. Ursúa, L. M. Gandía, and P. Sanchis. Hydrogen production from water electrolysis : Current status and future trends. *IEEE*, 100(2) :410 – 426, 2012.
- [UMG⁺09] A. Ursúa, L. Marroyo, E. Gubía, L. M. Gandía, P. M. Diéguez, and P. Sanchis. Influence of the power supply on the energy efficiency of an alkaline water electrolyser. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(8) :3221–3233, 2009.
- [V. 19] V. Guida and D. Guilbert and G. Vitale and B. Douine. Control of a synchronous stack interleaved DC-DC buck converter for proton exchange membrane electrolyzer applications. *8th International Conference on Fundamentals and Development of Fuel Cells (FDFC 2019)*, 2019.
- [VB18] Immanuel Vincent and Dmitri Bessarabov. Low cost hydrogen production by anion exchange membrane electrolysis : A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81 :1690 – 1704, 2018.
- [VCG21] Gianpaolo Vitale, Fabiola Castaldi, and Damien Guilbert. Design of a LLC Resonant Converter for Powering a PEM Electrolyzers. *19th International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPPQ'21), Almeria (Spain), 28th to 30th July 2021*, pages 1–7, 2021.
- [WB19] J. Webster and C. Bode. Implementation of a non-discretized multiphysics PEM electrolyzer model in modelica[®]. *Proceedings of the 13th International Modelica Conference*, pages 833 – 840, 2019.
- [WGH⁺08] B. Wahdame, L. Girardot, D. Hissel, F. Harel, X. Francois, D. Candusso, M. C. Pera, and L. Dumercy. Impact of power converter current ripple on the durability of a fuel cell stack. In *2008 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, pages 1495 – 1500, 2008.
- [WGH19] Hanqing Wang, Arnaud Gaillard, and Daniel Hissel. A review of DC/DC converter-based electrochemical impedance spectroscopy for fuel cell electric vehicles. *Renewable Energy*, 141 :124–138, 2019.

- [WH08] Josh Wibben and Ramesh Harjani. A High-Efficiency DC-DC Converter Using 2 nH Integrated Inductors. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 43(4) :844–854, 2008.
- [YGH⁺21] Burin Yodwong, Damien Guilbert, Melika Hinaje, Matheepot Phattanasak, Wattana Kaewmanee, and Gianpaolo Vitale. Proton Exchange Membrane Electrolyzer Emulator for Power Electronics Testing Applications. *Processes*, 9(3), 2021.
- [YGK⁺21] B. Yodwong, D. Guilbert, W. Kaewmanee, M. Phattanasak, M. Hinaje, and G. Vitale. Modified Sliding Mode-Based Control of a Three-Level Interleaved DC-DC Buck Converter for Proton Exchange Membrane Water Electrolysis. *2021 Research, Invention, and Innovation Congress (RI2C)*, pages 1–6, 2021.
- [YGKP19] Burin Yodwong, Damien Guilbert, Wattana Kaewmanee, and Matheepot Phattanasak. Energy Efficiency Based Control Strategy of a Three-Level Interleaved DC-DC Buck Converter Supplying a Proton Exchange Membrane Electrolyzer. *Electronics*, 8(9), 2019.
- [YGP⁺20a] Burin Yodwong, Damien Guilbert, Matheepot Phattanasak, Wattana Kaewmanee, Melika Hinaje, and Gianpaolo Vitale. AC-DC Converters for Electrolyzer Applications : State of the Art and Future Challenges. *Electronics*, 9(6), 2020.
- [YGP⁺20b] Burin Yodwong, Damien Guilbert, Matheepot Phattanasak, Wattana Kaewmanee, Melika Hinaje, and Gianpaolo Vitale. Faraday’s Efficiency Modeling of a Proton Exchange Membrane Electrolyzer Based on Experimental Data. *Energies*, 13(18), 2020.
- [YGP⁺20c] Burin Yodwong, Damien Guilbert, Matheepot Phattanasak, Wattana Kaewmanee, Melika Hinaje, and Gianpaolo Vitale. Proton Exchange Membrane Electrolyzer Modeling for Power Electronics Control : A Short Review. *C*, 6(2), 2020.
- [YMT⁺19] B. Yodwong, P. Mungporn, P. Thounthong, B. Nahid-Mobarakeh, N. Takorabet, D. Guilbert, N. Bizon, P. Kumam, and C. Kaewprapha. Model Based Control of Battery/Supercapacitor Hybrid Source for Modern e-Vehicle. *2019 Research, Invention, and Innovation Congress (RI2C)*, pages 1–7, 2019.
- [YTGB20] Burin Yodwong, Phatiphat Thounthong, Damien Guilbert, and Nicu Bizon. Differential Flatness-Based Cascade Energy/Current Control of Battery/Supercapacitor Hybrid Source for Modern e-Vehicle Applications. *Mathematics*, 8(5), 2020.
- [ZF09] Tao Zhou and Bruno Francois. Modeling and control design of hydrogen production process for an active hydrogen/wind hybrid power system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(1) :21–30, 2009.
- [ZGZ⁺19] Yuedong Zhan, Youguang Guo, Jianguo Zhu, Bo Liang, and Biao Yang. Comprehensive influences measurement and analysis of power converter low frequency current ripple on PEM fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(59) :31352 – 31359, 2019.
- [ZVB19] Siniša Zorica, Marko Vukšić, and Tihomir Betti. Design considerations of the multi-resonant converter as a constant current source for electrolyser utilisation. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 111 :237–247, 2019.

Abstract

The first part of this HDR dissertation is devoted to my education and professional background, my research, teaching and administrative activities, the national and international projects in which I participated, and a list of my publications. Thereafter, my research work carried out within the GREEN laboratory since my recruitment in September 2016 is synthesized. These research works are mainly focused on the modeling of the proton exchange membrane (PEM) electrolyzer taking into account dynamic operations, on the development of an electrolyzer emulator making it possible to test and validate new DC-DC converter topologies and their controls without damaging a physical PEM electrolyzer, and on the power electronics interfacing renewable energy sources and the PEM electrolyzer combined with its control. Finally, pedagogical and also medium and long-term research perspectives are given. These are mainly based on preliminary works related to technical challenges for the large-scale dissemination of PEM electrolyzer technology.

Keywords: Renewable energy sources, Electrolyzer, Modeling, Power electronics, Control.

Résumé

La première partie de ce mémoire d'HDR est consacrée à mon parcours personnel, mes activités de recherche, d'enseignement, administratives, les projets nationaux et internationaux auxquels j'ai participé et une liste de mes publications. Par la suite, mes travaux de recherche effectués au sein du laboratoire GREEN depuis mon recrutement en septembre 2016 sont synthétisés. Ces travaux de recherche se concentrent principalement sur la modélisation de l'électrolyseur à membrane échangeuse de protons (PEM) tenant compte des fonctionnements dynamiques, sur le développement d'un émulateur d'électrolyseur permettant de tester et de valider de nouvelles structures de conversion d'énergie et leurs commandes sans endommager un électrolyseur PEM physique, et sur l'électronique de puissance interfaçant des sources d'énergies renouvelables et l'électrolyseur PEM associée à sa commande. Enfin, des perspectives pédagogiques et également de recherche à moyen et long terme sont données. Ces dernières sont principalement basées sur des travaux préliminaires en lien avec des défis techniques pour la diffusion à grande échelle de la technologie d'électrolyseur PEM.

Mots-clés: Sources d'énergies renouvelables, Électrolyseur, Modélisation, Électronique de puissance, Commande.

