

**Denis Candusso,
Chargé de recherche à l'IFSTTAR LTN**

**CV pour une candidature à l'HDR par l'ENS Cachan
Ecole Doctorale Sciences Pratiques (EDSP)**



I. Notice individuelle et CV

I.1. Etat civil

- NOM et prénom : CANDUSSO Denis
- Né le 10 octobre 1974 à Châlons-sur-Marne (51).
- Marié. Trois enfants.

- Chargé de recherche (CR1) à l'IFSTTAR (Institut Français des Sciences et Technologies des Transports de l'Aménagement et des Réseaux) issu de la fusion en janvier 2011 de l'INRETS (Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité) et du LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées). Site internet de l'EPST : <http://www.ifsttar.fr/>
- Membre de l'Equipe de Recherche en Evolution (ERE) Laboratoire des Technologies Nouvelles (LTN) de Versailles Satory (78). Directeur : Gérard COQUERY. Directeur adjoint : Zoubir KHATIR. Localisé à Belfort (90), sur la plateforme d'essais de générateurs à piles à combustibles (PAC). Sites internet : <http://www.fclab.fr/> et <http://www.ineva-cnrt.com/>.

- Discipline de rattachement : Génie électrique.

- Adresse professionnelle :
Plateforme Systèmes Pile à combustible, 13 rue Ernest Thierry Mieg, Bât. F, F 90010 Belfort Cedex.
- Téléphone : 03 84 58 36 33
- Télécopie : 03 84 58 36 36
- Courriel : denis.candusso@ifsttar.fr
- Page internet : <http://www.inrets.fr/ur/ltn/energie/pileacombustible2.htm>

I.2. Diplômes - Titres Universitaires

- Une qualification 63^{ème} section CNU obtenue en 2003.
- Doctorat INP Grenoble, spécialité Génie Electrique, obtenu le 29 novembre 2002. Mention très honorable et félicitations du jury. Ecole doctorale "Electronique, Electrotechnique, Traitement du Signal" (EEATS). Thèse réalisée au Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble (LEG, actuellement G2ELAB); collaboration avec le CEA Grenoble. Titre du mémoire : "Hybridation du groupe électrogène à pile à combustible pour l'alimentation d'un véhicule électrique".
- DEA Génie Electrique INPG, obtenu en juin 1998. Mention bien. Ecole doctorale EEATS. Titre du rapport : "Véhicule électrique à source hybride - batteries, supercondensateurs".
- Ingénieur de l'Ecole Nationale Supérieure des Arts et Industries de Strasbourg (ENSAIS, actuel INSA Strasbourg), filière "Electrotechnique, Electronique Industrielle" (EEI), obtenu en juillet 1997.

I.3. Parcours

- CR1 à l'INRETS puis à l'IFSTTAR depuis janvier 2009.
- D'avril 2003 à décembre 2010 : CR2 à l'INRETS.
- D'octobre 2002 à mars 2003 : ATER à l'INP Grenoble – ENSIEG – Laboratoire LEG.

I.4. Résumé de l'activité de recherche

Mes travaux portent sur la caractérisation et l'analyse expérimentale de générateurs pile à combustible (PAC) en vue de leur intégration dans les systèmes de transport. Les activités menées à l'IFSTTAR / INRETS se caractérisent par une approche expérimentale forte, justifiée par la nécessaire détermination des performances des piles existantes, par l'évaluation de leurs durées de vie et de leurs modes de défaillance sous les contraintes réelles des applications embarquées. La démarche scientifique adoptée mêle étroitement expérimentation, analyse des phénomènes et diagnostic, modélisation de l'expérience et modélisation physique (Fig. 1). D'un point de vue contractuel, les actions de recherche auxquelles je participe s'inscrivent dans différents projets nationaux et européens. La possibilité m'est aussi donnée de participer à des activités de formation par et à la recherche dans le cadre des cursus proposés à des étudiants de 3^{ème} cycle à Belfort et en Ile-de-France. Les recherches sur les PAC à l'IFSTTAR font l'objet d'un partenariat important avec les personnels et organismes présents sur la plateforme de l'UTBM ; les travaux concernent la durée de vie, la fiabilité et l'intégration des PAC dans les systèmes de transports (partenaires principaux : CEA, CNRS, ENSEM, IFSTTAR / INRETS, UFC, UTBM). L'implication de l'IFSTTAR sur la plateforme belfortaine est principalement motivée par le besoin d'expérimenter sur des objets possédant des niveaux de puissance significatifs pour les applications véhicule (Fig. 2), et l'objectif final est d'accéder au retour d'expérience technologique et fonctionnelle des PAC dans le domaine des transports.

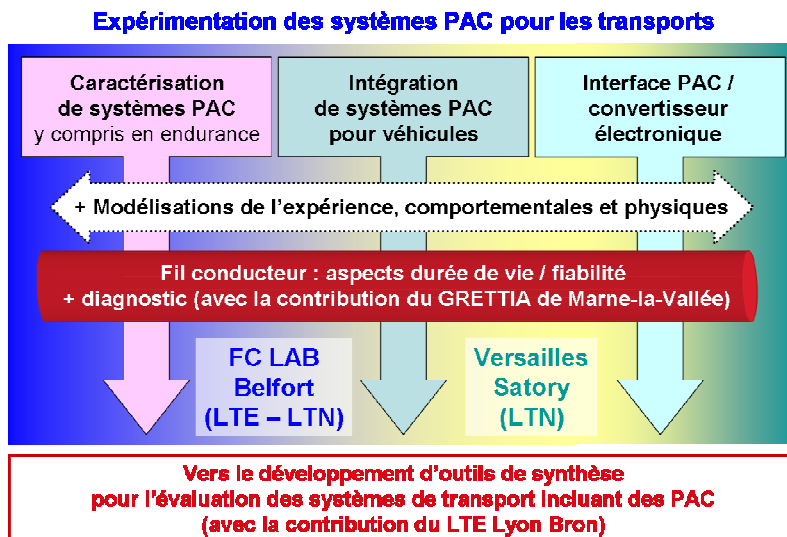


Fig. I.4.1 :
Recherches menées à
l'IFSTTAR sur les
générateurs PAC embarqués.

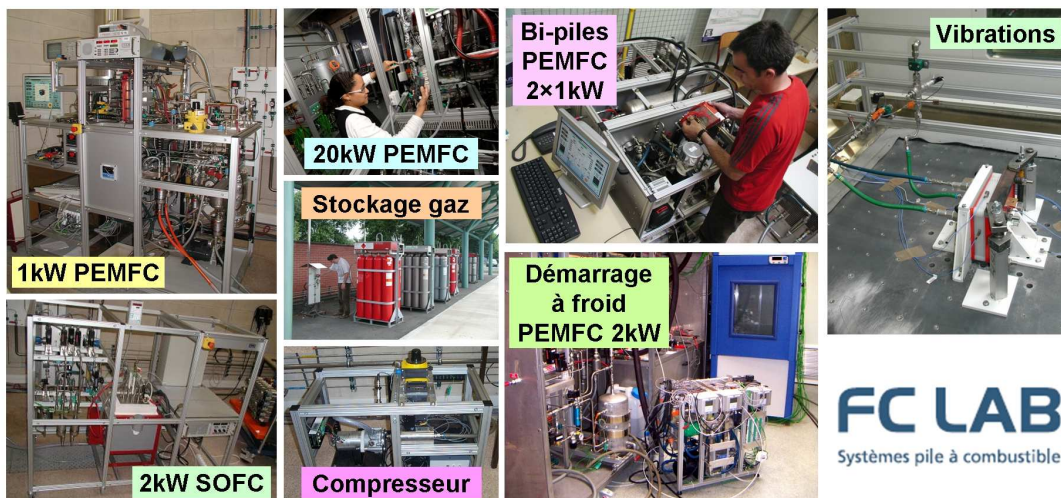


Fig. I.4.2 : L'IFSTTAR contribue à des recherches expérimentales originales sur des PAC aux niveaux de puissances significatifs et dans des conditions d'usage liées aux applications transport.

II. Synthèse des travaux de recherche. Description des principaux résultats, projets, perspectives

Du point de vue de sa thématique, mon activité de recherche à l'IFSTTAR s'inscrit dans la continuité de mes travaux réalisés en DEA, en thèse de doctorat et en tant qu'ATER au Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble (LEG).

II.1. Contexte général des recherches menées à l'IFSTTAR sur le générateur PAC

Les activités de recherches de l'IFSTTAR sur les PAC sont étroitement liées aux contextes actuels, nationaux et internationaux, du véhicule "décarboné" et de la réduction des émissions de gaz à effet de serre. L'IFSTTAR, en particulier grâce à deux de ses laboratoires (LTE - LTN : Laboratoire Transports et Environnement - Laboratoire des Technologies Nouvelles), apporte des réponses sur ces thématiques dans le champ de la technologie :

- par l'évaluation du potentiel de développement de groupes électrogènes à PAC embarqués pour chaînes de traction innovantes (avec pour objectif d'aboutir à une meilleure vision des facteurs clés / verrous permettant l'émergence d'applications),
- et par la contribution à des recherches sur ces systèmes (accompagnement des développements scientifiques, technologiques et industriels).

Les travaux sur les PAC font actuellement partie intégrante d'un ensemble d'activités auxquelles l'IFSTTAR prend part et qui visent à "**réduire la consommation d'énergie et les impacts environnementaux des véhicules**" (objectif 3 du Contrat d'objectifs Etat - INRETS 2010 - 2013). Pour mener à bien ses actions sur les systèmes PAC embarqués, l'IFSTTAR s'implique au sein du laboratoire commun FC LAB de Belfort.

• Le vecteur énergétique hydrogène et le véhicule électrique à PAC

Dans certaines circonstances (bouquet d'énergies primaires disponible, fiscalité adaptée...), **le vecteur énergétique hydrogène associé à des PAC peut constituer un maillon utile permettant d'établir des chaînes énergétiques fonctionnelles plus efficaces**. Dans le domaine des transports, le recours à un groupe électrogène à PAC alimenté en hydrogène, hybridé par des batteries ou des supercondensateurs, permet d'aboutir à un véhicule peu polluant et polyvalent car doté d'une autonomie significative. Il faut cependant indiquer que des questions essentielles demeurent posées au niveau de la filière hydrogène (problématiques technico-économiques non résolues, contraintes réglementaires liées à la circulation des véhicules à hydrogène et à la perception par le public des risques associés au combustible). Par ailleurs, si des progrès importants et indéniables ont maintenant été enregistrés depuis une dizaine d'années sur les PAC (améliorations des "cœurs de pile" et des procédés d'industrialisation de leurs composants, meilleure intégration de la pile dans son environnement, fiabilisation des auxiliaires et du système), ils ne semblent pas encore suffisants pour entrevoir une large diffusion de la technologie à très court terme dans les systèmes de transports aux cahiers des charges souvent fort difficiles (dynamiques de charge importantes, critères de durée de vie / fiabilité exigeants, environnements climatiques et vibratoires sévères). **Il n'existe en fait pour cela probablement pas encore de systèmes PAC répondant complètement aux contraintes du triptyque coûts - fiabilité / durée de vie - performance** (la notion de performance étant à appréhender ici dans un sens global, en tenant compte de critères de rendement, de compacité et de légèreté). Dans le domaine des transports, les recherches sur les PAC continuent donc à être menées au niveau mondial, principalement sur deux types de pile : PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) et SOFC (Solide Oxyde Fuel Cell).

• Les générateurs PAC : des systèmes convertisseurs d'énergie

Un générateur PAC embarqué est un convertisseur d'énergie qui transforme l'énergie liée à la réaction chimique entre un combustible et un comburant (généralement de l'hydrogène et de l'air) en chaleur et en énergie électrique. Cette dernière peut être utilisée à bord d'un véhicule pour alimenter soit la chaîne de traction, soit des auxiliaires (fonction d'APU : "Auxiliary Power Unit"). Les niveaux de puissance à atteindre varient en fonction de l'application véhicule visée : quelques kW pour une APU, 20-80 kW pour assurer la traction d'une automobile électrique (la valeur dépend de la puissance des batteries embarquées en complément au système PAC), au minimum 50 kW pour un bus.

Une cellule de PAC de type PEM est constituée de deux électrodes formées d'une zone réactionnelle, d'une couche de diffusion, séparées par un électrolyte et entourées d'éléments distribuant les réactifs et les joints. **Une PAC peut ainsi être considérée comme un type particulier de batterie** avec des réactifs et des produits qui ne sont pas stockés dans l'élément électrochimique mais apportés et évacués en continu. La différence de potentiel disponible aux bornes d'une cellule de PAC étant faible (de l'ordre du Volt), des cellules sont empilées pour atteindre des niveaux de tensions utiles et donner ainsi naissance à des "stacks". Le système PAC se compose aussi d'organes auxiliaires qui assurent notamment les fonctions d'approvisionnement et de conditionnement des réactifs, l'évacuation et la valorisation des produits, la gestion et la supervision de l'ensemble du générateur. **Compte tenu de la configuration du groupe électrogène à PAC qui fait apparaître des échanges énergétiques et fonctionnels très importants, une approche dite "système" doit absolument être envisagée pour obtenir de performances meilleures.** La conception même de l'empilement ne peut se faire en s'affranchissant d'une réflexion sur le choix des auxiliaires à mettre en œuvre et sur les modes de contrôle du générateur. A contrario, la capacité à définir ces auxiliaires et ces lois de gestion menant à une intégration optimisée de la PAC au sein du générateur et du véhicule suppose une bonne appréhension des incidences du comportement de ces organes périphériques sur les performances du stack.

II.2. Démarche scientifique et technique à l'IFSTTAR sur la thématique du générateur PAC embarqué

Mon activité de recherche à l'IFSTTAR est menée dans un cadre contractuel via des supports financiers régionaux, nationaux et européens, mais aussi à travers des actions à caractère plus exploratoire ("recherche de socle") et grâce à des implications dans la formation par et à la recherche. Les travaux réalisés à l'IFSTTAR se caractérisent généralement par des **phases expérimentales importantes** (conception et réalisation de moyens d'essais), justifiées par la nécessaire caractérisation des performances des piles existantes (conception et réalisation des essais, exploitation des résultats), par l'évaluation de leurs durées de vie (essais d'endurance sur 1000 h) et de leurs modes de défaillance sous les contraintes réelles des applications embarquées (phénoménologie, diagnostic). Les travaux réalisés correspondent néanmoins à une véritable activité scientifique très éloignée de la production exclusive d'essais bruts. Différentes **analyses et modélisations** associées aux expériences sont en effet également proposées. Ces activités, au caractère davantage théorique et méthodologique, sont plus volontiers réalisées à travers différents encadrements d'étudiants.

Les activités de recherches menées à l'IFSTTAR (Fig. 1) portent :

- **sur les modes de caractérisation et de diagnostic des générateurs PAC** en vue de l'évaluation et de l'amélioration de leurs performances. L'une des spécificités des travaux réalisés par l'IFSTTAR réside dans les niveaux de puissance des piles investiguées. Nous sommes ainsi amenés à **nous approprier progressivement des techniques et des instruments de mesure électrochimique** (relevés de courbes de polarisation, spectrométrie d'impédance, voltammétries cyclique et linéaire, mise en place d'indicateurs de la dégradation des stacks) initialement utilisés par la communauté des électrochimistes (en règle générale sur des monocellules, voire des composants / matériaux de PAC), et à **les adapter à des empilements de PAC** aux puissances plus en rapport avec les applications transport (Cf. Réf. **ACL1.DC23**). Un impédancemètre spécifique (haute tension, multi-cellule) a ainsi été développé à Belfort dans le cadre du projet ANR DIAPASON et de la thèse Sébastien WASTERLAIN. Les essais de PAC nous conduisent aussi à définir et à réaliser des **protocoles et plans expérimentaux** permettant des caractérisations plus efficaces et des optimisations à la fois en termes énergétique et de fiabilité / durée de vie (thèse de Bouchra WAHDAME; Cf. Réf. **TH.BW**). Des **procédures de diagnostic spécifiques et originales permettant la détection et la localisation de cellules défaillantes dans des stacks** ont également été imaginées (stage post-doctoral de Guangyu TIAN de l'Université de Tsinghua – Chine ; Cf. réf. **ACL1.DC11**).

Pour affiner les analyses des essais, des **méthodes permettant le traitement des informations expérimentales collectées** (Analyse en Composantes Principales, Anova...) sont régulièrement proposées. Des modèles comportementaux (conçus à base de réseaux de neurones par exemple) voire phénoménologiques / physiques de systèmes PAC sont développés. Ces travaux sont majoritairement

menés pour mieux comprendre, représenter les mécanismes complexes de dégradation des PAC et en vue de pouvoir établir un **diagnostic de l'état de santé des PAC** étudiées : par exemple dans le cadre du projet ANR DIAPASON et des thèses de Nadia STEINER (Cf. réf. **TH.NS**) et Sébastien WASTERLAIN (Cf. Réf. **TH.SW**) avec des approches diagnostic basées sur des techniques de reconnaissance de forme (pour établir une classification des états de fonctionnement, des défauts), de traitement du signal (transformée en ondelettes) et d'analyse probabiliste (réseaux bayésiens). Dans la continuité de ces travaux, le LTN a pu bénéficier du support d'une ASI INRETS (DIAGPAC) et à la suite de cette action, la thèse de Raïssa ONANENA a débuté en collaboration avec FEMTO-ST / ENISYS et le pôle diagnostic de l'IFSTTAR GRETTIA de Marne-la-Vallée. Les travaux ont été initiés autour de l'estimation de la durée de fonctionnement de PAC en vue d'établir des **stratégies de maintenance prédictive** (cf. réf. **ACL1.DC22**).

• **sur l'expérimentation des systèmes PAC en vue de leur intégration dans l'environnement transport**. Les travaux donnent d'abord lieu à des caractérisations de systèmes PAC placés dans des conditions d'usage spécifiques aux applications véhicules (**duplication en laboratoire des conditions d'usage liées aux cahiers des charges transport** : sollicitations par des **cycles dynamiques de courant** déduits de profils de mission véhicule, par des **ambiances climatiques et/ou vibratoires** particulières...), avec pour finalité l'optimisation des performances des générateurs sous les contraintes transports et des travaux à mener sur l'intégration de la PAC au sein de la chaîne de traction électrique du véhicule (recherche de solutions innovantes pour la conception des systèmes PAC : réflexions menées sur les architectures fluidiques, les topologies électriques et l'hybridation, la sûreté de fonctionnement). L'IFSTTAR bénéficie pour cela avec FC LAB et la plateforme de Belfort d'un cadre de recherche très multidisciplinaire et d'un instrument public d'importance, qui offre des moyens techniques satisfaisant aux essais de PAC fortes puissances et possédant peu d'équivalents en Europe.

• **sur l'interface électrique PAC - convertisseur électronique** et la maîtrise des contraintes en puissance de la mission transport (avec notamment la prise en compte des aspects **fonctionnement en modes dégradés et tolérance aux pannes** du système PAC via une redondance accordée par le concept de générateur multistack) ; ces travaux sont aujourd'hui menés à la fois au FC LAB et à Versailles Satory en lien avec le LGEP, dans le cadre du laboratoire commun SPEE LABS – Sud Paris Energie Electrique (CNAM, ENS Cachan, INRETS, Univ. Pierre et Marie Curie, Paris Sud, Supélec) (thèse d'Emmanuel FRAPPE co-encadrée par Alexandre DE BERNARDINIS et Gérard COQUERY, Olivier BETHOUX et Claude MARCHAND). **L'impact de l'électronique de puissance sur les fonctionnements physiques de piles** s'avère être un sujet particulièrement intéressant.

Les différents projets à mener conduisent bien souvent l'IFSTTAR à réaliser des travaux qui ont plus ou moins à voir avec l'ensemble des axes de recherche évoqués ci-dessus. On constate aussi que **les aspects durée de vie et fiabilité en utilisation réelle, compréhension des modes de défaillance et méthodes de diagnostic constituent en quelque sorte le fil conducteur de toutes nos activités**.

La démarche scientifique adoptée à l'IFSTTAR continue à mêler étroitement expérimentation / métrologie, analyse des phénomènes (pour avoir ainsi la chance, par les observations réalisées, d'être en quelque sorte "aux premières loges"), modélisation de l'expérience (expérimentique / plans d'expérience) et modélisation physique (pour mieux comprendre et pour représenter le plus fidèlement possible les phénomènes observés)^(Note 1). Au final, les résultats des travaux menés par l'IFSTTAR ont vocation à venir alimenter des outils de synthèse permettant une évaluation plus globale des systèmes de transport incluant des PAC, tel que l'outil logiciel VEHLIB développé par l'équipe VEH du LTE (**Fig. 1**). Ces outils sauront trouver leur utilité au cours de la période 2011 - 2015, considérée notamment par l'ADEME comme une période de préparation de l'émergence de marchés commerciaux importants pour les technologies hydrogène et PAC (cf. feuille de route stratégique de l'ADEME - 2011).

Note 1 : A noter qu'un besoin actuel et fort peut être exprimé : bénéficier de l'apport de compétences externes dans le domaine des matériaux et des analyses post-mortem pour mieux appréhender les modes de défaillances des PAC.

III. Liste des publications et communications scientifiques

III.1. Articles dans des revues internationales avec comité de lecture

- Articles dans des revues internationales ou nationales avec comité de lecture répertoriées dans les bases de données internationales (ex : ISI Web of Knowledge) (29+6):

- Articles dans des revues à comité de lecture répertoriées dans la liste IFSTTAR / INRETS (29) :

- ACL1.DC29 • N. Steiner, D. Hissel, Ph. Moçotéguy, D. Candusso, D. Marra, C. Pianese, M. Sorrentino (accepté en octobre 2011). *Application of fault tree analysis to fuel cell diagnosis*. Fuel Cells - From Fundamentals to Systems. Ed. Wiley-VCH Verlag GmbH.
- ACL1.DC28 • E. Frappé, A. De Bernardinis, O. Bethoux, D. Candusso, F. Harel, C. Marchand, G. Coquery (mai 2011). *PEM fuel cell fault detection and identification using differential method: simulation and experimental validation*. The European Physical J. Applied Physics. (EPJAP). Vol 54, n°2 - article 23412, 11 pages. Ed. EDP Sciences.
- ACL1.DC27 • F. Harel, S. Bégot, S. Wasterlain, D. Candusso (mai 2011). *Electrochemical characterisation of fuel cell stack during cold start*. Accepté le 14/09/2010 dans The European Physical J. Applied Physics. (EPJAP). Vol 54, n°2 - article 23402, 10 pages. Ed. EDP Sciences.
- ACL1.DC26 • S. Wasterlain, D. Candusso, F. Harel, X. François, D. Hissel (juin 2011). *Development of test instruments and protocols for the diagnostic of fuel cell stacks*. Publié suite à 12th Ulm ElectroChemical Talks (12th UECT), Neu-Ulm (Allemagne). Journal of Power Sources. Vol. 196, n°12, pp. 5325-5333. Ed Elsevier
- ACL1.DC25 • N. Yousfi Steiner, D. Hissel, Ph. Moçotéguy, D. Candusso (février 2011). *Diagnosis of Polymer Electrolyte Fuel Cells Failure Modes (Flooding & Drying out) by Neural Networks Modeling*. International Journal of Hydrogen Energy. Vol. 36, n°4, pp. 3067-3075. Ed. Elsevier.
- ACL1.DC24 • R. Onanena, L. Oukhellou, D. Candusso, F. Harel, D. Hissel, P. Aknin (janvier 2011). *Fuel cells static and dynamic characterizations as tools for the estimation of their ageing time*. International Journal of Hydrogen Energy. Vol. 36, n°2, pp. 1730-1739. Ed. Elsevier.
- ACL1.DC23 • N. Yousfi Steiner, D. Hissel, Ph. Moçotéguy, D. Candusso (janvier 2011). *Non intrusive diagnosis of polymer electrolyte fuel cells by wavelet packet transform*. International Journal of Hydrogen Energy. Vol. 36, n°1, pp. 740-746. Ed. Elsevier.
- ACL1.DC22 • R. Onanena, L. Oukhellou, D. Candusso, A. Same, D. Hissel, P. Aknin (août 2010). *Estimation of fuel cell operating time for predictive maintenance strategies*. International Journal of Hydrogen Energy. Vol. 35, n°15, pp. 8022-8029. Ed. Elsevier.
- ACL1.DC21 • S. Bégot, F. Harel, D. Candusso, X. François, M-C. Péra, S. Yde-Andersen (juillet 2010). *Fuel cell climatic tests designed for new configured aircraft application*. Energy Conversion and Management. Vol. 51, n°7, pp. 1522-1535. Ed. Elsevier.
- ACL1.DC20 • L. Placca, R. Kouta, D. Candusso, J-F. Blachot, W. Charon (mai 2010). *Analysis of PEM fuel cell experimental data using Principal Component Analysis and multi-linear regression*. International Journal of Hydrogen Energy. Vol. 35, n°10, pp. 4582-4591. Ed. Elsevier.
- ACL1.DC19 • A. De Bernardinis, D. Candusso, F. Harel, X. François, G. Coquery (mai 2010). *Experiments of a twenty cell PEFC operating under fault conditions with diode by-pass circuit for uninterrupted power delivery*. Energy Conversion and Management. Vol. 51, n°5, pp. 1044-1054. Ed. Elsevier.
- ACL1.DC18 • G. Tian, S. Wasterlain, D. Candusso, F. Harel, D. Hissel, X. François (avril 2010). *Identification of failed cells inside PEMFC stacks in two cases: anode / cathode crossover and anode / cooling compartment leak*. Int. J. Hydrogen Energy (suite au HyForum 2008). Vol. 35, n° 7, pp. 2772-2776. Ed. Elsevier.
- ACL1.DC17 • S. Wasterlain, D. Candusso, D. Hissel, F. Harel, P. Bergman, P. Menard, M. Anwar (février 2010). *Study of temperature, air dew point temperature and reactant flow effects on PEMFC performances using electrochemical spectroscopy and voltammetry techniques*. J. Power Sources. Vol. 195, n°4, pp. 984-993. Ed. Elsevier.
- ACL1.DC16 • N. Yousfi-Steiner, Ph. Moçotéguy, D. Candusso, D. Hissel (octobre 2009). *A review on PEM Fuel Cell catalyst degradation and starvation issues: causes, consequences and diagnosis for mitigation*. J. Power Sources. Vol. 194, n°1, pp. 130-145. Ed. Elsevier.
- ACL1.DC15 • B. Wahdame, D. Candusso, X. François, F. Harel, J-M. Kauffmann, G. Coquery (janvier 2009). *Design of experiment techniques for fuel cell characterisation and development*. Int. J. Hydrogen Energy. Vol. 34, n°2, pp. 967-980. Ed. Elsevier.
- ACL1.DC14 • V. Rouss, D. Candusso, W. Charon (novembre 2008). *Mechanical behaviour of a fuel cell stack under vibrating solicitations linked to aircraft applications. Part II: Three-dimensional modelling*. Int. J. Hydrogen Energy. Vol. 33, n°21, pp. 6281-6288. Ed. Elsevier.
- ACL1.DC13 • V. Rouss, P. Lesage, S. Bégot, D. Candusso, W. Charon, F. Harel, X. François, V. Selinger, C. Schilo, S. Yde-Andersen (novembre 2008). *Mechanical behaviour of a fuel cell stack under vibrating solicitations linked to aircraft applications. Part I: Experimental*. Int. J. Hydrogen Energy. Vol. 33, n°22, pp. 6755-6765. Ed. Elsevier.

- ACL1.DC12 • N. Yousfi-Steiner, P. Moçotéguy, D. Candusso, D. Hissel, A. Hernandez, A. Aslanides (septembre 2008). *A review on PEM voltage degradation associated with water management: impacts, influent factors and characterization*. J. Power Sources. Vol. 183, n°1, pp. 260-274. Ed. Elsevier.
- ACL1.DC11 • G. Tian, S. Wasterlain, I. Endichi, D. Candusso, F. Harel, X. François, M-C. Péra, D. Hissel, J-M.Kauffmann (août 2008). *Diagnosis methods dedicated to the localisation of failed cells within PEMFC stacks*. J. Power Sources. Vol. 182, n°2, pp. 449-461. Ed. Elsevier.
- ACL1.DC10 • B. Wahdame, D. Candusso, F. Harel, X. François, M-C. Péra, D. Hissel, J-M. Kauffmann (août 2008). *Analysis of a PEMFC durability test under low humidity conditions and stack behaviour modelling using experimental design techniques*. J. Power Sources. Vol. 182, n°2, pp.429-440. Ed. Elsevier.
- ACL1.DC9 • D. Candusso, A. De Bernardinis, M.C. Péra, F. Harel, X. François, D. Hissel, G. Coquery, J-M. Kauffmann (avril 2008). *Fuel cell operation under degraded working modes and study of a diode bypass circuit dedicated to multi-stack association*, Energy Conversion and Management, Vol. 49, n°4, pp. 880-895. Ed. Elsevier.
- ACL1.DC8 • B. Wahdame, D. Candusso, X. François, F. Harel, M-C. Péra, D. Hissel, J-M. Kauffmann (décembre 2007). *Comparison between two PEM fuel cell durability tests performed at constant current and under solicitations linked to transport mission profile*. Int. J. Hydrogen Energy. Vol. 32, n°17, pp. 4523-4536. Ed. Elsevier.
- ACL1.DC7 • D. Hissel, D. Candusso, F. Harel (septembre 2007). *Fuzzy Clustering Durability Diagnosis of Polymer Electrolyte Fuel Cells dedicated to Transportation Applications*. IEEE Transactions on Vehicular Technology. Vol. 56, n°5, part 1, pp. 2414-2420.
- ACL1.DC6 • F. Harel, X. François, D. Candusso, M-C. Péra, D.Hissel, J-M. Kauffmann (avril 2007). *PEMFC durability test under specific dynamical current solicitation linked to vehicle road cycle*. Fuel Cells from Fundamentals to Systems. Vol. 7, n°2, pp.142-152. Ed. Wiley-VCH Verlag GmbH.
- ACL1.DC5 • B. Wahdame, D. Candusso, X. François, F. Harel, A. De Bernardinis, J-M. Kauffmann, G. Coquery (février 2007). *Study of a 5kW PEMFC using experimental design and statistical analysis techniques*. Fuel Cells -From Fundamentals to Systems. Vol. 7, n°1, pp. 47-62. Ed. Wiley-VCH Verlag GmbH.
- ACL1.DC4 • J. Garnier, A. De Bernardinis, M.C. Péra, D. Hissel, D. Candusso, J-M. Kauffmann, G. Coquery (mai 2006). *Study of a PEFC Power Generator Modular Architecture based on a Multi-stacks association*, Journal of Power Sources. Vol. 156, n°1, pp. 108-113. Ed. Elsevier.
- ACL1.DC3 • B. Wahdame, D. Candusso, J-M. Kauffmann (mai 2006). *Study of gas pressure and flow rate influences on a 500W PEM fuel cell thanks to the experimental design methodology*. J. Power Sources. Vol. 156, n°1, pp. 92-99. Ed. Elsevier.
- ACL1.DC2 • D. Candusso, F. Harel, A. De Bernardinis, X. François, M.C. Péra, D. Hissel, P. Schott, G. Coquery, J-M. Kauffmann (juillet 2006). *Characterisation and modelling of a 5kW PEMFC for transportation applications*. Int. J. of Hydrogen Energy. Vol. 31, n°8, pp. 1019-1030. Ed. Elsevier.
- ACL1.DC1 • D. Candusso, J-P. Poirot-Crouvezier, B. Bador, E. Rullière, R. Soulier, J-Y. Voyant (janvier 2004). *Determination of current density distribution in Proton Exchange Membrane Fuel Cells*. The European Physical J. Applied Physics. Vol. 25, n°1, pp. 67-74. Ed. EDP Sciences.

- [Articles dans des revues à comité de lecture répertoriées dans les bases de données internationales hors liste INRETS \(6\)](#):

- ACL2.DC6 • S. Wasterlain, F. Harel, D. Candusso, X. François, D. Hissel (avril 2011). *A new high voltage impedance spectrometer for the diagnostic of fuel cell stacks*. ASME Journal of Fuel Cell Science and Technology (article publié suite à la 8ème ASME Fuel Cell Science, Engineering and Technology Conference, New-York). Vol. 8, n°2, pp. 024502-1 - 024502-6. E. ASME.
- ACL2.DC5 • N. Yousfi-Steiner, D. Candusso, D. Hissel, P. Moçotéguy, A. Aslanides (octobre 2010). *Model-based diagnosis for proton exchange membrane fuel cells*. Mathematics and Computers in Simulation (IMACS). Vol. 81, n°2. Ed. Elsevier. (suite à la conférence ELECTRICMACS 2008).
- ACL2.DC4 • S. Wasterlain, D. Candusso, F. Harel, X. François, M-C. Péra, D. Hissel (avril 2010). *Durability Test Results of a PEMFC Operated at Over-Nominal Temperature with Low Humidified Reactants*. ASME Journal of Fuel Cell Science and Technology. Vol. 7, n°2. (4 pages).
- ACL2.DC3 • B. Wahdame, D. Candusso, X. François, F. Harel, M-C. Péra, D. Hissel, J-M. Kauffmann (décembre 2008). *Analysis of a Fuel Cell Durability Test Based on Design of Experiment Approach*. IEEE Transactions on Energy Conversion. Vol. 23, n°4, pp. 1093-1104.
- ACL2.DC2 • M-C. Péra, D. Candusso, D. Hissel, J-M. Kauffmann (2007). *Power generation by fuel cells: the new Eldorado?* IEEE Industrial Electronics Magazine. Vol. 1, n°3, pp.28-37.
- ACL2.DC1 • M-C. Péra, D. Candusso, D. Hissel, J-M. Kauffmann (septembre 2006). *Fuel Cell Power Generators: a great idea but a stubborn reality*. IEEE Industrial Electronics Society Newsletter. Vol. 55, n°3, pp.11-13. ISSN 0746-1240.

- Articles dans des revues avec comité de lecture non répertoriées dans des bases de données internationales (1) :

- ACLN2.DC1 • D. Candusso, E. Rullière, E. Toutain (septembre 2001). *A fuel cell hybrid power source for a small electric vehicle*. Journal of renewable energy sources. Ed. Algiers. Numéro special : Power Engineering. UPEC, Swansea, Royaume-Uni.

III.2. Articles dans des revues nationales

- Articles dans des revues nationales sans comité de lecture (1) :

- ASCL.DC1 • D. Candusso, F. Harel, A. De Bernardinis, P. Dupuy, G. Coquery (janvier 2010). *L'INRETS expérimente et évalue des systèmes piles à combustible*. Revue TEC Transport / Environnement / Circulation (ATEC – ITS France), n°204, octobre – décembre 2009, pp. 34-39, ISSN 0397-6513.

III.3 Livres ou chapitres de livres

- OS2.DC5 • D. Hissel, D. Candusso, M-C. Péra (octobre 2010). *Energy Storage*. Sous la direction de Yves Brunet. Chapitre 7 : *Fuel Cells: System Operation*. Editeur ISTE Wiley. 272 pages. ISBN: 9781848211834.
- OS2.DC4 • D. Hissel, D. Candusso, M-C. Péra (2009). *Problématiques du stockage d'énergie*. Sous la direction de Yves Brunet. Chapitre 7 : *Piles à combustible : aspects système*. Pages 205 – 227. Traité EGEM. Editeur Hermès Lavoisier. 320 pages. ISBN 978-2-7462-2053-9.
- OS2.DC3 • D. Candusso, R. Glises, D.Hissel, J-M. Kauffmann, M-C. Péra (octobre 2007). *Pile à combustible PEMFC et SOFC. Description et gestion du système*. Techniques de l'Ingénieur. Génie énergétique. 11 p. BE8595. Editeur T.I. 11 pages.
- OS2.DC2 • D. Candusso, R. Glises, D. Hissel, J-M. Kauffmann, M-C. Péra (octobre 2007). *Pile à combustible PEMFC et SOFC. Transferts de chaleur et de masse*. Techniques de l'Ingénieur. Génie énergétique. BE8596. Editeur T.I. 12 pages.
- OS2.DC1 • D. Hissel, M-C. Péra, D. Candusso, F. Harel, S. Bégot (2005). *Characterization of polymer electrolyte fuel cells for embedded generators. Test bench design and methodology*, dans l'ouvrage *Advances in Fuel Cells*, Editeur Xiang - Wu Zhang. pp. 127-148. Research Signpost. ISBN 81-308-0026-8.

III.4. Brevets

- VB.DC1 • N. Steiner, P. Moçoteguy, L. Gautier, D. Hissel, D. Candusso (déposé le 25 juin 2009 auprès de l'INPI). *Détection de défaut dans un dispositif électrochimique*. Dit aussi *Ondelettes*. Brevet référence EDF B2232. Demande FR 09 54357.

III.5. Articles dans des conférences internationales avec comité de lecture

- Communications avec actes dans un congrès international :

- Actes édités (par un autre éditeur que Inrets - Lavoisier) (13) :

- ACT2.DC16 • B. Wahdame, L. Girardot, D. Hissel, F. Harel, X. François, D. Candusso, M-C. Péra, L. Dumercy (30 juin - 2 juillet 2008). *Impact of power converter current ripple on the durability of a fuel cell stack*. IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE). Cambridge, Royaume-Uni. 6 pages.
- ACT2.DC15 • P. Coddet, M-C. Péra, D. Candusso, D. Hissel (4 – 7 juin 2007). *Study of Proton Exchange Membrane Fuel Cell safety procedures in case of emergency shutdown*. IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE). Vigo, Espagne. pp. 725-730, ISBN 1-4244-0755-9.
- ACT2.DC14 • B. Wahdame, D. Candusso, X. François, F. Harel, M-C. Péra, D. Hissel, J-M. Kauffmann (7 - 10 novembre 2006). *Dual Response Surface Approach for the Analysis of a Fuel Cell Durability Test*. IEEE Industrial Electronics Conference (IECON). Paris. pp. 4337-4342, ISBN 1-4244-0136-4.
- ACT2.DC13 • B. Wahdame, D. Candusso, X. François, F. Harel, M-C. Péra, D. Hissel, J-M. Kauffmann (9 - 13 juillet 2006). *Analysis of a Fuel Cell Durability Test Using the Response Surface Methodology*. IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE). Montréal, Canada. pp. 2007-2012, ISBN 1-4244-0497-5.
- ACT2.DC12 • S. Jemeï, F. Harel, X. François, D. Candusso, D. Hissel, M-C. Péra, J-M. Kauffmann (20 - 23 juin 2005). *PEM fuel cell modelization including durability considerations*. IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE). Dubrovnik, Croatie. Vol. 2, pp. 833-837, ISBN 0-7803-8738-4.
- ACT2.DC11 • B. Wahdame (encadrement en thèse au L2ES : D. Candusso). (7 - 8 juin 2005) *Caractérisation et optimisation du fonctionnement des piles à combustible par la méthode des plans d'expériences*. 7ème Conférence des Jeunes Chercheurs en Génie Electrique (JCGE). Montpellier. pp.141-146.

- ACT2.DC10 • B. Wahdame, D. Candusso, J-M. Kauffmann (29 novembre - 2 décembre 2004). *Study of gas pressure and flow rate influences on a 500W PEM fuel cell thanks to the experimental design methodology*. 2nd France-Deutschland Fuel Cell Conference (FDFC). Belfort. Vol. 2, pp. 389-394. ISBN 2914279-16-7.
- ACT2.DC9 • F. Harel, X. François, D. Candusso, D. Hissel, M-C. Péra, J-M. Kauffmann (29 novembre - 2 décembre 2004). *First experimental results of PEMFC durability under constant power solicitation constraint*. 2nd France – Deutschland Fuel Cell Conference 2004 (FDFC). Belfort. Vol. 2, pp. 365-370. ISBN 2914279-16-7.
- ACT2.DC8 • D. Candusso, F. Harel, X. François, A. De Bernardinis, M-C. Péra, D. Hissel (29 novembre - 2 décembre 2004). *Experimental study of a 5kW PEM fuel cell for transportation applications*. 2nd France-Deutschland Fuel Cell Conference (FDFC). Belfort. Vol. 2, pp. 355-360. ISBN 2914279-16-7.
- ACT2.DC7 • J. Garnier, A. De Bernardinis, M.C. Péra, D. Hissel, D. Candusso, J.M. Kauffmann, G. Coquery (29 novembre - 2 décembre 2004). *Study of a PEFC power generator modular architecture based on a multi-stack association*. 2nd France Deutschland Fuel Cell Conference (FDFC). Belfort. Vol. 1, pp. 83-88, ISBN 2914279-16-7.
- ACT2.DC6 • J. Garnier, M-C. Péra, D. Hissel, F. Harel, D. Candusso, N. Glandut, J-P. Diard, A. De Bernardinis, J-M. Kauffmann, G.Coquery (4 - 9 octobre 2003). *Dynamic PEM fuel cell modeling for automotive applications*. IEEE Vehicular Technology Conference (VTC). Orlando, USA. Vol. 3, pp. 3284–3288. ISBN 0-7803-7955-1.
- ACT2.DC5 • D. Candusso, A. Walter, S. Bacha, E. Rullière (5 - 8 novembre 2002). *Modelling, control and simulation of a fuel cell based power supply system with energy management*. IEEE Industrial Electronics Conference (IECON). Séville, Espagne. Vol. 2, pp. 1294–1299.
- ACT2.DC2 • D. Candusso, E. Rullière, E. Toutain (12 - 14 septembre 2001). *A fuel cell hybrid power source for a small electric vehicle*. Universities Power Engineering Conference (UPEC) 36. Swansea, Royaume-Uni. pp. 2061-2065.
- [Autres actes \(actes autres que ceux publiés dans des revues ou édités, CD Rom\) \(22\)](#) :
- ACT3.DC22 • S. Wasterlain, D. Candusso, F. Harel, X. François, D. Hissel (1 – 3 septembre 2010). *Diagnosis of a Fuel Cell Stack Using Electrochemical Impedance Spectroscopy and Bayesian Networks*. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), Lille. 6 pages.
- ACT3.DC21 • S. Wasterlain, F. Harel, D. Candusso, X. François, D. Hissel (14 – 16 juin 2010). *A new high voltage impedance spectrometer for the diagnostic of fuel cell stacks*. 8^{ème} ASME Fuel Cell Science, Engineering and Technology Conference, New-York. 11 pages. Actes disponibles sous la forme d'un CD.
- ACT3.DC20 • R. Onanena, F. Chamroukhi, L. Oukhellou, D. Candusso, P. Aknin, D. Hissel (13 – 15 décembre 2009). *Supervised learning of a regression model based on latent process. Application to the estimation of fuel cell lifetime*. ICMLA 2009, 8th IEEE International Conference on Machine Learning and Applications, Miami Beach, 6 pages.
- ACT3.DC19 • A. De Bernardinis, D. Candusso, F. Harel, G. Coquery (8 – 10 septembre 2009). *Power Electronics Interface for an Hybrid PEMFC Generating System with Fault Management Strategies for Transportation*. EPE 2009, Barcelone, 10 pages.
- ACT3.DC18 • S. Wasterlain, F. Harel, D. Candusso, D. Hissel (29 juin – 2 juillet). *Development of a High Voltage Impedance Spectrometer for the Characterization and Diagnosis of Large PEFC Stacks*. European Fuel Cell Forum 2009. Lucerne, Suisse, 19 pages.
- ACT3.DC17 • A. De Bernardinis, F. Harel, L. Girardot, D. Candusso, D. Hissel, X. François, G. Coquery, S. Besse (29 juin – 2 juillet 2009). *Experimental Dynamic Behavior of a 30kW 90Cell PEFC Prototype under Transportation Load Cycle Constraints*. European Fuel Cell Forum 2009. Lucerne, Suisse, 16 pages.
- ACT3.DC16 • B. Davat, S. Astier, T. Azib, O. Bethoux, D. Candusso, G. Coquery, A. De Bernardinis, F. Druart, B. François, M. Garcia Arregui, F. Harel, M. Hinaje, D. Hissel, J-P. Martin, M-C. Péra, S. Pierfederici, S. Raël, D. Riu, S. Sailler, Y. Bultel, T. Creuzet, C. Turpin, T. Zhou (1 – 3 juillet 2009). *Fuel cell based hybrid systems*. Article de la communauté française menant des recherches sur les systèmes pile à combustible dans le cadre du programme Energie du CNRS. Electromotion, EPE Chapter "Electric Drives", Joint Symposium, Lille, 11 pages.
- ACT3.DC15 • S. Wasterlain, F. Harel, D. Candusso, D. Hissel, X. François (1 – 3 juillet 2009). *First results obtained with an impedancemeter developed for the diagnosis of large PEFC stacks*. Electromotion, EPE Chapter "Electric Drives", Joint Symposium, Lille, 6 pages.
- ACT3.DC14 • F. Harel, A. De Bernardinis, L. Girardot, X. François, D. Candusso, D. Hissel, G. Coquery (10 – 12 décembre 2008). *Experiments of a 30kW 90 cell PEMFC under transportation load cycle constraints*. FDFC 2008. Nancy, 10 pages.

- ACT3.DC13 • D. Hissel, Ch. Turpin, S. Astier, L. Boulon, A. Bouscayrol, Y. Bultel, D. Candusso, S. Caux, S. Chupin, T. Colinart, G. Coquery, B. Davat, A. De Bernardinis, J. Deseure, S. Didierjean, J. Dillet, F. Druart, M. Fadel, G. Fontes, B. François, J.C. Grandidier, F. Harel, M. Hilairet, M. Hinaje, S. Jemei, O. Lottin, L. Madier, G. Maranzana, S. Martemianov, D. Nguyen, R. Ortega, R. Outbib, M-C. Pera, S. Rael, N. Retiere, D. Riu, S. Sailler, R. Talj, T. Zhou (10 – 12 décembre 2008). *A review on existing modelling methodologies for PEM fuel cell systems*. Article de la communauté française menant des recherches sur les systèmes pile à combustible dans le cadre du programme Energie du CNRS. FDFC 2008. Nancy, 30 pages.
- ACT3.DC12 • S. Wasterlain, D. Candusso, D. Hissel, F. Harel, P. Bergman, P. Menard, M. Anwar (10 – 12 décembre 2008). *An experimental study of the temperature, relative humidity and flow rate effects on the performances of a single PEMFC*. FDFC 2008. Nancy, 12 pages.
- ACT3.DC11 • A. Narjiss, D. Depernet, D. Candusso, F. Gustin, D. Hissel (10 – 12 décembre 2008). *On-line diagnosis of a PEM fuel cell through the PWM converter*. FDFC 2008. Nancy, 8 pages
- ACT3.DC10 • G. Tian, S. Wasterlain, D. Candusso, F. Harel, D. Hissel, X. François (3 - 4 août 2008). *Identification of failed cells inside PEMFC stacks in two cases: anode / cathode crossover and anode / cooling compartment leak*. HyForum 2008. Changsha, Chine, 5 pages.
- ACT3.DC9 • A. Narjiss, D. Depernet, D. Candusso, F. Gustin, D. Hissel (1 - 3 septembre 2008). *Online diagnosis of PEM fuel cell*. 13th International Conference on Power Electronics and Motion Control (EPE-PEMC). Poznan, Pologne. 6 pages. ISBN 978-1-4244-1742-1.
- ACT3.DC8 • N. Yousfi-Steiner, D. Candusso, D. Hissel, P. Moçotéguy, A. Aslanides, A. Hernandez (8 – 11 juin 2008). *Modelling for PEMFC flooding diagnosis purpose*. Electrimacs (IMACS). Québec, Canada. 6 pages.
- ACT3.DC7 • F. Harel, X. François, D. Candusso, M-C. Péra, D. Hissel, J-M. Kauffmann (4 - 8 juillet 2005). *PEMFC durability test under specific dynamical current solicitation linked to vehicle road cycle*. 3rd European Polymer Electrolyte Fuel Cell Forum (EPEFC). Lucerne, Suisse. 17 pages.
- ACT3.DC6 • M. Chnani, H. Maker, D. Candusso, M-C. Péra, D. Hissel (4 - 8 juillet 2005). *Electrical analogy modelling of PEFC system fed by a compressor*. 3rd European Polymer Electrolyte Fuel Cell Forum (EPEFC). Lucerne, Suisse. 14 pages.
- ACT3.DC5 • B. Wahdame, D. Candusso, X. François, F. Harel, A. De Bernardinis, J.M. Kauffmann, G. Coquery (4 - 8 juillet 2005). *Study of a 5kW PEMFC using Experimental Design and Statistical Analysis Techniques*, 3rd European Polymer Electrolyte Fuel Cell Forum (EPEFC), Lucerne, Suisse. 21 pages.
- ACT3.DC4 • M. Chnani, H. Maker, M-C. Péra, D. Candusso, D. Hissel (2 - 6 avril 2005). *Modeling of a PEFC generator*. Electric Vehicle Symposium 21 (EVS21). Monaco. 9 pages.
- ACT3.DC3 • D. Candusso, E. Rullière, J-P. Poirot-Crouvezier (15 - 19 novembre 2003). *A demonstration vehicle with a proton exchange membrane fuel cell hybrid energy source*. Electric Vehicle Symposium 20 (EVS 20). Long Beach, Californie. 10 pages.
- ACT3.DC2 • D. Candusso, T. Pascal, E. Rullière, P. Baurens (20 - 24 octobre 2001). *Impedance measurement of a proton exchange membrane fuel cell*. Electric Vehicle Symposium 18 (EVS18). Berlin, Allemagne. 7 pages.
- ACT3.DC1 • D. Candusso, E. Rullière, S. Bacha (20 - 24 octobre 2001). *Modelling of a fuel cell hybrid power source for a small electric vehicle*. Electric Vehicle Symposium 18 (EVS18). Berlin, Allemagne. 11 pages.

III.6. Articles dans des conférences nationales avec comité de lecture

- Communications avec actes dans un congrès ou national :

- Actes édités par Inrets – Lavoisier (1) :

- ACT1.DC1 • D. Candusso, E. Rullière, J-P. Poirot-Crouvezier, P. Schott, P. Baurens (2002). *Modélisation dynamique d'un véhicule électrique à pile à combustible*. 5ème colloque Véhicules électriques et hybrides, enjeux technologiques et perspectives. pp. 121 – 132. Actes INRETS n°84. Coordination : Jean-Paul Yonnet, François Badin. Editeur : INRETS, ISSN 0769-0266, ISBN 2-85782-568-4. 198 pages.
- Actes édités (par un autre éditeur que Inrets - Lavoisier) (4) :**
- ACT2.DC4 • D. Candusso, E. Rullière, J-P. Poirot-Crouvezier, P. Schott, P. Baurens (25 - 26 juin 2002). *Modélisation dynamique d'un véhicule électrique à pile à combustible*. Congrès Véhicules électriques et hybrides, enjeux technologiques et perspectives (C-VELEC no5). Grenoble. Article paru ultérieurement dans les Actes INRETS n°84.
- ACT2.DC3 • D. Candusso, I. Valero, A. Walter, S. Bacha, E. Rullière (12 - 13 juin 2002). *Modélisation, contrôle et simulation d'un système pile à combustible destiné à une application stationnaire*. Colloque Génie Electrique, Vie et Qualité (GEVIQ). Marseille. pp. 139-144.

- ACT2.DC1 • D. Candusso, E. Rullière, J-P. Yonnet, P. Baurens (9 - 10 novembre 2000). *Simulation d'un véhicule électrique à source hybride pile à combustible - éléments intermédiaires de stockage de la puissance*. Colloque Piles à combustible et interfaces pour les transports. Belfort. pp 145-152.

III.7. Conférences invitées dans des congrès nationaux ou internationaux

- INV.DC1 • D. Candusso (juin 2005). *Pile à combustible : quelle faisabilité, quelle échéance, pour quels véhicules? Les verrous technologiques*. Congrès Automotive Meetings, CNIT – Paris La Défense.

III.8. Posters, communications orales dans des conférences nationales et internationales

· Communications par affiche dans un congrès international ou national (6) :

- AFF.DC6 • S. Wasterlain, D. Candusso, F. Harel, X. François, D. Hissel (15 – 17 Juin 2010). *Development of test instruments and protocols for the diagnostic of fuel cell stacks*. 12th Ulm ElectroChemical Talks (12th UECT), Neu-Ulm (Allemagne).
- AFF.DC5 • S. Wasterlain, F. Harel, D. Candusso, D. Hissel, X. François, Ph. Moçotéguy (23 – 24 juin 2009). *Experimental methods for the diagnosis of PEMFC stacks*. Workshop « Diagnostics Tools for Fuel Cell Technologies ». Trondheim, Norvège.
- AFF.DC4 • N. Yousfi-Steiner, P. Moçotéguy, D. Candusso, D. Hissel, L. Gautier (6 - 7 octobre 2008). *PEM stacks testing according to Design of Experiment*. Workshop on Accelerated Testing in Fuel Cells, WBZU Ulm, Allemagne.
- AFF.DC3 • N. Yousfi-Steiner, D. Candusso, D. Hissel, P. Moçotéguy, L. Gautier, A. Aslanides (30 septembre - 2 octobre 2008). *Diagnostic de piles à combustible de type PEM*. Séminaire GDR PACTE. Grenoble.
- AFF.DC2 • G. Tian, S. Wasterlain, I. Endichi, D. Candusso, F. Harel, X. François, M-C. Péra, D. Hissel, J-M. Kauffmann (19 - 21 septembre 2007). *Diagnosis methods dedicated to the localisation of failed cells within PEMFC stacks*. International workshop on degradation issues in fuel cells. Hersonessos, Grèce.
- AFF.DC1 • B. Wahdame, D. Candusso, F. Harel, X. François, M-C. Péra, D. Hissel, J-M. Kauffmann (19 - 21 septembre 2007). *Analysis of a PEMFC durability test under low humidity conditions and stack behaviour modelling using experimental design techniques*. International workshop on degradation issues in fuel cells. Hersonessos, Grèce.

· Communications orales sans actes dans un congrès international ou national (5) :

- COM.DC5 • Ph. Moçotéguy, N. Steiner, S. Wasterlain, D. Hissel, D. Candusso, F. Harel, V. Raimbault, P-A Bliman, M. Sorine, A. Giraud, F. Auzanneau, S. Rosini, X. François (23 – 24 juin 2009). *Elaboration of a non intrusive diagnosis tool for the detection of water management defaults and CO poisoning in PEMFC stacks*. Workshop « Diagnostics Tools for Fuel Cell Technologies ». Trondheim, Norvège.
- COM.DC4 • D. Candusso, S. Wasterlain, F. Harel, X. François, D. Hissel, M.C. Péra, W. Charon, P. Lesage, G. Tian, A. De Bernardinis, G. Coquery (8 et 9 janvier 2009). *Méthodologies expérimentales pour identifier les cellules défailtantes dans les stacks PEM - Cas des fuites de réactifs*. Journées CNRS Système PAC – Thème diagnostic. Délégation CNRS de Paris A, Ivry-sur-Seine.
- COM.DC3 • D. Candusso, J.M. Kauffmann, F. Harel, X. François (17 – 18 juillet 2008). *Systèmes piles à combustible et modélisation de l'expérience*. Journées CNRS Système PAC – Thème modélisation. Paris. CNRS - Délégation Paris Michel-Ange.
- COM.DC2 • D. Candusso, A. De Bernardinis, F. Harel, G. Coquery (6 novembre 2007). *Les systèmes PAC à l'INRETS*. Journées CNRS Système PAC. CNAM Paris.
- COM.DC1 • D. Candusso, F. Harel, A. De Bernardinis, M-C. Péra, D. Hissel, P. Schott, G. Coquery, J-M. Kauffmann (6 - 7 octobre 2004). *Characterisation tests of a 5kW PEMFC for transportation applications*. Conférence Fuel Cells Science & Technology. Munich, Allemagne.

III.9. Rapports de recherche, littérature « grise »

· Rapports de recherche (rapports contractuels : ANR, Europe..., rapports « gris »...) :

- AP1.DC22 • Partenaires du projet DIAPASON (FC LAB) (Août 2010). *Rapport de clôture du projet DIAPASON (ANR PAN-H 06-004) HN-43/10/054*. 74 pages.
- AP1.DC21 • S. Wasterlain, F. Harel, D. Candusso, D. Hissel, N. Steiner, P. Moçotéguy (juillet 2010). *Etude de l'évolution des paramètres d'identification et comparaison des 2 méthodes (temporelle et fréquentielle)*. Livrable 2.4. Projet ANR PAN'H DIAPASON (FC LAB). 33 pages.
- AP1.DC20 • S. Wasterlain, F. Harel, D. Candusso, D. Hissel (novembre 2009). *Rapport d'essais. FC LAB sur la PAC 3M 20 cellules – courbes de polarisation - impédancemétrie*. Projet ANR PAN'H DIAPASON (FC LAB). 41 pages.

- AP1.DC19 • Consortium du projet européen CELINA avec pour participants au FC LAB Belfort : D. Candusso, S. Bégot, X. François, F. Harel, V. Rouss, P. Lesage, W. Charon, M-C. Péra, J-M. Kauffmann (novembre 2008). Contribution au rapport final CELINA (L2ES – FC LAB). 399 pages.
- AP1.DC18 • D. Candusso. Rapport d'activités INRETS en vue du passage au grade de CR1. Octobre 2008. 60 pages.
- AP1.DC17 • S. Wasterlain, F. Harel, D. Candusso, D. Hissel (juillet 2008). *Rapport d'essais. Courbes de polarisation stack 3M 5 cellules. Essais préliminaires.* Projet ANR PAN'H DIAPASON (FC LAB). Livrable 2.3. 11 pages.
- AP1.DC16 • S. Wasterlain, F. Harel, D. Candusso, D. Hissel (juin 2008). *Description de la méthode d'analyse par spectroscopie d'impédance : fréquences d'étude.* Projet ANR PAN'H DIAPASON (FC LAB). Livrable 2.2. 10 pages.
- AP1.DC15 • D. Candusso, S. Bégot, X. François, F. Harel, V. Rouss, P. Lesage, W. Charon, M-C. Péra, J-M. Kauffmann (avril 2008). Livrable D3.3.6 : *Test report.* Rapport de synthèse sur l'ensemble des essais réalisés à Belfort dans le cadre du projet européen CELINA (L2ES – FC LAB). 26 pages.
- AP1.DC14 • V. Rouss, P. Lesage, W. Charon, D. Candusso, S. Bégot, X. François, F. Harel, M-C. Péra, J-M. Kauffmann (2007). Livrable D3.3.5 : *Test data and report of vibration test results.* Projet européen CELINA (L2ES – FC LAB). 32 pages + 3 annexes
- AP1.DC13 • D. Candusso, S. Bégot, X. François, F. Harel, M-C. Péra, J-M. Kauffmann (2007). Livrable D3.3.4: *Test data and report of climatic test results.* Projet européen CELINA (L2ES – FC LAB). 102 pages.
- AP1.DC12 • D. Candusso, S. Bégot, X. François, F. Harel, M-C. Péra, J-M. Kauffmann (2007). Livrable D3.3.3: *Test data and report of atmospheric simulation test results.* Projet européen CELINA (L2ES – FC LAB). 29 pages + annexes.
- AP1.DC11 • D. Candusso, S. Bégot, X. François, F. Harel, M-C. Péra, J-M. Kauffmann (2007). Livrable D3.3.2: *Test data and report of reference test results.* Projet européen CELINA (L2ES – FC LAB). 46 pages + annexes.
- AP1.DC10 • G. Tian, D. Candusso, J-M. Kauffmann (février 2006). *Rapport concernant le stage post-doctoral de TIAN Guangyu, professeur associé à l'Université Tshinghua (Chine).* Synthèse des travaux communiquée aux financeurs du stage (Ambassade de France en Chine, Fondation Franco Chinoise pour les Sciences et leurs Applications - FFCSA, Conseil Régional de Franche-Comté). 17 pages.
- AP1.DC9 • D. Candusso (janvier 2006). *Notes prises lors de la conférence Fuel Cell Seminar 2005 de Palm Springs – Californie.* Rapport interne INRETS – L2ES – CNRT INEVA. 23 pages.
- AP1.DC8 • D. Candusso, F. Harel, A. De Bernardinis (octobre 2005). *Etude de l'association d'une pile à combustible PEM avec une diode placée en anti-parallèle.* Rapport d'essais. Projet ANR SPACT 80. 27 pages.
- AP1.DC7 • C. Bonnet, F. Lopicque, G. Valentin, M-C. Péra, D. Candusso, D. Hissel, J-M. Kauffmann (2005). *Vieillessement de cœur de piles à combustible à membranes : causes et mécanismes.* Rapport d'ACI VITAPAC. Présentation des travaux au colloque Energie à Grenoble les 2 - 4 novembre 2005.
- AP1.DC6 • D. Candusso, B. Wahdame, F. Harel, X. François, M-C. Péra, D. Hissel, J-M. Kauffmann (octobre 2005). *Essai d'endurance sur une pile à combustible PEM pour une température de fonctionnement supérieure à la température nominale.* Rapport interne L2ES. 129 pages.
- AP1.DC5 • F. Harel, D. Candusso, X. François, M-C. Péra, D. Hissel, J-M. Kauffmann (janvier 2005). *Expérimentations sur piles à combustible à membrane de faibles puissances.* Rapport INRETS LTE N°0503. 92 pages.
- AP1.DC4 • D. Candusso, F. Harel, X. François, D. Hissel, M-C. Péra, J-M. Kauffmann (août 2004). *Influence de l'environnement sur le comportement de générateurs à pile à combustible.* Rapport L2ES pour la DRIRE Franche-Comté, convention 01 Y 0044-02. 74 pages.
- AP1.DC3 • A. De Bernardinis, D. Candusso, F. Harel (2004). *Charge active 200kW pour Système Pile à Combustible adapté aux applications transport.* Etude bibliographique pour la connexion au réseau d'une pile à combustible. Rapport Projet PACo SPACT. 16 pages.
- AP1.DC2 • D. Candusso, F. Harel, X. François, A. De Bernardinis (2004). *Essais expérimentaux réalisés sur l'ensemble banc – pile Helion 5kW.* Rapport d'essais. Projet PACo SPACT. 44 pages + annexes.
- AP1.DC1 • E. Rullière, D. Candusso (mars 2003). *Hybridation de la pile à combustible utilisée comme source d'énergie dans un lanceur.* Rapport du contrat LEG – SNECMA. 16 pages.
- [Autres produits de diffusion et de vulgarisation \(fiches d'actualité scientifique de l'INRETS, contributions à différents médias autres que les revues...\)](#) :
- AP2.DC4 • D. Candusso, F. Harel (16 septembre 2008). *Systèmes pile à combustible à l'INRETS. Positionnement INRETS dans FC LAB.* Présentation devant le CS FC LAB. Belfort. 30 pages.
- AP2.DC3 • D. Candusso, A. De Bernardinis, F. Harel (30 janvier 2008). *Systèmes pile à combustible à l'INRETS.* Présentation interne LTE – LTN. Belfort FC LAB. 76 pages.

- AP2.DC2 • W. Charon, D. Candusso, F. Harel, G. Maranzana, P. Nika, J-F. Blachot, X. François (juin 2007). *Performances système - Expérimentation : moyens et méthodes*. Rapport réalisé en vue de la rédaction du programme scientifique de FC LAB. 21 pages.
- AP2.DC1 • *Rapport d'activités Système Pile à Combustible du L2ES, 2000 – 2004*. Contribution à la rédaction du rapport. Le document est disponible sur le site internet du L2ES. 90 pages.

- Thèses soutenues (3) :

- TH.SW • Sébastien Wasterlain (2010). *Approches expérimentales et analyse probabiliste pour le diagnostic de pile à combustible de type PEM*. Thèse UFC / FEMTO-ST/ENISYS, soutenue le 4 février 2010. 298 pages.
Financement : ANR projet Diapason
Encadrement : Daniel Hissel (UFC – FC LAB), Denis Candusso (INRETS – FC LAB)
- TH.NS • Nadia Steiner (2009). *Diagnostic non intrusif de groupes électrogènes à piles à combustible de type PEMFC*. Thèse UFC / FEMTO-ST/ENISYS / Eifer-EDF, soutenue le 3 décembre 2009. 205 pages.
Financement : EDF Eifer Karlsruhe
Encadrement : Philippe Moçoteguy (EDF – Eifer), Daniel Hissel (UFC – FC LAB), Denis Candusso (INRETS – FC LAB)
- TH.BW • Bouchra Wahdame (2006). *Analyse et optimisation du fonctionnement de piles à combustible par la méthode des plans d'expériences*. Thèse L2ES - UFC / UTBM, soutenue le 21 novembre 2006. 214 pages + annexes.
Financement : Ministère de la Recherche
Encadrement : Jean-Marie Kauffmann (UFC – L2ES), Denis Candusso (INRETS)

IV. Encadrement scientifique

IV.1. Formation par et à la recherche en tant que CR INRETS / IFSTTAR LTN

L'opportunité m'a été donnée d'effectuer des activités de formation par et à la recherche à Belfort dans le cadre des cursus proposés aux étudiants de 3^{ème} cycle par les Universités de Belfort (UFC et UTBM). Ecole Doctorale : Sciences Pour l'Ingénieur et Microtechniques – SPIM : <http://www.ecole-doctorale-spim.org/accueil-1-1.htm>). Plus récemment, j'ai également pu participer au co-encadrement d'un stage réalisé dans le cadre du Master Recherche 2 Physique et Ingénierie de l'Energie (PIE) de l'ENS Cachan auquel le laboratoire LTN apporte son soutien (<http://www.satit.ens-cachan.fr/PIE/index.html>). Ces activités, à la fois très porteuses et très gratifiantes, sont constituées de 6 co-encadrements de thèse de doctorat, de 5 co-encadrements de stages de DEA et Master Recherche - Professionnel, de travaux menés avec un chercheur étranger en stage post-doctoral. Ces actions menées dans un cadre davantage théorique permettent aussi de mieux valoriser des essais expérimentaux réalisés sur la plateforme systèmes PAC de Belfort.

• Thèses de doctorat (3 soutenues, 3 en cours) :

- Co-encadrement de la thèse de doctorat en Génie Electrique de M. Nicolas NOGUER
Encadrement : W. CHARON - Professeur UTBM, G. COQUERY - DR IFSTTAR, R. KOUTA - MCF UTBM, D. CANDUSSO
Durée : oct. 2011 - sept. 2014. En cours
Financement : thèse UTBM / M3M – IFSTTAR – FC LAB, Financement IFSTTAR / INRETS – Région Franche-Comté
Titre provisoire de la thèse : Analyse de la fiabilité d'une pile à combustible et architectures de piles autorisant des fonctionnements en modes dégradés.
Pourcentage de co-encadrement : 30%
Publications associées : -
- Co-encadrement de la thèse de doctorat en Génie Electrique de M. Idriss RABAAOUI
Encadrement : D. HISSEL - Professeur UFC, L. OUKHELLOU - DR IFSTTAR Grettia, S. JEMEI - MCF UFC, D. CANDUSSO

Durée : jan. 2011 - déc. 2013. En cours

Financement : thèse UFC – IFSTTAR – FC LAB, Financement par le projet ANR PAN'H DIAPASON2

Titre provisoire de la thèse : Suivis de points de fonctionnement et diagnostics de piles à combustible.

Pourcentage de co-encadrement : 25%

Publications associées : une communication prévue à JCGE'2011 en décembre à Belfort

- Co-encadrement de la thèse de doctorat en Génie Electrique de Mlle. Raïssa ONANENA GUELAN
Encadrement : D. HISSEL - Professeur UFC, P. AKNIN, L. OUKHELLOU, D. CANDUSSO

Durée : oct. 2009 - oct. 2012. En cours

Financement : thèse UFC – IFSTTAR – FC LAB, Financement IFSTTAR / INRETS – Région Franche-Comté

Titre provisoire de la thèse : Diagnostic de piles à combustible.

Pourcentage de co-encadrement : 30%

Publications associées : 2 revues int., 2 conférences int., 1 conférence nat.

- Co-encadrement de la thèse de doctorat en Génie Electrique de M. Sébastien WASTERLAIN

Encadrement : D. HISSEL - Professeur UFC, D. CANDUSSO

Durée : oct. 2006 - fév. 2010. Soutenance le 04/02/2010

Financement : thèse UFC – FC LAB, Financement par le projet ANR PAN'H DIAPASON

Titre de la thèse : Approches expérimentales et analyse probabiliste pour le diagnostic de pile à combustible de type PEM.

Pourcentage de co-encadrement : 50%

Publications associées : 7 revues int., 6 conférences int., 1 conférence nat.

- Co-encadrement de la thèse de doctorat en Génie Electrique de Mme. Nadia STEINER

Encadrement : P. MOÇOTÉGUY – EDF-EIFER, D. HISSEL - Professeur UFC, D. CANDUSSO

Durée : nov. 2006 – déc. 2009. Soutenance le 03/12/2009

Financement : thèse UFC – FC LAB, Financement EDF-Eifer

Titre de la thèse : Diagnostic non intrusif de groupes électrogènes à piles à combustible de type PEMFC

Thèse réalisée en lien avec le projet ANR PAN'H DIAPASON

Pourcentage de co-encadrement : 33%

Publications associées : 1 brevet, 5 revues int., 3 conférences int., 1 conférence nat.

- Co-encadrement de la thèse de doctorat en Génie Electrique de Mlle Bouchra WAHDAME

Encadrement : J-M. KAUFFMANN - Professeur UFC, D. CANDUSSO

Durée : oct. 2003 - oct. 2006. Soutenance le 21/11/2006

Financement : thèse UFC / UTBM – L2ES, allocation du Ministère de la Recherche

Titre de la thèse : Analyse et optimisation du fonctionnement de piles à combustible par la méthode des plans d'expériences

Nominée pour le Prix de Thèse du Club EEA en 2007

Pourcentage de co-encadrement : 70%

Publications associées : 6 revues int., 6 conférences int., 1 conférence nat..

• Stage post-doctoral (1) :

- Co-encadrement du post-doc. de M. Guangyu TIAN (Université Tshinghua, Beijing - Chine)

Encadrement : D. CANDUSSO, J-M. KAUFFMANN - Professeur UFC, D. HISSEL - Professeur UFC, M-C. PERA - MCF UFC

Durée : oct. 2004 – août 2005

Financement : Ambassade de France, FFCSA, Région de Franche-Comté

Thème du stage : Qualification et localisation de défauts sur les stacks de piles PEM

Pourcentage de co-encadrement : 30%

Publications associées : 2 revues int., 2 conférences int., 1 conférence nat.

• **DEA, Master Recherche et Professionnel, Projet de fin d'Etudes (6 en tant que CR INRETS) :**

- Co-encadrement du stage de Projet de Fin d'Etudes de M. Ibrahima DIAW
Encadrement : A. DE BERNARDINIS – CR IFSTTAR LTN, D. CANDUSSO
Tuteur à l'ENS Cachan : Frédéric MAZALEYRAT.
Durée : avril 2011 - septembre 2011.
Titre du stage : Définitions de topologies électriques permettant le fonctionnement de piles à combustible en mode potentiostatique
Pourcentage de co-encadrement : 50%
Publications associées : -
- Co-encadrement du stage de Projet de Fin d'Etudes de Mlle. Raïssa ONANENA GUELAN
Encadrement : D. HISSEL - Professeur UFC, P. AKNIN, L. OUKHELLOU, D. CANDUSSO
Tuteur à l'ENSE³ de Grenoble : Pierre GRANJON.
Durée : avril 2009 - août 2009. Soutenance à Grenoble en septembre 2009
Titre du stage : Diagnostic de piles à combustible
Pourcentage de co-encadrement : 30%
Publications associées : 1 conférence int., rapport de stage.
- Co-encadrement du stage de Master PROTEE de M. Issame ENDICHI
Encadrement : D. CANDUSSO
Durée : mars 2007 - juillet 2007. Soutenance au L2ES le 17/07/2007
Titre du stage : Etude et modélisation de problèmes liés à l'étanchéité interne des piles à combustible PEM
Pourcentage de co-encadrement : 100%
Publications associées : 1 revue int., 1 conférence int., rapport de stage.
- Co-encadrement du stage de Master PROTEE de M. Pierre CODDET
Encadrement : M-C. PERA - MCF UFC, D. CANDUSSO
Durée : mars 2006 - juillet 2006. Soutenance au L2ES le 18/07/2006
Titre du stage : Etude des stratégies de sauvegarde de piles à combustible en cas d'arrêt d'urgence
Pourcentage de co-encadrement : 50%
Publications associées : 1 conférence int., rapport de stage.
- Co-encadrement du stage de Masters Recherche et Prof. PROTEE de M. Youssef BOUAYAD
Encadrement : D. CANDUSSO
Durée : mars 2005 – juillet 2005. Soutenance au L2ES le 19/07/2005
Titre du stage : Etude statique et dynamique du conditionnement des fluides réactifs alimentant un système pile à combustible
Pourcentage de co-encadrement : 100%
Publications associées : Rapport de stage.
- Co-encadrement du stage de DEA PROTEE de M. Moussa CHNANI
Encadrement : D. CANDUSSO
Durée : mars 2004 – sept. 2004. Soutenance au L2ES le 31/8/2004
Titre du stage : Etude de l'incidence des actionneurs et des organes de conditionnement des fluides sur le comportement d'un système pile à combustible
Pourcentage de co-encadrement : 100%
Publications associées : 2 conférences int., rapport de stage.

IV.2. Formation par et à la recherche en tant doctorant et ATER au LEG, INPG / UJF

- Co-encadrement d'un projet d'option de la troisième année, option Electronique de Puissance et Traitement de l'Energie (EPTE) (d'octobre 2002 à février 2003). N. DEVILLERS, F. POITEVIN. 3^{ème} année de l'ENSIEG. "Etude bibliographique sur les groupes électrogènes à pile à combustible pour dispositifs embarqués de petite taille et étude de la chaîne de traction d'un robot mobile autonome doté d'une source hybride pile à combustible - batteries". Personnels co-encadrant : E. RULLIERE - MCF INPG, D. CANDUSSO.
- Co-encadrement d'un projet de fin d'études (de mars à juin 2002). C. NACHIN, 3^{ème} année de l'ENSIEG, option EPTE. "Conception et réalisation d'une source hybride pile à combustible – batteries

pour robot mobile". Personnels co-encadrant : E. RULLIERE, D. CANDUSSO et J-P. POIROT, P. BAURENS du CEA/DRT Grenoble.

- Co-encadrement d'un projet d'option de la 3^{ème} année, option EPTE de l'ENSIEG (d'octobre 2001 à février 2002). A. LEPINE, C. NACHIN. "Etude bibliographique sur les piles à combustibles pour dispositifs embarqués de petite taille (type scooter) et dimensionnement d'une source hybride pile à combustible – batteries". Personnels co-encadrant : E. RULLIERE, D. CANDUSSO.

- Participation à l'encadrement d'un projet de fin d'études / stage de DEA INPG Génie Electrique (de mars à septembre 2001). R. SOULIER, 3^{ème} année, option EPTE. "Cartographie des densités de courant dans une Pile à Combustible par mesure du champ magnétique induit" réalisé en partenariat avec le CEA. Personnels co-encadrant : E. RULLIERE, J-Y. VOYANT, D. CANDUSSO et J-P. POIROT, B. BADOR, P. BAURENS du CEA/DRT Grenoble.

- Co-encadrement d'un projet de fin d'études / stage de DEA INPG Génie Electrique (de mars à septembre 2001). A. WALTER, 3^{ème} année, option EPTE. "Modélisation de systèmes à piles à combustible". Personnels co-encadrant : E. RULLIERE, S. BACHA - Prof. UJF, I. VALERO – Doctorant UJF, D. CANDUSSO.

- Participation à l'encadrement d'un projet de fin d'études (de mars à septembre 2000). T. PASCAL, 3^{ème} année, option EPTE. "Dispositif de mesure d'impédance d'une pile à combustible par spectroscopie" réalisé en partenariat avec le CEA Grenoble. Personnels co-encadrant : E. RULLIERE, D. CANDUSSO et J-P. POIROT, P. BAURENS du CEA/DRT Grenoble.

V. Participation à la vie scientifique et responsabilités collectives exercées

V.1. Activités d'enseignements

● En tant que CR INRETS - IFSTTAR LTN :

- Années 2009 à 2011 :

6 h de cours + 12 h de Travaux Dirigés (soit annuellement 21 h équivalent TD) en modélisation - simulation de chaînes de traction des véhicules électriques et hybrides. Master Recherche 2^{ème} année à l'Université de Franche Comté (UFC, UFR STGI Belfort).

- Année 2005 :

Une présentation générale portant sur les systèmes PAC, et sur les verrous technologiques à lever au niveau du générateur, a été faite devant des étudiants de l'INSA Rouen, le 21 novembre 2005, lors d'une journée dédiée aux nouvelles technologies dans les automobiles et organisée en partenariat avec le département énergétique et propulsion de l'école.

- Année 2004 :

Encadrement de séances de Travaux Pratiques (TP) d'électrotechnique générale à l'IUT - Université de Franche-Comté de Belfort (durée : 48 h).

● En tant que doctorant vacataire et ATER au LEG - INPG / UJF :

- Année 2002 : Poste d'ATER à l'ENSIEG (actuel ENSE3) de Saint Martin d'Hères (38)

Dans le cadre du DEA Génie Electrique INPG / UJF : conception d'un nouveau Bureau d'Etude (BE) portant sur la modélisation d'une connexion de PAC au réseau électrique.

- Années 2000 – 2001 et 2001 – 2002 :

TP à l'IUT Génie électrique de Saint Martin d'Hères (49 h) en électrotechnique, année spéciale.

TP à l'ENSIEG (16 h) en électrotechnique, 2^{ème} année, option Signaux Systèmes.

Bureau d'étude à l'ENSIEG (14 h) en modélisation des structures, 3^{ème} année, option Electronique de Puissance et Traitement de l'Energie. Sujet abordé : prélèvement sinusoïdal.

Conception d'un nouveau BE portant sur la modélisation d'un filtre actif. Le programme mis au point a ensuite été utilisé par les étudiants de l'option PDSE de l'école.

- Années 1999 – 2000 :

TP à l'IUT Génie électrique de Saint Martin d'Hères (56 h). Electrotechnique, 1^{ère} année.

V.2. Activités liées à l'administration

- Participation aux commissions d'entretiens organisées pour le recrutement en 1^{ère} année INSA du 04 au 06/05/2010, en 3^{ème} année INSA les 07 et 08/07/2010 à Strasbourg.
- Participation à la "Commission de spécialistes 63^{ème} section Université de Franche-Comté" de 2004 à 2007 en tant que membre nommé suppléant, et de 2007 à 2008 en tant que membre nommé titulaire.
- Participation au groupe de coordination FC LAB (dit "Codir FC LAB") qui se réunit depuis juillet 2008 environ une fois par semaine autour de son directeur Florent PETIT. Le groupe est composé d'un représentant par laboratoire du 1^{er} cercle composant FC LAB (CEA LITEN, INRETS LTE-LTN, FEMTO-ST, UTBM SET, UTBM M3M).
- Co-animation avec Willy CHARON (Prof. UTBM) du groupe "Performances système – expérimentation : moyens et méthodes" dans le cadre de FC LAB et du développement de son programme scientifique.

V.3. Activités liées à la recherche

V.3.1. Participation à des comités, organisation de colloques, séminaires...

● Participation à des comités scientifiques et organisation de conférences :

- Participation au comité scientifique de la conférence internationale : "Fundamentals & Developments of Fuel Cells (FDFC-2008)" du 10 au 12/12/2008 à Nancy.
- Participation au comité d'organisation de la conférence internationale : "2nd France - Deutschland Fuel Cell Conference (FDFC-2004). Fuel Cells: Materials, Engineering, Systems, and Applications" du 29/11 au 02/12/2004 à l'Atria Novotel de Belfort. Réalisation des actes (ISBN n°2914279-16-7), participation aux visites techniques, réalisation des essais techniques, rédaction de courriers divers.
- Organisation d'une réunion inter - laboratoires de Génie Electrique travaillant sur les PAC (LEEI Toulouse, EPF Lausanne, GREEN Nancy, LEG Grenoble), le 02/12/2003 à Belfort.

● Expertises et comités de lecture :

- Expertise et évaluation pour l'ANR d'un projet "Jeunes Chercheuses Jeunes Chercheurs" portant sur les PAC, en juillet - août 2005.
- Relecteur pour les revues internationales "International Journal of Hydrogen Energy" (Elsevier), "Energy Conversion and Management" (Elsevier), "International Journal of Electrical Power and Energy Systems" (Elsevier), "IEEE Transactions on Vehicular Technology", "IEEE Transactions on Industrial Electronics", "IEEE Transactions on Energy Conversion", "Journal Fuel Cell Science and Technology" (ASME), "The European Physical Journal Applied Physics" (EDP Sciences S A). Relecteur pour les conférences internationales "IEEE ISIE 2006 (International Symposium on Industrial Electronics)", "IEEE VPPC 2008 et 2010 (IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference)" et "IEEE ICEM 2010 (IEEE International Conference on Electrical Machines)".

● Participation à des jurys de thèse :

- Participation prévue au jury de thèse de doctorat de Latévi Atatoè PLACCA (M3M ; UTBM ; FC LAB) à Belfort le 17/12/2010 en tant que membre invité. Titre de la thèse : "Impact des incertitudes sur le fonctionnement des piles à combustible par une approche fiabiliste".
- Participation au jury de thèse de doctorat de Moussa CHNANI (FEMTO-ST/ENISYS ; UFC-UTBM ; FC LAB) à Belfort le 07/10/2008 en tant qu'examinateur. Titre de la thèse : "Modélisation macroscopique des piles PEFC et SOFC pour l'étude de leur couplage".

V.3.2. Programmes d'échanges, collaborations, réseaux internationaux, projets nationaux et européens

● Participation à des échanges internationaux :

- Collaboration étroite et suivie avec l'institut EIFER de Karlsruhe - Allemagne (EDF – Univ. de Karlsruhe, <http://www.eifer.uni-karlsruhe.de/>) dans le cadre des projets ANR DIAPASON et DIAPASON2, et de la thèse de Nadia STEINER.

- Collaborations avec Airbus Deutschland, le JRC Petten (Pays-Bas), le DLR (Allemagne), IRD (fabricant danois de PAC) dans le cadre du projet européen CELINA.
- Projet / réseau thématique européen FP5 FCTESTNET (Fuel Cell Testing Network). Contribution au projet dont l'objectif était de recenser et d'harmoniser les procédures de test existantes dans le domaine des PAC (communication de procédures de tests utilisées sur la plateforme expérimentale de Belfort). Participation à deux réunions : le 03/10/2003 à Belfort et du 20 au 22/10/2004 chez le constructeur de PAC ZSW à Ulm (Allemagne).
- Participation aux échanges INRETS / KRRI / Hyundai. Visites de la plateforme PAC de Belfort puis de la société LOHR le 04/10/2004 à Duppigheim (Bas-Rhin) avec des personnels du Korea Railroad Research Institute. Un projet de coopération a été déposé en 2005 et 2006 par le LTN : STAR (Science and Technology Amicable Research).
- Participation à une mission organisée par l'Agence Française pour les Investissements Internationaux (AFII – Invest in France Agency) et la Mission Economique de Chicago du 9 au 16 novembre 2005 dans le but de promouvoir les compétences françaises en matière de PAC auprès d'interlocuteurs américains. Répondant à une sollicitation du CNRT Ineva, j'ai eu dans ce cadre l'opportunité de participer à la conférence Fuel Cell Seminar (21^{ème} édition) organisée à Palm Springs - Californie. Celle-ci s'est déroulée parallèlement à un salon d'exposants regroupant des industries, des laboratoires actifs dans le secteur de la PAC et des organismes assurant la promotion de cette technologie. Les notes prises à l'occasion de cette conférence sont disponibles.

● Participation à des projets européens (EU) :

Projet EU mené à bien (responsable scientifique au niveau du L2ES puis du FC LAB) et participation à :

- CELINA (STREP EU FP6) : "Fuel Cell Application in a New Configured Aircraft". Ce projet s'inscrit dans le contexte général des recherches portant sur l'avion « plus électrique » qui doit permettre d'atténuer les impacts de l'aviation civile sur l'environnement. Dans ce cadre, l'utilisation d'hydrogène comme combustible et la mise en œuvre de systèmes PAC à bord des avions doit être considérée en particulier pour proposer des alternatives aux générateurs (APU) actuels basés sur des turbines à gaz. Dans le but de contribuer à l'étude de faisabilité technique, à la détermination des besoins en termes de sécurité et de sûreté de fonctionnement liés à l'utilisation future de la PAC dans l'aviation, les grands équipements spécifiques de la plateforme belfortaine (banc de test 20kW, chambre climatique, dispositifs de mélange des gaz, table vibrante) ont été mis à contribution pour reproduire au mieux en laboratoire les conditions de fonctionnement liées à un environnement de type aéronautique. Des PAC ont été caractérisées dans des conditions d'usages dynamiques, climatiques, vibratoires sévères. Site internet : http://cordis.europa.eu/search/index.cfm?fuseaction=proj.document&PJ_RCN=7977844.

Projet EU en cours :

- MOBYPOST (projet EU accepté dans le cadre de la JTI FCH-JU) : "Mobilité hydrogène pour La Poste". L'objectif du projet est de concevoir et réaliser pour La Poste une dizaine de véhicules de distribution du courrier ne rejetant pas de CO₂. L'hydrogène alimentant la PAC embarquée dans chaque véhicule sera produit à partir de l'énergie solaire, sur le lieu de garage des véhicules. Des plateformes de préparation et de distribution du courrier de La Poste situées en Franche-Comté accueilleront une installation de production d'hydrogène et les véhicules. Le FC LAB de Belfort contribue à la conception de la chaîne de traction des véhicules à PAC en menant des travaux de relevés de profils de mission (mesures embarquées), de modélisation - simulation et de caractérisation expérimentale. Site internet : <http://www.fch-ju.eu/project/mobility-hydrogen-postal-delivery>.

● Participation à des réseaux de chercheurs au niveau national :

- Participation au nouveau GDR PACS (Piles A Combustible, Systèmes) créé en 2010 (<http://www.gdr-pacs.cnrs.fr/spip.php?article3>). Les laboratoires du CNRS et d'autres EPST (dont l'IFSTTAR) ayant une forte activité dans le domaine des PAC sont à présent structurés au sein du GDR 3339 PACS, créé le 1^{er} janvier 2010 pour une durée de 4 ans. Des industriels (dont le CEA et EDF) participent également à ce GDR. Composé de plus de 150 personnes, il est structuré en 3 axes : PACEM (Piles A Combustible à Electrolyte Membrane), SOC (Solid Oxide Cells) et systèmes.
- Participation à des réunions d'échange entre laboratoires CNRS travaillant sur les systèmes PAC en vue de faire intégrer cette communauté au GDR PACTE (Piles A Combustible Tout Electrolyte ;

<http://www.gdr-pacte.cnrs.fr/>) : réunion du 06/11/2007 au CNAM à Paris (exposé sur les systèmes PAC à l'INRETS), réunion des 17 et 18/07/2008 au CNRS - Délégation Paris Michel-Ange (réalisation d'un exposé sur les systèmes PAC et la modélisation de l'expérience), réunion des 08 et 09/01/2009 (séminaire "Diagnostic des systèmes piles à combustible" à la Délégation CNRS de Paris A, Ivry-sur-Seine. Participation à la réunion plénière du GDR PACTE à Minatoc - Grenoble du 29/09 au 02/10/2008. Communication de transparents de synthèse liés aux activités INRETS sur : la modélisation des systèmes PAC, leur diagnostic, leur hybridation.

- Participation à la structuration de la communauté systèmes PAC dans le cadre du programme ENERGIE du CNRS. Participation à la réunion du GAT 3 Piles à Combustible et leur Gestion (PACoGES) du 19 au 21/01/2003 à Toulouse – Labège. Ce réseau thématique, mis en place par le CNRS, est dédié à l'étude des membranes PEM, aux piles à haute température et aux systèmes PAC.

- Participation aux Plates-Formes Intégratrices (PFI) INRETS / Groupes d'Echange et de Recherche IFSTTAR (GERI) "Effet de serre et transport" et "Véhicule électrique". Communication et échanges d'informations en lien avec les activités PAC de l'INRETS - IFSTTAR. Site internet : <http://www.inrets.fr/les-recherches/geri.html>.

● Participation à des projets régionaux et nationaux :

Les recherches à l'IFSTTAR sont menées dans un cadre contractuel via des supports financiers régionaux (DRIRE Franche-Comté), nationaux (ANR) et européens, mais aussi à travers des actions à caractère exploratoire et grâce à des implications dans la formation par et à la recherche. L'IFSTTAR / l'INRETS a été ou est impliqué dans les projets directement en tant que partenaire, ou via sa participation aux actions L2ES puis FC LAB.

Projets régionaux et nationaux menés à bien. Participation à :

- SPACT (projet labellisé par le réseau PACo : PF-99-46. Période 2002 - 2005) : Systèmes Pile à Combustible pour les Applications Transport,

- Convention DRIRE Franche-Comté 01 Y 0044-02 (contrat L2ES. Période 2003 - 2004) : Influence de l'environnement sur les performances et le vieillissement des PAC PEM,

- VITAPAC (Action Concertée Incitative CNRS L2ES - LSGC) (contrat L2ES. Période 2004 - 2005) : Etude des causes du vieillissement des PAC de type PEM,

- SPACT80 (ANR PAN'H. Période 2005 - 2008) : Système PAC pour applications transports 80kW,

- DIAPASON (ANR PAN'H. Période 2006 - 2010) : Méthodes de DIAGNOSTIC pour Piles à combustible pour les applications Automobile et Stationnaire sans instrumentation,

- DIAGPAC (Action Spécifique INRETS LTN. Année 2009) : Méthodologies de diagnostic pour PAC. Collaboration INRETS Marne-la-Vallée, INRETS Versailles Satory, INRETS Belfort / FC LAB et FEMTO-ST / FC LAB.

Projet national en cours :

- DIAPASON2 (ANR HPAC 2010. Période janvier 2011 - 2014) : Suite de DIAPASON. Méthodes de diagnostic et de pronostic de l'état de santé d'une PAC de type PEM.

- F-CITY H2 (financements européen, OSEO, région Franche-Comté, collectivités territoriales) : Intégration d'un générateur PAC dans un véhicule urbain FAM (F-City) destiné à un usage de type libre-service. Le FC LAB intervient aux côtés de Michelin dans le cadre d'études de sûreté de fonctionnement.

VI. Liste des rapporteurs

Nous proposons les noms d'HDR suivants (discipline : Génie Electrique) :

Prénoms Noms	Coordonnées	Note
Stephan Astier PR 63 INP Toulouse ENSEEIH	Université de Toulouse, Laplace, CNRS-INP-UPS ENSEEIH. 2 rue Charles Camichel. BP 7122 - 31071 Toulouse Cedex 7 Tél : 05 34 32 23 92 Courriel : stephan.astier@laplace.univ-tlse.fr S. Astier mène des activités de recherche et de formation dans le domaine des énergies durables et des nouvelles technologies de l'énergie : les systèmes photovoltaïques, les électrolyseurs et piles à combustible en particulier.	*
Bernard Davat PR 63 INP Lorraine ENSEM Nancy	GREEN Nancy. ENSEM. 2 avenue de la Forêt de Haye. 54516 Vandœuvre-lès-Nancy. Tél : 03 83 59 56 54 Courriel : bernard.davat@ensem.inpl-nancy.fr . B. Davat mène des activités de recherche dans le domaine des générateurs pile à combustible et des chaînes de traction hybrides.	*
Jean-Michel Vinassa PR 63 Institut polytechnique de Bordeaux	ENSEIRB MATMECA / IPB Laboratoire de l'Intégration du Matériau au Système (IMS UMR 5218 CNRS – IPB – Univ. Bordeaux 1) Département : PCS. Groupe : Fiabilité. Equipe : Puissance Bât. A31. 351 Cours de la Libération, 33405 Talence cedex, France Tél : 05 40 00 26 13 Courriel : jean-michel.vinassa@ims-bordeaux.fr J-M. Vinassa mène des travaux de recherche sur la caractérisation, la modélisation, la fiabilité, le vieillissement des composants de stockage de l'énergie électrique : batteries, supercondensateurs.	

- * Ces noms sont proposés même s'ils figurent sur deux publications communes proposées dans le cadre du GDR PACS et dont les auteurs appartiennent à la communauté des chercheurs universitaires français qui exercent une activité dans le domaine des systèmes pile à combustible (conférences internationales : ACT3.DC16 et ACT3.DC13).

Date : 23/11/2011
Signature du candidat
Denis Candusso

Signature des garants
Gérard Coquery
Zoubir Khatir

VII. Annexe : résumé des travaux de formation par et à la recherche

Note : ne figurent pas dans cette annexe les synthèses de travaux récemment entrepris :

- Thèse de doctorat en Génie Electrique de M. Nicolas NOGUER,
- Thèse de doctorat en Génie Electrique de M. Idriss RABAAOUI,

VII.1. Thèse de doctorat en Génie Electrique de Bouchra WAHDAME

- **Encadrement**

J-M. KAUFFMANN – PR UFC
D. CANDUSSO

- **Durée**

Oct. 2003 – nov. 2006

- **Financement**

Ministère de la Recherche
Thèse L2ES - UTBM - UFC

- **Soutenue le 21/11/2006. Mention très honorable. Jury composé de :**

M. Stephan ASTIER, PR Univ. Paul Sabatier Toulouse, INPT, laboratoire LAPLACE (Président)
M. Pascal BROCHET, PR Ecole Centrale de Lille (Rapporteur)
M. Maurice PILLET, PR Univ. De Savoie (Rapporteur)
M. Gérard COQUERY (Examineur)
M. Jean-Marie KAUFFMANN
M. Denis CANDUSSO

Nominée en 2007 pour le prix de thèse du Club EEA

- **Titre de la thèse**

Analyse et optimisation du fonctionnement de piles à combustible par la méthode des plans d'expériences

- **Mots clés**

Système pile à combustible, plans d'expériences, méthode des surfaces de réponse, durée de vie, application transport

- **Résumé de la thèse**

Les générateurs piles à combustibles (PAC) ont des performances qui dépendent fortement des conditions de fonctionnement liées à l'environnement dans lequel ils se trouvent. De plus, le pilotage de ces systèmes demeure délicat en raison du grand nombre de paramètres physiques mis en jeu tels que le profil du courant imposé par la charge, la température du stack, les températures, les pressions, les débits, l'hydratation des gaz... La méthodologie des Plans d'Expériences (PE) permet de définir de manière rationnelle les essais visant à caractériser rapidement et efficacement une PAC. Elle permet de déterminer les paramètres les plus influents sur le comportement de la pile et de mettre en évidence les interactions éventuelles qui lient ces facteurs. D'autre part, la caractérisation du générateur PAC par des PE a pour finalité de prédire le comportement du système vis-à-vis de ses paramètres de fonctionnement et d'envisager ainsi, par la suite, des stratégies de pilotage du système visant à optimiser un critère déterminant tel que la tension, la consommation d'hydrogène, la puissance électrique maximale, voire la durée de vie du stack.

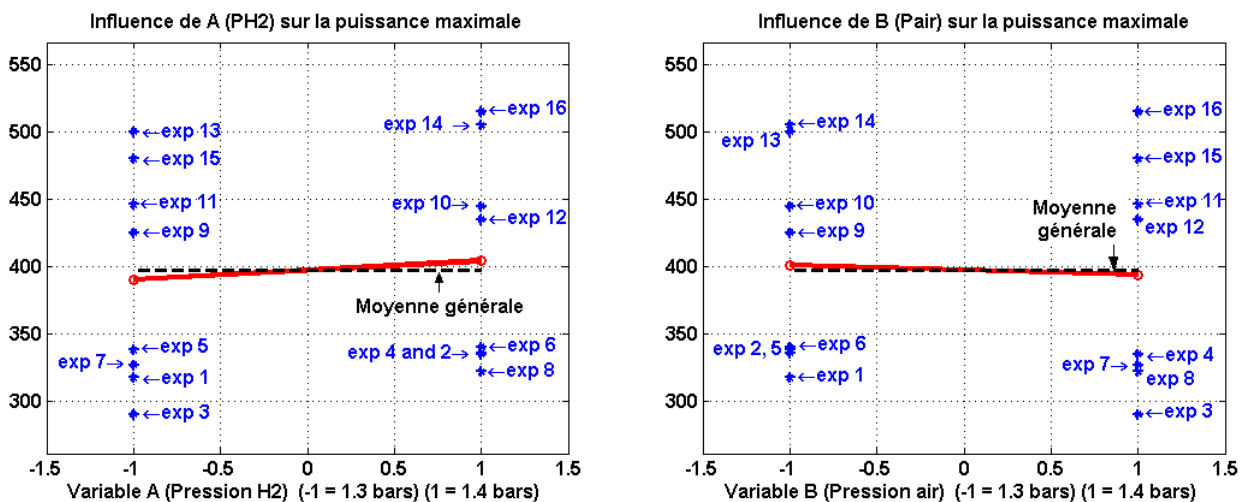
Le mémoire est divisé en six chapitres. Après un bref aperçu du fonctionnement d'une PAC et de ses contraintes (premier chapitre), l'auteur donne les éléments essentiels de la méthodologie des PE nécessaires à la compréhension de la suite du travail (deuxième chapitre). Un plan destiné à étudier l'influence des débits et des pressions, côté hydrogène et côté air, sur la puissance maximale de la pile a été réalisé sur une pile PEM 500W utilisée en mode régulation de pression (troisième chapitre). Le plan complet comporte seize essais. Les analyses de la variance pour le plan complet et pour le plan fractionnaire (huit expériences choisies judicieusement parmi les seize réalisées) ont conduit à des résultats sensiblement identiques, à savoir une influence majeure du facteur débit d'air sur le niveau de puissance maximal atteint par la pile étudiée. Les plans et les outils logiciels mis au point ont ensuite été développés et utilisés pour analyser des résultats expérimentaux collectés sur une pile PEM 5kW dans le cadre du projet SPACT (chapitre quatre). Les analyses réalisées permettent de cerner clairement et

d'exprimer quantitativement, pour différents niveaux de courant de charge, les incidences des paramètres température de stack, pressions et surstœchiométries des gaz réactifs sur les performances de la PAC. Une modélisation statistique de la tension de pile en fonction des paramètres étudiés est mise en œuvre pour optimiser les conditions de fonctionnement de la pile. Le cinquième chapitre est consacré à l'analyse par la Méthode des Surfaces de Réponse (MSR) de résultats expérimentaux issus d'un essai d'endurance d'une PAC 100W ayant fonctionné en régime stationnaire pendant 1000 heures (cadre de la convention DRIRE 01 Y 0044-02). Cette étude a notamment permis de montrer l'intérêt d'adopter des surstœchiométries variables au cours du temps pour aboutir d'une part à des performances élevées en terme de tension de pile et d'autre part à une diminution de la variabilité des tensions de cellules. Le dernier chapitre montre comment les PE peuvent contribuer à une meilleure compréhension des phénomènes physiques intervenant dans les PAC. Trois domaines sont considérés : les pertes de charge dans les plaques bipolaires distributrices des gaz réactifs, l'impact de l'humidification sur la variation de la résistance interne de la pile et le vieillissement à une température de fonctionnement supérieure à la valeur nominale.

L'ensemble des travaux réalisés montre comment la méthode des plans d'expériences peut être un moyen approprié pour caractériser, analyser et améliorer le système complexe que représente un générateur PAC.

• Note sur les travaux réalisés

Bouchra WAHDAME a réalisé un travail très pluridisciplinaire. Elle a ainsi dû faire face à des problèmes de génie électrique, de contrôle - commande, de fluide, d'électrochimie... pour parvenir à appréhender le fonctionnement d'un système PAC. Elle a en outre acquis des connaissances très précieuses sur la méthodologie des plans d'expériences et sur les outils statistiques qui lui sont associés. Des compétences importantes ont été développées : en analyse expérimentale, compétences particulièrement adaptées aux besoins actuels importants affichés dans le domaine de la PAC et des systèmes complexes. En s'appuyant constamment sur des ouvrages ou des publications, Bouchra WAHDAME a acquis une connaissance et une expérience incontestables sur la thématique PAC et a participé au recueil et à l'exploitation de nombreuses données expérimentales collectées sur des piles aux puissances différentes (de 100W à 5kW). Des outils logiciels d'analyses particulièrement intéressants et ayant une portée pratique ont été mis au point dans l'environnement Matlab®. Les programmes développés permettent notamment de mettre clairement en évidence les niveaux d'incidences de paramètres physiques sur le comportement des piles et rendent ensuite possible une optimisation des performances. Bouchra WAHDAME a prouvé son aptitude à communiquer ses connaissances scientifiques aussi bien par écrit qu'oralement (rapport de thèse, 6 articles dans des revues internationales, 4 publications dans des conférences internationales, 1 publication nationale, 1 présentation orale au congrès national JCGE 2005 et 2 présentations orales lors des conférences internationales IEEE : ISIE 2006 et IECON2006).



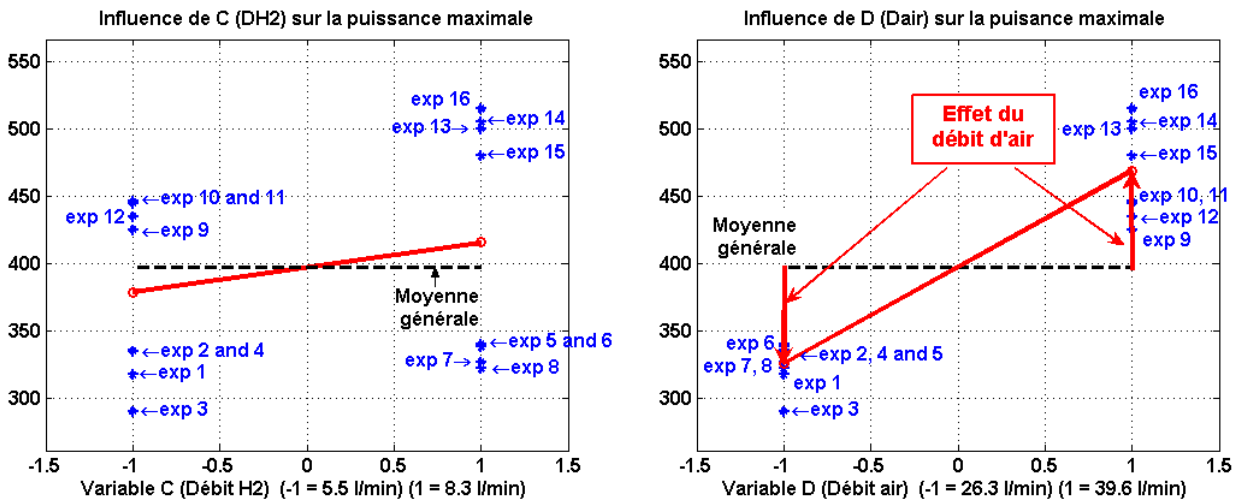


Fig. VII.1 : Etude de l'impact des pressions et débits H2 / air sur les performances d'une PAC. Graphes des effets moyens relatifs au plan d'expériences (Chap. III de la thèse de B. WAHDAME).

• L'après thèse

Bouchra WAHDAME a obtenu la qualification aux fonctions de Maître de Conférences (63^{ème} section) début 2007. Elle a été employée au sein de FC LAB, de décembre 2006 à septembre 2007 en tant qu'Ingénieur de Recherche contractuel et a travaillé dans le cadre du projet SPACT80 (responsable FC LAB : D. HISSEL). Elle a ensuite été quelques mois ATER à l'Université de Franche-Comté et a continué à exercer ses activités de recherche dans le cadre de SPACT80. Depuis février 2008, elle occupe un poste en CDI d'ingénieur calculs au sein de la société Alstom Power à Belfort et travaille notamment sur des alternateurs de fortes puissances (>1GW) refroidis à l'hydrogène.

VII.2 Thèse de doctorat en Génie Electrique de Nadia YOUSFI STEINER

• Encadrement

P. MOÇOTEGUY – IR EDF EIFER
D. HISSEL – PR UFC
D. CANDUSSO

• Durée

Nov. 2006 – déc. 2009

• Financement

EDF EIFER, en lien avec le projet DIAPASON
Thèse FEMTO-ST / UFC et FC LAB

• Soutenue le 03/12/2009. Mention très honorable. Jury composé de :

M. Bernard DAVAT, PR INPL Nancy, laboratoire GREEN (Président)
M. Patrice AKNIN, DR INRETS LTN (Rapporteur)
M. Pascal MAUSSION, PR Univ. Toulouse (Rapporteur)
M. Philippe MOÇOTEGUY, Chef de projet EDF EIFER, Karlsruhe (Examineur)
M. Cesare PIANESE, Univ. de Salerno, Italie (Examineur)
M. Vincent RAIMBAULT, Ingénieur et chef de projet chez HELION (Examineur)
M. Daniel HISSEL
M. Denis CANDUSSO

• Titre de la thèse

Diagnostic non intrusif de groupes électrogènes à piles à combustible de type PEMFC

• Mots clés

PEMFC, diagnostic, arbres de défaillance, reconnaissance des formes, réseaux de neurones, transformées en ondelettes

• Résumé de la thèse

Les piles à combustibles (PAC de technologies PEMFC ou SOFC) sont des technologies prometteuses dans le domaine applicatif de la micro-cogénération. Utilisées pour produire de l'électricité et de la chaleur dans un bâtiment, elles permettent d'abaisser la consommation d'énergie primaire et rendent donc possible une diminution des émissions de gaz à effet de serre, ainsi qu'une réduction de la facture énergétique pour le client utilisateur. Ces gains potentiels sont cependant fortement dépendants des performances des piles utilisées (rendements électrique et thermique), de leur durée de fonctionnement (durée de vie et disponibilité : 40000 h de fonctionnement en base avec une maintenance annuelle) et des coûts engendrés (objectif au niveau du micro-cogénérateur : 1500 €/kW). Pour atteindre les objectifs de rendement et de durée de vie qu'implique l'application de la micro-cogénération, il convient d'améliorer la fiabilité des systèmes pile (cœur de pile et auxiliaires) et d'optimiser les stratégies de contrôle du système en privilégiant des modes de fonctionnement non dégradants et adaptés aux besoins thermique et électrique de l'habitat. Dans ce contexte, des procédures de diagnostic sont nécessaires pour identifier les processus causant les dysfonctionnements dans les PAC utilisées et pour pouvoir prévoir des actions correctives adaptées.

La mise en œuvre de telles actions de diagnostic repose avant tout sur une bonne connaissance préalable des mécanismes physiques qui conduisent aux phénomènes de dégradations observés dans les PAC. Les piles sont par essence des systèmes multiéchelles (des composants à la cellule, de la cellule au cœur de pile, de la pile au système), régis par des phénomènes multiphysiques complexes (ayant trait à l'électrochimie, la mécanique, la thermique, la fluïdique, l'électricité...). Dans ce contexte, des arbres de défaillances ont pu être élaborés par Nadia STEINER afin d'explicitier à la fois qualitativement et de manière claire, intuitive les différentes relations causales intervenant dans les processus de dégradation des PEMFC. Des équations mathématiques régissant ces phénomènes ont aussi pu être établies. Ce travail-là, qui s'est inscrit dans une démarche globale de modélisation multiphysique, s'est avéré très utile pour mettre en évidence et mieux comprendre les défauts liés à la gestion de l'eau dans les PEMFC, aux fonctionnements en sous-stœchiométries et aux empoisonnements des électrodes par des polluants (CO par exemple). Ces modèles de pile phénoménologiques ne se sont néanmoins pas montrés faciles d'utilisation pour assurer des diagnostics aux visées applicatives fortes (en ligne ou semi-différé). La problématique du diagnostic a alors été abordée en considérant deux autres types d'approches : à base de modèles (en l'occurrence, des "boîtes noires ou grises") d'une part, et en utilisant les principes de la reconnaissance de forme d'autre part. Les avantages et inconvénients de ces deux types de méthodes ont été analysés, tout comme les problématiques sous-jacentes aux étapes de détection et de classification. Les méthodes ont été mises en œuvre sur des bases de données expérimentales issues de campagnes d'essai effectuées au FC LAB et dans le cadre du projet ANR *DIAPASON*. Les mesures utiles étant constituées de suivis d'évolutions de tension de piles, de pertes de charges dans les compartiments cathode, de relevés de courbes de polarisation, de spectres d'impédance et de sauts de courant.

L'approche basée modèle a consisté à tirer profit de la force des Réseaux de Neurones (RN) qui permettent de représenter des phénomènes complexes sans avoir besoin d'explicitier les différents relations entre les entrées et les sorties du modèle. En outre, dans ce cas, la modélisation n'a besoin de porter que sur le seul fonctionnement normal, ce qui facilite bien les choses pour examiner des défauts multiples liés à la gestion de l'eau (assèchements et noyages dans la PAC). La méthode a donc consisté à comparer les tensions de PAC et les pertes de charge cathodiques mesurées sur un stack PEM à celles calculées par un RN à partir des débits d'entrée d'air, de la température du stack et du courant de charge. L'apprentissage du RN ayant été fait à partir de données recueillies dans des conditions expérimentales où le stack n'était pas noyé, ni asséché. Les résidus générés ont été utilisés pour déterminer l'état de santé du stack : PAC noyée, asséchée et dans un état intermédiaire.

L'approche reconnaissance de forme a quant à elle été appliquée à des variables issues d'une paramétrisation heuristique de mesures (sauts de courant, spectres d'impédance) et à des modèles liés à ces mêmes types de réponses. Des espaces dits de représentations ont été élaborés et différents outils (Analyse en Composantes Principales, critère de Fisher, méthodes séquentielles SFS et SBS) ont été déployés pour aboutir à une réduction de la dimensionnalité des espaces, initialement de trop grandes tailles pour pouvoir être traités simplement. Différentes procédures de classifications ont ensuite été

envisagées (stratégies "un contre tous", "deux à deux" avec des classifieurs de type kppv, RN ou Machines à Vecteurs Support - SVM).

Le traitement des informations collectées sur les PAC a finalement encore été envisagé, toujours dans un contexte de reconnaissance de forme, mais en introduisant une nouvelle description des signaux de tension de pile réalisée au moyen de transformées en ondelettes et paquets d'ondelettes. Ces dernières correspondent en fait à une décomposition multiéchelle du signal à analyser. La méthode consiste à effectuer à l'aide de filtres passe-haut et passe-bas, et ce de manière itérative, un découpage / une décomposition du signal en une série de "sous-signaux" de détails (hautes fréquences) et d'approximation (basses fréquences). Chaque passage par les filtres correspondant à un niveau de décomposition (on parle "d'échelle"). Connaissant les domaines de fréquences (f) auxquels interviennent certains problèmes physiques dans les PAC, des défauts peuvent être localisés en choisissant un niveau de décomposition approprié du signal observé : la tension de pile (phénomènes thermiques et fluidiques : $f < 0.1\text{Hz}$, phénomènes de diffusion : $0.1\text{Hz} < f < 10\text{Hz}$). Une fois le niveau de décomposition fixé, les signaux doivent servir de base à une "détection de défaut" puis à une "discrimination". Pour cela, la notion de signature de défaut doit être définie (ex. : coefficients en ondelettes seuillés, énergie des différents sous-signaux, différentes caractéristiques statistiques comme la moyenne, l'écart type... ou alors combinaison de ces caractéristiques). Une représentation en "arbre d'ondelettes" partant du signal d'origine et générant à chaque étape deux nouveaux paquets à partir du filtrage de chaque paquet, permet de montrer les liens entre les paquets. Elle peut être vue comme la carte d'un signal, dans la mesure où elle dévoile des informations sur le signal en question, à différentes échelles temporelles et fréquentielles. La notion de filtre rend maîtrisable la fréquence de chaque paquet et elle est donc exploitable pour la localisation de changements fréquentiels indicateurs de l'occurrence d'un défaut. On peut ainsi repérer les paquets porteurs d'information discriminante pour chacun des défauts. Un apprentissage approprié permet de définir une carte simplifiée (en éliminant les paquets non pertinents) pour chaque défaut, représentant en quelque sorte sa signature. Finalement, comme pour toute démarche de reconnaissance de formes, un défaut est détecté en comparant la "carte" du signal avec celle des "défauts" à diagnostiquer.

Réalisée en lien étroit avec le projet *DIAPASON*, les travaux réalisés dans cette thèse ont aussi servi à identifier des synergies possibles en termes de recherche entre les applications stationnaires et transports, au niveau de la compréhension des modes de défaillance des piles et dans le domaine des méthodes de diagnostic. Les contraintes liées à la non-intrusion et à la limitation de l'instrumentation (approche "macroscopique" avec la prise en considération de la tension globale du stack seule) ont été prises en compte afin d'adapter les algorithmes aux applications embarquées et stationnaires (en perspective de *DIAPASON2*).

• Notes sur la thèse

La thèse de Nadia STEINER a apporté une contribution forte au thème du diagnostic des PAC de type PEM. Les travaux menés, délibérément pluridisciplinaires, présentent un aspect original et exploratoire très important : l'objectif consistait à évaluer pour la première fois les potentialités de différents outils au caractère mathématique évident (méthodes de reconnaissance de forme et d'analyse du signal par des transformées en ondelettes) dans une optique diagnostic. Les résultats obtenus n'en offrent pas moins des perspectives significatives en termes de prolongement de recherche, voire de retombées applicatives comme en témoigne par exemple le brevet déposé dans le cadre de la thèse et du projet *DIAPASON*.

Un travail très conséquent et varié, réalisé avec beaucoup de soin, incluant une large part d'analyse de données et de traitement d'information d'origines expérimentales diverses, a été réalisé. Des solutions très intéressantes et concrètes ont été proposées. Des outils logiciels d'analyses originaux et bien adaptés au diagnostic des PAC ont été mis au point.

Il faut aussi souligner l'apport très fort de Nadia STEINER, et d'EIFER par le biais de Philippe MOÇOTEGUY (électrochimiste de formation), dans l'approfondissement de la physique de la PAC et des mécanismes de dégradation, de défaillance qui interviennent dans ces objets. Ces travaux initiaux, qui ont fait l'objet du premier chapitre de thèse et de deux communications dans des revues internationales (*Journal of Power Sources*), ont sous-tendu toutes les approches de diagnostic mises en œuvre par la suite.

Nadia STEINER a eu le souci de valoriser et communiquer les avancées de ses travaux de thèse par un brevet, 6 publications dans des revues internationales, 2 communications en conférences internationales (*ELECTRIMACS 2008* et *Conférence de Trondheim en 2009*) et 2 communications faites en "Workshops".

• **L'après thèse**

Nadia STEINER occupe actuellement un emploi d'ingénieur de recherche au laboratoire EIFER de Karlsruhe. Elle continue à mener des travaux sur le thème du diagnostic de PAC et étend notamment les résultats de ses travaux de thèse au cas des piles SOFC (en particulier dans le cadre du projet EU *GENIUS*).

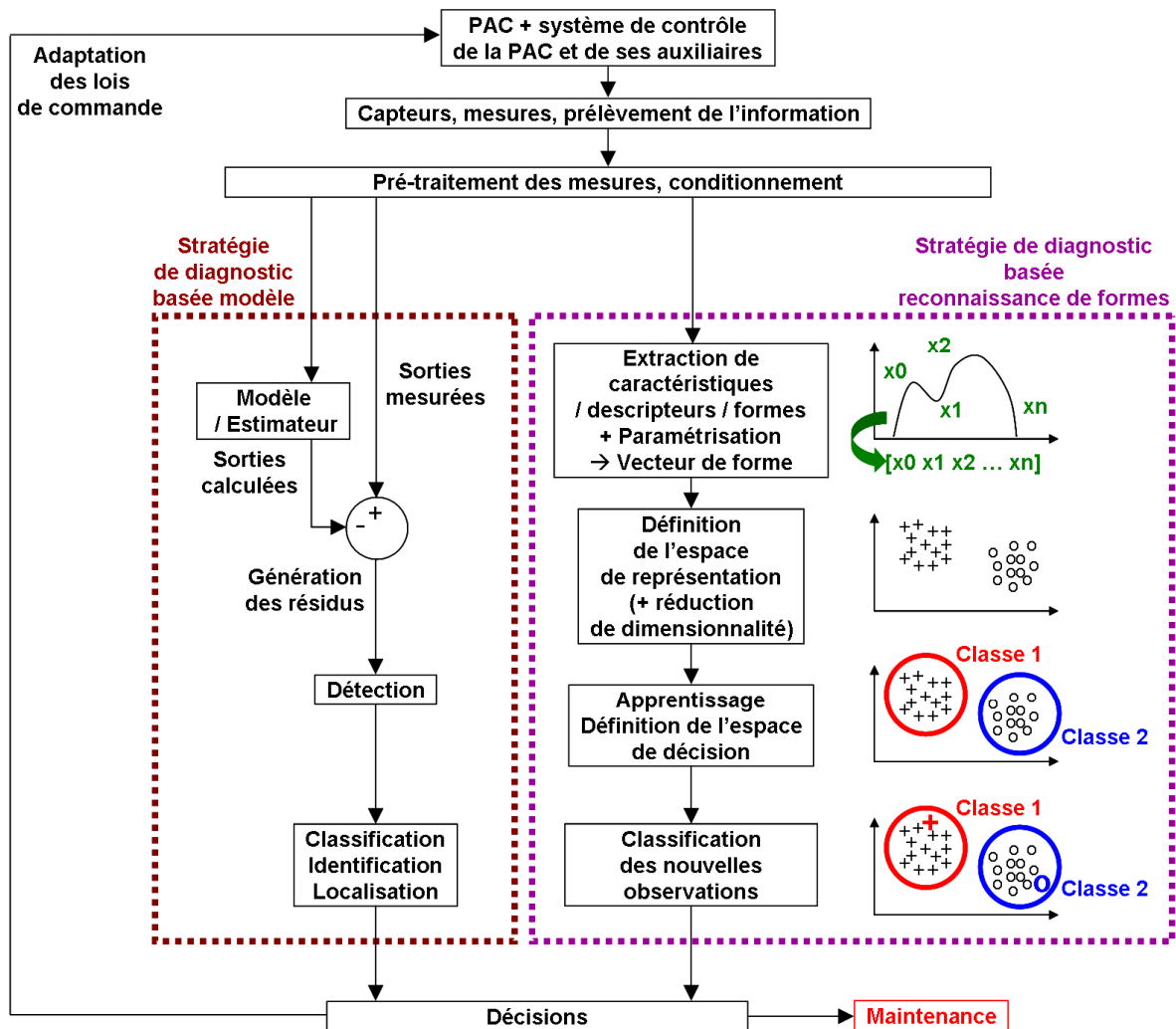


Fig. VII.2 : Schéma général présentant une démarche de diagnostic, avec ici deux options possibles : une stratégie basée sur l'utilisation d'un modèle ou bien une méthode mettant en œuvre des techniques de reconnaissance de forme. Figure adaptée de schémas présentés dans la thèse de Nadia STEINER.

VII.3. Thèse de doctorat en Génie Electrique de Sébastien WASTERLAIN

- **Encadrement**

D. HISSEL – PR UFC
D. CANDUSSO

- **Durée**

Oct. 2006 – fév. 2010

- **Financement**

ANR – PAN'H
Projet *DIAPASON*
Thèse FEMTO-ST, UFC et FC LAB

- **Soutenue le 04/02/2010. Mention très honorable. Jury composé de :**

M. Rachid OUTBIB, PR Univ. Aix Marseille III (Président)

M. Gérard COQUERY, DR INRETS LTN (Rapporteur)

M. Christophe TURPIN, CR CNRS Univ. Paul Sabatier Toulouse, INPT, laboratoire LAPLACE (Rapporteur)

M. Philippe MOÇOTEGUY, Chef de projet EDF EIFER, Karlsruhe (Examinateur)

M. Jordi RIERA, PR Univ. De Catalogne, Espagne (Examinateur)

M. Giovanni SPAGNUOLO, PR Univ. de Salerno, Italie (Examinateur)

M. Daniel HISSEL

M. Denis CANDUSSO

Prix de thèse du Club EEA – GDR SEEDS obtenu en 2012

- **Titre de la thèse**

Approches expérimentales et analyse probabiliste pour le diagnostic de piles à combustible de type PEM

- **Mots clés**

Système pile à combustible, expérimentation, diagnostic, spectrométrie d'impédance, voltammétries linéaires et cycliques, réseaux bayésiens

- **Résumé de la thèse**

La durée de vie et la fiabilité des générateurs piles à combustible (PAC) à membranes polymère (PEM) constituent des enjeux majeurs dans le développement de cette technologie, en particulier dans le secteur des transports. On peut néanmoins estimer que la contrainte de la durée de vie pourrait être en partie contournée, ou atténuée, si l'on optait pour des procédures de diagnostic et de maintenance préventive qui permettraient de détecter à quel moment il conviendrait de changer certains organes du générateur PAC. Les travaux de cette thèse de doctorat se sont inscrits dans ce contexte qui était aussi celui du projet ANR PAN'H *DIAPASON* (Méthodes de diagnostic pour Piles à combustible pour les applications Automobile et Stationnaire sans instrumentation).

Le besoin exprimé au FC LAB de disposer d'instruments de mesure permettant la caractérisation de générateurs PAC de fortes puissances a conduit Sébastien WASTERLAIN à développer un spectromètre d'impédance haute tension et multivoie (Fig. 3). Ce nouveau système de mesure original, possédant 31 voies d'acquisition, est capable de réaliser des relevés sur des générateurs électrochimiques dont les tensions peuvent atteindre plusieurs centaines de Volt. Différentes caractérisations de stacks basses températures (PEMFC) ont été réalisées en mettant en œuvre un plan d'expérience combinant des conditions normales et dégradantes. Les signatures fréquentielles issues des mesures par spectroscopie d'impédance ont ensuite été analysées par la méthode probabiliste des réseaux bayésiens en vue d'assurer un diagnostic de l'état de santé du générateur. L'approche retenue a consisté à discerner sept modes de fonctionnements de PAC (incluant un mode "normal" et six modes de défaillances). L'analyse probabiliste a montré d'excellentes capacités à assurer un diagnostic efficient de la PAC étudiée. Un taux de bonne détection et classification des modes de fonctionnement de 98.5% a ainsi été obtenu sur le plan d'expérience préalablement défini dans *DIAPASON*.

En complément des travaux menés autour de la mesure de spectres d'impédance électrochimique, deux autres techniques électroanalytiques (voltammétries à balayage linéaire et cyclique), jusqu'alors réservées à l'étude de mono-cellules de PAC, ont été adaptées en vue de procéder à l'analyse de générateurs multicellules. La voltammétrie à balayage linéaire a notamment permis de caractériser la perméabilité des membranes perfluorées qui équipent les PAC de type PEMFC ; la perméabilité des

membranes constituant un excellent indicateur de l'état de santé des stacks. La voltammétrie à balayage cyclique a été utilisée quant à elle pour caractériser les surfaces réellement actives aux électrodes. Enfin, une méthode combinant mesures pressiométriques et mesures électriques a été développée dans le but d'identifier les cellules défaillantes dans un générateur multicellule (problèmes d'inétanchéités anode – cathode et avec le compartiment caloporteur de la PAC).

• Note sur les travaux réalisés

Sur toute la durée de sa thèse, Sébastien WASTERLAIN a constamment prouvé son aptitude à proposer et à mettre en œuvre des idées nouvelles dans un cadre très pluridisciplinaire, sur un plan non seulement scientifique mais aussi technique. Il a développé de fortes compétences dans le développement de protocoles expérimentaux, en instrumentation électrochimique pour la caractérisation, l'analyse et le diagnostic de générateurs électrochimiques tels que les PAC.

Sébastien WASTERLAIN a commencé ses travaux de thèse en effectuant des recherches bibliographiques très fouillées d'une part sur la durée de vie et les modes de vieillissement des PAC PEM, et d'autre part sur les méthodologies de diagnostic associées aux modèles boîtes noires – boîtes grises. Il faut souligner à cette occasion l'effort important qu'il a réalisé dans l'approfondissement de la compréhension des mécanismes de dégradation et de défaillance qui interviennent dans les PAC. Ce sont des aspects qui bien évidemment sous-tendent toutes les approches de caractérisation et de diagnostic ; et dans la suite de sa thèse, Sébastien WASTERLAIN a pu s'appuyer sur des connaissances fort utiles issues de très nombreuses références bibliographiques. Un moyen d'essai original a ensuite été développé en vue de la caractérisation dynamique et du diagnostic des piles (objectifs : spectrométrie d'impédance sur des stacks aux niveaux de tensions significatifs pour les applications transport et stationnaire, et possibilité d'établir des spectres pour chacune des cellules ou pour des groupes de cellules au sein des empilements. Le spectromètre commercial Zahner utilisé au FC LAB ne permettait que la caractérisation de piles de cinq cellules et seule la tension complète aux bornes du stack était analysée). A noter que dans le futur, l'instrument développé devrait aussi permettre de solliciter les PAC avec des signaux dont la composante alternative ne sera plus une simple sinusoïde mais une onde plus chargée en harmoniques. Ce type de sollicitation pourrait s'avérer fort intéressante dans un contexte de diagnostic embarqué.

Sébastien WASTERLAIN a fait preuve de beaucoup de ténacité, d'opiniâtreté et a toujours cherché à vraiment approfondir le sujet de thèse proposé, à aller "au fond des choses", en allant assez souvent au-delà de ce qui était attendu de sa part. Il a ainsi complètement répondu à la mission première et difficile qui lui avait été impartie, dans le cadre de *DIAPASON*, à savoir d'une part le développement d'un impédancemètre haute tension, multicellule fonctionnel et d'autre part l'exploration du potentiel des méthodes probabilistes en vue du diagnostic des PAC. Parallèlement donc à ces activités de recherche à mener dans un cadre contractuel, Sébastien WASTERLAIN s'est également intéressé à des protocoles de détection de cellules défaillantes dans les stacks, au problème spécifique des défauts d'étanchéité interne entre les compartiments anode - cathode - caloporteur des PAC. Il a par ailleurs réalisé un stage très fructueux de quatre semaines au Connecticut Global Fuel Cell Centre (Connecticut – USA) fin 2007, stage qui lui a permis de compléter ses connaissances théoriques et expérimentales dans le domaine de la caractérisation des PAC. Il s'est ainsi familiarisé avec la technique de la voltammétrie (à balayages linéaire et cyclique) et ses nouvelles connaissances, son savoir-faire ont permis l'introduction de cette technique de caractérisation au FC LAB. Ces outils y sont maintenant fort utiles ; il faut en effet bien comprendre qu'il existe en définitive un nombre limité de techniques "électriques" de caractérisation pour PAC de fortes puissances et qu'il y a donc un intérêt très fort à en développer de nouvelles pour accéder à une meilleure estimation des paramètres physiques liés aux fonctionnements de la PAC.

Sébastien WASTERLAIN a prouvé son aptitude à communiquer ses connaissances scientifiques aussi bien par écrit qu'oralement (rapport de thèse, 6 articles dans des revues internationales, 4 publications dans des conférences internationales, 2 présentations orales lors des conférences internationales *ASME Fuel Cell – New York 2010* et *European Fuel Cell Forum – Lucerne 2009*, rapports d'avancement du projet *DIAPASON*).

• L'après thèse

Sébastien WASTERLAIN occupe actuellement un emploi de post-doctorant à l'EPFL. Il mène des recherches sur des sources et convertisseurs d'énergies alternatives destinés à des applications de type navire / bateau.

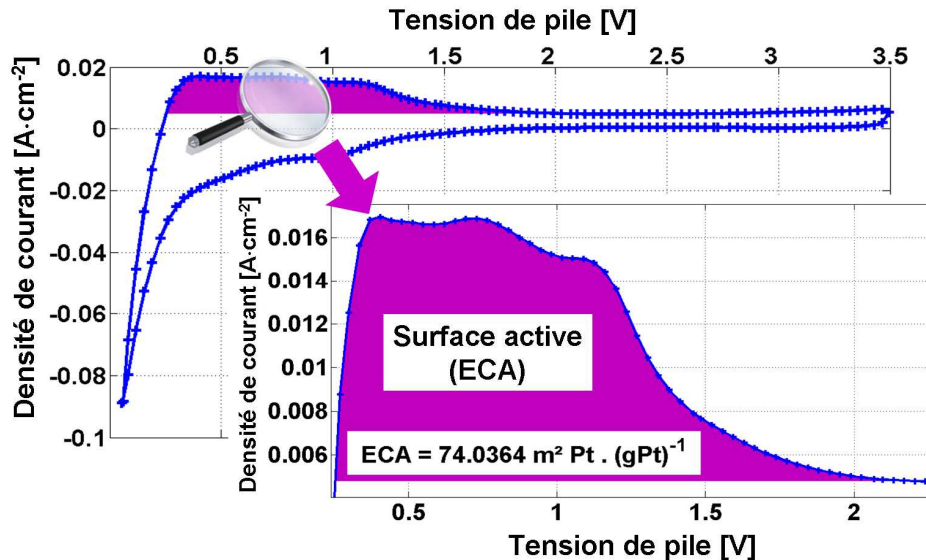


Fig. VII.3 : Estimation de surfaces actives d'électrodes par des mesures de voltammétrie cyclique appliquée à des stacks cf. réf. ACL1.DC23.

VII.4. Thèse de doctorat en Génie Electrique de Raïssa ONANENA

• Encadrement

P. AKNIN – DR INRETS LTN
D. HISSEL – PR UFC
L. OUKHELLOU – MCF INRETS LTN
D. CANDUSSO

• Durée

Oct. 2009 – oct. 2011

• Financement

INRETS – Région Franche-Comté
Thèse INRETS et FEMTO-ST /
UFC et FC LAB

• Titre provisoire de la thèse

Diagnostic de piles à combustible

• Mots clés

Système pile à combustible, durée de vie, diagnostic, traitement de l'information, reconnaissance de forme, régression à variables latentes

• Sujet de la thèse

Les systèmes PAC sont aujourd'hui arrivés à un niveau de développement qui laisse à penser qu'une diffusion plus large de systèmes les intégrant pourra avoir lieu dans un proche avenir, en particulier pour les véhicules électriques avec des enjeux forts en termes de durabilité. La durée de vie des générateurs PAC et de leurs composants est donc un point central à étudier en amont, avec en corollaire la mise au point d'indicateurs fiables de leurs défaillances. Dans ce contexte, le Laboratoire des Technologies Nouvelles (LTN) a mené une action spécifique de recherche (ASI) sur la problématique "Diagnostic des Piles à Combustible", associant l'équipe "Générateur PAC embarqué" (localisée à Belfort) d'une part et l'équipe "Diagnostic et maintenance des systèmes de transport" d'autre part (localisée à Marne-la-Vallée).

A Belfort, dans le cadre de l'Institut FC LAB et du laboratoire FEMTO-ST, des protocoles d'essais et des méthodes de caractérisation de PAC sont mis en œuvre et développés de manière à obtenir un maximum d'informations permettant d'accéder à une meilleure connaissance de leur comportement.

Parmi les méthodes d'investigation expérimentale, on peut citer les courbes de polarisation, la spectrométrie d'impédance, la surveillance des tensions de cellule à vide, les techniques de voltammétrie... La maîtrise de ces méthodes de caractérisation permet d'accéder à une meilleure compréhension des mécanismes physiques régissant les PAC et d'établir ultérieurement un diagnostic sur leurs états de santé.

Plusieurs enjeux applicatifs conditionnent les méthodes de diagnostic à développer :

- la localisation des défauts dans les différentes cellules constituant le système PAC (problème multicomposant et multidéfaut),
- la mise en évidence des effets et des causes des mécanismes de dégradation (classification des défauts),
- l'évaluation de la sensibilité des diagnostics aux conditions de fonctionnement et à leurs variations, en vue de l'élaboration de stratégies de contrôle (diagnostic embarqué lié au système de régulation) et de diagnostic différé, à effectuer lors d'opération de maintenance. La contrainte de la durée de vie pourrait ainsi être atténuée en optant pour des procédures de maintenance préventive qui permettraient de détecter à quel moment il convient de changer certains organes sensibles de la PAC tels que les cœurs de pile.

L'objectif de la thèse est centré sur la mise au point d'un système de diagnostic des systèmes PAC en s'appuyant sur les champs de l'analyse de données, de l'apprentissage et des tests statistiques pour le suivi temporel. En amont, des méthodes de mesure innovantes pourront également être proposées.

● **Avancement de la thèse**

Les premiers travaux de Raïssa ONANENA ont consisté à développer une approche de diagnostic par reconnaissance des formes dédiée à l'estimation du temps de fonctionnement équivalent de systèmes PAC de type PEM. La méthode proposée utilise les caractérisations statiques et dynamiques des performances de la PAC que sont les relevés de courbes de polarisation d'une part, et des mesures de spectres d'impédance d'autre part. Plutôt que les courbes elles-mêmes, ce sont d'ailleurs leurs évolutions qui sont exploitées ici pour estimer le temps de fonctionnement équivalent du générateur PAC et en conséquence son espérance en termes de durée de vie. Pour atteindre ces objectifs, le système de diagnostic proposé repose sur la succession de plusieurs étapes. Des descripteurs sont d'abord extraits des courbes de polarisation et des spectres d'impédance afin de résumer l'information à disposition, tout en diminuant l'influence du bruit. Tandis que la paramétrisation des courbes de polarisation est réalisée à l'aide d'un modèle empirique, celle des spectres d'impédance utilise à la fois des connaissances expertes et une modélisation paramétrique par modèle de régression à variables latentes (développée initialement par le LTN Marne dans le contexte d'applications ferroviaires ; cf. thèse de Faïcel Chamroukhi). Cette dernière approche permet à la fois une segmentation automatique des courbes et une approximation polynomiale des segments obtenus. Une procédure de sélection de variables est ensuite mise en œuvre en vue de ne garder parmi les paramètres extraits que les plus pertinents vis-à-vis du problème à traiter. Certains descripteurs pouvant en effet être caractéristiques des courbes mais s'avérer finalement peu en rapport avec le phénomène de vieillissement à observer. Ecarter certains paramètres permet également d'ajuster la complexité de l'étape suivante dans le processus de diagnostic choisi : à savoir, la construction d'un modèle de régression qui permet de fournir une estimation du temps de fonctionnement équivalent de la PAC à partir du sous-ensemble de descripteurs sélectionnés. Les performances de l'approche proposée ont été évaluées sur des données de vieillissement correspondant à deux PAC différentes. Une erreur moyenne de 2 h sur un horizon temporel global de 1000 h de fonctionnement a été obtenue. La portabilité de la méthode a également été illustrée par une validation sur des tests de vieillissement réalisés à partir d'un autre type de stack (autre constructeur).

Les travaux de thèse de Raïssa ONANENA ont fait l'objet de 2 articles dans des revues internationales et d'une communication à l'occasion d'une conférence internationale (*ICMLA 2009*).

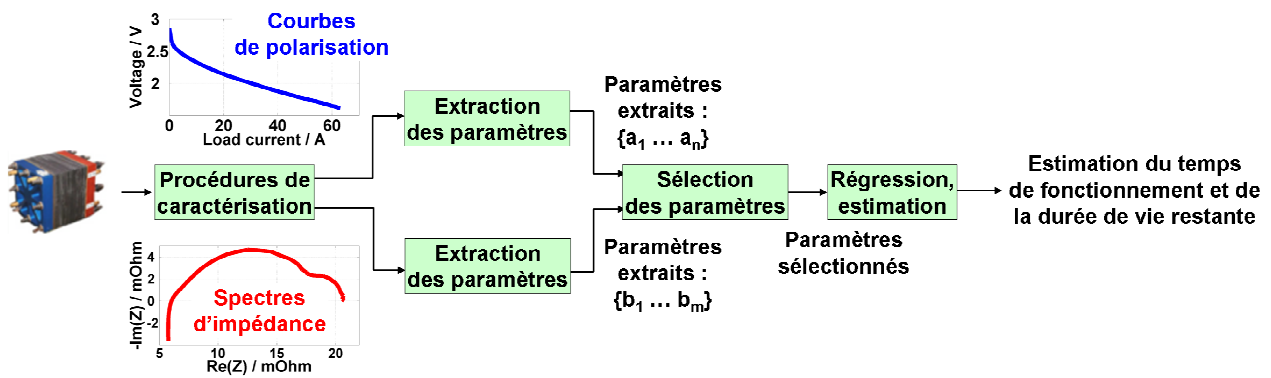


Fig. VII.4 : Principe du diagnostic à base reconnaissance de forme appliqué aux PAC dans le cadre de la thèse de Raïssa ONANENA.

VII.5. Stage post-doctoral de Guangyu TIAN (Université Tsinghua, Beijing - Chine)

• Encadrement

J-M. KAUFFMANN – PR UFC
D. CANDUSSO
D. HISSEL, M-C. PERA – MCF UFC

• Durée

Oct. 2004 – août 2005

• Financement

Ambassade de France, FFCSA,
Région de Franche-Comté

• Thème du stage et problématique

Le sujet de ce stage post-doctoral a porté sur la qualification et la localisation de défauts sur les stacks de piles PEM.

Les cœurs de piles PEM, ou AME (assemblage membrane – électrodes, ou encore : MEA, EME), sont sans doute les éléments les plus sensibles et les plus vulnérables du système PAC opérant dans des conditions de fonctionnement transport. Les membranes sont des composants qui ont une faible épaisseur, de l'ordre de 25µm, pour réduire les coûts et améliorer la conductivité. Elles peuvent être soumises à des contraintes fortes, d'origines mécaniques et thermiques. Des différences trop importantes entre les pressions des compartiments anodique et cathodique peuvent entraîner une rupture ; une mauvaise hydratation de la membrane et des inhomogénéités hydrauliques à sa surface peuvent faire apparaître des "points chauds", donner naissance à des trous qui mettent en présence directe l'hydrogène de l'anode avec l'air de la cathode. La présence de ces porosités ou perforations peut à priori s'avérer critique en termes de performances pour la pile, voire de sécurité pour les personnes. Avec le développement de membranes plus résistantes et plus fiables, avec l'adoption de conditions de fonctionnement plus propices pour la durée de vie de la pile (par exemple grâce à des auxiliaires plus performants et mieux pilotés, via l'hybridation par des supercondensateurs qui prennent en charge une partie des dynamiques de courant), le risque d'apparition de ce type de défaut devra être réduit au possible. Néanmoins, au laboratoire, des problèmes d'étanchéité ont d'ores et déjà été rencontrés sur plusieurs technologies de piles PEM, après des durées de fonctionnement et des conditions d'utilisation variables. Par conséquent, il nous semble particulièrement intéressant et nécessaire d'imaginer des procédures visant à la détection d'un tel défaut et à sa localisation spatiale sur le stack. Une fois le diagnostic effectué, il s'agit aussi de déterminer la conduite à tenir, sur le banc de test en laboratoire et à terme sur le véhicule. En 2004, de très rares informations sur ces sujets sont disponibles dans la littérature ; les constructeurs de pile avec lesquels nous sommes en contact n'ont pas ou peu d'expérience dans ce domaine. Ils savent détecter un problème d'étanchéité interne ou externe au stack, au moyen d'un test en pression à l'azote, mais ne disposent pas de procédure particulière pour localiser spatialement le défaut. Celui-ci peut d'ailleurs provenir d'une membrane défectueuse mais aussi d'un joint, situé entre les plaques distribuant les gaz, endommagé ou déplacé.

• Travail réalisé

Un premier défaut d'étanchéité interne avait été détecté au laboratoire lors du deuxième essai d'endurance, réalisé en 2004 sur une pile ZSW trois cellules soumise à un cycle de courant dynamique issu d'un profil de mission transport. L'origine première du problème est un dysfonctionnement du local de test, qui a d'abord eu des répercussions négatives sur le banc d'essais puis sur le stack lui-même. L'essai avait alors été interrompu. Par précaution, nous n'avons pas réalimenté la pile en gaz réactifs. Un autre défaut d'étanchéité interne avait été décelé en 2004 sur le stack 5 kW du L2ES. La provenance de ce défaut est plus difficile à déterminer. Le problème peut vraisemblablement être imputé à des dysfonctionnements occasionnels du banc de test qui se sont traduits par des différences intempestives de pressions anode – cathode. M. Guangyu TIAN a pu exploiter et analyser les enregistrements des données expérimentales disponibles effectués lors des essais considérés.

Deux autres problèmes d'étanchéités internes sont apparus sur un stack trois cellules lors du troisième essai d'endurance réalisé au premier semestre 2005 à une température de fonctionnement égale à 65°C. M. Guangyu TIAN a alors pu participer à la réalisation des tests de pression à l'azote permettant de mettre en évidence une fuite interne et de juger de l'importance de celle-ci. Nous avons ensuite cherché à localiser le défaut et à mettre en place des procédures ad-hoc. Un test spécifique a été défini. Il consiste à alimenter la pile en gaz réactifs à courant de charge nul, en mode ouvert puis à interrompre de façon soudaine les débits d'air et d'hydrogène. L'observation des tensions de cellules nous renseigne alors sur le numéro de la cellule défectueuse. En effet, à courant nul et après arrêt des débits, une cellule normale de pile conserve une tension relativement stable à ses bornes pendant une durée supérieure à la minute ; cette tension résiduelle est due aux volumes tampons des gaz réactifs contenus dans les électrodes. Lors du test considéré, la cellule défectueuse voit sa tension chuter de façon très rapide. En outre, des essais réalisés en mode régulation de pression ont montré que la création, pendant une durée déterminée, d'un gradient de pression entre les compartiments anode et cathode pouvait avoir une influence sur le niveau de fuite observé. Le premier défaut d'étanchéité rencontré sur la pile soumise à l'essai de vieillissement était tel qu'il nous empêchait de caractériser la pile et de continuer l'essai d'endurance. La cellule posant problème a alors été enlevée et l'essai s'est poursuivi avec un stack de deux cellules. Une autre fuite interne, plus légère, a été mise en évidence par la suite. Elle n'a pas empêché le déroulement final du test d'endurance. Ces premières observations une fois effectuées sur une pile de faible puissance (100 W), un travail expérimental de diagnostic a été entrepris sur le stack 5 kW. Les procédures mises en place sur la petite pile ont été adaptées au stack sous investigation, en prenant en compte l'architecture fluidique particulière du banc d'essai 10 kW. Par précaution, au début des essais, de l'azote a été ajouté à l'hydrogène au moyen de la station de mixage des gaz du L2ES. La mise en place de débits d'hydrogène faibles à l'anode (quelques NI/min) et de débits d'air importants à la cathode (200 NI/min) a permis d'assurer une sorte de ventilation dans le stack et de cette manière, les risques de combustion ont été minimisés. Lors des différents essais réalisés, des cellules défectueuses ont ainsi pu être localisées par l'observation de leur tension et par la détection des signatures électriques correspondant aux défauts.

Un rapport de synthèse est disponible. Les travaux ont été poursuivis d'abord lors du Master d'Issame ENDICHI puis dans le cadre de la thèse de Sébastien WASTERLAIN.

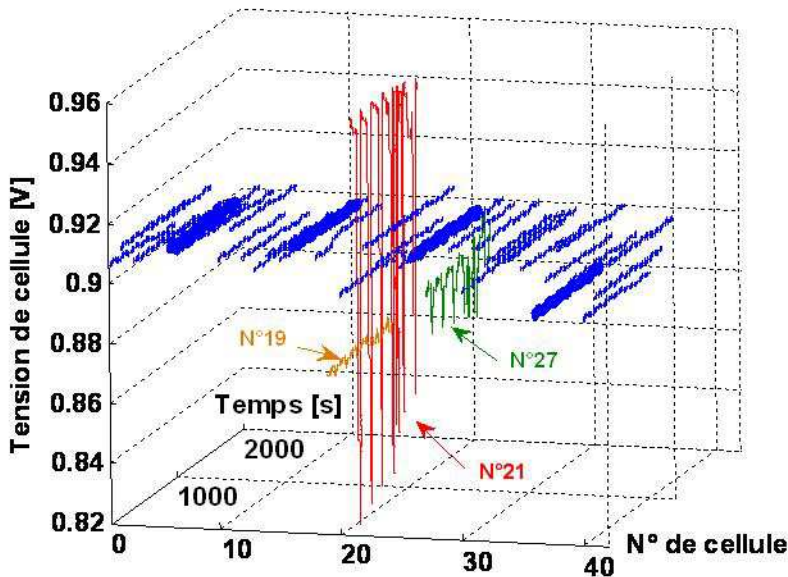


Fig. VII.5 : Evolution des tensions de cellules de la pile 5 kW à courant de charge nul. Les cellules N°19, 21 et 27 sont très sensibles aux variations de pression engendrées par la régulation du banc d'essai.

VII.6. Stage de DEA PROTEE de Moussa CHNANI

• Encadrement

J-M. KAUFFMANN – PR UFC
D. CANDUSSO

• Durée

Mars 2004 – sept. 2004
Soutenance au L2ES le 31/08/2004

• Titre du stage

Etude de l'incidence des actionneurs et des organes de conditionnement des fluides sur le comportement d'un système PAC

• Description du sujet

Sollicitée en courant, la pile à combustible PEM (à Membrane Echangeuse de Protons ou Membrane polymère) répond en tension avec sa dynamique propre. Celle-ci est liée aux réactions électrochimiques se déroulant aux interfaces électrode – électrolyte de la pile, aux transports de charges et de masses dans ses capacités de double couche et ses couches de diffusion.

Pour fonctionner, la pile est entourée sur un banc de test d'organes permettant le conditionnement des réactifs (hydrogène, air) et leur régulation, tels que des détendeurs, des vannes, des canalisations, des régulateurs de débit, des pompes. Le banc est également équipé d'appareils de mesures (débitmètres, capteurs de pression...) et d'un système de contrôle commande (développé avec le logiciel Labview sur les bancs du L2ES par exemple). Tous les actionneurs et éléments assurant le conditionnement des réactifs possèdent eux aussi leurs temps de réponse propres (constantes mécaniques et électriques, effets tampons des volumes de canalisations) et ces derniers peuvent intervenir de façon forte sur la dynamique du système global. Le pilotage des actionneurs doit alors se faire de façon à ne pas endommager la pile ainsi qu'à pénaliser le moins possible la dynamique et le rendement de l'ensemble. Ainsi, pour la mise en place des gaz sur un profil de consigne temps – courant, on peut choisir au laboratoire d'adopter par exemple la stratégie suivante. La consigne de courant est d'abord traitée pour générer des débits de gaz correspondant à des surstœchiométries données. L'information issue des débitmètres est alors récupérée et permet de calculer le courant susceptible d'être effectivement délivré par la pile. De cette façon, on s'assure que la pile ne débite pas plus que le courant correspondant à la quantité de gaz qui la traverse. Dans ces conditions, on comprend que la consigne initiale de courant peut être suivie avec un certain retard. Un apport de gaz en excès pourrait se traduire par une dynamique meilleure au niveau de la tension de pile mais aussi par un rendement moindre du système.

L'objectif général de ce travail de DEA était de parvenir à mieux cerner l'incidence des actionneurs et des organes de conditionnement des fluides sur le comportement du système pile, en termes de sécurité, de dynamique et de consommation.

• Travail réalisé

Une modélisation dynamique et de type monophasique (chaque réactif est pris sous la forme d'un seul mélange de gaz ; la présence d'eau liquide n'est pas prise en compte), basée sur une analogie électricité – fluide, a été proposée pour les actionneurs et éléments assurant le passage et le conditionnement des gaz. Chaque organe est représenté par un circuit RC (Résistance Capacité) pour modéliser : - d'une part les pertes de charges des fluides, - d'autre part le volume occupé par le mélange de gaz (azote, oxygène, vapeur d'eau du côté cathodique et azote, hydrogène, vapeur d'eau du côté anodique). Ce type de représentation permet à un étudiant en génie électrique d'appréhender de manière relativement aisée des principes simples de la mécanique des fluides et également de résoudre les problèmes de causalité rencontrés dans la modélisation multiphysique, lors du choix des variables d'entrée et de sortie pour les sous-modèles. (Cette manière de faire constitue aussi en quelque sorte "un juste (et très modeste !) retour des choses" dans la mesure où Georg Simon Ohm avait utilisé le modèle de l'hydraulique pour établir la loi qui porte son nom.)

Les lignes air et hydrogène de deux bancs d'essais (1 kW et 10 kW) disponibles au L2ES ont été modélisées dans l'environnement Matlab-Simulink®. Le calage et la validation des modèles ont été effectués à partir d'essais réalisés en statique et sur des profils de mission temps - courant. Des stratégies de pilotage des fluides ont ensuite été élaborées, implantées et testées en simulation. L'étude d'un modèle générique dynamique et de type diphasique (présence de gaz et d'eau liquide) a également été initiée à la fin du stage.

Ces travaux de DEA ont ensuite été complétés et valorisés par deux publications à des conférences internationales (*EVS21 et European PEFC Forum 2005*). M. Moussa CHNANI a ensuite réalisé une thèse au L2ES. Encadré par M. Jean-Marie KAUFFMANN et Mme. Marie-Cécile PERA, il a mené des travaux de recherche sur le couplage d'une pile PEM avec une pile SOFC (haute température) dans le cadre du projet EU *FELICITAS* auquel participe l'INRETS. Il occupe à présent un poste d'ingénieur dans l'industrie.

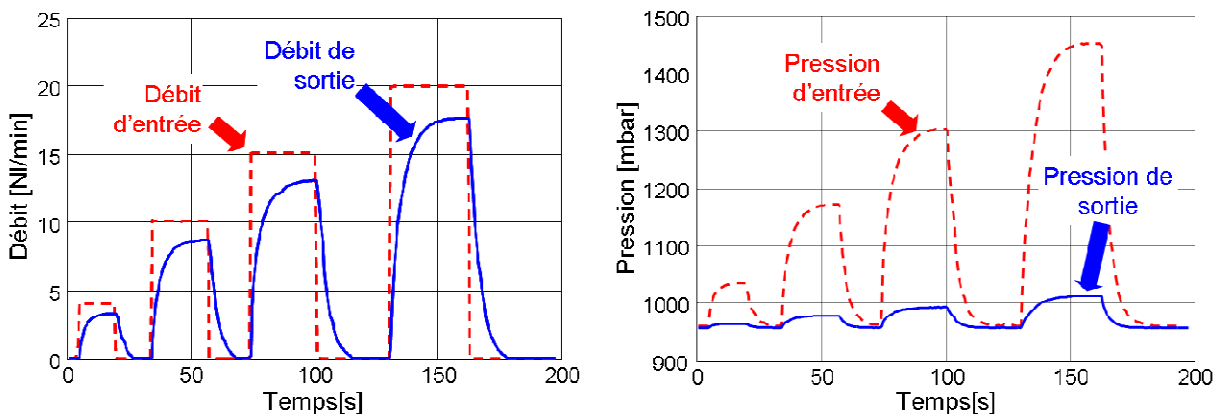


Fig. VII.6 : Exemple d'évolutions de débits et pressions d'air dans la ligne cathode d'un banc PAC (mesures réalisées en amont et en aval d'une PAC ne consommant pas de réactifs). Les réponses « de type RC » suggèrent aux électriciens de recourir à une analogie fluide – électrique pour modéliser les topologies fluidiques de bancs et générateurs PAC.

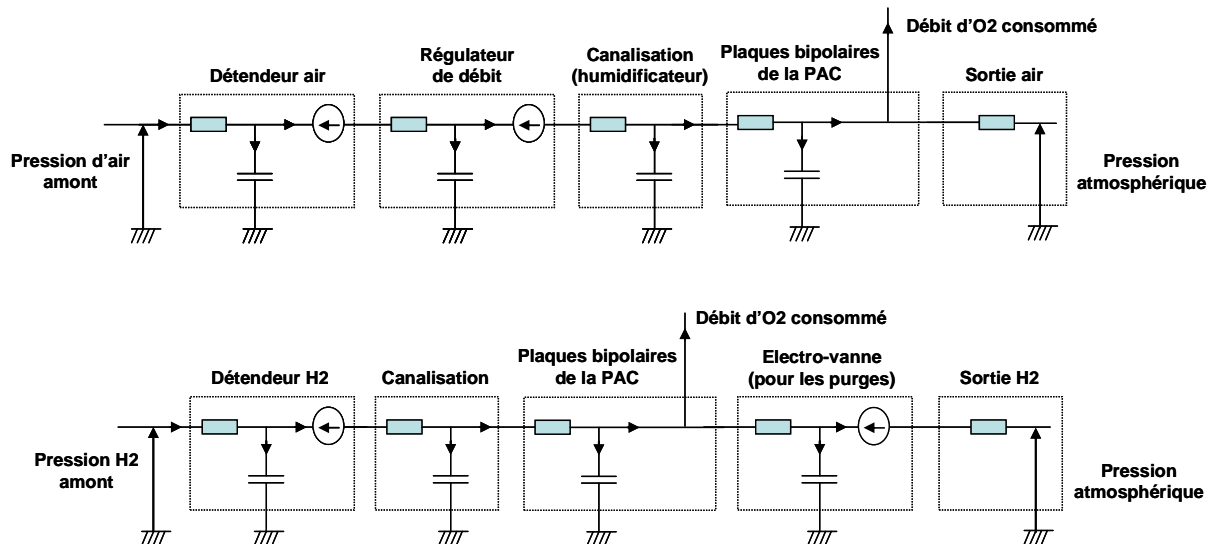


Fig. VII.7 : Exemple de modélisation des lignes air et hydrogène d'un générateur PAC embarqué en recourant à une analogie fluide – électrique.

VII.7. Stage de Masters Recherche et Professionnel PROTEE de Youssef BOUAYAD

• Encadrement

J-M. KAUFFMANN – PR UFC
D. CANDUSSO

• Durée

Mars 2005 – juillet 2005
Soutenance au L2ES le 19/07/2005

• Titre du stage

Etude statique et dynamique du conditionnement des fluides réactifs alimentant un système pile à combustible

• Description du sujet

Ce stage de Master Recherche et Professionnel s'inscrit dans la continuité de celui du DEA de M. Moussa CHNANI.

Pour fonctionner, la pile PEM est nécessairement entourée, sur un banc de test ou sur un véhicule, de multiples organes permettant le conditionnement de ses gaz réactifs (hydrogène et air) tels que des détendeurs, des vannes, des canalisations, des régulateurs de débit, des humidificateurs... Une modélisation dynamique et de type monophasique, basée sur une analogie électricité – fluide, a déjà été proposée pour les actionneurs et éléments assurant le conditionnement des gaz (DEA de M. Moussa CHNANI). Dans les générateurs PAC de type PEM, la gestion de l'eau demeure encore à la fois cruciale et problématique dans certaines conditions. Les membranes doivent en effet être correctement hydratées pour posséder une bonne conductivité protonique. A contrario, un excès d'eau liquide dans les couches de diffusion gêne le transport des réactifs (phénomène de noyage) vers les sites réactionnels. C'est pour cette raison qu'une modélisation faisant apparaître l'eau dans ses phases vapeur et liquide s'avère être très intéressante.

Le travail à effectuer au cours de ce stage consiste par conséquent à transcrire en diphasique et en dynamique les modèles monophasiques existant pour les organes présents sur la ligne air du banc d'essais 1 kW disponible au L2ES. Chaque organe peut être représenté par un circuit CR (Capacité Résistance) pour modéliser : - d'une part le volume occupé par le gaz (mélange d'azote, d'oxygène et de vapeur d'eau) et par l'eau liquide, - d'autre part les pertes de charges des fluides gazeux et de l'eau liquide.

• Travail réalisé

La ligne air du banc 1kW a été modélisée dans l'environnement Matlab-Simulink®. Compte tenu de l'approche diphasique retenue, une attention particulière a notamment du être portée aux

fonctionnements des organes (humidificateur, échangeur, séparateur, réchauffeur) permettant le contrôle de l'humidification de l'air en amont de la pile et donc aux changements de phases de l'eau. Dans le modèle proposé, les températures des différents éléments, pile et auxiliaires, ont été imposées aux niveaux de chacun des organes. L'évolution de ces températures peut être au besoin donnée par des essais expérimentaux.

M. Youssef BOUAYD a pu, à la fin de son stage, commencer à montrer grâce à plusieurs simulations les possibilités offertes par le modèle réalisé. Celui-ci doit encore être développé et amélioré ; ses paramètres doivent être calés (en particulier au niveau de la cinétique du changement de phase de l'eau) et les résultats de simulation validés expérimentalement à partir d'essais déjà réalisés sur le banc 1 kW. Les pertes de charge dans la pile et dans le condenseur situé en aval du stack ont néanmoins pu être déterminées pendant le stage à partir d'essais expérimentaux réalisés sur une pile ZSW vingt cellules par Mlle. Bouchra WAHDAME. Le modèle développé pourrait à terme être utilisé pour des simulations sur des profils de mission transports temps – vitesse du véhicule. Il devrait par exemple permettre de montrer encore un peu plus l'intérêt du mode régulation de pression (utilisation de la vanne déverseur située en aval du stack) en mode dynamique pour améliorer les performances du système pile (amélioration du rendement de tension, meilleure gestion de l'eau dans le système). Le modèle pourrait ensuite être adapté à d'autres architectures fluidiques de bancs de tests, à différents types d'humidificateurs plus adaptés à une utilisation embarquée. La modélisation de la ligne hydrogène pourrait également être entreprise en utilisant la démarche adoptée dans ce travail. Les modèles des lignes air et hydrogène pourraient alors aussi être couplés à des modèles de piles, disponibles au L2ES et permettant le calcul de la tension aux bornes du stack.

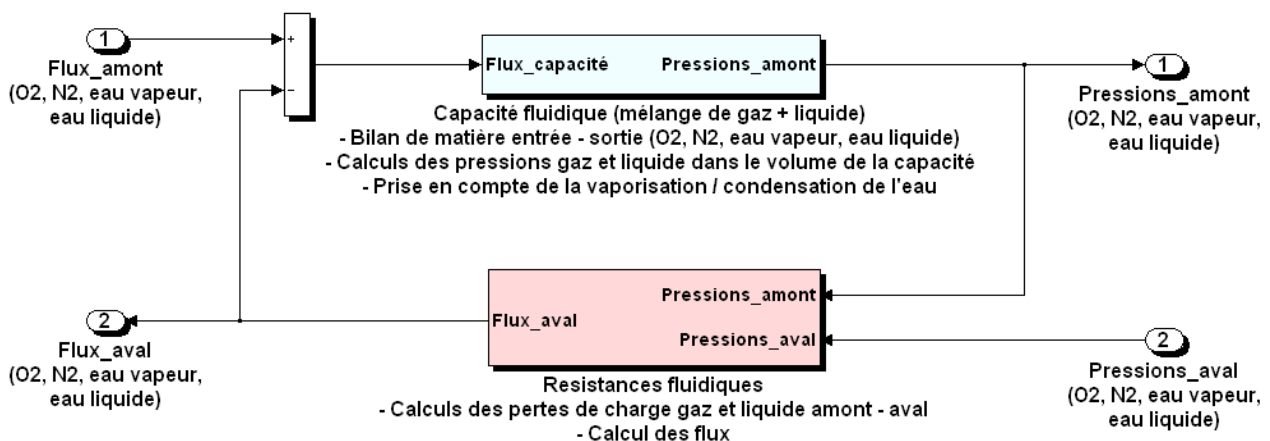


Fig. VII.8 : Première sous-couche dans l'environnement Matlab – Simulink d'un élément fluïdique de type CR diphasique pour modéliser le volume occupé par le gaz (mélange d'azote, d'oxygène et de vapeur d'eau) et par l'eau liquide, ainsi que les pertes de charges des fluïdes gazeux et de l'eau liquide.

VII.8. Stage de Masters Recherche et Professionnel PROTEE de Pierre CODDET

• Encadrement

M-C. PERA – MCF UFC
D. CANDUSSO

• Durée

Mars 2006 – juillet 2006
Soutenance au L2ES le 18/07/2006

• Titre du stage

Etude des stratégies de sauvegarde de piles à combustible en cas d'arrêt d'urgence

• Description du sujet

Les travaux proposés s'inscrivent dans un contexte similaire à ceux réalisés sur l'association PAC / diode anti-parallèle.

Le développement des générateurs PAC à l'échelle industrielle est encore timide car de nombreux verrous technologiques restent à lever afin que ce type de système s'avère réellement compétitif,

technologiquement et économiquement. La durée de vie et la fiabilité de ces dispositifs constituent un obstacle majeur car les performances obtenues jusqu'à présent ne sont pas à la hauteur des critères des applications concernées (stationnaire comme transport). En régime stabilisé, dans des conditions opératoires bien contrôlées, la durée de fonctionnement d'une ou de quelques cellules peut atteindre plusieurs milliers d'heures. En conditions réelles, cette durée est communément divisée par un facteur dix. Ce sont les phases transitoires, les arrêts, les démarrages et les incidents système qui sont en partie responsables de cet écart.

L'objectif de ce stage est d'établir des stratégies d'arrêt sur incident susceptibles d'assurer la sauvegarde du stack et d'éviter des dégradations irréversibles. Une bibliographie approfondie sera menée sur ce thème. L'analyse des informations recueillies ainsi que le savoir faire acquis au laboratoire permettront de dresser une liste des incidents susceptibles de se produire et de déterminer d'éventuelles parades. Les stratégies retenues seront évaluées par simulation du système sous Matlab/Simulink®. Elles pourront ensuite être mises en œuvre expérimentalement.

● Travail réalisé

Une pile à combustible est un assemblage de cellules élémentaires, comprenant chacune deux électrodes (l'anode et la cathode) séparées par un électrolyte. Les travaux menés lors du stage concernent l'étude d'un système de génération d'énergie composé de plusieurs piles PEM (à membranes échangeuses de protons). Ce type de dispositif électrochimique convertit en continu l'énergie issue de la réaction chimique combustible - comburant en énergies électrique et thermique. Les réactifs sont renouvelés et les produits évacués en permanence, ce qui signifie qu'il y a production d'énergie électrique aussi longtemps que le système est convenablement alimenté. Dans un tel système de génération d'énergie, et en cas d'apparition d'un problème au niveau de l'une des piles, il est nécessaire d'éliminer ou de diminuer le risque de réaction vigoureuse entre l'hydrogène restant dans le circuit anodique et l'oxygène afin d'assurer un niveau de sécurité maximal.

Le rapport de Master recense d'abord les principaux problèmes pouvant entraîner un défaut de fonctionnement au niveau du système et propose un moyen permettant d'assurer une continuité de service du générateur. Dans le contexte d'un système basé sur l'association de piles à combustible, l'apparition d'un problème au niveau de l'une des cellules de l'un des stacks nécessite de mettre en œuvre un moyen permettant de préserver l'intégrité du système et d'assurer un niveau de sécurité maximal. L'analyse des solutions proposées dans la littérature a fait ressortir l'intérêt potentiel du principe proposé par Sadamoto et al. [United States Patent 20040247964] consistant à court-circuiter de manière adaptée (par l'intermédiaire d'un transistor MOS) les cellules défaillantes du stack afin d'assurer la continuité de service du système. Ce principe assurant un fonctionnement en mode dégradé a donc fait l'objet d'une modélisation réalisée à l'aide du logiciel SABER (modélisation électrique de la pile et fluide via une analogie électricité – fluide, modélisation du circuit électronique assurant le court-circuit et la surveillance). Le modèle généré a permis de montrer que la réalisation d'un court circuit par le système de détection commandant un MOS de puissance engendrait l'apparition d'un pic de courant susceptible de provoquer des dommages irréversibles à la pile. Un scénario d'arrêt a donc été proposé en complément. Il consiste à réaliser un arrêt d'urgence en deux étapes : dans un premier temps, une décharge du potentiel de réaction est effectuée par l'arrêt de la fourniture en gaz réactifs et dans un second temps, le court-circuit des cellules défaillantes est obtenu par l'utilisation d'un MOS de puissance.

La modélisation proposée a donné des premiers résultats de simulation intéressants. Elle a aussi permis de soulever un certain nombre de questions vis-à-vis du comportement physique des piles dans des conditions de fonctionnement particulières liées à la mise en œuvre d'une électronique de puissance (problématiques de la dégradation et de la sûreté). Ainsi, le niveau de tension bas aux bornes d'une cellule de pile permettant d'assurer un niveau de sécurité suffisant doit-il être déterminé de manière plus précise et en fonction de l'application prévue. Des améliorations au niveau de la commande (pour une remise en route automatique du système suite à une action "réparatrice" au niveau des fluides) et du système de détection (au niveau des cellules) pourraient également être réalisées lors d'une mise en œuvre pratique du système de protection et plus généralement de la stratégie de sauvegarde proposée.

Les travaux réalisés ont donné lieu à une présentation orale et à une publication lors d'une conférence internationale (*IEEE ISIE 2007*).

VII.9. Stage de Masters Recherche et Professionnel PROTEE de Issame ENDICHI

• Encadrement

J-M. KAUFFMANN – PR UFC
D. CANDUSSO

• Durée

Mars 2007 – juillet 2007
Soutenance au L2ES le 17/07/2007

• Titre du stage

Etude et modélisation de problèmes liés à l'étanchéité interne des piles à combustible PEM

• Description du sujet

Ce sujet de Masters Recherche et Professionnel s'inscrit dans la continuité du stage post-doctoral de M. Guangyu TIAN. L'objectif est de réaliser des analyses expérimentales complémentaires sur les essais réalisés lors de ce post-doc, de procéder à des modélisations simples permettant de retrouver et d'expliquer les fonctionnements de piles souffrant d'inétanchéités internes (membranes poreuses ou percées, joints rompus ou déplacés occasionnant des diffusions de gaz réactifs entre l'anode et la cathode).

• Travail réalisé

M. Issame ENDICHI a débuté son stage par des recherches bibliographiques portant sur les défauts de PAC PEM, en se focalisant sur les problèmes d'inétanchéités anode-cathode. Il a ensuite entrepris de proposer des modélisations de piles permettant de retrouver les courbes expérimentales issues d'essais menés sur une pile ZSW 100 W dotée de trois cellules (utilisée lors du troisième vieillissement mené à une température supérieure à la température nominale et pendant le stage de Guangyu TIAN) et sur un stack HELION 5 kW, 42 cellules (projet SPACT). Le principe de la modélisation retenue pour la pile repose sur l'écriture en statique de la tension à vide d'une PAC PEM et sur la représentation en dynamique (fluidique monophasique) des ensembles membrane - couches de diffusion - électrodes par la mise en œuvre de l'analogie électricité – fluidique, initialement proposée dans le cadre du stage de M. Moussa CHNANI.

M. Issame ENDICHI s'est attaché à retrouver par la simulation les évolutions des potentiels à l'abandon des piles expérimentées et défailtantes. Deux essais principaux ont été considérés : celui correspondant au "test du créneau de gaz réactifs" (qui consiste à observer le potentiel à vide de la pile et à couper de manière soudaine l'alimentation en réactifs), celui permettant la localisation des cellules abîmées sur le stack 5 kW par la génération de gradients de pression anode – cathode. Les modèles proposés ont permis de montrer que l'évolution des potentiels à vide pouvait être en partie corrélée par le taux de perméation de réactifs entre les compartiments carburant – comburant (pouvant être ramené à un courant dit de "crossover"). Les travaux ont aussi débouché sur des questionnements liés à la représentation du potentiel à vide des PAC, notamment sur la façon de déterminer et représenter les parts relatives des surtensions liées au "crossover", aux phénomènes d'activation, à des réactions entre le platine des électrodes et l'oxygène de l'air. Il est aussi apparu que les diffusions de réactifs (hydrogène et/ou air) pouvaient être gouvernées par des gradients de pressions anode – cathode et que des scénarios de diffusion différents pouvaient être imaginés suivant les conditions de fonctionnement de la pile.

Les modèles et simulations réalisés dans le cadre de ce Master ont servi de base à des travaux permettant de mieux valoriser les expérimentations déjà réalisées, notamment lors du stage de Guangyu TIAN, en apportant des compléments d'explication plus théoriques. Un poster a été proposé lors du *Workshop on fuel cell degradation* qui s'est tenu en Crête en septembre 2007. A la suite de cette conférence, un article a été accepté dans la revue internationale *Journal of Power Sources*.

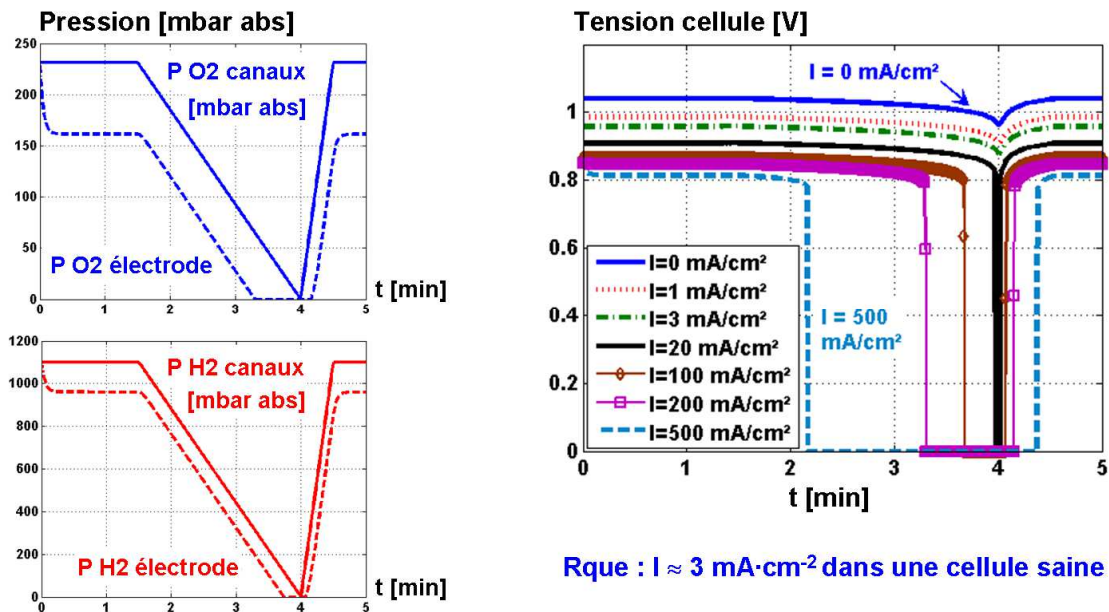


Fig. VII.9 : Profils de pression imposés dans les canaux d'une PAC de type PEM et évolution des tensions à vide / à l'abandon d'une cellule de pile pour différentes valeurs de courant de perméation anode – cathode ("crossover") après l'arrêt des débits de gaz réactifs.

VII.9. Stage de Master 2 d'Ibrahima DIAW - Physique et Ingénierie de l'Energie (PIE) de l'ENS Cachan (action s'inscrivant dans le cadre de SPEE LABS et de FC LAB)

• Encadrement

A. DE BERNARDINIS – CR IFSTTAR
D. CANDUSSO
Tuteur à l'ENS : F. MAZALEYRAT

• Durée

Avril 2011 – Septembre 2011 à Versailles Satory
Soutenance à l'ENS Cachan le 03/10/2011

• Titre du stage

Définitions de topologies électriques permettant le fonctionnement de piles à combustible en mode potentiostatique

• Description du sujet

Dans le cadre de ses recherches sur les chaînes de traction électriques innovantes, l'IFSTTAR mène des actions sur la thématique "Générateur Piles à Combustible embarqués". Une pile à combustible (PAC) est un générateur électrochimique qui transforme une énergie sous forme chimique présente dans un combustible (le dihydrogène par exemple) en énergie électrique et en chaleur. Une PAC peut aussi être assimilée à un type particulier de batterie avec des réactifs (combustible et comburant) qui ne seraient pas stockés au sein même des électrodes mais dans des réservoirs et/ou dans l'air ambiant si de l'air est utilisé.

Les PAC présentant des niveaux de puissance suffisants pour les applications transport sont en fait constituées de plusieurs cellules mises en série électriquement et placées en parallèle au niveau fluide. Dans le cadre d'applications du type générateur embarqué, les PAC sont en général sollicitées par un courant de charge contrôlé via un convertisseur électronique adapté (un hacheur parallèle - élévateur par exemple) et elles offrent alors une réponse variable en tension selon le point de fonctionnement de la pile. Ce mode de contrôle des PAC est qualifié de galvanostatique.

Le mode potentiostatique, plus singulier dans une perspective applicative, se caractérise par une commande directe en tension et par la collecte d'une réponse en courant. Il peut présenter un intérêt potentiel en particulier pour des protocoles de diagnostic permettant de caractériser les PAC, d'établir un diagnostic sur leurs états de santé (voltammétries cycliques et linéaires) et d'améliorer les durées de

vie des empilements. Dans cette perspective, les formes d'ondes (courant, tensions) doivent être générées à partir de convertisseurs / charges électroniques aux topologies et aux contrôles adaptés. Au cours du stage de Master, l'étudiant aura à recenser et évaluer, par la simulation, différentes architectures électriques possibles permettant des fonctionnements de PAC en mode potentiostatique (sur la base soit de charges linéaires, soit de convertisseurs électroniques destinés aux applications véhicule). Le cas spécifique de l'application diagnostic et des techniques de voltammétrie sera plus particulièrement considéré. Une réalisation expérimentale et une validation sur un stack PAC (empilements de cellules) au laboratoire FC LAB seront finalement envisagées.

• **Travail réalisé**

Monsieur Ibrahima DIAW a effectué son stage de Master2 Recherche au Laboratoire des Technologies Nouvelles de l'IFSTTAR à Versailles. Son sujet a porté sur l'étude et la simulation numérique de topologies de convertisseurs DC-DC à découpage fonctionnant en mode potentiostatique pour la voltammétrie cyclique sur une PAC multi-cellules. Ibrahima DIAW a mené une étude comparative, appuyée par la simulation, de plusieurs topologies candidates pour parvenir à un choix topologique répondant au cahier des charges complexe d'une PAC de 100 cellules fonctionnant dans des situations propres à la mise en œuvre d'une voltammétrie cyclique (réversibilité en courant, forts di/dt, tensions de PAC basses : jusqu'à 0.05 V / cellule). Des hacheurs DC-DC réversibles en courant ont notamment été considérés ; certaines architectures associant la PAC à un dispositif de stockage tampon de l'énergie, type batterie.

Les travaux de simulation réalisés vont donner lieu à une communication en conférence internationale (PCIM 2012 - Nuremberg).

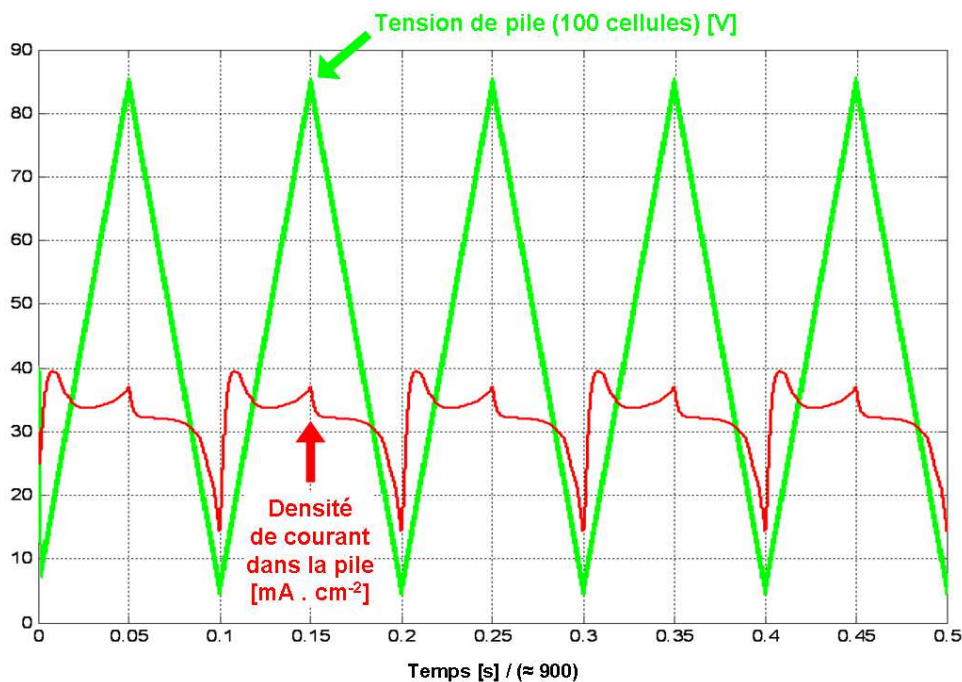


Fig. VII.10 : Exemple de formes d'ondes obtenues en simulation.
 Courbes tension de pile et densités de courant,
 (l'échelle temporelle a été ajustée pour répondre à des contraintes de temps de calcul).