



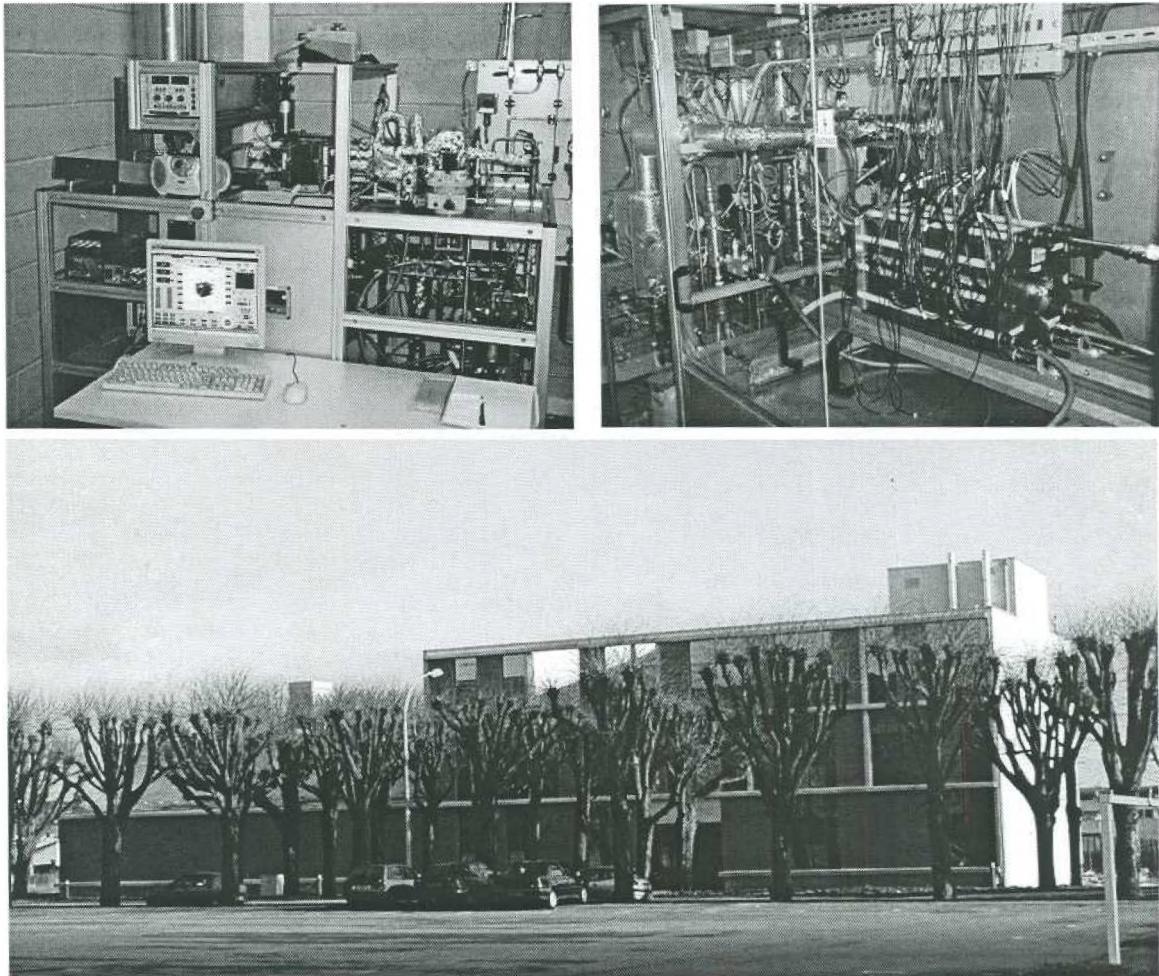
Gestion INIS
Doc. Enreg. le 28/04/05
N° TRN FIN06041348



E

**RAPPORT D'ACTIVITES
SYSTEME PILE À COMBUSTIBLE
DU L2ES**

2000 - 2004



Laboratoire de recherche en Electronique, Electrotechnique et Systèmes
Unité mixte UFC-UTBM – EA 3898
L2ES – UTBM – Bât F – rue Thierry Mieg
90010 BELFORT Cedex
Tél : 33 (0)3 84 58 36 00 – Télécopie : 33 (0)3 84 58 36 36
Web : <http://l2es.utbm.fr>

Sommaire

Préambule	3
1. Historique	5
2. Système pile à combustible	6
3. Les acteurs	9
4. Les outils	12
4.1 Plate-forme nationale d'essais	12
4.2. Moyens d'essais	13
5. Les axes de recherche du L2ES	21
5.1 Modélisation	22
5.2 Auxiliaires et architecture du système	33
5.3. Diagnostic et durée de vie	42
5.4 Contrats	47
6. Les relations partenariales	58
7. Publications et thèses	63
8. Organisation de Colloques	70
9. Perspectives et projets à moyen terme	71
Conclusion	73
Annexes	
Plate-forme nationale d'essais de pile à combustible	75
Sigles	87

Préambule

Le principe de fonctionnement des piles à combustible est connu depuis fort longtemps (Sir Grove en 1839). Les premiers développements industriels datent des années 50 pour les satellites. Un intérêt grandissant s'est manifesté ces dix dernières années pour d'autres applications. En effet la génération directe d'énergie électrique par conversion électrochimique de l'hydrogène et de l'oxygène pour former de l'énergie électrique, de la chaleur et de l'eau présente de nombreux avantages et en particulier l'absence de pollution. Les applications pour les transports terrestres ont été mises en avant par l'engagement fort d'un fabricant de véhicules. Tous les autres constructeurs ou presque ont suivi le mouvement avec plus ou moins d'implication. L'application pour les transports suppose que le véhicule soit conçu comme un véhicule hybride série si l'énergie pour la propulsion provient d'une pile à combustible. Une alimentation auxiliaire (APU) est une autre piste suivie actuellement par des équipementiers pour pallier l'augmentation de la consommation suite à l'augmentation croissante des équipements d'un véhicule liés au confort, à la sécurité, à la transmission des informations entre autres. S'il est encore difficile pour le moment de préciser un échéancier fiable, les premières expériences à échelle raisonnable, concernent les transports en commun.

C'est dans ce cadre que le L2ES a défini ce nouvel axe de recherche en liaison avec l'INRETS (laboratoires LTN et LTE). Le L2ES travaille depuis de nombreuses années sur les motorisations électriques dans les voitures et sur les moteurs de propulsion à action directe (moteurs roues). Un deuxième axe concerne la gestion de l'énergie y compris le stockage d'énergie électrique pour des véhicules (banc ECCE). Les mots clés des préoccupations du laboratoire sont : Energie et Transport. Le générateur à pile à combustible constitue donc une autre source d'énergie électrique et c'est dans ce sens que le L2ES a choisi de s'investir.

Le générateur pile à combustible est un dispositif complexe dont les performances dépendent du cœur de pile mais également des débits, pressions et température des gaz, carburant et comburant, et donc des auxiliaires. Compte tenu des compétences au niveau du laboratoire, nous avons décidé de nous intéresser au système pile à combustible, auxiliaires, optimisation du fonctionnement du système global sur le plan du rendement, prise en compte de l'environnement et donc de la charge et le cas échéant des dispositifs de stockage de l'énergie électrique.

Ce choix constituait un pari sachant que l'accent en France, est mis sur le cœur de pile, membranes, couches de diffusions, catalyseurs. Avec un peu de recul, nous pensons avoir fait un bon choix car le comportement du cœur de pile ne peut être dissocié du système tant au niveau de la fluidique que de la transformation de l'énergie électrique. La dynamique est intimement liée à celle du système et les variations brusques de courant, génératrices de d'assèchement de membrane ou de noyages, voire de chutes de tension en dessous de la limite de stabilité peuvent être gommées par le dispositif de stockage d'énergie électrique. De plus, ce dernier permet la récupération d'énergie électrique alors que c'est strictement interdit pour la pile à combustible.

Nous verrons que la pile à combustible est un élément non linéaire, fortement tributaire des conditions de fonctionnement mais également de la dynamique. L'étude de l'interaction avec le système nécessite de bien modéliser le cœur de pile. Différentes approches sont possibles, depuis la description électrochimique fine jusqu'à la modélisation boîte noire. Nous avons pris, compte tenu de nos connaissances encore trop réduites en électrochimie, le parti de modéliser le cœur de pile de telle manière que les paramètres du modèle puissent être déterminés à partir de grandeurs externes. Cette première phase d'apprentissage théorique s'est accompagnée très rapidement de validations expérimentales. Un banc

d'essai pour piles de petite puissance a été construit au laboratoire bien avant que la plate-forme d'essais ne soit opérationnelle.

Le pari sur le système pris en concertation étroite avec l'INRETS a été admis également par les pouvoirs publics puisque la décision de construire un bâtiment comprenant la plate-forme d'essais de piles à combustible de forte puissance a été inscrite au contrat de plan Etat – Région début 2000. La mise en œuvre a été rapide puisque la plate-forme est opérationnelle depuis janvier 2003 permettant ainsi de développer les essais et d'accroître les compétences. Juillet 2000, Monsieur le Ministre de la Recherche a annoncé la création d'un Centre National de Recherche Technologique sur les piles à combustible et leurs interfaces pour les transports, localisé sur Belfort-Montbéliard et Nancy. Le CNRT a mis en place une Association loi 1901 de préfiguration en décembre 2001 nommée INEVA chargée de promouvoir les activités pile à combustible et la plate-forme.

Les connaissances et les compétences sur la pile à combustible étaient réduites au moment du démarrage de cette activité. La mise en œuvre de méthodologies d'études maîtrisées dans le domaine du Génie Electrique, une analyse bibliographique approfondie et la mise en œuvre sur bancs d'essais ont permis progressivement d'affiner les axes de recherche dans le domaine. La montée en puissance s'est faite volontairement de manière lente et réfléchie pour être certain de la pertinence des axes de recherche et de leur pérennité. Les publications montrent la crédibilité des travaux. Les contrats nationaux ou européens accompagnent cette évolution tant au niveau des PEMFC que des SOFC.

Il faut souligner que le travail a été réalisé en concertation étroite avec les laboratoires LTN et LTE de l'INRETS. La mise à disposition progressive d'un ingénieur d'études et d'un chargé de recherche a permis d'asseoir la recherche sur les systèmes pile à combustible et de nous impliquer ensemble dans des projets nationaux et européens. Cette première phase de pionnier doit se prolonger par une nouvelle phase d'ouverture vers d'autres laboratoires pouvant apporter des compétences complémentaires et de restructuration. C'est ce qui se dessine actuellement.

On peut valablement penser à faire un bilan au bout de cinq années de défrichements, de construction et de mise en place d'un outil unique en France, d'essais de générateurs à pile à combustible puis de travail de recherche, voire de recherche technologique puisque les préoccupations sont proches des besoins des utilisateurs.



Jean Marie Kauffmann
Directeur du L2ES
Responsable de l'équipe Système Pile à Combustible

Historique

Le L2ES a été créé suite à la réorganisation des activités de recherche sur le Nord Franche-Comté en 1999. Il a été constitué à partir de l'équipe Energétique Electrique de l'Institut de Génie Energétique.

Suite à une réunion de travail, le 19 février 1999 à l'INRETS, la thématique pile à combustible appliquée aux transports a été jugée pertinente. La plate-forme nationale d'essais de pile à combustible et les travaux de recherche sur les systèmes pile à combustible découlent de cette volonté conjointe.

Le L2ES est une unité mixte Université de Franche-Comté et Université de Technologie de Belfort-Montbéliard. Il a été associé à l'INRETS sous la forme de Laboratoire de Recherche en Emergence (LRE T_31) par une convention conclue pour 4 ans en 2000. Dans le nouveau contrat quadriennal, il est équipe d'accueil EA 3898.

History

Fuel cell activities started at L2ES in 2000. L2ES was also created in 2000 from a team of electrical engineer researcher. L2ES is a mixed research unit of University of Franche-Comté and University of Technology of Belfort – Montbéliard.

The fuel cell devoted to transportation application topic has been defined in collaboration with INRETS (National research Institute for Transportation and its Safety).

Quelques dates :

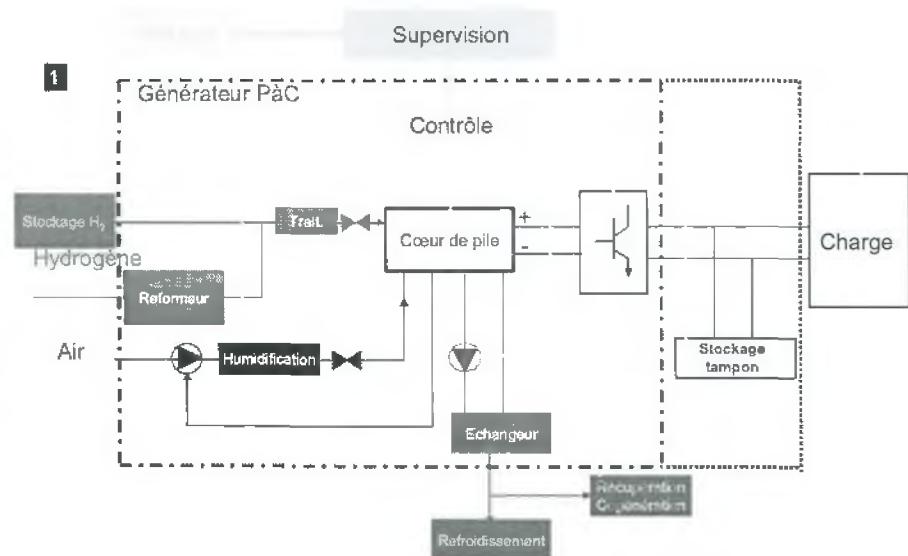
1998	CIADT – demande d'implantation de l'INRETS sur le Nord Franche-Comté
1999	Définition des thèmes de recherche en commun avec l'INRETS et choix du thème système pile à combustible
Nov. 1999	Dépôt du dossier du projet SPACT
Jan. 2000	Création du L2ES
Mars 2000	Inscription de la construction de la plate-forme d'essais de pile à combustible au contrat de plan Etat – Région
Juil. 2000	Décision de créer un CNRT Pile à combustible et interfaces pour les transports terrestres
Nov. 2000	Colloque sur les piles à combustible
Nov. 2000	Notification du projet SPACT
Juil. 2001	Mise en service de la pile 500W et du premier banc d'essai
Sept. 2001	Début de la construction de la plate-forme d'essais
Déc. 2001	Mise en place d'INEVA
Déc. 2002	Achèvement de la construction de la plate-forme
Déc. 2002	Mise en service du banc 10 kW
Déc 2002	FCTESTNET
Jan. 2004	Nouveau plan quadriennal pour le L2ES

Fuel Cell System

Among all the definitions of the fuel cell system, we consider as the fuel cell generator, the stack, the ancillaries (air and hydrogen or more generally fuel supply, valves, humidifier or gas treatment, cooling), power electronics, buffer storage and control.

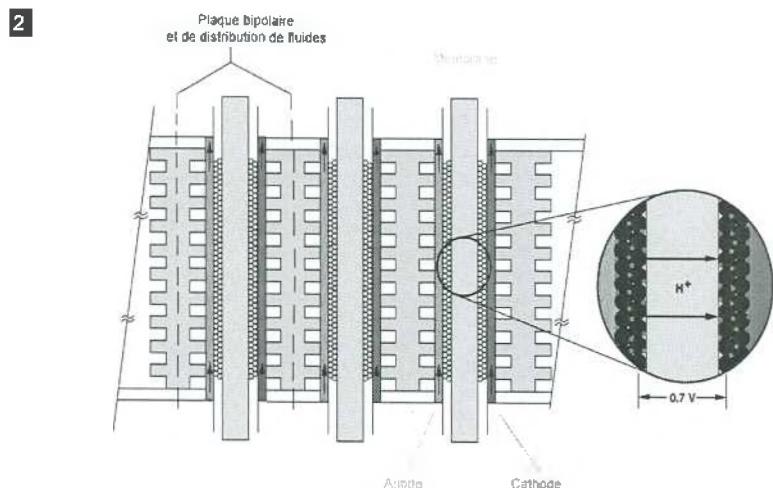
Le système Pile à Combustible

Le schéma ci-après décrit ce que nous appelons système pile à combustible basé sur une pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC). Autour du cœur de pile, élément actif, il faut mettre en œuvre un certain nombre d'auxiliaires pour faire fonctionner correctement le générateur et en obtenir le meilleur rendement.



1 Schéma décrivant le système pile à combustible
(Scheme describing the fuel cell system)

La tension aux bornes de la pile à combustible du type à membrane échangeuse de protons est donnée de manière simplifiée par la formule dite de Tafel. Elle montre que la tension dépend des pressions partielles d'hydrogène et d'oxygène, de la température et bien sûr du courant débité. Si l'hydrogène est généralement stocké sous pression, il n'en pas de même du comburant pour lequel on utilise de l'air et non de l'oxygène pur sauf pour des applications particulières (espace par exemple). L'air doit être comprimé sous une pression variant entre 1 et 3 bars.



2 Schéma d'un assemblage de cellules élémentaires d'un cœur de pile
(Scheme of fuel cell assembly)

La figure ci-dessus donne une vue éclatée d'une cellule élémentaire. On y distingue les canaux de distribution, les couches de diffusion avec les catalyseurs et la membrane échangeuse de protons avec l'électrolyte. Le transfert des protons ne peut se faire que si la membrane est humide. De ce fait, on trouve un système d'humidification sur au moins l'un des deux circuits de gaz.

Par ailleurs la réaction chimique $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- + 1/2\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$ est exothermique. La température de fonctionnement du cœur de pile doit être contrôlée d'où la nécessité d'un circuit de refroidissement. Le convertisseur de puissance fait partie intégrante du générateur pile à combustible. La tension normale aux bornes d'une cellule est de l'ordre de 0,7 volt et même avec la mise en série d'une centaine d'entre elles, la tension résultante n'est pas suffisante pour alimenter un système de propulsion. Le générateur pile à combustible est une source à courant continu faible tension et fort courant. Le convertisseur de puissance réalise l'adaptation au circuit de charge.

Ainsi un générateur pile à combustible comprend :

- cœur de pile (stack)
- compresseur et circuit d'humidification de l'air
- circuit d'humidification de l'hydrogène (le cas échéant)
- circuit de refroidissement
- convertisseur de puissance
- système de stockage d'énergie électrique tampon (le cas échéant)
- capteurs, vannes et dispositifs de contrôle
- système de pilotage.

Ainsi le rendement du générateur pile à combustible est fortement obéré par les comportements et les consommations des auxiliaires.

L'approche système consiste à étudier le comportement du générateur dans sa globalité et à optimiser les composants et leur association en travaillant sur l'architecture et sur la commande. La charge et l'environnement constituent les contraintes de cet environnement.

Un générateur n'est « utilisable » pour des applications portable, transport ou stationnaire que dans la mesure où la fiabilité est suffisante. C'est un deuxième axe de recherche, analyse des causes de défaillance, diagnostic à partir de données facilement mesurables, influence des conditions de fonctionnement sur la durée de vie du système pile et plus particulièrement du cœur de pile.

Les travaux menés au L2ES sont basés sur la simulation qui permet une analyse du comportement dans des conditions très variées et sur l'expérimentation. Les modèles nécessaires pour la simulation doivent d'une part être validés et d'autre part ne permettent pas de prendre en compte toutes les interactions entre composants et toutes les conditions de fonctionnement.

Research topics at L2ES**Thèmes de recherche**

- fuel cell system modelling
- fuel cell system architecture and its optimisation
- diagnosis and life time

Les travaux de recherche menés au L2ES peuvent être classés en trois thèmes

- **modélisation des phénomènes et des composants d'un système**
- **architecture du système pile à combustible et son optimisation**
 - o composants du générateur
 - o architecture du générateur
 - o contrôle – commande du générateur
 - o optimisation du fonctionnement du système
- **durée de vie et diagnostic**
 - o influence de l'environnement thermique
 - o influence du cycle de fonctionnement
 - o démarrage à froid
 - o comportement mécanique
 - o diagnostic

A ces travaux de recherche menés pour certains en coopération avec d'autres laboratoires, il faut ajouter des contrats nationaux ou européens qui peu ou prou entrent dans ces mêmes axes de recherche.

Les acteurs

Les travaux de recherche sont menés essentiellement par l'équipe Système Pile à Combustible qui a été mise en place en 2000 lors de la création du L2ES. L'équipe Machines Electriques apporte sa contribution pour la conception de moteurs pour l'entraînement de compresseurs (moteur 10 000 tr/min et réflexions pour un moteur vers 40 000 tr/min). L'équipe Gestion de l'Energie et Electronique de Puissance travaille sur le système de stockage à base de supercondensateurs, travaux qui n'ont été réellement intégrés pour le moment que pour les APU, elle ne figure que pour mémoire et spécifiquement pour cette action.

Les tableaux ci-après donnent la situation fin 2004. En cas de besoin, les dates d'arrivée au laboratoire sont indiquées.

Participants

Research works on fuel cell system concern essentially a specific team. The two other teams intervene more precisely on motors for compressor and power electronics in relation with power storage thanks to ultracapacitors.

1. Équipe Système Pile à Combustible

Fuel Cell System Team

Permanents : Enseignants chercheurs

Nom Prénom	Grade	CNU	Etabl.	Quotité	Commentaires
Kauffmann Jean Marie	PR	63	UFC	0,8	Directeur, Resp de l'équipe
Outbib Rachid	PR	61	UTBM	0,5	1.09. 2003
Hiebel Patrick	MCF	63	UFC	0,3	
Glises Raynal	MCF	62	UFC	0,5	
Hissel Daniel	MCFH	61	UTBM	1	1.09. 2000
Gualous Hamid	MCF	63	UFC	0,3	
Péra Marie-Cécile	MCF	63	UFC	1	1.09. 1999

Pour mémoire : Personnel INRETS

Nom Prénom	Grade	Quotité	Commentaires
Candusso Denis	CR	1	LTN – INRETS (1 ^{er} avril 2003)
Harel Fabien	IGE	1	LTN – INRETS (1 ^{er} novembre 2001)

Post doctorant

Nom Prénom	Quotité	Commentaires
Tian Guangyu	1	Université Tshinghua – Beijing - Financement : Ambassade de France, FFCSA, Région de Franche-Comté.

ATER

Nom Prénom	Etabl.	CNU	Quotité	Commentaires
Dumercy Laurent	UTBM	63	1	(50%) – thèse 27.11.2004
Tekin Mestan	UTBM	63	1	(50%) – thèse 10.12.2004

Personnel IATOS

Nom Prénom	Etabl.	Grade	Fonction principale
François Xavier	UTBM	IR	Plate-forme et essais
	UTBM	IGE	Maintenance de la plate-forme et essais systèmes pile à combustible (au 1 ^{er} septembre 2004)
Bégot Sylvie	UTBM		Chargée de mission – IGR sur budget propre à 50%
Jemei Samir	UTBM	IGR	Budget propre - programme APURROUTE (proposé à partir du 01.01.2005)

Doctorants

Nom Prénom	Etabl.	Encadrement		Financement	
Lachichi Amel	UFC	Davat		MRT	GREEN
Garnier James	UTBM	Kauffmann	Péra	LTN-INRETS	Cofinancé CR
Wahdame Bouchra	UTBM	Kauffmann	Candusso	MRT	
Hernandez Andres	UTBM	Outbib	Hissel		
Mulot Jérôme	UTBM	Kauffmann	W.Charon, J.Délépine	Delphi	Convention (Offre avec Delphi) CEA
Chnani Moussa	UTBM	Kauffmann	Péra	CG90	
M'Batna Jean Paul	UTBM	Kauffmann Panday	R.Glises H.Louahlia	Bourse Tchad	FEMTO-ST (CREST)

Mémoire CNAM

Nom Prénom	Encadrement		Sujet
Bontour Stéphane	H.Gualous	D.Hissel	APU parallèle
Chaduiron Damien	F.Harel	F.Gustin	Commande en temps réel – charge active
Monty-Andaval Cyril	F.Harel	P.Hiebel	Compresseur

Power Electronics and Energy Management team

2. Équipe Gestion de l'Energie – Electronique de puissance

Permanents : Enseignants chercheurs

Berthon Alain	PR	63	UFC	0,2	Responsable de l'équipe. GeEnP
Gustin Frédéric	MCF	63	UFC	0,3	
Gualous Hamid	MCF	63	UFC	0,4	

Electrical Machines team

3. Équipe Actionneurs électriques

Permanents : Enseignants chercheurs

Miraoui Abdellatif	PR	63	UTBM	0,3	Responsable de l'équipe Actionneurs électriques
Espanet Christophe	MCF	63	UFC	0,4	
Amara Yassine	MCF	63	UTBM	1	

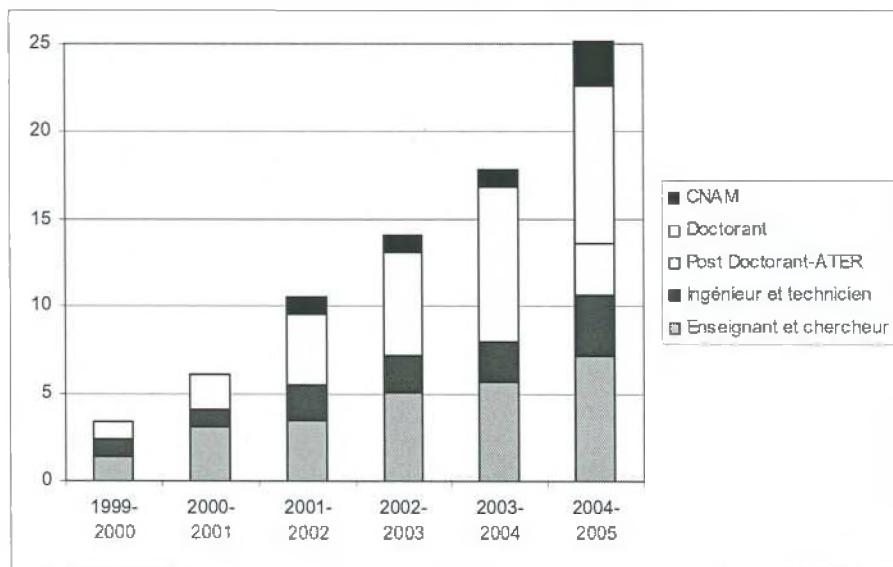
Doctorants

Dubas Frédéric	UFC	Miraoui	Espanet	MRT	Moteur rapide
Blunier Benjamin	UTBM	Miraoui	Amara	C.Régional	Moteur très rapide

Evolution of the number of participants

4. Evolution des effectifs (hors DEA)

Le graphique ci-après donne l'évolution des permanents et doctorants intervenant sur le générateur pile à combustible. Les DEA ne figurent pas sur ce graphique mais on trouvera leur liste au § 7.9. Le personnel INRETS est intégré dans les effectifs. Le graphique prend en compte les quotités et leur évolution au cours de ces 5 années.



On observe une progression régulière avec une stabilisation du nombre de doctorants eu égard au nombre de permanents pouvant encadrer les travaux.

Testing environment

Important testing devices have been installed in Belfort. The national testing platform for fuel cells in a transportation environment has been built. L2ES has been involved in it and has installed testing benches for different rated powers with specific measurement tools.

Contribution to the national test platform for fuel cell and transportation interfaces implementation

The national test platform for fuel cell and transportation interfaces has been supported by local authorities and EU (building funding), and the French state (equipment).

A project team (UTBM, UFC, CEA) has been made to conduct the equipment general design and the coordination with the engineering companies in charge.

Fund management has been made by UTBM. The L2ES is in charge of the scientific and technical management of the platform.

Après avoir donné les principaux éléments concernant la plate-forme nationale d'essais de pile à combustible pour des applications transport (un descriptif détaillé est donné en annexe), nous décrirons les bancs d'essai qui ont été mis en place progressivement au niveau du L2ES soit sur crédits propres soit dans le cadre de contrats nationaux ou régionaux. Ils servent d'outils de compréhension des phénomènes et de validation pour les modèles. Nous décrirons également les instruments de mesure spécifiques.

Les outils

1. La plate-forme nationale d'essais de piles pour les transports (cf annexe)

La construction de la plate-forme d'essais de piles à combustible a été inscrite au Contrat de plan Etat-Région 2001-2007. Le bâtiment est pris en charge par les collectivités locales, le Conseil Général du Territoire de Belfort qui assure la maîtrise d'ouvrage et le Conseil régional de Franche-Comté avec le soutien de crédits FEDER. L'équipement est financé par l'Etat.

Le maître d'œuvre délégué pour la construction du bâtiment est la SODEB et les plans ont été conçus par le Cabinet d'architectes Schneider-Rundstadler assistés par un certain nombre de bureaux d'études.

En raison du caractère technique très particulier, une équipe projet a été constituée au niveau de l'UTBM. Elle était chargée de la conception globale de l'équipement de la plate-forme et de la liaison avec le cabinet d'architectes et les bureaux d'études. Elle a été étroitement associée à la conception du bâtiment. Cette équipe projet était constituée essentiellement de :

Gérard REY, ingénieur au CEA Grenoble, détaché à mi temps pendant 2 ans à l'UTBM

Xavier FRANÇOIS, ingénieur de recherche au L2ES (UTBM)

Jean Marie KAUFFMANN, Directeur du L2ES.

Hervé DURUPT, Ingénieur sécurité UTBM

Ont également participé activement à l'équipe projet :

Marie-Cécile PERA, Maître de Conférences – UFC – L2ES

Daniel HISSEL, Maître de Conférences – UTBM – L2ES

Les données techniques sont précisées ci-après.

Foncier :	Surface concernée	4190 m ²
-	Emprise du bâtiment	853
-	Zone de stockage d'hydrogène	782
-	Parking et voiries	1055
-	Accès bâtiment	100
-	Traitements pied du bâtiment	65
-	espaces verts	933

Bâtiment : surface utile	1177 m ²
- zone essais de piles	321
- zone laboratoires	161
- zone bureaux et services	694

Bâtiment : locaux techniques	160 m ²
-------------------------------------	--------------------

Dates : 06/2000 – 12/2002

Participants : G. Rey, X. François, J.M. Kauffmann, H. Durupt, M.C. Péra, D. Hissel

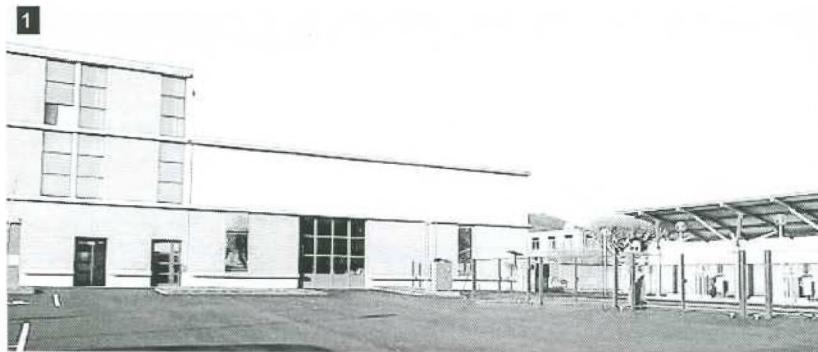
Partenaires : CEA, INEVA

Financement bâtiment : Conseil Général du Territoire de Belfort, Conseil Régional de Franche-Comté, FEDER.

Financement équipement : Etat

Le coût de construction du bâtiment a été de 3 145 000 € y compris les crédits de premier équipement. Le financement a été apporté par le Conseil Général du Territoire de Belfort et le Conseil Régional de Franche-Comté avec le soutien du FEDER.

L'équipement fixe de la plate-forme a été financé par l'Etat dans le cadre du contrat de plan Etat-Région. Le suivi des travaux a été assuré par l'équipe projet. La gestion des crédits et la passation des marchés ont été assurées par l'UTBM.



1 Vue du bâtiment avec à droite la zone de stockage d'hydrogène.
(View on the building with on the right the hydrogen storage area).

Les dépenses sont regroupées par grandes familles.

Traitement d'air – refroidissement	410 k€ TTC
Alimentation en gaz	366 k€ TTC
Adaptation au bâtiment	60 k€ TTC
Sécurité et automatismes	218 k€ TTC
Etudes techniques et suivi chantier	100 k€ TTC
Matériel	139 k€ TTC
Frais de gestion	55 k€ TTC
<hr/>	
Total	1 348 k€ TTC

Les équipements doivent être complétés par les charges actives de forte puissance (pour des puissances supérieures à 30 kW) qui nécessitent des études particulières pour le renvoi de l'énergie électrique sur le réseau.

Le L2ES est en charge de la plate-forme nationale d'essais sur les plans scientifique et technique.

2. Les moyens d'essais

Le L2ES développe des bancs d'essai pour ses travaux de recherche mais également pour assurer les contrats. Les puissances vont pour le moment de 1kW à 20kW. L'environnement transport impose des contraintes de charge pour suivre le profil de mission mais également des contraintes climatiques et vibratoires. Un équipement spécifique, unique en France, a ainsi pu être mis en place.

Le L2ES dispose d'instruments de mesure adaptés. Il a également développé ses propres outils d'acquisition de données, de supervision et de contrôle.

Testing devices

L2ES has developed testing benches for its research works but also for projects on the platform. Transportation environment constraints have been taken into account, for instance, mission profile, thermal, vibrations.

Test bench 1kW

A test bench has been designed in the laboratory to characterize stacks up to 1kW. It has been upgraded since its first version, in july 2001. Operating conditions, like gas temperature, pressure, flows, humidity, stack temperature, ... are well mastered and repeatable. Constant load as long as dynamic current profile can be applied. It allows automatic operation, 24h/24, for long time testing.

Banc de test 1kW

Il est apparu très rapidement la nécessité de disposer de moyens de validation des modèles mis au point mais également de compréhension des phénomènes dans les piles à combustible PEMFC. Le premier banc d'essai, sous une forme très laboratoire a été opérationnel en juillet 2001.

Il a ensuite été modifié plusieurs fois par Fabien Harel (rapport INRETS-L2ES). Le banc d'essai permet de tester des piles en statique et en dynamique d'une puissance maximale de 1000 W. Il dispose de toutes les fonctionnalités, contrôle de tous les débits, pressions et température des gaz, contrôle du point de rosée à l'entrée de la pile, mesure des tensions des cellules et de leurs températures, régulation de température dans une large gamme, charge active programmable. Les capteurs et les dispositifs de pilotage tels que les vannes ou les systèmes d'humidification sont fonctions de la puissance et peuvent être spécifiques à chaque manipulation. Il a été automatisé pour permettre des essais de longue durée 24h/24.

L'humidification de l'air a fait l'objet d'une étude particulière dans le cadre du mémoire CNAM de Stéphane Moratin. Le principe retenu est celui du bouilleur mais l'objectif est de contrôler avec une précision suffisante le taux d'humidification et donc le point de rosée.

La philosophie retenue est de mettre à disposition les équipements d'acquisition de données suivant les standards habituels avec des cartes National Instruments™ tant analogiques que numériques. Les programmes d'acquisition ont été développés sous Labview™. Pour apporter plus de souplesse en particulier dans le pilotage en temps réel des stoechiométries et de la charge active de nouveaux programmes sont développés sous Real Time Work Shop™ dans le cadre du mémoire CNAM de Damien Chaduiron.

Le banc d'essai est utilisé pour des piles de 20 cellules ZSW de puissance 500 à 700 W et pour de petits stacks de 3 cellules ZSW pour étudier la durée de vie.

La construction a été financée d'abord sur des crédits propres du laboratoire et des crédits de la Région de Franche-Comté pour les systèmes d'acquisition. Les compléments ont été apportés par un contrat ADEME et un contrat FRT.

1 Photo du banc 1kW en juillet 2001
(Photo of the 1kW test bench in july 2001)



Dates : 10/2001 – 10/2004

Participants : F. Harel, X. François, S. Jemei

Partenaire industriel :

Financement : L2ES, Région de Franche-Comté, ADEME, contrat FRT

Banc d'essai bipiles

Un banc d'essai de mise en parallèle de deux stacks jusqu'à 750 W a été conçu et réalisé au laboratoire. Le point de vue adopté a été de simplifier le plus possible la structure du système, afin de se placer dans un contexte d'intégration automobile. Ainsi, le nombre de capteurs et de paramètres de régulation a été réduit au maximum, sans toutefois obérer les mesures de sauvegarde des stacks. En effet, il ne s'agit pas ici de caractériser finement les performances des stacks (rôle du banc 1kW) mais au contraire de s'appuyer sur l'expérience acquise sur le fonctionnement des piles pour optimiser le coût et le volume du générateur.

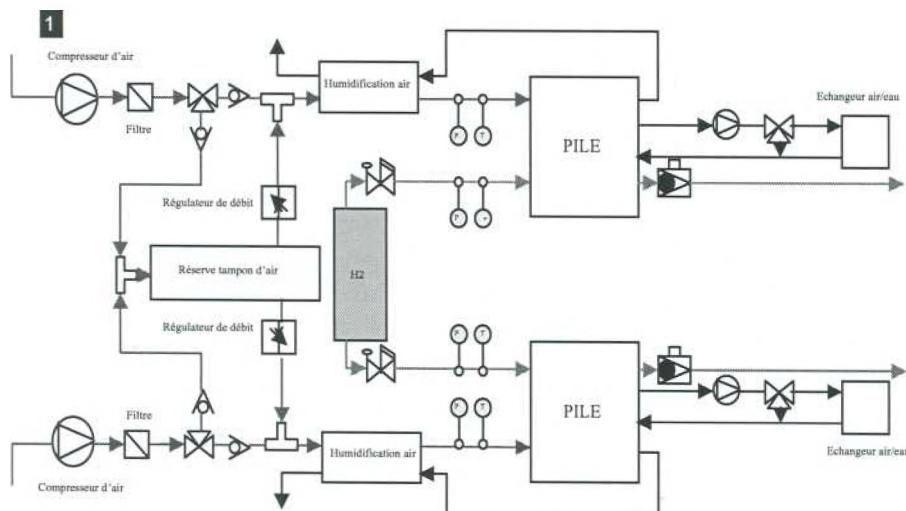
Une symétrie totale a été respectée pour les deux stacks ; le banc est conçu sur la base de deux générateurs élémentaires, susceptibles de fonctionner soit indépendamment l'un de l'autre, soit de façon couplée du point de vue électrique. Le couplage électrique est assuré par le convertisseur de sortie.

La ligne hydrogène est alimentée par le stockage disponible sur la plateforme. Un détendeur permet de ramener la pression au niveau pression de travail des piles. La sortie de l'anode de la pile est fermée par une électrovanne, en fonctionnement normal, et s'ouvre lorsque le compartiment anodique doit être purgé (fonctionnement en « mode fermé »).

La ligne d'air peut fonctionner sous trois modes. Dans le premier, un compresseur d'air alimente directement chaque stack, et le débit est réglé grâce à la vitesse de rotation du compresseur. Dans le deuxième mode, les deux compresseurs alimentent un réservoir d'air tampon, permettant de lisser l'alimentation en air en cas de variations brutales de charge. Le troisième mode consiste à alimenter les piles à partir du circuit d'air de la plate-forme. Dans tous les cas, le gaz est humidifié par un système de roue enthalpique.

Le refroidissement est assuré par la circulation d'eau déminéralisée à travers les plaques bipolaires en circuit fermé. L'échangeur est court-circuité si la température de pile est insuffisante (typiquement lors du fonctionnement à faible charge).

Le banc est en cours de réalisation.



Twin stacks test bench

This test bench is dedicated to the operation of two stacks. It is designed as two identical generators, with as few actuators and sensors as possible. They are fed in air and hydrogen independently. They can be operated simultaneously or separately from the electrical generation point of view. The electrical coupling is performed by the output converter.

1 Synoptique du banc bipiles.
(Synoptic of the twin stack test bench)

Dates : 10/2002 – 10/2005

Participants : F. Harel, J. Garnier, M.C. Péra, D. Hissel, J.M. Kauffmann

Partenaire laboratoire :
LTN (INRETS)

Financement : ITFC (MENRT,
FEDER), INRETS, L2ES

10kW fuel cell testbench and 5kW PEM fuel cell made by Helion

The test bench delivered by the French manufacturer Hélion in the framework of the SPACT project allows the test of PEM fuel cells whose maximal power is 10kW. The test bench is dedicated to the characterisation of fuel cells operating in transportation conditions.

The 5kW PEM stack, fed in air and hydrogen, is also built by Hélon.

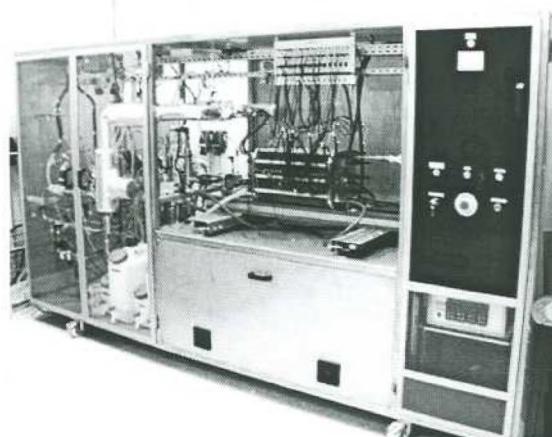
Banc de test Helion 10kW et pile PEM 5 kW

Le banc 10kW et le stack Helion 5kW ont été acquis dans le cadre du projet SPACT. Le banc a été livré et installé fin 2002 sur la plateforme pile à combustible de Belfort. Depuis janvier 2003, des essais nombreux et de différentes natures ont pu être réalisés dans le but de recueillir des données expérimentales fiables nous permettant de mieux comprendre le comportement de la pile étudiée. Des modifications, réalisées en concertation entre le L2ES, l'INRETS et Helion, ont également été apportées au banc dans le but d'améliorer et d'optimiser ses fonctionnalités.

Le banc Helion permet de tester des piles PEM en fonctionnement sur point stationnaire ou en dynamique (sur des profils de mission type transport). Les différents paramètres - température d'eau du circuit de refroidissement, températures des gaz, débit d'eau de refroidissement, pressions des gaz - sont contrôlés précisément. L'humidification des gaz réactifs est réalisée par injection d'eau. Le banc rend possible un fonctionnement en modes: ouvert, à anode fermée avec purges, ou en mode re-circulation d'hydrogène. Le courant de pile peut être imposé au moyen d'une charge active réalisée par le GREEN et l'INRETS LTN.

La pile Helion 5kW est de type PEM ; elle est alimentée en hydrogène et en air. Elle comporte 42 cellules. Chacune d'entre elle possède une membrane dont la surface active est 375cm².

1 Photographie du banc Helion 10kW et de la pile PEM 5kW (10kW test bench and 5kW PEM fuel cell delivered by Hélion).



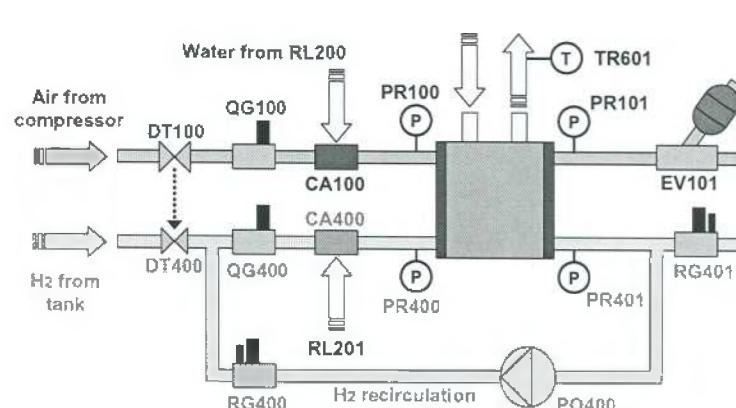
2 Schéma fluidique de principe du banc de test Helion (simplified fluidic scheme of the Helion testbench).

Dates : 01/2001 – 07/2004

Participants : M.C.Péra, D.Hissel
J.M.Kauffmann, F.Harel,
D.Candusso

Partenaires : INRETS, UTBM, UFC, INPL, UHP, CEA, Armines and DGA

Financement : Réseau PACo -
MENRT



Banc d'essais pour groupe moto-comresseur PEFC

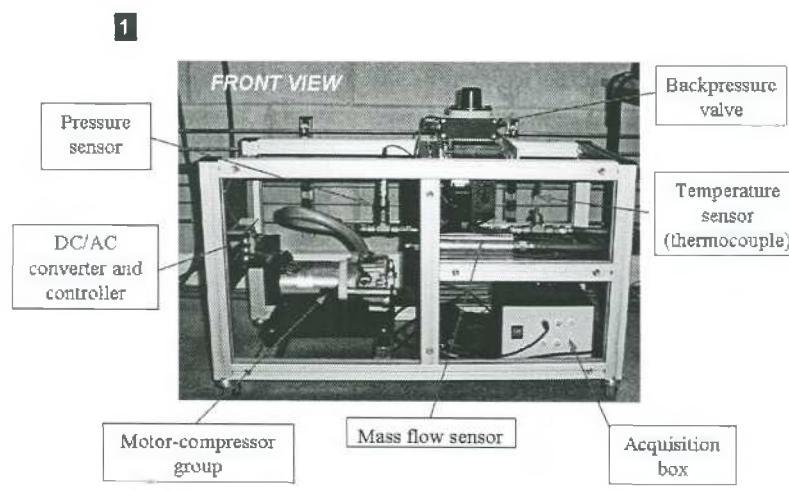
La validation expérimentale des modèles et des lois de contrôle de groupe moto-comresseur d'air pour pile à combustible PEFC développés au laboratoire, a exigé la définition et la réalisation d'un banc d'essais dédié. Ce banc d'essais, réalisé autour d'un compresseur à palettes non lubrifiée, est complètement instrumenté et permet d'émuler la présence d'un stack en aval du compresseur d'air, au moyen d'un déverseur.

Ses principales caractéristiques sont les suivantes :

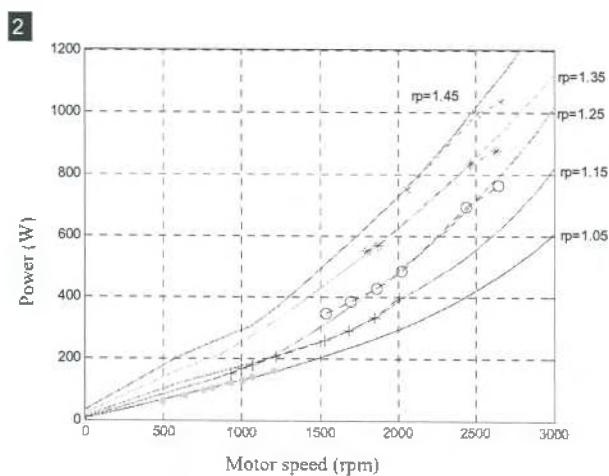
- régulation de vitesse du groupe motocompresseur
- déverseur en sortie de compresseur destiné à réguler la pression
- débitmètre massique sur la ligne air
- capteur de pression
- capteurs de température
- boîtier d'acquisitions
- système d'acquisition LabView®

PEFC air compressor test bench

The aim of this test bench is to characterize a rotary vane air compressor dedicated to PEFC. The experimental results are then used to validate simulation models of motor-compressor groups.



1 Vue de face du banc d'essais instrumenté (Front view of the air compressor test bench)



2 Tracé expérimental Puissance / Vitesse de rotation pour différents ratios de pression (Consumed electrical power versus motor speed for different air pressure ratios).

Dates : 10/2002 – 06/2003

Participants : M. Tekin, F. Harel, D. Hissel, J.M. Kauffmann

Partenaire industriel : -

Financement : MENRT, Région de Franche-Comté, L2ES

20 kW PEFC Test Bench

The 20 kW fuel cell test bench is dedicated to the characterisation of PEFC stacks under low temperature.

A special glycol coolant circuit and the use of demineralised water make it possible to perform test starting sequences for a 20kW PEFC stack from ambient temperatures as low as -20°C.

Presently, without humidification circuit but with pressure security and a lot of monitoring, this test bench can work under various operating conditions.

Banc d'essai PEFC 20 kW

Le banc de tests de PEFC jusqu'à 20kW est un moyen d'essais conçu et réalisé dans le cadre du projet GENEPAC. Le banc sera opérationnel en février 2005.

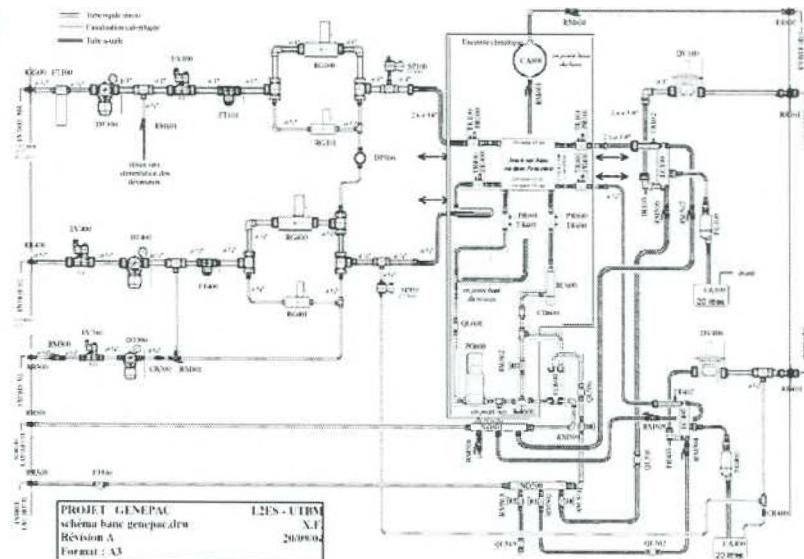
Ce banc permet de tester des piles PEM en fonctionnement stationnaire ou en dynamique (suivi de cycle) placées ou non dans une installation climatique. En effet, un châssis supportant le stack et une partie de ses auxiliaires peut être placé à température négative dans l'enceinte climatique de 2.3m³ dont dispose la plate-forme de Belfort. Le circuit de refroidissement du stack en eau déminéralisée additionnée d'un glycol spécial permet de descendre à -20°C et monter à +90°C.

Les performances maximales du banc sont les suivantes : 2200 Nl/min en air @ 3 bars et 525 Nl/min en H₂ @ 3 bars, charge électrique 24kW / 400V/ 1000A. Les différents paramètres – température et débit d'eau du circuit de refroidissement, débits et pressions des circuits de gaz – sont mesurés et contrôlés précisément par des systèmes PXI et SCXI de National Instruments™.

Le banc ne dispose actuellement d'aucune régulation de température ni d'humidification des gaz réactifs. Les modes ouvert, fermé, ou en contre-pression sont possibles à l'anode et à la cathode (en oxygène). Des soupapes et un système de surveillance paramétrable de l'écart de pression assurent le contrôle des pressions anodique et cathodique du stack à tester.

Le banc va servir prochainement à valider le démarrage à froid (-18°C) d'un prototype de stack conçu par PCA et le CEA dans le cadre du projet GENEPAC.

1 Schéma fluidique du banc de test (fluidic scheme of the test bench).



Dates : 03/2003 – 03/2005

Participants : S.Bégot, X.François, F. Harel

Partenaire industriel :

Financement : MINEFI (Réseau PACo), L2ES.

Simulation des contraintes environnementale de type transport sur banc d'essai

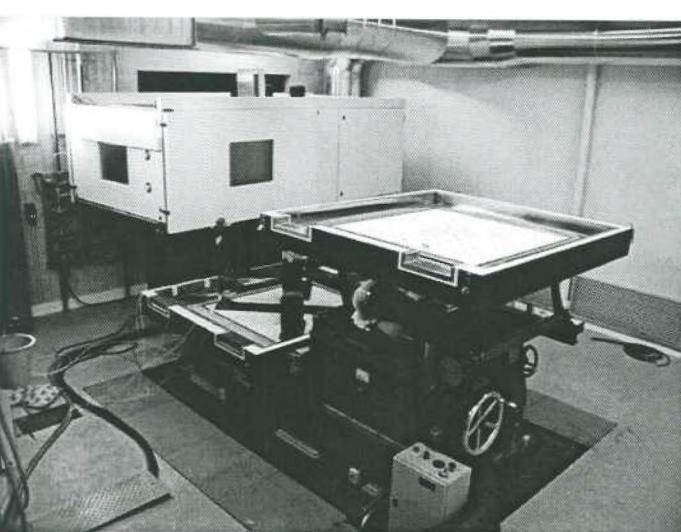
Des discussions avec des utilisateurs potentiels de la plate-forme nationale d'essais ont rapidement montré que l'étude du comportement des piles à combustible dans des applications transport suppose de pouvoir placer soit le cœur de pile soit le générateur complet dans des conditions environnementales adéquates, température et vibrations. Une équipe a été montée pour concevoir, dimensionner l'installation et mener le projet jusqu'à la recette de l'installation sur le site.

Le générateur de vibrations a été découplé du bâtiment au moyen d'un massif anti-vibratoire et des boîtes à ressort. Le massif d'une masse de 18 tonnes environ est spécialement ferraillé et un marbre a été fixé sur la surface. La table vibrante, de 1220x1220 mm², comprend un pot vibrant électrodynamique dont la fréquence peut varier entre 5 et 2000 Hz. La force est de 35 kN et les performances sont de 3g à 6 Hz et ± 1 pouce pour une masse de 250 kg (jusqu'à 500 kg en limitant le domaine d'exploration). L'équipement permet d'analyser le comportement du dispositif à étudier suivant trois axes x, y et z mais non simultanément. Les sollicitations particulières liées par exemple au comportement d'un véhicule pour un profil de mission peuvent être appliquées par l'intermédiaire du dispositif de pilotage du pot vibrant électrodynamique.

Le caisson climatique a été conçu pour être positionné sur table vibrante ainsi un équipement peut fonctionner dans des conditions environnementales réelles tant en température qu'en vibration. La gamme de température va de -45°C à 130°C avec un dégagement de chaleur interne de 10 kW. La variation possible est de 1°C par minute dans la plage -30 à 130°C. Le volume est 1700x1700x800 mm³ soit environ 2,3m³. L'hygrométrie est également contrôlée. Le caisson peut être utilisé indépendamment de la table vibrante.

Ces équipements acquis dans le cadre d'un programme CIADT (PME) avec le soutien du FEDER, permettent de tester tout objet ou équipement. Grâce à des dispositifs de sécurité spécifiques à l'utilisation d'hydrogène (soufflage d'air), un cœur de pile ou un générateur pile à combustible peut être testé en fonctionnement.

Le montant des investissements et travaux annexes est de 777 139 € TTC avec une participation de 40% du CIADT, 40% du FEDER.



Transportation constraints simulation on static test bench

Systems are sensible to environmental constraints as vibration and climatic conditions (temperature and hygrometry). They are particularly severe in the case of transportation applications. A vibration table has been implemented on the national test platform to apply solicitation profile (one axis at a time), representative of transportation application. Specified temperature and hygrometry conditions can be applied to a system in a climatic chamber. Both devices can be used simultaneously and the tested system can be operated during the vibration and/or climatic test.

1 Photo du caisson climatique et de la table vibrante
(Photo of the climatic chamber and the vibration table)

Dates : 01/2001 – 09/2004

Participants : G.Rey (CEA), F.X.Peton (UTBM), X. François, J.M.Kauffmann, W.Charon (M3M-UTBM), P.Lesage (M3M-UTBM), J.L.Raynaud (LMARC-UFC), H.Durupt (UTBM), J.P.Schwartz (INEVA)

Partenaire industriel :

Financement : Etat (CIADT), FEDER

Specific instrumentation

An impedance spectrometer has been bought to Zahner. It allows performing measurements from 10µHz to 100 kHz, with a load current up to 40A. A controlled atmosphere chamber has been specified for hydrogen safety. A gas station allows mixing up to 5 gases (a priori CO, CO₂, CH₄, N₂, O₂) to vary the fuel and the oxidant gas composition simultaneously.

Instrumentation spécifique

Spectromètre d'impédance

Le laboratoire s'est doté d'un spectromètre d'impédance acquis auprès de la société Zahner. Il a les caractéristiques suivantes :

Potentiostat principal :

 Bande passante de fréquence 10µHz à 8MHz

 Courant +/-3A

 Bande d'impédance: 10mOhm à 10MOhm

Potentiostat de puissance

 Bande passante de fréquence: DC-100kHz

 Courant maximum: +/-40A

 Tension maximale: +/-5V

La formation a été assurée par le fabricant mais surtout dans le cadre d'un stage effectué par James GARNIER, docteurant, au LEPMI à Grenoble. Il a ainsi pu bénéficier des compétences de MM J.P.Diard et N.Glandut.

Chambre à atmosphère contrôlée

Les dimensions internes de la chambre à atmosphère contrôlée sont telles que la pile Hélion de 5 kW peut y être installée. Les sécurités hydrogène ont été plus particulièrement travaillées. Cette enceinte anti-déflagrante B1A a les caractéristiques suivantes :

 Volume utile 650 litres

 Plage de température : -20°C/100°C

 Détection H2 par 2 capteurs OLDHAM haute température

 Injection d'azote ou d'air en cas de détection de seuil H2

 Puissance dissipable par l'élément à tester : 1.5kW

 Masse maximale de l'élément à tester : 80kg

 Dynamique : 1.5°C/min

 Contrôle manuel ou automatique par logiciel

Station de mixage de gaz

La station de mixage autorise le mélange de 5 gaz (a priori CO, CO₂, CH₄, N₂, O₂) pour pollution de deux lignes H2 et AIR en simultané

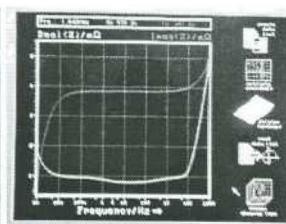
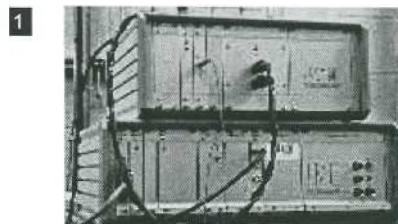
 Contrôle de la quantité de polluant par ratio : 10 boucles de régulation

 Contrôle manuel ou automatique

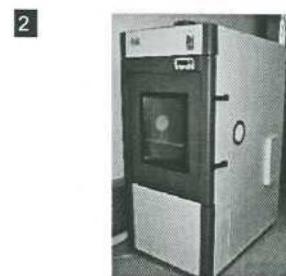
 Débit maxi de chaque constituant polluant : 30nl/min

Elle a été conçue et fabriquée par SERV'INSTRUMENTATION suivant nos spécifications.

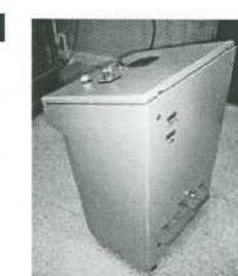
1 Spectromètre d'impédance
(Impedance spectrometer)



2 Chambre à atmosphère contrôlée
(Controlled atmosphere chamber)



3 Station de mixage des gaz
(Mixing gas station)



Dates : 2003

Financement : Etat (FRT)

Les axes de recherche du L2ES sur le système PAC

Si l'orientation générale des travaux de recherche sur le système pile à combustible était et reste clairement définie, il a été nécessaire d'affiner progressivement les thèmes scientifiques que nous souhaitions et pouvions traiter.

Dans une première phase, il était nécessaire de bien comprendre le fonctionnement d'une pile à combustible, de ses contraintes et de ses limites. Nous l'avons fait d'une part en liaison avec le CEA dans le cadre de la thèse de Fabrice Mathieu qui a malheureusement arrêté en novembre 2000, menée en partenariat et d'autre part par des essais sur le banc 500 W mis en service dès juillet 2001. Les recherches bibliographiques, les recherches propres et les participations aux congrès internationaux nous ont permis de définir les axes de recherche nécessaires pour mener à bien le thème général que nous avions retenu sur le système pile à combustible.

L'analyse a ainsi montré que d'une part le comportement du cœur de pile est fortement influencé par celui des auxiliaires en fonctionnement stationnaire mais encore plus en fonctionnement dynamique, ce qui est fondamental pour une application transport et que d'autre part, la consommation des auxiliaires pénalise très fortement le rendement du générateur pile à combustible. Enfin, ce générateur doit avoir une fiabilité compatible avec les applications visées, transport ou stationnaire. Deux aspects sont donc à envisager, diagnostiquer le fonctionnement du système pile à combustible et en cas de défaut, prendre les mesures pour garantir la sécurité du matériel et des personnes et faire en sorte que l'utilisateur ne soit pas pénalisé.

Les travaux menés au L2ES peuvent être résumés dans l'objectif général :

Optimisation dynamique et énergétique d'un système pile à combustible en fonctionnement normal et en fonctionnement dégradé.

L'approche système entraîne que les données d'entrée sont des grandeurs aisément mesurables ou nécessaires au pilotage du système. Tel est le cas pour le courant et les tensions (de cœur de pile ou de cellule), les températures et avec plus de difficultés, les débits et les pressions. Ces grandeurs externes mesurables conditionnent les **modélisations** nécessaires avant tout travail d'optimisation et de commande.

Les auxiliaires font partie intégrante du système et pénalisent fortement le rendement. L'approche à ce niveau comme pour l'architecture du générateur est essentiellement énergétique. Les moyens d'action sont au niveau de la conception de chaque composant mais surtout de la commande et de l'approche globale. L'**architecture** du générateur doit permettre une dynamique adaptée ; le stockage électrique tampon doit à notre avis être intégré au générateur. L'association parallèle de stack ou de générateur améliore très sensiblement le MTBF et nous travaillons sur cette architecture.

La fiabilité du générateur n'est pas compatible actuellement avec les besoins tant au niveau du cœur de pile qui est particulièrement fragile que du système. Le vieillissement doit être intégrée dans la conception du système et des outils de **diagnostic** sont à développer pour augmenter la **durée de vie**.

Research topics at L2ES on fuel cell systems

The objectives of the laboratory are summarized in ***Dynamic and Energetic Optimization of a fuel cell system in normal and degraded conditions.***

For a system approach, the inputs and outputs are easily measured values and **modelling** is based on it. The architecture of **ancillaries** and fuel cell system is studied with an energetic approach. Means of action are in the design of ancillaries and in the local or global control.

Ageing and **life time** have to be integrated in the design and **diagnosis** tools are developed.

Modelling

Modelling and its corollary validation are necessary for optimizing. For a system approach, inputs and outputs are measured values. Types of modelling developed in L2ES take into account these constraints.

Neural network modelling has been validated in permanent and transient conditions for a PEMFC stack and for a compressor.

Behaviour model has been developed to be integrated into a larger vehicle's model integrating stack and fluids.

Thermal model has a more local approach taking into account interaction between solids and fluids and thermal energy generation.

Modélisation des composants et du système pile à combustible

L'optimisation du système pile à combustible nécessite de disposer de modèles fiables et adaptés à l'approche système. Une approche électrochimique pure de traduction des phénomènes suppose la connaissance des paramètres physiques des différents composants d'un cœur de pile, membranes, électrodes, couches de diffusion en particulier. Cela suppose également que toutes les données géométriques sont accessibles, ce qui est rarement le cas en raison de la confidentialité très forte imposée par les constructeurs.

Nous avons délibérément choisi de privilégier la modélisation à partir de grandeurs externes mesurables, courant et tension, pressions et débits pour les stoechiométries, température et température de rosée. Nous utilisons également la spectroscopie d'impédance pour la modélisation dynamique.

La modélisation des composants obéit aux mêmes impératifs pour permettre de constituer la modélisation d'un système par assemblage par blocs d'un système. Un outil unique a été choisi de ce fait, Matlab-Simulink™. Ce logiciel est largement reconnu dans le monde scientifique et les échanges entre laboratoires se font facilement.

Modélisation nécessite validation. Nous avons donc largement développé les bancs d'essais. L'instrumentation permet la mesure de toutes les grandeurs utiles pour valider les modèles mis au point. Cette validation nécessite également que les conditions de fonctionnement soient parfaitement maîtrisées, stoechiométrie, température, humidification par contrôle de l'hygrométrie, courant de charge et sa dynamique.

Il a fallu également maîtriser les modes opératoires pour obtenir des mesures parfaitement répétables. Ceci impose bien souvent de commencer par un cycle pour définir des conditions initiales et des évolutions temporelles. Les données mesurées sont également tributaires de l'état du cœur de pile. Les paramètres électrochimiques évoluent au fur et à mesure des essais en raison du vieillissement.

Les modélisations ont été faites essentiellement sur des piles à électrolyte polymère (PEFC). Celle des piles à haute température (SOFC) n'est pour le moment que basée sur des modèles tirés de la littérature. Nous serons amenés à nous y intéresser prochainement dans le cadre de contrats particuliers, APUROUTE et FELICITAS. Nous n'avons pas non plus abordé la modélisation, même externe de reformeur. Les alimentations en carburant se sont à partir d'un stockage centralisé d'hydrogène. De même le comburant est l'air même si l'alimentation en oxygène est opérationnelle.

Différentes approches de modélisation ont été prises depuis des modèles boîte noire ou d'état à un modèle comportemental. Ces modélisations ne peuvent encore s'appliquer à la modélisation thermique en raison du couplage nécessaire entre les parties solides et les parties fluides et de l'importance des sens des écoulements. Il en est de même pour la modélisation mécanique et vibratoire de plaques puis de cellules et de stacks de piles à haute température qui nécessite la mise en œuvre d'outils spécifiques.

La **modélisation neuronale** a été mise en œuvre dans le cadre d'un contrat industriel. Les données d'entrée sont le courant, les débits et la température. La grandeur de sortie est la tension. Le modèle a été mis au point en fonctionnement stationnaire et en fonctionnement dynamique à fréquence fixe puis à fréquence variable correspondant à un profil de mission. La technique a été appliquée également à un compresseur d'air.

La technique de **modélisation comportementale** a été utilisée dans les premiers travaux menés d'abord par Fabrice Mathieu puis par Samer Hamandi avant d'être complètement reprise pour que le modèle puisse être intégré dans un modèle de véhicule. Le modèle de base est celui de Tafel qui fait intervenir les pressions partielles de carburant et de comburant. Les comportements des circuits fluides ont également été modélisés.

La température de fonctionnement du cœur de pile a une très forte incidence sur le fonctionnement et sur la gestion de l'eau. La **modélisation thermique** nécessite de décrire d'une part les parties solides (méthode nodale) et les parties fluides (comportement des gaz) et d'autre part de décrire la génération de chaleur liée à la réaction. Le modèle est fait pour une cellule et extrapolé à un stack.

Nous ne développerons pas par une fiche, la **modélisation vibratoire** de cellules de pile à haute température, travail de thèse mené par Jérôme Mulot qui bénéficie d'une convention Cifre avec la Société Delphi. La description mécanique et vibratoire d'une plaque puis d'une cellule est placée sous la responsabilité du Professeur W.Charon du laboratoire M3M de l'UTBM. Ce travail est mené également en liaison avec le CEA Grenoble. Le L2ES n'intervient que dans un deuxième temps en liaison avec le projet APUROUTE pour l'APU dans une application transport.

Neural network modelling of a PEFC

The goal of this Ph.D. Thesis is to propose a new modelling methodology for PEFC, where no deep knowledge of the internal parameters of the stack is required. Neural network modelling has been used to reach such an aim.

The obtained results are very good, as static and dynamic behaviours of the fuel cell have been modelled, with accuracy remaining under 4% in all operating conditions, including variable current frequency solicitations.

Modélisation neuronale d'une PEFC

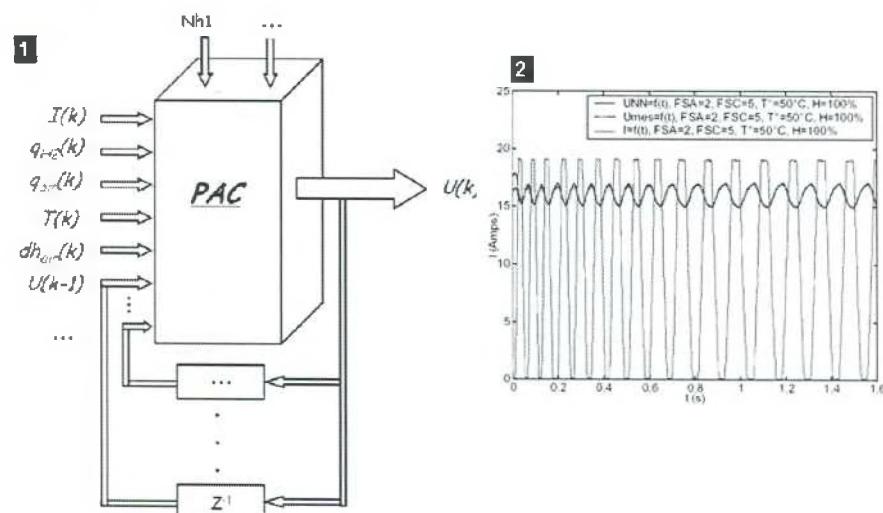
L'établissement d'un modèle analytique d'une pile à combustible de type PEFC n'est pas chose aisée, de par le caractère à la fois multi-physique et multi-échelles (de temps et de taille) d'un tel dispositif. De plus, lorsque ces modèles existent, ils mettent en œuvre un grand nombre de paramètres, souvent délicats à identifier sur un système réel complet. Dès lors, une connaissance importante du fonctionnement et des grandeurs internes du stack est souvent requise, connaissance bien souvent domaine réservé des fabricants de pile à combustible.

L'alternative réside dans le choix d'une toute autre approche de modélisation, par exemple en utilisant un modèle de type « boîte noire ». L'idée directrice est ici de pouvoir reproduire après coup (i.e. après une phase d'apprentissage) l'évolution des sorties d'une boîte noire (ici le générateur à pile à combustible) en fonction des entrées présentées à celle-ci. Ceci constitue exactement un des champs d'application de la technique des réseaux neuromimétiques.

Dans le cadre de la thèse de doctorat de Samir Jemeï, les réseaux de neurones ont ainsi été utilisés pour modéliser le comportement statique et dynamique de différentes piles à combustible de type PEFC de puissances nominales de 500W et 5kW.

Les résultats obtenus grâce à cette méthodologie de modélisation sont particulièrement intéressants et prometteurs. Le modèle développé s'avère en effet capable de prédire (sur une base expérimentale de test) le comportement statique et dynamique (même à fréquence variable) de la tension de sortie de la pile à combustible sous diverses conditions de fonctionnement. Les résultats obtenus mettent en évidence la très bonne corrélation entre les essais expérimentaux et les résultats de simulation (moins de 4% d'erreur quel que soit le mode de fonctionnement de la pile). De plus, la méthodologie proposée est directement transposable à d'autres types de piles à combustible (SOFC, MCFC...) ou à des piles à combustible de fournisseurs différents ou de technologies différentes.

1 Représentation schématique du principe de modélisation (Modelling principle).



Dates : 10/2001 – 10/2004

Participants : S. Jemeï, D. Hissel, M.C. Péra, J.M. Kauffmann

Partenaire industriel : PSA

Financement : PSA

Modélisation comportementale d'une PEFC

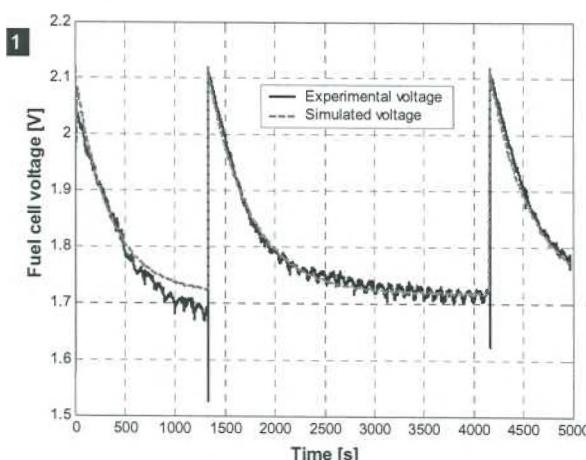
Un véhicule électrique est constitué d'un nombre important de composants, dont l'un peut être un générateur pile à combustible. Bien souvent, plusieurs sources ou éléments de stockage électriques sont hybrides afin d'optimiser la gestion d'énergie. Un outil de simulation est donc développé dans ce cadre, avec un objectif dimensionnement du générateur pile à combustible. Une modélisation précise de l'ensemble des phénomènes physiques dans la pile, outre les problèmes qu'elle pose, ne répond pas à un tel cahier des charges. Néanmoins, le modèle doit pouvoir rendre compte de l'influence des paramètres de fonctionnement du stack.

Aussi, une modélisation comportementale simple a été adoptée et mise en œuvre par Hattab Maker, durant son stage de DEA, à la suite des travaux initiés par Fabrice Mathieu et Samer Hamandi. La réponse en tension quasi-statique de la pile est calculée d'après une équation dérivée des lois de Nernst et de Tafel:

$$U = U_0 + \alpha T \ln P_{\text{air}} + \beta T \ln P_{\text{H}_2} + \gamma T \ln I - RI$$

Les coefficients (α , β , γ , R) sont identifiés d'après des essais expérimentaux, sur le banc 1kW. Deux architectures de systèmes ont été considérées. La première est une alimentation en hydrogène, avec une régulation de débit à l'entrée et un échappement libre en sortie. Ce choix correspond plutôt à une caractérisation sur banc du fonctionnement du stack car il assure un bon fonctionnement électrique de la pile mais il est dispendieux en combustible. La deuxième architecture est une régulation en pression et une électrovanne, fermée en fonctionnement normal et permettant des purges. Cette deuxième structure est une des options possibles dans une application industrielle. Dans ce dernier cas, une dégradation de la réponse en tension de la pile est observée, au cours du temps, même dans des conditions stabilisées de tous les paramètres de fonctionnement. Ce phénomène est attribué à l'accumulation d'eau et d'azote migrant à travers la membrane, de la cathode vers l'anode.

Le modèle ainsi développé permet de simuler la réponse en tension de la pile, sur un profil de courant donné, pour une architecture de système réaliste vis-à-vis du type d'application considéré (transport par exemple). Associé, à la modélisation fluidique des composants du système, il permet d'évaluer la consommation en combustible et comburant sur l'ensemble du cycle. Le calcul s'appuyant sur une modélisation quasi-statique, la dynamique de ce modèle est de l'ordre de grandeur de la seconde, c'est-à-dire celle des auxiliaires de la pile.



Behaviour model of a PEFC

The scope of this Master Degree thesis is to develop a quasi-static behaviour model of a PEFC stack, based on the Nernst and Tafel equations for sizing purpose. The dead end hydrogen circuit case has been studied with particular interest, as one of the presumed architecture for transportation application.

1 Comparaison des réponses en tension expérimentale et simulée d'un stack de trois cellules sous une densité de courant constante (0,4 A/cm²), en circuit hydrogène fermé. Comparison between experimental and simulated voltage response for a 3 cell stack at 0.4 A/cm², with dead end hydrogen circuit.

Dates : 03/2000 – 09/2004

Participants : H. Maker, M. Chnani, F. Mathieu, S. Hamandi, M.C. Péra, D. Hissel, J.M. Kauffmann

Partenaire laboratoire :
LTE (INRETS)

Financement : L2ES, INRETS

Electrochemical modelling of a PEFC

A static and dynamic modelling has been developed on electrochemical basis. The aim is to have a model, which can be easily implemented in the simulation of a power train for transportation application. It can also be used in an electrical power generator simulation, hybridized or not with a power buffer. Few parameters have to be tuned with few experimental results (polarization curves and impedance spectroscopy). The model has been validated on current solicitation, representative of transportation constraints. This work has been performed in the frame work of James Garnier PhD thesis.

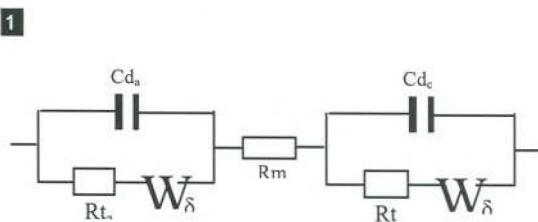
Modélisation électrochimique d'une PEFC

Une pile met en jeu des phénomènes complexes et multidisciplinaires : électrochimiques, fluidiques, thermiques ..., certains aspects peuvent être plus ou moins développés selon l'utilisation ultérieure du modèle. Une des approches que nous avons développées est fondée sur une modélisation des réactions électrochimiques aux électrodes, travail a été réalisé dans le cadre de la thèse de James Garnier, en collaboration avec le LTN (INRETS).

Un mécanisme réactionnel de type redox irréversible a été retenu, ce qui implique une réaction en une étape, où les concentrations surfaciques en réactifs interviennent, sans phase adsorbée. Ces hypothèses permettent de calculer les potentiels d'électrode. La tension de cellule est obtenue en retranchant la chute de tension liée à la résistance de polarisation. Cependant, la courbe de polarisation ne traduit qu'une succession d'états stationnaires. Elle est donc insuffisante pour rendre compte des effets dynamiques, liés à la variation rapide du courant de charge. Pour cela, on calcule l'impédance qui peut se mettre sous la forme d'un schéma électrique équivalent. Les paramètres de ce modèle sont identifiés à l'aide de mesure de spectroscopie d'impédance. Ce modèle a été notamment validé sur un profil de courant dont la dynamique est représentative des conditions de circulation réelles de véhicules issues de travaux développés par l'INRETS. La réponse en tension de la pile simulée est comparée à la mesure expérimentale réalisée sur le banc 1 kW, sur un stack de 3 cellules, de puissance nominale 75W.

Le modèle ainsi développé est bien adapté à la simulation de sources électriques et peut être facilement implanté dans une chaîne de traction électrique complète. Il comporte un nombre réduit de paramètres à identifier, si l'on considère la complexité des phénomènes mis en jeu. De plus, il ne s'appuie que sur des mesures externes de la pile, sans connaissance a priori de la structure interne du stack. Il peut ainsi être identifié facilement pour une géométrie différente de pile à électrolyte polymère voire une toute autre technologie.

1 Schéma équivalent de l'impédance d'une cellule de pile (Equivalent circuit of a cell impedance)



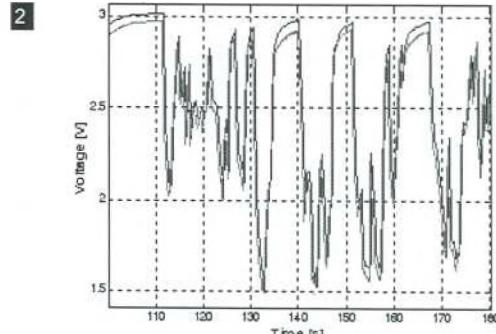
2 Comparaison des résultats expérimentaux et des résultats de simulation pour un profil de courant de type transport (Simulation/Experimental results for transportation current profile).

Dates : 10/2002 – 10/2005

Participants : J. Garnier, M.C. Péra, D. Hissel, J.M. Kauffmann

Partenaire laboratoire :
LTN (INRETS)

Financement :
INRETS/Région Franche Comté



Modélisation d'état non linéaire d'une PEFC

Un des passages obligés en vue de la réduction des coûts d'un groupe électrogène à pile à combustible (embarqué ou non) passe par l'augmentation de la durée de vie de la pile à combustible. Pour ce faire, il apparaît primordial de pouvoir proposer des lois de contrôle performantes des paramètres internes au cœur de pile et de pouvoir diagnostiquer d'éventuels dysfonctionnements avant que ceux-ci ne deviennent dommageables. Ces lois de contrôle doivent dès lors permettre un fonctionnement optimal du groupe électrogène, en vue de réduire les contraintes sur les matériels et matériaux.

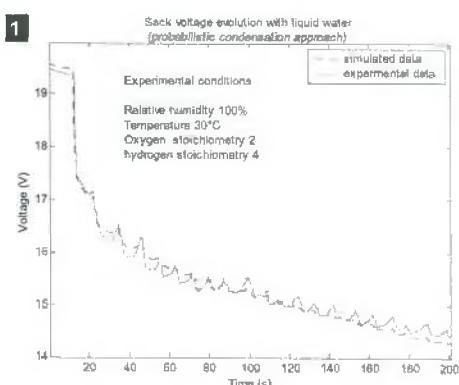
De telles lois de contrôle, à la fois robustes et performantes, ne peuvent être obtenues que si un modèle simple mais néanmoins représentatif des phénomènes se produisant au cœur de la pile à combustible est disponible. Ce travail, première partie de la thèse de doctorat de Andres Hernandez, se place dans cette optique en cherchant à établir une modélisation d'état non linéaire d'un stack PEFC.

Le modèle d'état non linéaire proposé repose sur 8 variables d'état : les pressions partielles des différents gaz (hydrogène, oxygène, azote, vapeur d'eau) au sein des compartiments cathodique et anodique de la pile et sur la quantité d'eau en phase liquide présente dans ces deux compartiments. Les grandeurs d'entrée sont les pressions aux entrées de la pile à combustible ainsi que le courant demandé. La grandeur de sortie est la tension aux bornes de la pile. Le modèle développé présente des performances particulièrement satisfaisantes, tant en régime statique que dynamique. Il repose sur une approche probabiliste novatrice pour la modélisation du phénomène d'évaporation / condensation de l'eau au sein des compartiments de la pile.

Non linear state-space modelling of a PEFC

This work is the first part of a Ph. D. Thesis dedicated to PEFC system diagnosis. In order to extend the stack life time, it is necessary to propose efficient control laws of the stack internal parameters that can ensure an optimal working point and a reduced stress to its components, but also to diagnose faults before they become damageable for the stack. Therefore, a reliable but simple model that can predict static and dynamic responses of external and internal parameters from the least possible input information is needed.

To reach such an aim, a non linear state space model based on product and reactant partial pressures within the channels, including the possible presence of liquid water, is introduced.



2

$$\begin{cases} \frac{d[P]}{dt} = f_1([P], [V_{H_2O}], [U], \theta) \\ \frac{d[V_{H_2O}]}{dt} = f_2([P], [V_{H_2O}], [U], \theta) \\ U_{P,A} = g([P], [V_{H_2O}], [U]) \end{cases}$$

$$[P] = \begin{bmatrix} P_{O_2}^e \\ P_{H_2O}^e \\ P_{N_2}^e \\ P_{H_2}^e \\ P_{H_2O}^a \\ P_{N_2}^a \end{bmatrix}$$

$$[V_{H_2O}] = \begin{bmatrix} V_{H_2O}^e \\ V_{H_2O}^a \end{bmatrix}$$

1 Résultats expérimentaux / Résultats de simulation sur PEFC 500W (500W PEFC experimental / simulation results).

2 Principe du modèle d'état non linéaire (General scheme of the non linear state-space model).

Dates : 10/2003 – 10/2006

Participants : A. Hernandez, D.Hissel, R. Outbib

Partenaire industriel :

Financement : L2ES

Thermal modelling of a PEFC

The aim of this Ph.D. Thesis is to propose a thermal modelling permitting to obtain internal temperature gradients and variations of mass flows in the fluid channels. Spatial discretisation is realized with about 200 isothermal nodes representing the 3D structure. The analytic system is solved with a Gauss-seidel method.

Modélisation thermique d'une PEFC par méthode nodale

L'efficacité du système complet pile à combustible à membrane échangeuse de protons dépend fortement de son niveau de température atteint. La connaissance précise des transferts de masse et de chaleur internes permet d'obtenir par simulation les gradients internes de températures ainsi que les variations de débit massique dans les canaux.

Dans le cadre du travail de Thèse de Doctorat de Laurent DUMERCY, la modélisation thermique du système PEFC est réalisée à l'aide d'une méthode nodale. La méthode est éprouvée sur deux piles respectivement à trois et vingt cellules (puissance de 500W). La discréétisation spatiale est réalisée pour les deux modèles en trois dimensions. Les flux de chaleur par conduction et par convection sont considérés. En revanche, les flux radiatifs sont négligés en raison des relativement faibles niveaux de température atteints.

L'ensemble des canaux fluides est considéré dans la modélisation. Ainsi, les canaux H₂, air et eau (circuit de refroidissement) sont discrétisés en trois éléments isothermes dans la structure. La résolution de l'équation de l'énergie interne dans chacun des canaux permet d'obtenir les conditions aux limites nécessaires à la résolution du système analytique de la structure solide de la pile.

Les conditions aux limites considérées sur les surfaces extérieures de la pile sont de Dirichlet et sont relativement homogènes traduisant les fortes diffusions thermiques internes du système.

Differentes conditions aux limites sont considérées aux interfaces des cellules (modes adiabatique, série et à flux extérieur) traduisant ainsi l'ensemble des configurations possibles. Les simulations des canaux H₂ et air sont faites pour la totalité de la pile en co-courant et sur une seule cellule en contre-courant en raison de la complexité et de la précision du modèle. Les études sont réalisées en mode statique (température d'eau en entrée constante) et en mode dynamique (variation de la température d'eau en entrée en raison de la régulation du bouilleur).

1 Evolution des débits molaires dans le canal anode pour différentes densités de courant – piles de trois cellules
(Evolution of the mass flows for different current densities in the anode channel)

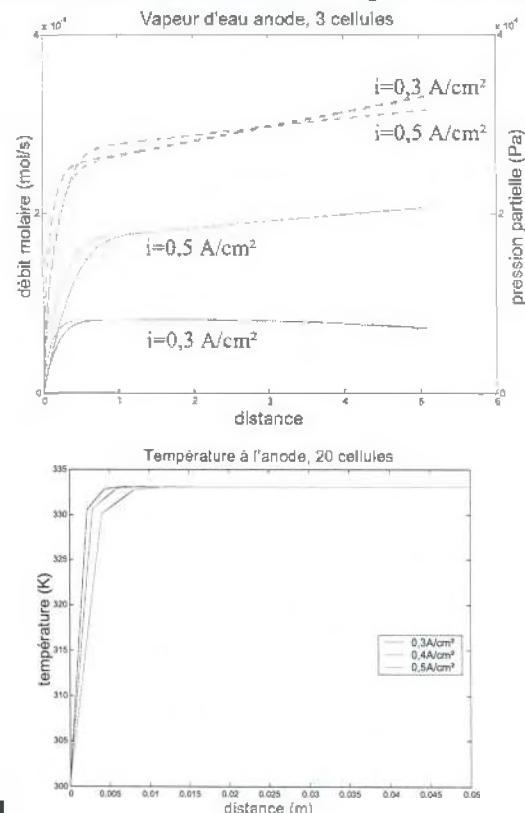
2 Profil de température dans le canal H₂ – $i=0,3 \text{ A/mm}^2$ – 20 cellules
(Temperature profile in the anode channel)

Dates : 10/2000 – 10/2004

Participants : L. Dumercy, R. Glises, J.M. Kauffmann

Partenaire laboratoire : FEMTO-CREST (H. Louahlia-Gualous)

Financement : Région de Franche-Comté

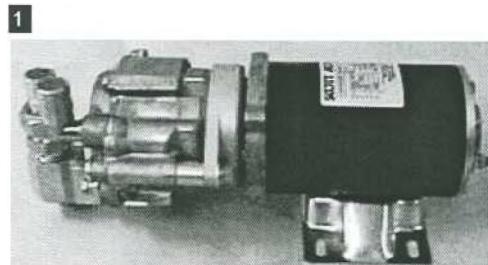


Modélisation d'un groupe moto-compresseur destiné à l'alimentation en air d'une pile PEFC

Dans le cadre de l'optimisation énergétique d'un groupe électrogène à pile à combustible, l'un des passages obligés concerne la réduction de la consommation énergétique du groupe électrogène destiné à l'alimentation en air du compartiment cathodique. En effet, si près de 40% de l'énergie disponible en sortie de PAC est consommée pour l'alimentation des auxiliaires nécessaires au bon fonctionnement de cette dernière (approvisionnement en gaz, humidification, refroidissement, convertisseurs statiques, ...), le groupe moto-compresseur se taille la part du lion (près de 70% de la consommation énergétique intrinsèque au groupe électrogène).

Dans cette optique, il est indispensable de disposer d'un modèle statique et dynamique représentatif du comportement de ce groupe moto-compresseur pour permettre une optimisation tant de son dimensionnement que de ses lois de contrôle. L'établissement d'un tel modèle est cependant délicat, de par le caractère multi-physique des relations mises en jeu (thermodynamique, mécanique des fluides, mécanique, thermique, électrique, automatique, ...).

Deux stratégies de modélisation ont ainsi été envisagées, la première repose sur une modélisation analytique de ce groupe motocompresseur (première partie de la thèse de doctorat de Mestan Tekin), la seconde sur une modélisation comportementale par réseaux de neurones dynamiques (DEA d'Andres Hernandez). Ces deux approches répondent à des besoins différents : prise en compte explicite de la causalité dans le cas du modèle analytique et nécessité de peu d'essais expérimentaux de caractérisation ; pas de connaissance a priori de la physique des phénomènes internes au compresseur dans le cas du modèle neuronal. Les résultats obtenus grâce à ces deux approches sont ainsi complémentaires.



Modelling of a PEFC air motor-compressor group

When considering intrinsic energy consumption reduction of PEFC systems, acting on the design and the control of the air motor-compressor group is a key point. Indeed, it consumes itself up to 30% of the fuel cell's output electrical energy.

This work is thus devoted to the modelling of a PEFC air motor-compressor group. Due to the high complexity of this fuel cell ancillary, two different modelling solutions have been considered: analytical modelling and artificial neural network modelling.

1 Groupe moto-compresseur à palettes (rotary vane motor-compressor group).

Dates : 10/2001 – 10/2003

Participants : M.Tekin, A.Hernandez, S.Jemeï, D. Hissel

Partenaire industriel : -

Financement : Région de Franche-Comté, L2ES

Study of the fluidic components and actuators in a fuel cell system

The study of the fluid line components in test benches is based on an electrical analogy (Master degree Thesis of Moussa CHNANI). Each fluidic device (pipe, fuel cell channel, valve...) is represented by a RC circuit. The parameters of the model are identified using some experimental measurements performed on the L2ES test benches. The modelling is validated under dynamical current profiles, which are representative of vehicle solicitations.

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

Sollicitée en courant, la pile à combustible PEM répond en tension avec sa dynamique propre. Celle-ci est liée aux réactions électrochimiques se déroulant aux interfaces électrode – électrolyte de la pile, aux capacités de double couche, aux couches de diffusion. Pour fonctionner, la pile est entourée sur les bancs de tests d'organes permettant le conditionnement et la régulation des gaz réactifs (hydrogène, air), tels que des détendeurs, des vannes, des canalisations, des régulateurs de débit. Le banc est également équipé d'instruments de mesures (débitmètres, capteurs de pression...) et d'un système de supervision. Tous les actionneurs et éléments assurant le conditionnement des réactifs possèdent eux aussi leurs temps de réponse propres (constantes mécaniques, électriques, effets tampons des volumes de canalisations). Ces derniers peuvent intervenir de façon forte sur la dynamique du système global.

En vue d'une application transport, le pilotage des actionneurs doit se faire de façon à ne pas endommager la pile, à pénaliser le moins possible la dynamique et le rendement de l'ensemble. Aussi, des stratégies particulières de mise en place des gaz doivent-elles être définies et mises en oeuvre sur des cycles de consigne temps – courant, issus de profils de missions transport temps – vitesse du véhicule.

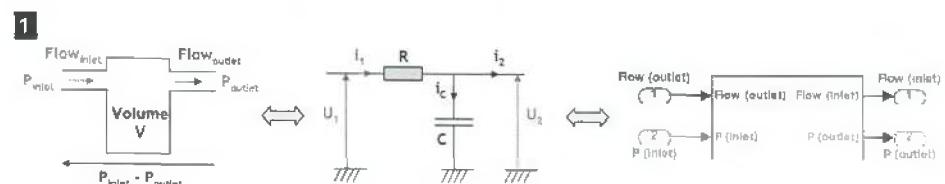
Le but de ce travail de DEA était de parvenir à mieux cerner l'incidence des actionneurs et du conditionnement des fluides sur le comportement du système pile, en termes de sécurité, de dynamique et de consommation.

Une modélisation dynamique et de type monophasique (les réactifs sont pris sous la forme de gaz seuls, il n'y a pas de présence d'eau liquide), basée sur une analogie électricité – fluidique, a été proposée pour les actionneurs et éléments assurant le passage et le conditionnement des gaz.

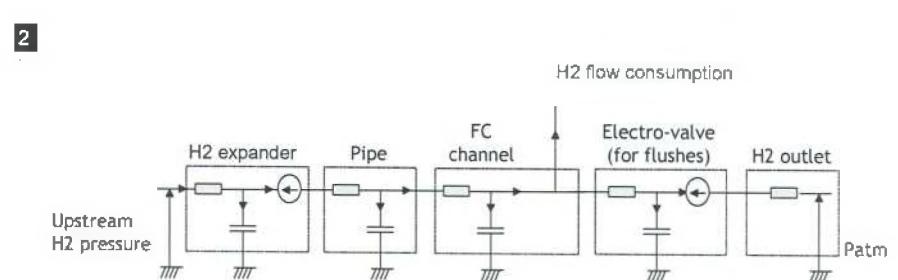
Les lignes air et hydrogène de deux bancs d'essais (1kW et 10kW) disponibles au L2ES ont été modélisées dans l'environnement Matlab-Simulink. Le calage et la validation des modèles ont été faits à partir d'essais réalisés en statique et sur des profils de mission temps - courant. Des stratégies de pilotage des fluides ont ensuite été élaborées, implantées et testées.

L'étude d'un modèle générique dynamique et de type diphasique (présence de gaz et d'eau liquide) a également été initiée.

1 Principe de modélisation adopté pour un élément fluidique
(Modelling principle of a fluidic component by a RC element).



2 Représentation de la ligne hydrogène d'un banc de test (hydrogen fluidic line of a test bench).



Dates : 02/2004 – 09/2004

Participants : M.Chnani, D.Candusso

Financement : -

Modélisation d'une SOFC

Jusqu'à présent, le laboratoire a essentiellement axé son développement en concentrant son action sur la technologie à électrolyte polymère. Cependant, la technologie à oxyde solide possède un potentiel important pour les applications transport, principalement en ce qui concerne les sources auxiliaires de puissance, pour alimenter le réseau de bord. Yannick Vernoux, lors de son stage de DEA, a amorcé l'étude de ce type de pile, en s'appuyant sur deux outils : une recherche bibliographique et la modélisation proposée dans le logiciel SABER.

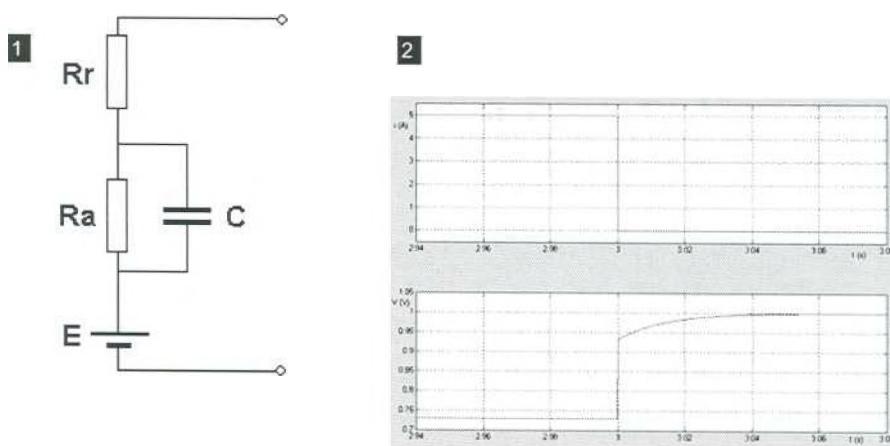
L'étude bibliographique a fait apparaître la diversité des approches possibles ; selon le type de phénomènes considérés (electrochimiques, thermiques, ...), l'échelle de temps et d'espace considérée ou la méthodologie employée (modèles de connaissance, semi-empirique, ...).

Compte-tenu du rôle de « défrichage » de ce travail vis-à-vis de l'activité du laboratoire, de l'absence de moyens d'essai et de la courte durée du stage, il s'est orienté vers l'analyse du modèle proposé par SABER, logiciel bien connu dans le domaine du génie électrique, et dont la documentation était pour le moins peu explicite concernant ce sujet. Les trois modèles disponibles sous les appellations Pile à combustible, SOFC et PEFC sont en réalité identiques, seul le paramétrage par défaut diffère. Le schéma équivalent utilisé pour la modélisation a pu être identifié en analysant les résultats obtenus à la suite des modifications des paramètres et à la lumière des connaissances acquises dans la modélisation des piles.

Matlab/Simulink® ayant été choisi comme un standard pour faciliter les échanges entre les différentes études menées, un modèle utilisant les techniques identifiées dans SABER, a été implanté dans Matlab/Simulink®. Ceci constitue un outil simple d'utilisation, rapide à renseigner, qui rend compte du type de réponse que peut fournir une pile vue comme une source électrique, mais sans tenir compte des contraintes de mise en œuvre d'un tel système. Il sera efficace dans une phase de pré-dimensionnement.

Modelling of a SOFC

The laboratory has focused its activities in the field of the PEFC. In this framework, Y. Vernoux has graduated its Master Degree thesis on the modelling of SOFC to prepare the ground for further investigations. According to its bibliography and its study of the SOFC SABER model, he has proposed a very basic model, easy to parameterize, that simulates the voltage waveform of a FC generator.



1 Schéma équivalent de pile SOFC implanté dans Matlab
(Equivalent circuit of a SOFC, implemented in Matlab)

2 Simulation de la réponse en tension à un échelon de courant d'une cellule d'après le schéma 1.

Dates : 03/2003 – 09/2003

Participants : Y. Vernoux, M.C. Péra

Partenaire industriel : -

Financement : -

Characterisation and optimisation of fuel cell system operation using experimental design methodology

Large numbers of experiments are often performed in order to analyse the performances of a fuel cell system or to identify the parameters of a physical fuel cell model.

The goal of the Ph.D. Thesis (Bouchra Wahdame) is to investigate the possibilities of the experimental design methodology with the aim characterising, analysing and improving fuel cell generators.

This method seems to be a very suitable means to evaluate the respective impacts of the physical control parameters on the fuel cell performances and thus to ensure for the fuel cell proper and optimal operating conditions.

Caractérisation et optimisation du fonctionnement des PAC par la méthode des plans d'expériences

Les piles à combustibles (PAC) ont des performances qui dépendent fortement des conditions de fonctionnement liées à l'environnement dans lequel elles se trouvent. Leur pilotage 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, pressions, débits, taux d'hydratation du combustible et du comburant... En outre, toutes ces grandeurs sont liées par des relations fortement non linéaires, souvent difficiles à modéliser, et très dépendantes des choix technologiques retenus pour les organes auxiliaires. L'identification des plages de variation des différents paramètres physiques permettant de caractériser puis d'optimiser le fonctionnement du stack et du système est généralement effectuée en recourant à un grand nombre d'essais expérimentaux, qui nécessitent à la fois du temps et des moyens financiers conséquents.

Une approche faisant intervenir la méthodologie des plans d'expériences permet de définir de manière rationnelle les essais visant à caractériser rapidement et efficacement la PAC ; elle permet de déterminer les paramètres les plus influents sur le comportement du générateur pile et de mettre en évidence les interactions éventuelles qui lient ces facteurs.

La mise en place d'une telle méthodologie permet aussi une comparaison plus aisée et plus objective de différents stacks. D'autre part, la caractérisation complète du générateur PAC peut permettre de prédire le comportement du système sur l'étendue de ses paramètres de fonctionnement et d'envisager ainsi, par la suite, des stratégies de pilotage du système visant à optimiser un critère déterminant de fonctionnement tel que le rendement, la consommation d'hydrogène, la puissance électrique maximale, voire la durée de vie du stack. Des modèles statistiques ont pu être élaborés dans ce sens. Ils permettent de choisir les niveaux des paramètres physiques de façon appropriée pour optimiser un critère donné (tension de pile maximale par exemple).

La méthode des plans d'expérience doit aussi constituer une aide pour juger du niveau utile de complexité à adopter pour le développement d'un modèle de pile ou de système pile en vue d'une application donnée.

Des plans d'expérience sont définis afin de caractériser une zone physique particulière dans une pile à combustible (telle que les plaques bipolaires) et pour obtenir des données permettant le calage de modèles physiques développés au sein du L2ES.

Différents plans d'expériences ont déjà été menés sur des piles PEM 100W, 500W et 5kW.

1 Exemple d'analyse de la variance réalisée pour détecter les paramètres physiques les plus influents sur la puissance maximale de la PAC, ici, le débit d'air. (ANOVA table showing the important contribution of air flow over the maximal fuel cell power).

Dates : 10/2003 – 10/2006

Participants : B.Wahdame, D.Candusso, J.M. Kauffmann

Financement : Ministère de la Recherche

1

Source	Sum Sq.	%	d. f.	Mean Sq.	fs	p-value
H2 pressure	247.5	0.52	1	247.5	0.48	0.538
Air pressure	52.5	0.11	1	52.5	0.1	0.770
H2 flow	2397.8	5	1	2397.8	4.64	0.120
Air flow	42997.8	91	1	42997.8	83.26	0.003

Auxiliaires et architecture d'un système pile à combustible

Le générateur pile à combustible est un système complexe car autour du cœur de pile qui assure la conversion électrochimique, il faut mettre en œuvre un nombre important d'auxiliaires. Ces auxiliaires doivent être en rapport avec les caractéristiques du cœur de pile.

Cette partie peut sembler plus appliquée mais elle nécessite d'une part une modélisation du composant (cf partie 5.1) mais également la mise au point de techniques de commande spécifiques en raison des non linéarités fortes de tous les dispositifs. Elles ne concernent pour le moment que les PEMFC.

Quatre éléments ont attiré notre attention compte tenu de notre expérience acquise durant les essais : le compresseur d'air, l'humidification, le refroidissement et l'électronique de puissance. Nous n'avons pas encore réellement mis en œuvre le contrôle global du générateur et nous alimentons pour le moment avec de l'hydrogène sous pression. Dans un prochain temps, dans le cadre de trois contrats (COREPAC, APURROUTE et FELICITAS) nous serons amenés à mettre en œuvre des reformateurs fonctionnant respectivement au gaz naturel, à l'essence et au méthane.

Le premier élément auquel nous nous sommes intéressés est le **compresseur d'air**. Le niveau de pression améliore le fonctionnement et le rendement de la pile. A titre d'exemple, les piles à combustible fonctionnent avec des pressions très différentes, depuis la pression atmosphérique jusqu'à quelques bars. La nature du compresseur d'air va être fondamentalement différente, depuis un simple soufflage à un compresseur à vis, à palette ou à turbocompression mais dans tous les cas il doit être exempt d'huile.

L'augmentation de la pression a une incidence directe sur la consommation du compresseur qui croît dans des proportions importantes. On estime à l'heure actuelle que 20% de la puissance délivrée par le cœur de pile est utilisée par le compresseur. Ceci se traduit également par une élévation de la température de l'air en entrée de pile. Ceci peut avoir une incidence bénéfique mais par une importante température extérieure, les conséquences peuvent être graves. Il faut préciser que les compresseurs adaptés aux piles à combustible sont rares et chers.

Trois approches sont considérées au laboratoire :

- adapter l'apport d'air aux stricts besoins de la pile
- améliorer la dynamique du compresseur et donc celle du générateur
- récupérer l'énergie encore disponible à la sortie de cathode

Les premiers points ont été traités dans la thèse de Mestan Tekin. Un contrôle judicieux permet des gains de l'ordre 10% sur la consommation d'un compresseur à palette et une commande optimisée par essaims particulaires a amélioré significativement le fonctionnement en présence de bouchon d'eau (lié à l'humidification).

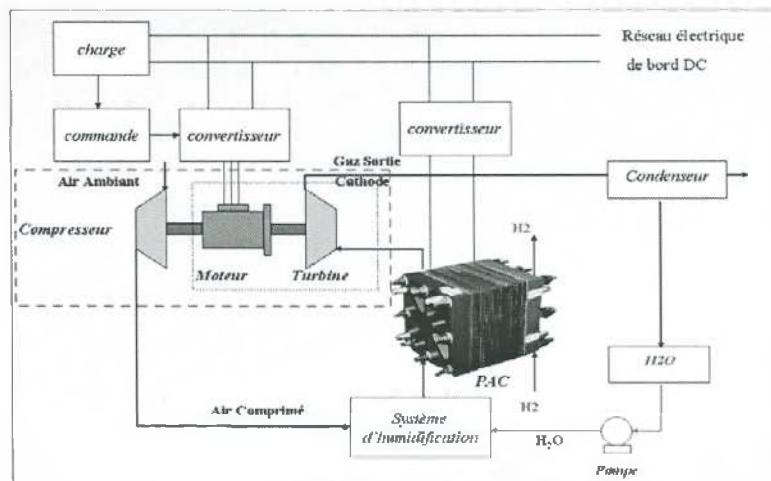
Récupérer l'énergie nous incite à envisager le couplage mécanique sur le même arbre d'un compresseur dynamique avec une turbine de récupération du comburant à la sortie. Le système ne fonctionne réellement qu'à vitesse très élevée. Ces dispositifs n'existent pas, à l'heure actuelle, avec les contraintes de pile à combustible, donc sans huile.

Ancillaries and architecture of a fuel cell system

Among all the ancillaries needed by a fuel cell generator, the L2ES has focused their research works on the compressor and its control. By using non linear techniques, it is possible to reduce significantly the power consumption and to increase the dynamic. Turbo compressor solution is put in study especially by the design of high speed permanent magnet motors.

The cluster concept is developed to increase reliability in the frame of a PhD thesis. The concept is also used in SPACT 80 project.

APUs have been designed and tested. They associate a fuel cell with ultracapacitors to obtain a constant voltage in a large range of current delivered.



Les compétences de l'équipe actionneurs électriques sont mises à profit pour concevoir des moteurs à aimants permanents rapides.

Un deuxième volet important concerne **l'architecture des générateurs**. La puissance dépend du nombre de cellules et de la surface active. L'augmentation de la puissance peut également être obtenue par association de plusieurs générateurs en série et/ou en parallèle. Cette solution présente de très gros atouts en particulier en fonctionnement dégradé. La solution d'un seul cœur de pile provoque une indisponibilité complète du générateur dans le cas de rupture d'une seule membrane alors que la disponibilité est largement augmentée par la mise en parallèle de plusieurs cœurs de pile ou générateurs. Des études ont montré que le TMBF passe de 1500 heures pour un seul stack à 68900 heures pour 4 stacks.

C'est cette philosophie qui a été retenue dans le cadre de la thèse de James Garnier. La même approche est retenue dans le cadre du projet SPACT 80. Elle permet également de réduire les coûts de production par effet de série même si pour le moment, l'effet de taille est encore réduit. Les problèmes tant de modélisation que d'optimisation sont au niveau couplage électrique mais également sur le plan de la fluidique. La validation des modèles et des études d'optimisation se fait sur le banc bipile.

L'influence de l'électronique de puissance est traitée pour le moment sur des APU (Auxiliary Power Unit). Elles associent une pile à combustible avec des supercondensateurs, éléments de stockage d'énergie électrique. Elles permettent une puissance élevée avec une source de puissance nettement plus faible. Deux structures ont été étudiées, la structure série où toute l'énergie délivrée par la pile à combustible est stockée dans des supercondensateurs avant d'être transférée vers la charge, et la structure parallèle apportant plus de souplesse mais plus difficile à réguler.

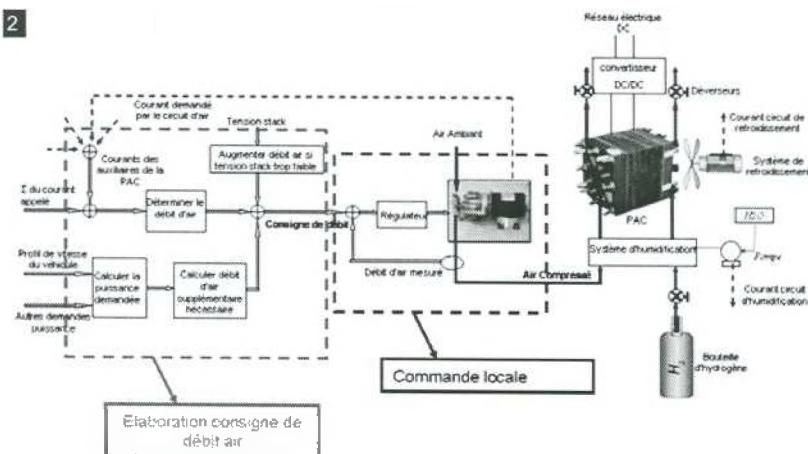
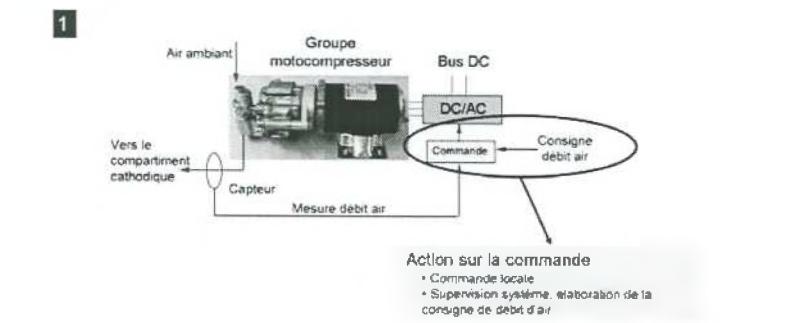
Le contrôle commande a été plus développé pour les bancs d'essai pour permettre un pilotage en temps réel par utilisation du Real Time Workshop de Labview.

Optimisation énergétique d'un groupe moto-compresseur d'air pour PAC PEFC embarquée – Action sur la commande

Parmi les différents auxiliaires nécessaires au fonctionnement d'une pile à combustible de type PEFC, le groupe moto-compresseur d'air constitue, sans nul doute, l'auxiliaire le plus gourmand en consommation énergétique intrinsèque au système. La réduction de la consommation énergétique liée à ce groupe moto-compresseur peut se faire au moyen de trois actions :

- action sur la motorisation électrique
- action sur la tête de compression
- action sur la commande

Dans le cadre de la deuxième partie de la thèse de doctorat de Mestan Tekin, une étude a été menée sur le choix d'une stratégie de commande (de type commande rapprochée ou de type supervision de la demande de débit d'air en fonction des demandes de puissance du véhicule). Suite à cette première étude, il apparaît qu'une stratégie non linéaire de commande rapprochée peut permettre de réduire significativement (de l'ordre de 10%) l'énergie consommée par le groupe moto-compresseur sur un cycle de fonctionnement de type indiciel. De plus, les outils de l'automatique avancée (notamment la logique floue) et de l'optimisation (notamment les essaims particulaires) peuvent apporter des solutions à la fois novatrices et performantes pour l'évaluation et l'optimisation de la consigne de débit d'air en fonction des différentes demandes de puissance du véhicule. De telles stratégies permettent, en outre, d'intégrer et de gérer, dès la phase de conception de la loi de commande, d'éventuels dysfonctionnements sur la pile à combustible.



Energy optimization of an embedded air motor-compressor group – Action on the control laws

When considering intrinsic energy consumption reduction of PEFC systems, acting on the design and the control of the air motor-compressor group is a key point. Indeed, it consumes itself up to 30% of the fuel cell's output electrical energy.

This work focuses on both the control strategy of the motor-compressor group and on the determination of the air flow set point versus power solicitations. Artificial intelligence based techniques (such as fuzzy logic) and evolutionary computing optimisation strategies (such as particular swarm optimisation) have been considered.

1 Groupe moto-compresseur à palettes – action sur la commande (rotary vane motor-compressor group – acting on the control law).

2 Système pile à combustible embarqué – commande locale du compresseur et supervision (embedded fuel cell system – local control of the compressor and supervision).

Dates : 10/2001 – 10/2004

Participants : M. Tekin, D. Hissel, M.C. Péra, J.M. Kauffmann

Partenaire industriel : -

Financement : Région de Franche-Comté

Compressor motorization

High speed motors are developed for motorization of compressors for fuel cell systems. In a first stage, a permanent magnet self controlled motor has been designed and built. Its rated speed in 10,000 rpm. In a second phase, the objectives are to reach 40,000 rpm and to design a real turbo compressor.

Motorisation de compresseur

La nécessité de fonctionner à grande vitesse a incité le L2ES à transposer les travaux effectués sur les moteurs lents d'entraînement direct pour des vitesses nettement plus élevées.

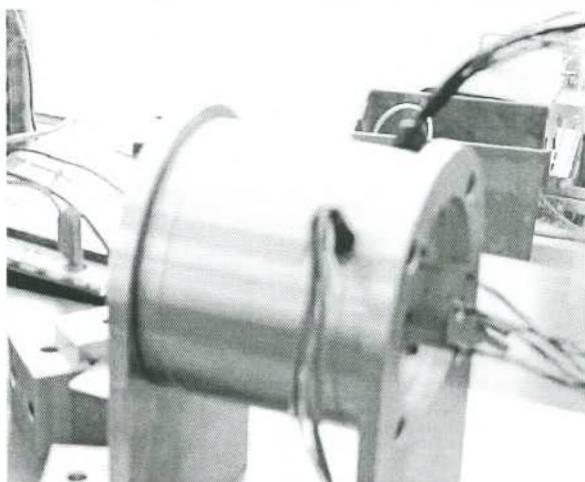
Dans une première phase, et ce dans le cadre de la thèse de Frédéric Dubas, un objectif de fonctionnement à 10 000 tr/min a été fixé. La structure retenue est celle d'un moteur à aimants permanents montés en surface au rotor (intérieur) autopiloté. Une étude particulière a permis de concevoir une machine à distribution de flux sinusoïdale à une paire de pôles au moyen d'aimants à aimantation parallèle.

La montée en vitesse suppose une montée en fréquence de l'alimentation et corrélativement une augmentation des pertes électromagnétiques. Les harmoniques de denture prennent d'autant plus d'importance au niveau des aimants qui sont soumis à un champ variable de fréquence élevée et qui développent de ce fait des courants induits en surface. Ceci peut poser des problèmes de tenue en température et de démagnétisation.

L'alimentation est du type sinusoïdal et un capteur spécifique monté en bout d'arbre fournissant une information de position en sinus et cosinus. Le dimensionnement mécanique et la construction du moteur ont été réalisés par Novelté Système avec qui le L2ES coopère depuis longtemps.

1 Moteur d'entraînement de compresseur – 10 000 tr/min (motor for compressor drive, rated speed 10,000 rpm).

1



Des développements plus récents, menés dans le cadre de la thèse de Benjamin Blunier visent à atteindre une vitesse de 40 000 tr/min. Les problèmes de pertes électromagnétiques, de pertes mécaniques et de tenue mécanique prennent encore plus d'importance.

Dates : 10/2002 – 10/2007

Participants : F.Dubas, B.Blinier, C.Espanet, Y.Amara, A.Miraoui

Partenaire industriel : -

Financement : Etat, Région de Franche-Comté

Dans le cadre d'une approche globale au sein du L2ES, voire plus large avec un constructeur, c'est l'ensemble du turbo compresseur qui sera étudié, conçu, alimenté et piloté pour répondre aux impératifs d'une alimentation en air d'une pile à combustible.

Optimisation de la commande de compresseurs d'air pour une association de piles à combustible

Dans le cadre des réflexions menées sur l'intégration d'un système pile à combustible dans un véhicule, il apparaît qu'une solution envisageable en vue de la mise en œuvre de systèmes embarqués robustes réside dans le fait d'associer plusieurs piles à combustible. Cette éventualité engendre des spécificités tant au niveau de la gestion des fluides gazeux qu'au niveau électrique. Ces particularités doivent être étudiées pour définir les composants et stratégies de commandes adaptées en vue de l'optimisation globale du système. Un des axes de travail spécifique de l'optimisation de ce système réside dans l'alimentation en comburant des piles à combustible. Cette alimentation est réalisée au moyen de compresseurs d'air dont la consommation énergétique est très importante. Il est alors indispensable de maîtriser au mieux les composants et la commande de ce sous ensemble afin de garantir les performances et le rendement du groupe électrogène global.

L'étude de l'optimisation du sous-système d'alimentation en air est appliquée au banc d'essais "bipiles" développé au laboratoire. Ce banc est composé de deux modules piles à combustible associés, d'environ 800W chacun, fournissant de la puissance électrique à un bus continu 42V.

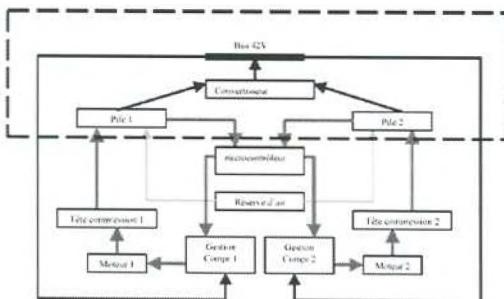
Dans le cadre du mémoire d'ingénieur CNAM de Cyril Monthy Andaval, une motorisation optimisée spécifique pour les motocompresseurs du banc "bipile" a été définie avec des moteurs DC Brushless 42V. Un système de pilotage des motocompresseurs assurant le contrôle optimisé de la pression d'air en entrée des piles à partir de la sollicitation en courant du système a également été mis en œuvre à partir d'un microcontrôleur Siemens C167CR.

Optimized control for air compressors in a multi-PEFC stack system

The aim of this work is to define components and controlled strategies for an optimized inboard PEFC air supplying system. The experimental validation of this study has been done on a multi-PEFC test bench developed in the laboratory.

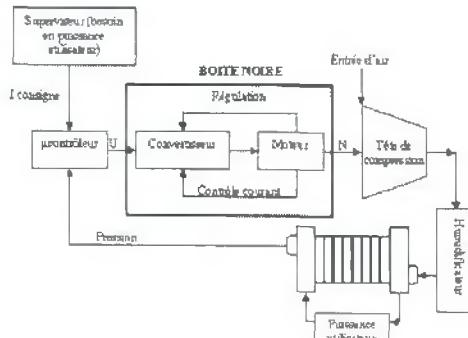
The results of this work have allowed the choice of DC brushless motors to drive the air compressors and the setting up of control laws implemented on a Siemens C167CR microcontroller.

1



1 Représentation schématique du principe de banc "bipile".
(Test bench principle).

2



2 Représentation détaillée d'un système d'alimentation en air sur banc "bipiles". (detailed architecture of an air supply system on the multi-PEFC test bench).

Dates : 04/2004 – 02/2005

Participants : C. Monthy Andaval, F. Harel, P. Hiebel

Partenaire industriel : -

Financement : L2ES

Realization of a PEFC automatic air climate control unit

The aim of this work is to realize and to characterize an automatic air climate control unit for embedded applications. Thus, the knowledge of the thermal characteristics of the air operating system permits to shunt the hygrometer and the thermocouple captors and to control the hygrometry and the temperature at the input of the fuel cell.

1 Schéma du système d'humidification (Air conditioning system)

2 Vue du système d'humidification et de l'hygromètre à miroir (View on the humidifier and on the mirror hygrometer)

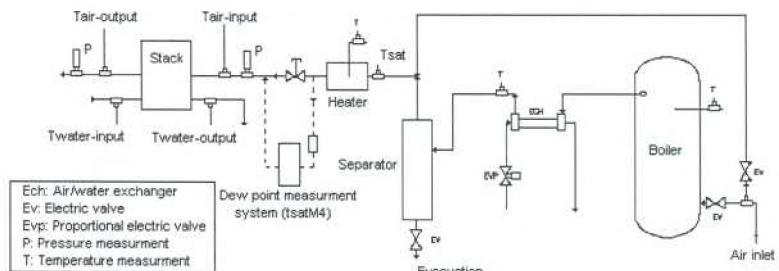
Réalisation et caractérisation d'un système automatique d'humidification d'air. Application à une pile à électrolyte

L'efficacité d'un système pile à combustible dépend pour partie de l'hygrométrie de ses fluides d'alimentation, tant du côté combustible (H_2) que comburant (air). Le travail présenté a été réalisé dans le cadre d'un mémoire CNAM par Stéphane Moratin sur une durée de 9 mois. Ce travail consistait à dimensionner et à construire un système automatique d'humidification à pression atmosphérique sur le circuit d'air.

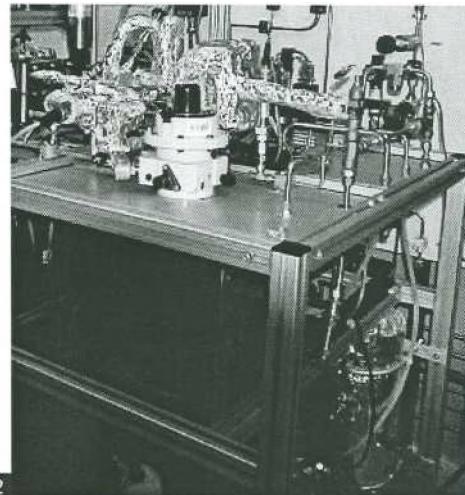
Le système est composé d'un bouilleur de 1000 W (2 résistances), d'un réchauffeur, d'un séparateur et d'un hygromètre à miroir en entrée de pile. L'hygromètre particulièrement inertiel comparativement à la dynamique du système ne sert qu'à caler initialement le système afin de vérifier l'hygrométrie en entrée de pile. L'ensemble du système a été dimensionné afin de corrélérer les puissances électriques au bouilleur et au réchauffeur en fonction de l'hygrométrie demandée en entrée de pile et du débit massique d'air dans le système pile.

La parfaite connaissance de l'énergie consommée par le système ainsi que l'estimation de l'inertie de sa réponse permet d'évoluer sans une métrologie contraignante et coûteuse pour les systèmes embarqués.

Le système surdimensionné n'avait que pour objectif initial de montrer la fiabilité et la faisabilité de notre approche et rentre à l'heure actuelle dans une seconde phase d'optimisation qui sera intéressante pour les systèmes embarqués.



1



2

Dates : 09/2002 – 04/2003

Participants : S.Moratin, R.Glises, D.Hissel.

Partenaire industriel :

Financement : L2ES

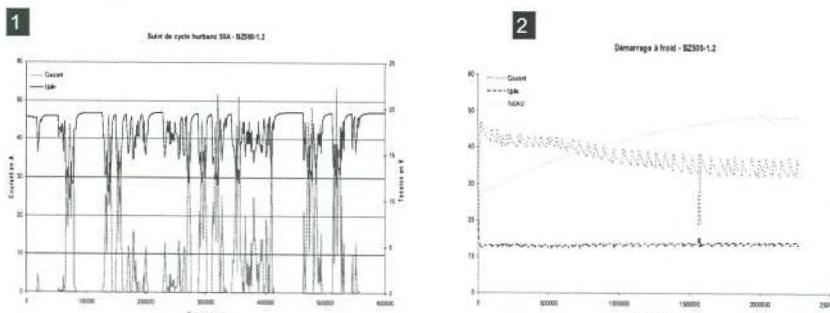
Etude d'une association convertisseur DC/DC - pile à combustible dans le cadre de sollicitations de type transport

La pile à combustible, dans ses applications (embarquées ou non), se voit forcément associée à un étage de conversion d'énergie faisant intervenir des composants d'électronique de puissance. Ce convertisseur a pour rôle d'adapter les grandeurs électriques de la pile aux demandes variables du consommateur d'énergie. De nombreuses architectures de convertisseurs de puissance sont envisageables en fonction des besoins particuliers des applications. Dans le cadre d'un travail de mémoire CNAM réalisé par Damien Chaduiron au L2ES, nous nous sommes placés dans le cas de figure d'un convertisseur élévateur de tension fournissant un bus continu à 700V, à partir d'une pile à combustible de tension nominale 115V et de puissance 20kW. Sur la base de cette architecture, nous nous sommes plus particulièrement intéressés à l'étude du comportement du convertisseur et de la pile sous des contraintes de type transport.

La première partie du travail a consisté à simuler le comportement d'un étage de convertisseur DC/DC à partir d'un modèle classique de hacheur élévateur développé sous Matlab Simulink. Les paramètres de régulation de ce hacheur ont été adaptés de manière à ce que le convertisseur fournit un bus continu régulé à 700V sous une sollicitation en courant représentative d'un profil de transport urbain pour un véhicule léger (AX Electrique – cycle HURBANC – INRETS). La pile est alors simulée par l'intermédiaire d'une simple courbe de polarisation.

La deuxième partie du travail a eu pour objet de développer autour des bancs d'essais piles à combustible du L2ES des programmes informatiques implantés dans un système d'exploitation temps réel (Labview Real Time) de manière à étudier le comportement expérimental de piles à combustible sous contraintes de type transport. Un premier programme a ainsi été réalisé permettant de solliciter une pile à combustible sur un profil de type transport (exemple du HURBANC). Un deuxième programme a été développé permettant la montée en puissance la plus dynamique possible d'une pile à combustible, quel que soit son point de fonctionnement initial (cas du démarrage à froid par exemple). Ces deux programmes ont été testés sur le banc 1kW du L2ES avec une pile ZSW de 500W.

Les résultats de ces travaux théoriques et expérimentaux nous permettent de progresser aujourd'hui dans l'appréhension de lois de contrôle de systèmes pile à combustible.



Study of a DC/DC converter - PEFC combination system under transportation constraints

This work is dedicated to study the behaviour of an 115V nominal voltage PEFC linked to a 700V boost chopper under transportation current solicitations. The aim is to improve the setting up of control laws for fuel cell systems. In the first part of this study, a simple model of the architecture is proposed, then, in a second part, control laws are developed with real time software and tested on a 500W PEFC.

1 Résultats expérimentaux - suivi de profil Hurbanc sur PEFC 500W (500W PEFC experimental results - Hurbanc driving cycle type current solicitation).

2 Résultats expérimentaux – démarrage à froid automatique sur PEFC 500W (500W PEFC experimental results – automatic cold start).

Dates : 04/2004 – 12/2004

Participants : D.Chaduiron, F. Harel, F. Gustin

Partenaire industriel : -

Financement :

PEFC generator architecture

In order to increase the power delivered by FC generator, the series and parallel association are binding solution. As a matter of fact, long and large stacks aren't tractable at power levels required for propulsion applications. A converter structure has been designed for this purpose. The experimental validation is in progress in the parallel case.

1 Association de deux stacks (V_1 , V_2) et du convertisseur de sortie pour la mise en parallèle.
(Association of two stacks and the converter for parallel operation).

Dates : 10/2002 – 10/2005

Participants : J. Garnier, M.C. Péra, D. Hissel, J.M. Kauffmann.

Partenaire laboratoire :
LTN (INRETS) A. De Bernardinis, G. Coquery

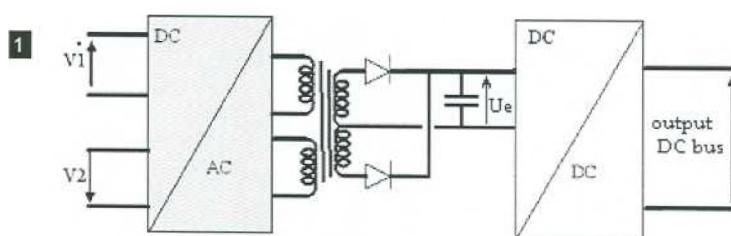
Financement :
INRETS/Région Franche Conté

Architecture de générateur PEFC

Même dans les meilleures conditions de fonctionnement, la tension disponible aux bornes d'une cellule de pile hydrogène/air est de l'ordre du volt, et la tension aux bornes du convertisseur électrochimique ne peut être augmentée de manière significative qu'en empilant les cellules (d'où l'utilisation couramment admise de l'anglicisme « stack »). Avec des chargements en platine usuels (de $0,01\text{g/cm}^2$ à 1mg/cm^2), les densités de courant nominales des PEFC sont de l'ordre de $0,5\text{A/cm}^2$ de membrane. Ainsi, la puissance que peut délivrer un stack est étroitement liée à deux paramètres géométriques : le nombre de cellules empilées et mises en série électriquement, et la surface de membrane. Or, il est clair que ces deux solutions présentent rapidement des limites, particulièrement pour des applications de type transport. En effet, un stack, à la fois long et de grande surface, est peu logeable dans un véhicule. De plus, et surtout, il est d'une mise en œuvre délicate, du point de vue de l'homogénéité de l'alimentation en gaz et de la maîtrise des gradients thermiques. Enfin, la mise en défaut d'une seule des cellules entraîne la mise hors service de l'ensemble du générateur.

Ainsi, une solution plus satisfaisante pour atteindre des puissances compatibles avec la propulsion de véhicule consiste à définir un générateur élémentaire, dont la gestion est bien maîtrisée. La puissance disponible peut ainsi être adaptée aux besoins de l'application par une mise en série et/ou en parallèle, de plusieurs de ces générateurs. Cette solution présente également l'avantage d'augmenter la disponibilité du dispositif, dans la mesure où, si un des éléments est défaillant, il reste suffisamment de puissance pour ramener le véhicule.

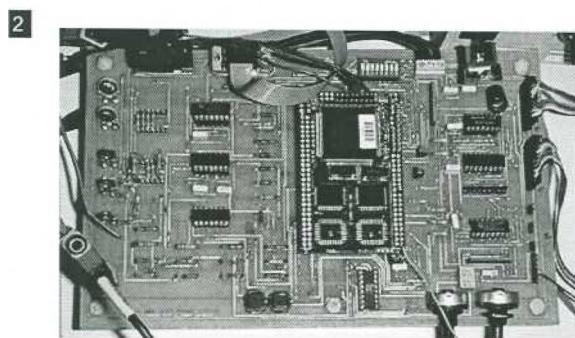
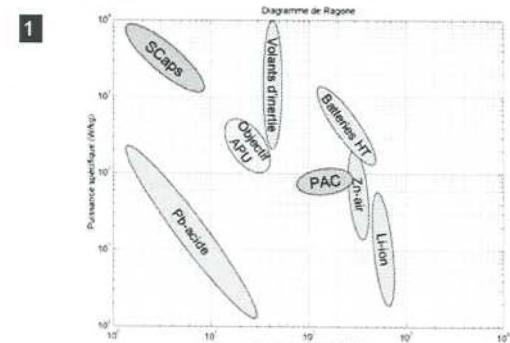
L'objectif du travail de thèse de James Garnier, co-encadrée avec le LTN (INRETS) est d'étudier le couplage électrique de générateurs. La modélisation électrochimique a permis de caractériser le fonctionnement d'un générateur élémentaire, en particulier pour les fréquences élevées. Une structure de convertisseur a été définie de manière à effectuer le couplage en série ou en parallèle de deux stacks, en respectant des contraintes de volume et de poids, et pouvant être étendue facilement à plus de deux stacks. Une topologie à deux étages a été retenue : un étage de conversion continu/alternatif, un transformateur haute fréquence planaire, puis un deuxième étage de conversion alternatif/continu. L'utilisation de cette technologie de transformateur permet d'améliorer notablement le poids et l'encombrement du convertisseur. L'association stacks en série et stacks en parallèle a été simulée pour différents types de commande du convertisseur. Du point de vue réalisation, le couplage parallèle a été privilégié et sera seul validé expérimentalement. Ce convertisseur est en cours de finalisation afin d'être testé sur le banc dédié bipôle.



Source auxiliaire de puissance associant pile à combustible et supercondensateurs

Les équipements de confort et de sécurité à bord d'un véhicule demandent une puissance électrique de plus en plus importante. L'alimentation actuelle associant un alternateur entraîné par le moteur thermique par l'intermédiaire d'une courroie et alimentant une batterie peut être rapidement dépassée. Elle peut être remplacée à moyen ou à court terme par une alimentation auxiliaire de puissance (APU) comportant une pile à combustible. Cette solution est susceptible d'apporter deux avantages : une réduction de la consommation et un volume plus réduit. Si l'on observe un diagramme de Ragone, parmi les différentes solutions technologiques possibles pour répondre au cahier des charges d'une telle APU embarquée (en général puissance moyenne appelée relativement faible et puissance crête pouvant aller jusqu'à un facteur 10 par rapport à cette puissance moyenne), une association pile à combustible (PAC) et supercondensateurs (SCaps) pourrait s'avérer particulièrement prometteuse. En effet, si la puissance spécifique des piles à combustible reste encore trop faible, leur énergie spécifique est déjà tout à fait satisfaisante. Ainsi, en diminuant quelque peu cette énergie spécifique par l'adjonction de supercondensateurs, tout en augmentant la puissance spécifique du système complet ainsi réalisé, l'objectif de cahier des charges devient accessible.

Dans le cadre des mémoires d'ingénieur CNAM de Laurent Bertoni et de Stéphane Bontour, deux solutions ont été successivement étudiées. La première, relativement simple, est basée sur une structure série et elle ne permet pas la récupération énergétique. L'objectif était de prouver la viabilité d'une telle association pour répondre à un cahier des charges très contraignant. La seconde solution étudiée est basée sur une structure parallèle permettant, de plus, la récupération énergétique. Dans les deux cas, le contrôle rapproché et la supervision des flux énergétiques au sein du système ont été assurés au moyen d'un microcontrôleur de type Siemens C167CR.



Fuel cell – ultracapacitors based APU

The aim of this work is to propose a new solution for the realisation of embedded Auxiliary Power Units (APU). Two different architectures, based on a PEFC stack and ultracapacitors, have been designed, simulated and validated experimentally.

1 Diagramme de Ragone (Ragone plot).

2 Système de contrôle et de supervision (control and supervision unit).

Dates : 01/2002 – 11/2004

Participants : L. Bertoni, S. Bontour, H. Gualous, D. Hissel

Partenaire industriel : -

Financement : ADEME, L2ES

Diagnosis and life time

Since the beginning of our fuel cell research activities, the specific problematic of life time and diagnosis of fuel cell stacks or fuel cell systems has been considered.

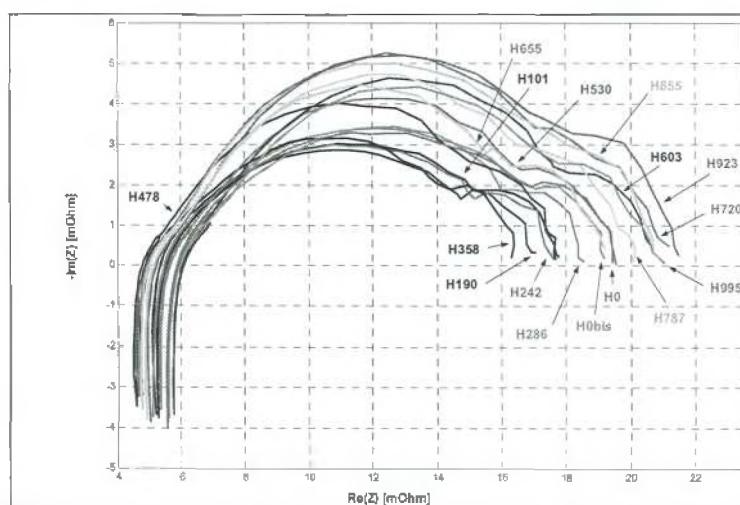
Considering life time of fuel cell stacks, static characterisation and impedance spectrometry are performed to evaluate stack performance deviations from nominal conditions. Long duration test programs (1000 hours) under temperature and load current transportation conditions are done on small power stacks.

Directly linked to the fuel cell system life time, diagnosis is another critical research area. The objectives are double: firstly, act on the system in case of fault so as to avoid a major damage; secondly, in case of damage, detect where the problem was located in the system so as to increase the experimental and knowledge feedback.

Diagnostic et durée de vie

Traiter le problème de vieillissement et de durée de vie a été envisagé dès le début des travaux de recherche sur la pile à combustible. En effet une proposition d'études a été déposée en 2001; elle était intitulée *Influence de l'environnement sur le comportement de générateurs à pile à combustible*. La Convention 01 Y 0044-02 a permis de démarrer ces travaux.

Le cœur de pile vieillit en fonction d'un certain nombres de phénomènes : nous en avons subordonné un certain nombre, cycle de fonctionnement, température, qualité des gaz, carburant et comburant et les équipements ont été acquis dans ce sens, station de mixage et chambre à atmosphère contrôlée. La difficulté est de définir le mode opératoire des essais et de déterminer un moyen de mesure qui permette d'apprécier l'évolution des caractéristiques. Deux solutions ont été retenues, la mesure de la caractéristique statique et la spectrométrie d'impédance.



Ces travaux qui nécessitent des durées extrêmement importantes d'essais et un renouvellement des MEA pour avoir des conditions initiales identiques se prolongent par une ACI CNRS en coopération avec le LSGC à Nancy à même d'analyser l'état des membranes et des couches de diffusion et de comparer les MEA ayant fonctionné pendant 1000 heures par rapport à des membranes neuves. La prolongation de ce thème est proposée dans le PPF proposé par Nancy.

Un deuxième volet particulièrement utile pour les applications transport est le comportement et le démarrage à basse température. Le caisson climatique et la chambre à atmosphère contrôlée ont été définis dans cette optique. L'objectif est de déterminer expérimentalement la dynamique compatible avec un démarrage à froid.

Enfin le diagnostic est corollaire pour ces travaux de telle manière que l'on puisse agir avant un défaut irrémédiable. Les seules mesures accessibles sont à nouveau les grandeurs utilisées pour la modélisation. La logique floue associée aux algorithmes génétiques a donné de premiers résultats qui doivent être confirmés. La modélisation d'état est une autre approche qui est actuellement considérée. Le diagnostic est indispensable pour augmenter la fiabilité du système pile mais il faut noter que les défauts ne sont pas uniquement liés au cœur de pile.

Durée de vie et fiabilité des systèmes pile à combustible pour les transports

Le L2ES étudie l'impact de l'environnement transport sur le comportement des générateurs pile à combustible (PAC). Des paramètres tels que le courant de charge, la température, la qualité de l'air ont sur la durée de vie des PAC une influence potentielle qu'il convient d'analyser et de quantifier.

Sur des profils de mission transport, le générateur PAC doit délivrer des courants possédant des dynamiques plus ou moins fortes, correspondant aux phases d'accélération et de freinage du véhicule. Les variations de débits de gaz réactifs engendrées peuvent provoquer des fatigues mécaniques au niveau du cœur de pile mais également sur les organes actifs de régulation et sur les auxiliaires. De plus, la pile est sollicitée par des courants pouvant posséder des dynamiques hautes fréquences liées au fonctionnement des convertisseurs électroniques embarqués. L'impact de ces courants sur la durée de vie des piles demeure mal connu.

Les PAC de type PEM sont également très sensibles à un certain nombre de polluants, en particulier au monoxyde de carbone contenu dans l'air. Cette sensibilité à la pollution doit être analysée. Une solution permettant de réduire les phénomènes d'empoisonnement par le monoxyde de carbone consiste à éléver la température de fonctionnement de la pile (120°C).

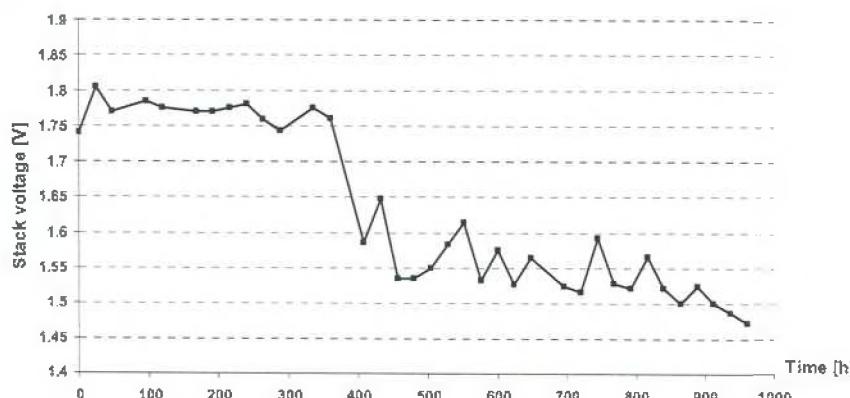
Néanmoins, ces températures plus élevées ne sont pas sans avoir des effets sur les performances du stack (résistance interne plus élevée). D'une manière plus générale, la sensibilité des générateurs PAC vis-à-vis des modifications des conditions extérieures de température (basses et hautes) est à étudier, en terme de durée de vie et de fiabilité.

A terme, des procédures et méthodes de vieillissement accéléré doivent être développées.

Deux essais de vieillissement ont été réalisés sur des piles trois cellules de puissance nominale 100W. Lors d'un premier test de référence, la pile a opéré à son point de fonctionnement nominal sur une durée de 1000h. Lors du second essai, la pile a été soumise à un cycle de courant dynamique issu d'un profil de mission transport pendant 800h environ. Des caractérisations ont été réalisées régulièrement, par relevés de courbes de polarisation et spectres d'impédance.

Plusieurs équipements spécifiques du L2ES sont ou vont être mis en œuvre dans le cadre de cette thématique (banc de test 1kW, impédancemètre, chambre à atmosphère contrôlée, station de mixage des gaz...).

1



Ageing, durability and reliability of fuel cell systems for transport application

The L2ES is involved in a research program dedicated to the study of PEMFC durability and reliability.

Three cell stacks are currently being tested on a 1kW test bench. The research program considers ageing of new stacks under various optimal and non-optimal operating conditions. Impacts of load current, temperature, air pollution are studied.

Stack characterisations are based on polarisation curves and impedance spectrometry measurements, carried out regularly throughout ageing process.

1 Evolution de la tension d'une pile PEM pendant 1000h aux conditions nominales de fonctionnement
(Three cell stack voltage versus time – fuel cell operated during 1000h at nominal conditions).

Dates : 02/2004 – 2005

Participants : D.Candusso, X.François, F.Harel, D. Hissel, M.C.Péra, J. M. Kauffmann

Financement : FRT -CPER

Low temperature behaviour

Many research labs are currently working on the behaviour of polymer electrolyte membranes under low temperatures and especially on the behaviour of the water contained inside this membrane.

Nevertheless, the water management in a fuel cell system cannot only be focused on the water management inside the membrane. Therefore, it's very important to define start-up and shut-down protocols for the whole fuel cell system (stack, gases conditioning circuits, cooling circuit) in case of operation in low temperature environment.

Comportement à basse température

De nombreux laboratoires travaillent sur le comportement à basse température des membranes. Il est admis que l'eau dans la membrane ne gèle qu'à très basse température mais la difficulté est de l'amener à la température de fonctionnement dans de bonnes conditions. Il a été montré également que le vieillissement est accéléré dans de telles conditions.

Un générateur pile à combustible ne se réduit cependant pas au cœur de pile et encore moins à la membrane. De l'eau est présente côté cathode dans les canaux de distribution et dans les tuyauteries sans oublier le système d'humidification et cette eau peut geler rapidement. Le circuit de refroidissement doit également subir un traitement spécial pour éviter la formation de cristaux et rester isolant.

De ce fait la problématique est double, définir un protocole d'arrêt du système qui permette d'évacuer la vapeur d'eau et l'eau qui s'est formé et définir une mise en route qui prenne en compte l'évolution de la température.

Il s'agit typiquement d'une supervision globale du système pile à combustible. Elle nécessite toute une série d'essais sur des coeurs de pile comprenant un nombre limité de cellules soit dans le caisson climatique soit dans le caisson à atmosphère contrôlée. C'est également un des objectifs du contrat *Influence de l'environnement sur le comportement de générateurs à pile à combustible*.

Des essais de comportement à basse température sont également prévus dans le cadre de GENEPAC.

Diagnostic d'une PEFC par logique floue

Dans le cadre d'applications transport, un élément clef à prendre en considération est la surveillance et le diagnostic de la pile à combustible et du dispositif de puissance associé pour identifier à temps toute anomalie de production d'énergie.

Un tel diagnostic en ligne permettrait d'identifier (voire de prévoir) tout dysfonctionnement. Ceci permettrait, dans le cas des défauts les moins dommageables pour le système PAC, un fonctionnement en mode dégradé, garant néanmoins d'une continuité de service. Ainsi, il serait envisageable de palier à ces défauts lors des phases d'immobilisation du véhicule (la nuit par exemple dans le cas de flottes captives). La qualité du service n'en serait donc pas altérée. Dans l'hypothèse d'un dysfonctionnement majeur, entraînant une immobilisation immédiate du véhicule, il est indispensable de pouvoir identifier, a posteriori, l'origine de la panne, de manière à permettre une réparation rapide et un retour d'expérience.

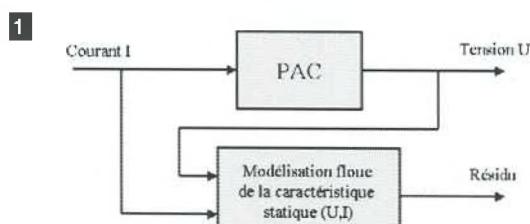
Deux sujets de DEA ont permis de proposer une méthode novatrice et performante de diagnostic d'une pile à combustible de type PEFC par logique floue. Cette méthode repose sur une identification préalable des caractéristiques nominales de cette pile à combustible. L'idée directrice reste, au-delà de cette identification, l'utilisation du plus petit nombre de capteurs possibles sur le dispositif. En effet, il est indispensable que l'outil de diagnostic proposé reste compatible, en terme de tarif, avec les exigences d'un véhicule de transport grand public.

La caractéristique statique nominale de la pile à combustible a ainsi été modélisée grâce à un formalisme flou dont les paramètres ont été réglés au moyen d'algorithmes génétiques. La méthode s'est avérée à même de diagnostiquer les deux dysfonctionnements envisagés à ce jour : une accumulation d'eau et d'azote dans le compartiment anodique de la pile à combustible et une baisse de la température de fonctionnement.

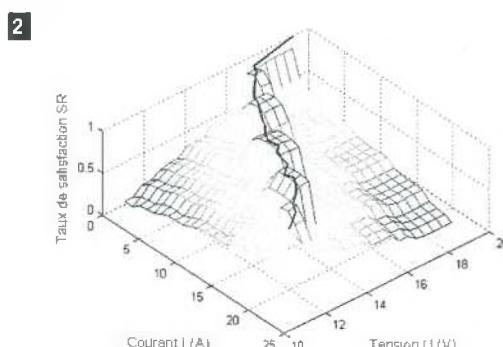
Fuzzy logic diagnosis of a PEFC

The goal of these two Master Degree Theses is to propose new diagnosis solutions of PEFC stacks using as few sensors as possible. Therefore, fuzzy logic modelling of the nominal behaviour of the stack has been considered. The parameters of this model have been tuned thanks to genetic algorithms.

The obtained experimental results underline the ability of the proposed system to diagnose two types of faults: water/nitrogen accumulation in anode compartment and operating temperature variation.



1 Représentation schématique du principe de diagnostic (Diagnosis principle).



2 Évaluation floue des résidus à partir de la caractéristique statique de la PAC
(Residue evaluation from the static characteristic of the PEFC stack)

Dates : 02/2001 – 09/2002

Participants : V. Hubert, J. Bécoulet, D. Hissel

Partenaire industriel : -

Financement : -

Frequency based diagnosis of a PEFC

In the field of PEFC stack diagnosis procedures, various methodologies have been considered in the L2ES laboratory. Thus, the Master Degree thesis of Karim Métali focused on frequency analysis of the FC output voltage in both nominal behaviour of the fuel cell stack and also faulty behaviour.

Diagnostic fréquentiel d'une PEFC

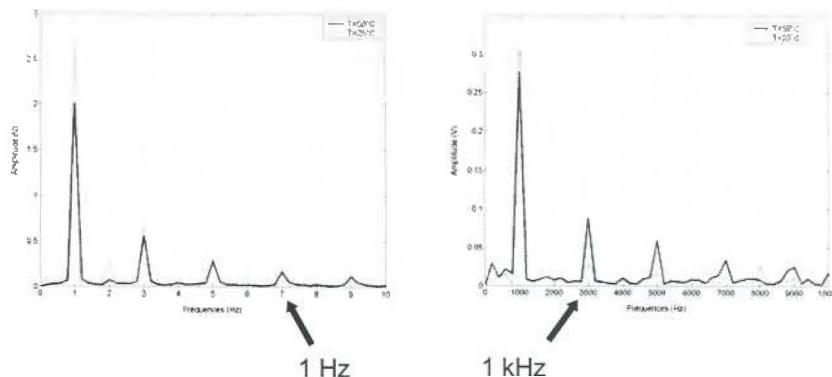
L'idée directrice de nos travaux sur le diagnostic d'un générateur pile à combustible dans son environnement réside, bien entendu, dans la mise au point d'un outil à la fois performant et fiable mais également ne nécessitant pas la mise en place de nombreux capteurs ou outils spécifiques supplémentaires de diagnostic.

Dans cette optique, nous nous sommes intéressés à une stratégie de diagnostic à base d'une analyse du contenu harmonique de la tension mesurée en sortie de pile à combustible, dans l'hypothèse d'une sollicitation crénelée en courant. Cette étude a fait l'objet du DEA de Karim Métali. Elle pourrait être directement applicable sur un système embarqué dans le cas de l'utilisation d'un onduleur de courant en sortie de la pile à combustible. Bien entendu, un calculateur permettant de faire une Transformée de Fourier en temps réel reste cependant nécessaire. La démarche de localisation de défauts a ici été volontairement limitée à deux types de dysfonctionnements très courants sur une pile à combustible de type PEFC et facilement réalisables expérimentalement (sans risque d'altération définitive du fonctionnement du stack) : une baisse de la température nominale de fonctionnement et une variation des conditions nominales d'approvisionnement en comburant.

Cette stratégie de localisation de défauts s'est malheureusement avérée peu pertinente pour notre utilisation, de par la grande puissance de calculs nécessaire pour permettre un fonctionnement en temps réel et de par la difficulté d'identification de la cause d'un dysfonctionnement avéré. Néanmoins, cette méthode n'est pas pour autant à rejeter en bloc, elle pourrait être associée en support à d'autres méthodologies pour affiner un diagnostic.

1

Défaut Température



1 Spectre fréquentiel de la tension de sortie de la PAC suivant la fréquence de la sollicitation en courant (sur défaut température)
(FFT of the FC output voltage in case of two different current frequency solicitations and in case of a temperature fault)

Dates : 03/2003 – 09/2003

Participants : K. Metali, D. Hissel

Partenaire industriel : -

Financement : -

Contrats de recherche

Les travaux de recherche sur le système pile à combustible ou plus simplement sur la pile à combustible nécessitent une approche particulière en raison du coût très élevé des coeurs de pile et des équipements auxiliaires. Dans tous les cas, pour les coeurs de pile, il s'agit presque toujours de prototypes et la technologie est loin d'avoir atteint la maturité. De plus, la durée de vie est très limitée d'une part à cause du vieillissement mais également de la très grande sensibilité des membranes aux défauts du système d'alimentation. A titre d'exemple l'écart de pression entre anode et cathode est typiquement de l'ordre de 200 mbars et le moindre écart lié à un dysfonctionnement de l'une ou de l'autre chaîne de régulation peut être fatal et nécessiter la remise en état de tout le stack. A titre d'information, le coût d'un cœur de pile est actuellement de l'ordre de 15 à 20 k€/kW.

Au coût d'achat d'un stack, il faut ajouter le coût des carburant et comburant et la maintenance de la plate-forme d'essais. On comprend dans ces conditions que les travaux doivent être supportés par des contrats.

Nous avons privilégié la solution qui nous permet d'améliorer nos compétences et nos connaissances sur le système pile à combustible. Nous ne souhaitons pas du tout que la plate-forme ne soit qu'un lieu de tests et essais et que nous ne participions pas à l'analyse et à l'exploitation des résultats. L'équipe Système pile à combustible doit pouvoir améliorer ses performances et transformer les problèmes posés en problématique scientifique.

Rechercher et gérer les contrats est très gourmand en temps et chaque fois que cela est possible, nous prévoyons l'embauche de personnel spécifique et ce d'autant plus que chaque manipulation nécessite une instrumentation spécifique et une modification de banc d'essais.

La plate-forme et le L2ES ont été fortement soutenues par le Réseau PACo. Après le premier contrat SPACT qui a permis réellement de nous former, ainsi que nos collègues de l'INRETS et du GREEN, nous avons bénéficié d'un contrat d'accompagnement du contrat de plan Etat-Région.

L'action du CNRT et de l'INRETS entre autres, alliée à une compétence croissante au niveau du L2ES et à un volontarisme fort nous a permis d'avoir de nouveaux contrats compatibles avec nos objectifs scientifiques. La tâche très lourde de préparation des dossiers a néanmoins monopolisé l'équipe. Trois contrats supplémentaires ont été labellisés par PACo.

Le L2ES s'est orienté rapidement vers les contrats européens. Il a pu participer à un réseau de tests de piles à combustible à basse ou haute température pour différentes applications (FCTESTNET) et il y a pris la responsabilité d'un certain nombre de tâches. Deux autres contrats européens sont acceptés et vont démarrer en 2005, CELINA (STREP) et FELICITAS (IP).

Research projects

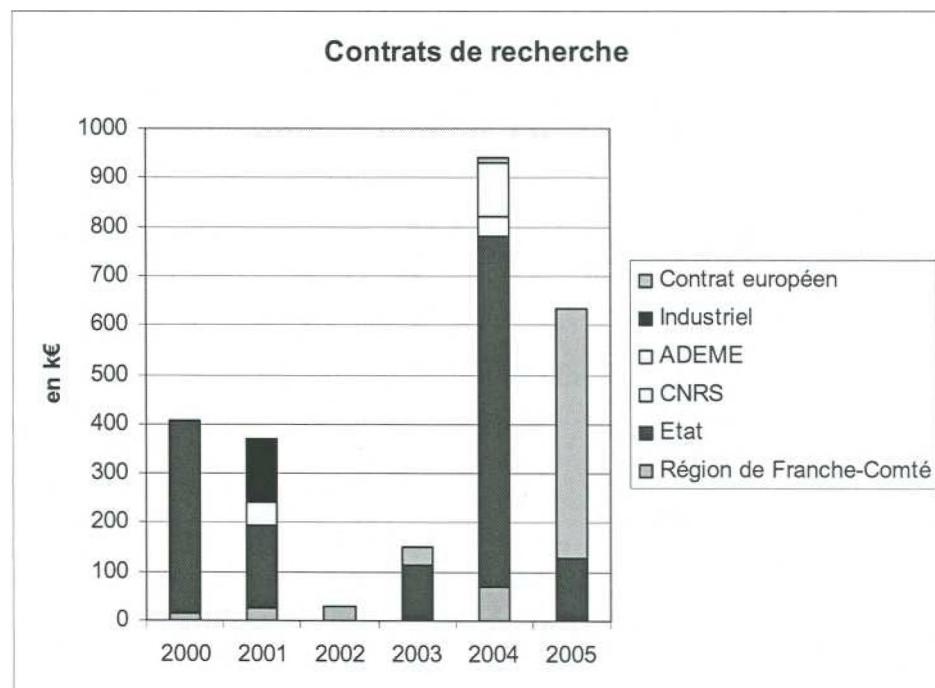
This part is devoted to the description of the research projects of the fuel cell system team.

These projects are funded by European FP5 or FP6 programs, the French National Network Réseau PACo, the French Ministry for Research, the French Ministry of Economy, Finance and Industry, the Franche-Comté County Council, the Franche-Comté Institute for Road Transport, the ADEME or the CNRS.

Due to the huge amount of money required for experimental tests on fuel cell stacks or systems, such a funding is vital for research projects in the field of fuel cell power generators.

Par ailleurs nous bénéficions du soutien du Conseil Régional de Franche-Comté pour les activités de recherche et de l'Institut des Transports Terrestres de Franche-Comté.

Le graphique ci-après traduit l'évolution des ressources contractuelles au cours des années. Le montant total est affecté à l'année de signature.



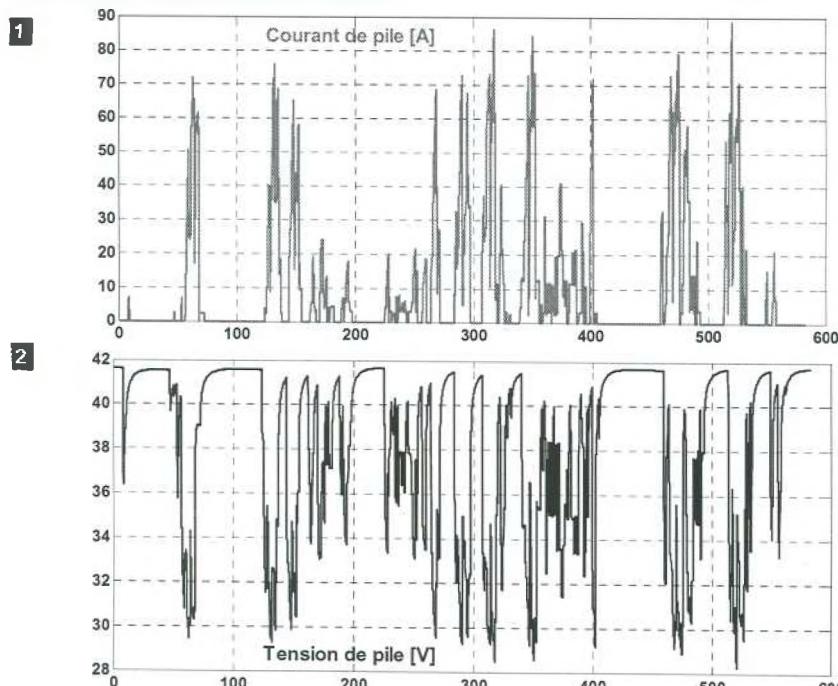
Projet SPACT

La proposition du projet *SPACT* a été enregistrée et labellisée par le réseau technologique PACo sous le numéro PF-99-46. Ce projet, qui a pris fin début 2004, a été réalisé dans le cadre d'une collaboration entre l'INRETS (LTN à Arcueil et LTE à Bron), les universités du pôle génie électrique Grand-Est, l'UTBM et l'UFC (L2ES à Belfort) ainsi que l'INPL et l'UHP (laboratoire GREEN à Nancy), le CEA, Armines et la DGA. Le comité de pilotage comprenait outre les partenaires du projet, les représentants de l'Etat, de la Région Franche-Comté et ceux du CNRT INEVA.

Le projet *SPACT* a porté sur la création d'outils de recherche destinés à la modélisation, à la simulation et à la validation expérimentale de systèmes pile à combustible pour les applications transports. Le projet a accompagné dans son déroulement la réalisation de la plateforme d'essais de Belfort, opérationnelle depuis fin 2002, et la création d'un pôle de compétence entre les laboratoires partenaires.

Le projet comportait essentiellement deux volets : le développement d'un outil de simulation d'une part et d'autre part la définition et l'acquisition d'un outil de validation expérimentale. Le logiciel s'est organisé autour d'une base de simulation d'un système pile à électrolyte polymère à canaux, fourni par le CEA. Des « briques » complémentaires ont été apportées par les partenaires pour affiner cet outil. La contribution du L2ES a concerné la simulation du groupe moto-compresseur et la modélisation thermique du stack.

L'acquisition d'un banc d'essai de 10kW et d'un stack de 5kW a été prise en charge par le L2ES. Replacée dans le contexte du début 2001, cette action s'est révélée ardue, car le développement du marché dans le domaine était balbutiant. Le choix s'est finalement porté sur la société Héliion pour la fourniture d'un banc d'essai et d'un stack (42 cellules), dans le cadre d'un marché négocié avec publicité (marché signé le 21/11/2001). Le banc a été livré et installé fin 2002 sur la plateforme pile à combustible de Belfort. Des essais nombreux et de différentes natures ont pu être réalisés dans le but de recueillir des données expérimentales fiables nous permettant de mieux comprendre le comportement de la pile étudiée. Des modifications, réalisées en concertation entre le L2ES, l'INRETS et Héliion, ont également été apportées au banc dans le but d'améliorer et d'optimiser ses fonctionnalités.



SPACT project

The SPACT project (Fuel Cell Systems for Transportation) has been accepted and funded par the French fuel cell network PACo. It aims the development of simulation software for fuel cell systems and also an experimental validation tool. The CEA (French National Atomic Research Centre), the INRETS (National Institute for Research on Transportation and Safety), the GREEN (Nancy Research Laboratory on Electronic and Electrotechnic) and the L2ES were involved in this project. The contribution of the laboratory has concerned the modeling of the compressor group and the stack thermal behavior. The Hélion 10kW test bench and the Hélion 5kW stack have been purchased in the frame work of that project.

1 Profil de courant $I(A)$ – temps (s) représentatif d'une mission de type transport appliquée au stack Hélion 5kW

(Transportation current sollicitation $I(A)$ – time (s) of the 5kW stack provided by Hélion company)

2 Réponse en tension (V) en fonction du temps (s) mesurée sur le stack.

(Experimental voltage response (V) of the stack versus time (s))

Dates : 01/2001 – 02/2004

Partenaires : INRETS, GREEN CEA, Armines, DGA

Responsable L2ES : J.M.Kauffmann

Participants : M. Tekin, L. Dumercy, D. Candusso, F. Harel, D. Hissel, M.C. Péra, R. Glises, J.M. Kauffman

Financement : Réseau PACo – MENRT

FCTESTNET thematic network

FCTESTNET is a thematic network under FP5, established to harmonise testing methods in the field of fuel cell technology. The overall objective is to define harmonised test procedures applicable to the component level (single cells, fuel cell stacks, balance-of-plant components), the sub-system level, and the entire fuel cell system level.

This concerns all the main fuel cell types (PEFC, DMFC, SOFC, MCFC) in all current main application areas (transport, stationary and mobile).

Réseau thématique FCTESTNET

FCTESTNET est un réseau thématique européen financé dans le cadre du FP5 de la Communauté Européenne. Il a pour objectif de recenser et d'harmoniser les méthodes de test existantes dans le domaine des piles à combustible. L'objectif final est la définition de procédures de test harmonisées applicables à différentes échelles de taille (de la monocellule au système pile à combustible dans son intégralité). Ceci passe également par la définitions de procédures de test spécifiques pour chacun des sous-systèmes mis en jeu dans un générateur pile à combustible.

Ce projet concerne les types de pile à combustible les plus courants (PEFC, DMFC, SOFC, MCFC) dans leurs diverses applications potentielles (transport, applications stationnaires, applications portables).

Dans le cadre de ce réseau thématique, le L2ES est impliqué dans deux workpackages (WP1 et WP4). WP1 est consacré aux applications transport (routier, ferroviaire, maritime, aérien). WP4 est consacré aux aspects système et auxiliaires de fonctionnement des différents types de piles à combustible.



1 Objet à tester tel que défini par FCTESTNET
(Testing object as defined by FCTESTNET)

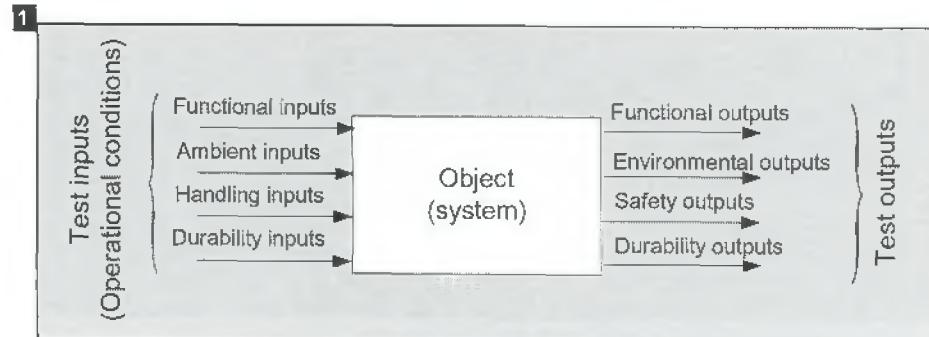
Dates : 01/2003 – 12/2005

Partenaires : JRC-IE, TNO, ZSW, Catella, FEV, CEA, ENEA, ECN, VDI, AVL, Airbus, Delphi, DLR, Germanischer Lloyd, INEGI, INTA, VITO, UTBM L2ES, Ecole des Mines, Nokia, Fiat, FZ Juelich, Fraunhofer ISE, ECHEM, Imperial College, CNRS LECA, Univ. Perugia, KTH, Ansaldo, CIEMAT, CRES

Responsables L2ES : D.Hissel, M.C.Péra

Participants : D. Hissel, M.C. Péra, J.M.Kauffmann, D.Candusso, S.Bégo

Financement : Europe FP5



Projet FELICITAS

FELICITAS est un projet intégré européen, accepté au sixième programme cadre européen et en cours de finalisation. Le Fraunhofer Institut est le porteur de projet. L'objectif est de développer des chaînes de traction à pile à combustible, alimentées en hydrogène et en hydrocarbures. L'application visée est le transport de marchandises routier, ferroviaire et maritime. Les efforts tendront plus spécifiquement vers :

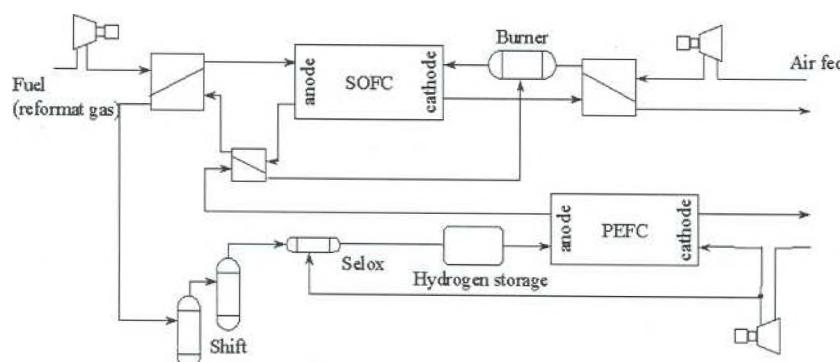
- un rendement élevé (au-delà de 60%),
- une densité de puissance élevée,
- des unités de puissance supérieure à 200kW,
- la durée de vie et la fiabilité.

Dans l'état actuel de développement, aucune des deux filières de pile reconnues pour leur potentiel dans les applications transports n'est capable d'atteindre de tels objectifs : les piles à électrolyte polymère possèdent des rendements trop faibles et sont sensibles au CO, les piles à oxyde solide n'offre pas une dynamique suffisante. FELICITAS se propose donc d'améliorer les performances de systèmes piles en associant plusieurs technologies, notamment la valorisation de l'énergie thermique et la récupération d'énergie.

La contribution du L2ES concerne le couplage d'une pile à oxyde solide et d'une pile à électrolyte polymère (tâche IV.3). La pile à électrolyte polymère est une technologie déjà éprouvée pour les applications transports, en particulier sa basse température de fonctionnement limite les temps de démarrage. Par contre, lorsqu'il s'agit de l'alimenter à partir d'hydrocarbures, le reformage est très pénalisant: c'est un dispositif encombrant, énergivore et difficile à mettre au point, en particulier l'élimination du monoxyde de carbone, poison violent et mortel pour les catalyseurs des électrodes. Au contraire, cette aspect est grandement simplifié dans le cas des piles à oxyde solide, qui sont capable, du fait de leur haute température de fonctionnement, d'oxyder le monoxyde de carbone, voire même de permettre le reformage interne. Elles offrent donc une grande souplesse du point de vue du choix du combustible, mais un démarrage à froid et une dynamique lents. L'objectif est donc d'utiliser le gaz d'échappement de l'anode de la SOFC pour alimenter la PEFC. Les gains de rendement espérés proviennent alors de la simplification et l'augmentation du rendement du système de purification du combustible et une gestion thermique optimisée. Le laboratoire participera à la définition du système, à sa modélisation et à la réalisation d'un prototype de faible puissance (inférieure à 1kW).

FELICITAS project

FELICITAS is an integrated project, accepted in the sixth framework programme. The Fraunhofer Institut is the project leader. The aim is the improvement of fuel cell systems for heavy-duty applications (road, rail, marine) by coupling different technologies. The L2ES is involved in the evaluation of the coupling of SOFC and PEFC, the PEFC being fed by the exhaust of the SOFC anode. The system will be modelled and a small scale prototype will be designed, made, and measured.



1 Architecture préliminaire du couplage SOFC/PEFC
(Preliminary flowchart of the SOFC/PEFC coupling)

Dates : 2005 – 2008

Partenaires : *FhG* (D), AVL (A), Ballard Power Systems (D), Université de Graz (D), FLW (D), Imperial College (UK), NTUA (G), Rolls Royce (UK), INRETS (F), TUE (NL), Université de Gênes (I), VUZ (CZ)

Responsable L2ES : M.C.Péra

Participants : M.C.Péra, M.Chnani, F.Harel, D.Candusso, J.M.Kauffmann

Financement : Programme européen (IP)

**Fuel cell application in a new configured aircraft
– European project
CELINA**

Fuel cell systems have the potential to be a highly efficient system for aircraft with a significantly reduction of fuel consumption, noise and gaseous emissions.

As a drop in possibility, the fuel cell application as emergency power supply will be investigated.

The technical focus of the project is therefore the investigation of the technical capabilities of an existing fuel cell system under special aircraft operation conditions.

The L2ES is in charge of the various experimental tests to be performed in order to reproduce in lab the aircraft transport conditions.

Etude de l'intégration d'une pile à combustible à bord d'un avion – Projet européen CELINA

Des systèmes pneumatiques et hydrauliques présents dans les avions vont être peu à peu remplacés par des organes électriques. Il va alors devenir nécessaire de trouver un générateur électrique performant, à haut rendement, capable d'alimenter ces derniers. Les piles à combustible (PAC) ont cette potentialité : elles peuvent aussi permettre d'envisager une réduction de la consommation de kérosène, une limitation du bruit et une diminution des émissions polluantes. La PAC pourrait être utilisée dans un premier temps en tant qu'alimentation de secours.

L'objectif du projet européen CELINA (type Strep), dont le coordinateur est Airbus, est d'évaluer les possibilités techniques offertes par une technologie de PAC PEM existante, soumise à des conditions de fonctionnement transport difficiles, spécifiques à l'aviation : profil de mission temps - courant, gestion thermique particulière (à basse température), environnement vibratoire, phénomène d'appauvrissement de l'air en oxygène dû à l'altitude.

Dans le cadre du projet, des modèles seront développés pour le générateur PAC, reformeur inclus. Le L2ES, en collaboration avec le Joint Research Centre Institute for Energy (JRC-IE), est en charge des tests qui seront à mener sur le stack (puissance prévue : 5kW). Les équipements spécifiques de la plateforme belfortaine (bancs, chambre climatique, table vibrante, station de mixage) seront utilisés pour reproduire en laboratoire les conditions de fonctionnement liées à un environnement type aviation. Un objectif important du programme est d'établir les besoins en terme de sécurité, de sûreté de fonctionnement liés à l'utilisation future de la PAC dans l'aviation.

1 Dans le domaine des transports, le marché des PAC pourrait être initié par les applications liées au domaine de l'aviation. (The European aircraft industry has the potential to act as market driver for fuel cell power systems).

Dates : 01/2004 – 01/2007

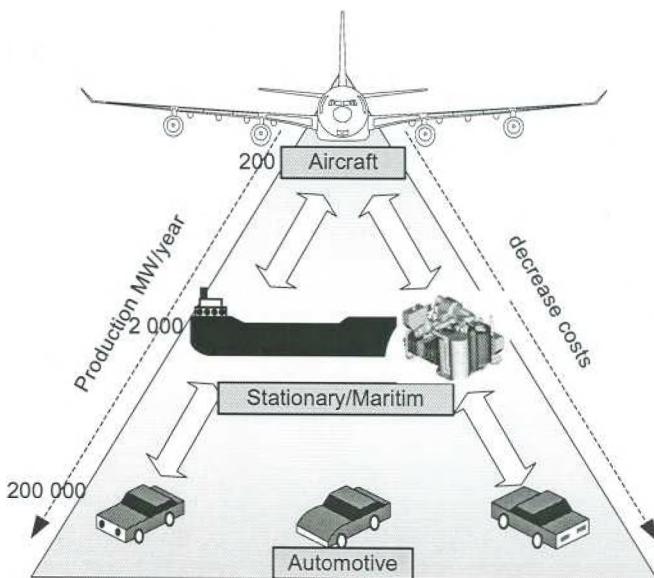
Partenaires : Airbus, Air Liquide, UTBM/L2ES, Dassault, Diehl Avionik Systeme, EADS, ECN, DLR, Germanische Lloyd, IRD, JRC-IE, JSI, KID, INPT, LLI, THALES, HUAS, IFS, UPAT

Responsables L2ES : M.C.Péra, D.Candusso

Participants : M.C.Péra, D.Candusso, D. Hissel, X.François, F. Harel, J.M. Kauffmann

Financement : UE (STREP)

1



Projet APURROUTE

La société Delphi travaille depuis plusieurs années sur un générateur auxiliaire de puissance, à la base duquel on trouve une pile à oxyde solide. L'objectif est d'être capable de faire face à la demande croissante de puissance à bord des véhicules et de d'améliorer le rendement de cette fourniture de puissance afin de réduire la consommation de carburant, la capacité de l'association moteur thermique/alternateur/batterie à satisfaire ces demandes n'étant pas certaine.

Le projet APURROUTE concerne l'analyse du fonctionnement de la dernière génération d'APU développée par Delphi et l'évaluation du potentiel d'un tel concept. Les tests porteront d'une part sur le stack seul (tests menés par le CEA, Grenoble), d'autre part sur le système complet. Le projet a été labellisé par le réseau PACo en décembre 2003 et est subventionné par le ministère délégué à la recherche. INEVA est le porteur de ce projet et est en charge de son animation.

Le L2ES interviendra au niveau du générateur complet. L'objectif de ces tests est d'évaluer les performances d'un tel système, en reproduisant les contraintes auxquelles il est soumis dans une application de type transport. Des essais de référence seront menés pour qualifier le système puis l'influence de plusieurs paramètres susceptibles d'influer sur le comportement du générateur sera étudiée :

- profil de courant représentatif de la dynamique transport,
- température ambiante et caractérisation du démarrage à froid,
- caractérisation de la tenue aux vibrations,
- incidence de la composition des carburants.

Les mesures électriques seront accompagnées de mesures sur les gaz d'échappement afin de calculer l'impact de cette solution sur la pollution atmosphérique.

APURROUTE project

The APURROUTE project has been accepted by the French fuel cell network PACo and funded by the French research ministry. It aims to analyze the potential ability of an APU based on an SOFC system and fed by gasoline, developed by Delphi, to fulfill the electrical power demand on vehicle board. The L2ES is involved in the complete system testing under transportation constraints: cold start, vibrations, current load dynamic, fuel composition. The exhaust gas will be also analyzed to measure the impact on air pollution.

Dates : 01/2005 – 01/2008

Partenaires : INEVA, Delphi, CEA, Renault, PSA, Total, LERMPS

Responsables L2ES : M.C.Péra, J.M.Kauffmann

Participants : S. Jemei, J.Mulot, M.C.Péra, F. Harel, J.M. Kauffman

Financement : PACo/MENRT

SPACT 80 Project

The SPACT 80 project is funded by the French research ministry. It aims to design, simulate and realize a hybrid 80kW multi-stack polymer electrolyte fuel cell generator. The thermal constraints and the life time of the whole system will be taken into account, from the design process.

The second part of this project will be devoted to test the proposed architecture on a real heavy-duty vehicle.

Projet SPACT 80

Le projet SPACT 80, projet fédérateur de générateur modulaire hybride à pile à combustible pour applications embarquées ferroviaires, pour applications routières de transport collectif et de transport de fret en ville et pour applications en tout chemin est basé sur l'association de modules élémentaires pour réaliser le générateur pile à combustible dans le but d'augmenter la puissance et d'améliorer la fiabilité. La mise en œuvre sera faite sur un loco-tracteur pour la SNCF puis sur le banc ECCE pour la DGA avec un objectif de puissance de 80kW.

Dans la première phase de ce projet, l'accent est mis sur l'expression du besoin et l'étude d'architecture pour un démonstrateur 80kW. Le projet intègre le caractère hybride voulu d'emblée pour permettre des surcouplages, la récupération de l'énergie et une meilleure gestion de la puissance délivrée par le générateur pile à combustible. L'architecture du générateur fera donc l'objet de simulations et d'optimisations globales pour les dispositifs retenus. Les aspects thermique et durée de vie sont également intégrés dès le début du projet de manière à augmenter la fiabilité et le rendement global du système.

Dans une deuxième phase du projet, des études spécifiques seront conduites sur les aspects durée de vie du générateur ainsi dimensionné et réalisé face à des contraintes de fonctionnement réelles ainsi que sur l'impact de l'environnement thermique (démarrage à froid, nombreux cyclages thermiques, ...) sur cette durée de vie.

Au niveau du L2ES, cette étude lui permettra de confirmer les travaux qu'il a commencé à mener sur l'architecture de systèmes piles à combustible par la mise en parallèle de modules élémentaires nécessitant une gestion originale des fluides et de l'énergie électrique pour utiliser au mieux les possibilités de chaque module et augmenter ainsi la fiabilité du générateur. Les travaux sur le vieillissement, la durée de vie et le diagnostic font partie intégrante de cette étude car un tel générateur ne peut être implanté sur des véhicules de transports en commun ou de fret que si la durée de vie est importante.

1 Banc d'essais mobile ECCE (ECCE mobile test bench)

Dates : 01/2005 – 01/2008

Partenaires : Helion, INRETS LTN, CEA LPAC, CNRS, UTBM L2ES, Air Liquide, SNCF, DGA

Responsables L2ES : D.Hissel, J.M. Kauffmann

Participants : D.Hissel, M.C.Péra, J.M.Kauffmann, D.Bouquain, R.Glises

Financement : PACo - Ministère de la Recherche

1



Projet VITAPAC

En dépit de l'importance des piles à combustible à membrane et d'une réelle demande du secteur industriel, le vieillissement du cœur de pile semble être relativement mal connu. Le projet VITAPAC, déposé et accepté, dans le cadre d'une Action Concertée Incitative (ACI) se propose d'étudier les causes de ce vieillissement. Le coordinateur de ce projet est François Lapicque, du LSGC de Nancy.

Différentes hypothèses peuvent être émises quand à l'origine des dégradations des performances de l'assemblage électrode-membrane-électrode (EME), partie vitale du cœur de pile, avec le temps : s'agit-il de désactivation du catalyseur, d'une dégradation des transferts et transports de gaz réactifs ou bien d'eau à travers la membrane ... ?

Le L2ES est chargé de mettre au point et d'appliquer le protocole expérimental de vieillissement. Deux technologies de PAC seront étudiées, avec des cellules de 100 cm². Des essais à courant constant de très longue durée et sur cycle de charge seront menés. Des caractérisations statiques (courbe de polarisation) et dynamiques (spectrométrie d'impédance) périodiques permettront d'évaluer l'évolution des performances des EME. Certains paramètres de fonctionnement, tels que la composition des gaz, la température et la stratégie d'humidification seront également pris en compte. Les EME vieillies seront ensuite analysées finement au LSGC pour identifier les modifications physiques, électrocatalytiques et électriques subies, à l'aide de techniques expérimentales complémentaires. L'exploitation des résultats sera ensuite menée conjointement.

VITAPAC project

The VITAPAC project aims to study ageing of MEAs and identify the failure causes (catalyst, diffusion layer, membrane, ...). Two types of MEA will be studied under different operating conditions (temperature, current load, fuel and oxidant composition, hydration management). Performance characterization will be carried out through periodic polarization curves and impedance spectroscopy. All these experiment will be developed and performed by the L2ES. The chemical analysis will be made by the LSGC (Chemical engineering laboratory) from Nancy.

Dates : 09/2004 – 09/2006

Partenaire : LSGC (Nancy)

Responsable L2ES : M.C.Péra

Participants : M.C.Péra, D.Candusso, F. Harel, J.M. Kauffmann

Financement : ACI - CNRS

GENEPAC Project

The GENEPAC project is coordinated by Peugeot – Citroën – Automobile in order to study the technical feasibility of a compact 60 kW embedded PEFC Electrical Generator. Defined with CEA, this research project will be targeted on the technological choices to reach very high FC stack power and weight densities.

The L2ES is partner in this project and carries out the validation tests of the stack under transport conditions. Within the framework of this project, a 20kW specific test bench was developed making it possible to test a PEFC stack at -18°C in a climatic room.

The test protocols of the stack under extreme environments are developed by the L2ES in close collaboration with the CEA and PCA in order to optimize the starting strategy.

Projet GENEPAC

Le projet GENEPAC coordonné par Peugeot – Citroën – Automobile (PCA) est un projet labellisé par le réseau PACo (PF-02-84) afin d'étudier la faisabilité Technique d'un Générateur Electrique à Pile à Combustible.

Dans ce projet, PCA, le CEA, le CNRT-INEVA, le L2ES et le CNRS, dans un souci d'intérêts communs, proposent d'associer leurs connaissances et compétences respectives avec les objectifs suivants : définir, réaliser et tester sur banc un générateur à pile à combustible basé sur la technologie de pile à combustible PEM d'une puissance nette de 60 kW, alimenté en hydrogène et pour une application automobile.

Ce projet de recherche sera ciblé sur les choix technologiques permettant d'atteindre une compacité de pile très importante et un rendement système (45% à puissance max, sur la base du PCI) au niveau des meilleurs au monde. Les quatre partenaires sont associés à des partenaires de second rang, notamment pour le cœur de pile et les plaques bipolaires. Ce projet pourra être une contribution majeure au développement de la filière française de la pile à combustible pour l'automobile.

Le L2ES est partenaire de ce projet et réalise les tests de validation de la pile sous conditions "transport". Dans le cadre de ce projet, un banc spécifique de 20kW a été développé permettant de tester un stack de validation placé à -18°C dans l'enceinte climatique disponible sur la plate-forme PAC de Belfort. Des verrous sont à lever notamment concernant le démarrage par température négative et sa durée. Le protocole de tests de la pile en ambiance extrêmes sera mis au point au L2ES en collaboration avec le CEA et PCA afin d'optimiser et d'adapter la stratégie de démarrage.

1 Enceinte climatique -45/+130°C, 2.3 m³, destinée aux tests de démarrage du stack par température négative (climatic room -45°C /+130°C for starting of stacks under negative temperature)

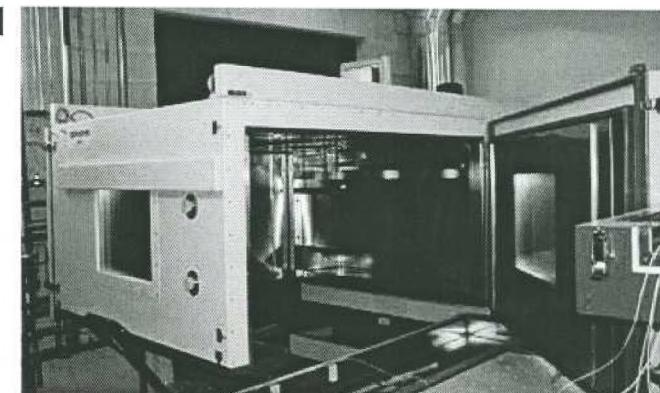
Dates : 04/2003 – 02/2005

Partenaires : PCA, CEA, CNRT-INEVA, CNRS

Responsable L2ES : X.François

Participants : J.M.Kauffmann, X.François, S.Bégot

Financement : MINEFI - Réseau PACo



COREPAC

L'objectif du projet est de réaliser un prototype de pile à combustible PEM fonctionnant au gaz naturel, intégrant un reformeur à membrane de purification, pour une application de cogénération en milieu résidentiel collectif. Ce choix technique devrait permettre de concevoir un système intrinsèquement simple présentant une durée de vie et des performances proches du cahier des charges du « marché ».

Il ne s'agit pas de développer complètement un tel système, mais de tirer parti des développements technologiques en cours sur les coeurs de pile et reformeurs, et de les intégrer dans un prototype afin d'éclairer la faisabilité et les perspectives de cette option technologique, méritant d'être explorée parallèlement aux techniques de reformage classiques. L'enjeu du projet est de maîtriser le couplage d'un stack PEM avec un reformeur gaz naturel à membrane intégrée, de développer les éléments d'intégration nécessaires pour réaliser un prototype et de valider expérimentalement ses performances en laboratoire.

Le L2ES est impliqué dans la phase de test du système, cœur de pile et reformeur gaz naturel avec des essais de longue durée sur un profil de charge correspondant à une application stationnaire résidentielle. Le projet permet au L2ES d'améliorer la compréhension des systèmes de cogénération à base de piles à combustible, leurs modélisations systémiques et les procédures de test en laboratoire associées. Il permet également de maîtriser le fonctionnement du reformeur et de comparer les performances tant statiques que dynamiques par rapport à une alimentation directe en hydrogène. Cette phase interviendra en 2006.

COREPAC Project

This project concerns a stationary application for a residential house. The system is fed by natural gas. The aim for the laboratory is to increase the knowledge of a cogeneration system with reformer

Dates : 01/2005 – 12/2007

Partenaires : ElfER, HELION, CNRS (LSGC)

Responsable L2ES : J.M.Kauffmann, P.Hiebel

Participants : X.François, P.Hiebel, J.M.Kauffmann, S. Bégot

Financement : ADEME - Réseau PACo, ElfER

Le L2ES travaille également avec **ElfER** sur une étude portant sur l'optimisation technico-économique du dimensionnement d'une installation de production autonome d'électricité pour sites isolés intégrant une pile à combustible, des batteries et une source d'énergie renouvelable. Le couplage peut associer des batteries, des générateurs photovoltaïques, une éolienne, ..

Dates : 11/2004 – 03/2005

Partenaire industriel : ElfER,

Responsable L2ES : P.Hiebel

Participants : S.Jemei, P.Hiebel

Partnership relations

1. INRETS

The L2ES has established privileged relations with two research laboratories of the French National Institute for Research on Transportation and Safety (LTN and LTE).

Many research projects have been developed together: SPACT, FCTESTNET, URBILEC, FELICITAS, APURROUTE, SPACT80. Moreover, three Ph. D. students have been co-trained by both INRETS and L2ES.

Relations partenariales

1. INRETS

Le L2ES a noué des rapports privilégiés avec deux laboratoires de l'INRETS, le Laboratoire des Technologies Nouvelles (LTN) dirigé par Gérard Coquery et le Laboratoire Transport et Environnement (LTE) dirigé par Jacques BEAUMONT. Dans ce dernier cas, les relations concernent l'équipe de François Badin. Le laboratoire, dès sa création, a travaillé avec le LTN et le LTE pour la définition des axes de recherche dans le domaine des systèmes pile à combustible et pour leur mise en œuvre. Une réunion régulière du Comité de suivi des activités pile à combustible permettait de faire le point sur les travaux de recherche, les contrats et les investissements. Sur un plan formel, le L2ES a été reconnu Laboratoire de Recherche en Emergence par l'INRETS (LRE T_31).

Cette coopération s'est traduite au niveau des contrats et des thèses mais également par l'implantation au sein du laboratoire d'abord d'un Ingénieur d'Etudes en novembre 2001 puis d'un chargé de recherche en avril 2003.

Le premier contrat, **SPACT**, labellisé par PACo et financé par le MENRT a réellement permis de faire démarrer les activités Pile sur Belfort. Il était piloté par l'INRETS et les autres partenaires étaient le CEA, le GREEN (Nancy), la DGA, ARMINES et le L2ES. Il a permis l'acquisition du banc d'essai et de la pile 5kW.

Les relations entre les laboratoires ont permis, sous l'instigation de l'un ou de l'autre, d'être partie prenante de contrats nationaux ou européens. Citons : FCTESTNET, URBILEC, FELICITAS, APURROUTE et **SPACT 80**.

Trois thèses ont démarré avec un encadrement conjoint INRETS et L2ES.

- Fabrice Mathieu sur allocation MENRT sur la modélisation d'un générateur pile. L'encadrement était assuré par Marie-Cécile Péra, François Badin et Jean Marie Kauffmann. Le candidat a démissionné au bout d'un an.
- Le même thème a été repris par la même équipe avec la thèse de Samer Hamandi. Le financement était apporté par l'INRETS. La dernière année de thèse a été catastrophique et de ce fait le travail n'a pas été soutenu.
- James GARNIER sur un cofinancement Conseil Régional de Franche-Comté et INRETS. Le thème d'études concerne l'architecture des générateurs pile à combustible et en particulier l'association série-parallèle. L'encadrement est assuré par Marie-Cécile Péra et Jean Marie Kauffmann pour le L2ES et Alexandre De Bernardinis et Gérard Coquery pour le LTN.

L'INRETS reste l'interlocuteur privilégié du L2ES

2. CNRT-INEVA

The French National Technological and Research Centre on "Fuel cell systems for transportation applications" (also called INEVA) is located in Belfort, Montbéliard and Nancy. 18 partners are involved in this CNRT, coming from industry, research organisations, universities and local councils.

2. CNRT – INEVA

Le CNRT *Pile à Combustible et Interface pour les Transports Terrestres* a été annoncé par Monsieur le Ministre de la Recherche en juillet 2000. La mise en place s'est faite sous forme d'une association loi 1901 dite de préfiguration et a pris le nom d'INEVA. Les 18 partenaires sont PSA, RENAULT, DELPHI, FAURECIA, GDF, GEEPE et AIR LIQUIDE pour les industriels, CEA, CNAM et INRETS pour les organismes de recherche, UHA, INPL, UHP, UTBM et UFC pour les universités du Grand Est, Conseil Général du Territoire de Belfort, Ville de Belfort et CAPM pour les collectivités locales.

Le CNRT est localisé sur Belfort, Montbéliard et Nancy.

INEVA a un rôle d'animation pour le développement des activités pile à combustible. La participation du L2ES au contrat **GENEPAC** est à mettre à son actif. Il a monté le dossier **APURROUTE** et en assure la coordination.

Des actions coopératives sont mises en chantier sur les compresseurs et le démarrage à froid.

3. CEA - Grenoble

Les relations avec le CEA datent également de 2000 avec d'une part la participation du CEA dans la construction et l'équipement de la plate-forme et d'autre part des relations scientifiques dans le cadre de contrats et de thèses.

Le CEA, dans le cadre d'une convention cadre avec l'UTBM, a mis à disposition Monsieur Gérard Rey pendant deux ans à mi-temps pour définir et suivre l'installation des équipements spécifiques liés à la plate-forme d'essais. La grande expérience et la connaissance des risques liés à l'hydrogène de Gérard Rey ont permis de rédiger les cahiers des charges pour les soumissions, de discuter valablement avec les entreprises et de suivre efficacement les montages et les mises en service.

Le CEA est un des partenaires de **SPACT** et dans ce cadre, Fabrice Mathieu a été accueilli pendant 2 mois au CEA à Grenoble dans l'équipe animée par Pierre Baurens et Pascal Schott.

La thèse avec convention Cifre de Jérôme Mulot est coencadrée par Jean Délépine du CEA. Elle porte sur le comportement des cellules et des stacks pour pile SOFC lorsqu'elles sont soumises à des excitations mécaniques.

Les travaux en commun se poursuivent également dans un certain nombre de contrats. Outre SPACT on peut citer : FCTESTNET, GENEPEC, **APURROUTE** et **SPACT 80**.

3. CEA - Grenoble

The relations with the CEA in Grenoble have been established in 2000. The CEA has been involved in the design and the building of the Belfort fuel cell test platform. Moreover, the CEA is partner of the L2ES in many projects: SPACT, FCTESTNET, GENEPEC, APURROUTE and SPACT80.

4. FEMTO-ST (CREST)

Le CREST créé également en 2000 était l'autre composante de l'IGE. Nous avons naturellement continué à travailler ensemble en particulier dans le domaine de la modélisation thermique. Ainsi Hasna Louahlia-Gualous a coencadré le travail de thèse de Laurent Dumercy. Elle est spécialisée dans le domaine du diphasique. L'encadrement de la thèse de M'Batna Jean Paul se fera dans les mêmes conditions de coopération.

4. FEMTO-ST (CREST)

The CREST laboratory performs research activities together with the L2ES in the area of thermal modelling of PEFC.

5. Nancy – GREEN – LSGC – LEMTA

Le GREEN est un partenaire privilégié du L2ES depuis de très nombreuses années tant sur le plan de la formation (DEA, DESS puis Master) que de la recherche. Nancy est également un des pôles du CNRT et les deux universités, INPL et UHP développent également un pôle de recherche sur les piles à combustible. Leur approche est différente car de par leur compétence, ils développent plus les études au niveau des cellules élémentaires et des membranes avec l'aide du CNRS tout au moins pour le LSGC et le LEMTA. Le GREEN est proche du L2ES dans ses préoccupations. Il intervient plus dans l'électronique de puissance. Le convertisseur est en effet très particulier puisqu'une pile à combustible se caractérise par une faible tension et un fort courant. Amel LACHICHI, est inscrite en thèse au L2ES et travaille au GREEN sous la responsabilité du Professeur Bernard DAVAT sur ce thème des

5. GREEN – LSGC – LEMTA (Nancy laboratories)

The GREEN laboratory has been a privileged partner of the L2ES for many years. It is working on fuel cell modelling, fuel cell output static converter design and control. This lab was also a partner of the SPACT project.

Partnerships with the LEMTA and the LSGC laboratories have been established in the

framework of a Master Degree Thesis and research projects (VITAPAC, COREPAC).

convertisseurs adaptés aux piles à combustible. Le GREEN était partie prenante du programme **SPACT** et en dehors de travaux de modélisation, a réalisé la commande de la charge active.

Un DEA sur l'humidification des gaz et de l'air en particulier a travaillé au LEMTA et au L2ES avec un double encadrement R. Benelmir et R. Glises.

Les relations avec le LSGC sont plus récentes mais se traduisent par deux contrats. Le premier est une ACI du CNRS, **VITAPAC**, sur l'analyse de la durée de vie de cellules pile à combustible. Il s'agit d'une suite du contrat d'études financés par le FRT dans le cadre du contrat de plan Etat-Région, le LSGC prenant en charge l'analyse physico-chimique des membranes. Le L2ES assure les essais de longue durée. Le deuxième est **COREPAC** piloté par ElfER. Il s'agit dans ce contrat d'une application stationnaire privilégiant la gestion thermique de l'énergie. Les essais se dérouleront sur la plate-forme à Belfort et l'analyse et l'interprétation des résultats seront faits par les deux laboratoires.

6. M3M-UTBM

The research team of Prof. W. Charon is in charge of the vibration tests on the fuel cell platform. Moreover, a co-trained Ph.D. is currently in progress.

6. M3M – UTBM

L'équipe du Professeur Willy CHARON du laboratoire M3M s'est beaucoup impliquée dans la définition, l'installation et la réception de la table vibrante. C'est d'ailleurs cette équipe, compétente dans le domaine des vibrations, qui prend en charge ce matériel sur la plate-forme.

Un premier travail en commun concerne le comportement vibratoire d'une APU SOFC, travail de Jérôme Mulot qui bénéficie d'une Cifre avec Delphi. La thèse est coencadrée par W. Charon, J. Délépine du CEA et J.M. Kauffmann.

7. GAT PACoGES

This thematic network has been established by the CNRS and is devoted to work on PEFC membranes, on high temperature stacks and on fuel cell systems.

7. GAT PACoGES

Le GAT PACoGES a été mis en place par le CNRS dans le cadre du programme Energie. Le GAT est animé par le Professeur Claude LAMY du LACCO à Poitiers. Les deux thèmes principaux concernent l'étude des membranes des piles PEFC et les piles à haute température. J.M.Kauffmann a été chargé d'animer un troisième axe, plus de prospective sur les systèmes pile à combustible. Ceci a permis de faire se rencontrer des communautés qui n'ont pas le même langage et qui n'ont pas la même approche spatiale ou temporelle. Ainsi nous avons pu sensibiliser les électrochimistes aux problèmes induits par les convertisseurs et le hachage créé par la MLI. J.M.Kauffmann a co-organisé une réunion à Paris en décembre 2002 associant industriels et universitaires et la réunion bilan à Toulouse en février 2004. Il a également participé aux réunions du programme Energie à Cargèse et à Perpignan. Le L2ES a été actif dans le cadre de ce troisième aspect du GAT PACoGES.

Le L2ES participe également au nouveau GAT mis en place : **PHILH2-PACo** sur le thème **Utilisation de l'hydrogène dans une PAC** et dont l'animateur est J.C. Grenier, ICMCB.

8. Electrical Engineering Laboratories

Regularly meetings are organised between the five French electrical engineering research laboratories working on fuel cells (LEG, LEEI, GREEN, L2EP and L2ES). Moreover, partnership has been established with the LEI laboratory from the EPFL in Switzerland.

8. Laboratoires de Génie Electrique

Les cinq laboratoires de Génie Electrique travaillant peu ou prou dans le domaine des piles à combustible à savoir LEG, LEEI, GREEN, L2EP et L2ES se rencontrent régulièrement et échangent leur expérience. Il y a également participation réciproque à des jurys de thèse. Depuis cette année universitaire des coencadrements d'étudiant de master 2 recherche sont programmés de Belfort vers le L2EP et du LEEI vers Belfort.

Il en de même avec le LEI de l'EPFL à Lausanne avec qui les relations sont encore plus étroites. Un projet de scooter avec pile à combustible et supercondensateurs a été déposé auprès du PREDIT et d'INTERREG III. Les autres partenaires de ce projet intitulé **URBILEC** sont Peugeot Motocycles, Air

Liquide, INRETS et Novelté System (ex Technicréa Recherche). Le dossier a été validé par le PRÉDIT Groupe 8 et est en examen au niveau d'INTERREG III. Il risque de ne pas pouvoir être mis en œuvre par suite d'un changement stratégique de Peugeot Motocycles.

9. Autres laboratoires

Le L2ES a également noué des relations avec le LEPMI et en particulier avec J.M. DIARD dans le domaine de la spectrométrie d'impédance. James Garnier, doctorant au L2ES a passé une semaine au LEPMI pour se familiariser avec cette technique. Marie Cécile PERA a participé à un jury de thèse au LEPMI. Les travaux ont donné lieu à une communication en commun.

10. ITTFC et RT3

La Région de Franche-Comté a mis en place un pôle de compétences intitulé Institut des Transports Terrestres de Franche-Comté. Il regroupe les forces vives des laboratoires francs-comtois travaillant dans le domaine. Le L2ES se situe dans l'axe énergie dans les transports et en particulier le volet de la gestion de l'énergie produite par la pile à combustible dans des applications transports terrestres.

J.M.Kauffmann anime également le Groupe thématique GT1 du Réseau RT3 (Réseau Technologique des Transports Terrestres), consacré aux véhicules hybrides classiques et à pile à combustible.

11. Relations industrielles

Un contrat a été signé en octobre 2001 avec **PSA** pour la préparation d'une thèse sur la modélisation neuronale d'une pile à combustible en régime statique et en régime dynamique. Cette thèse préparée par Samir Jemei a été soutenue le 14 octobre 2004. PSA est également le leader du projet **GENEPAC** pour la conception et la construction d'un cœur de pile pour les applications transport. Les autres partenaires sont le CEA, et le CNRS (GDR Membrane)

Les premières relations avec **HELION** datent de l'achat du banc et du stack 5kW. Elles se sont réellement développées dans le cadre des deux contrats **COREPAC** et **SPACT 80** qui viennent d'être signés. Dans les deux cas HELION est le fabricant du cœur de pile. Le L2ES intervient dans des études de durée de vie et d'architecture.

ElfER est le laboratoire de recherche d'EdF installé à Karlsruhe en Allemagne. ElfER pilote le projet **COREPAC** pour des applications stationnaires. Il s'agit de pile avec reformeur fonctionnant au gaz naturel. Dans le cadre d'un contrat direct, le L2ES fait une étude économique de couplage de générateur pile à combustible avec d'autres sources, photovoltaïque ou éolienne pour des sites isolés.

Le L2ES a établi également des relations de confiance avec **ZSW** à ULM qui fabrique des coeurs de pile. Cela se traduit par des prêts de matériel, des transmissions d'information sur la constitution des cellules et de résultats d'essais dans le respect de la confidentialité.

9. Other research labs

Partnership on impedance spectrometry has been established with the LEPMI laboratory in Grenoble.

10. ITTFC and RT3

The L2ES lab is involved in these two French networks focused on Energy and Transport and also fuel cell powertrains.

11. Industrial partnerships

The major industrial partners are PSA (one Ph. D. thesis), the CEA, Helion, and ElfER and ZSW in Germany.

12. European framework partnerships

Thanks to the FCTESTNET, FELICITAS and CELINA European funded projects, the laboratory is in touch with a lots of fuel cell makers, research centres or end-users

12. Relations dans le cadre de contrats européens

Le L2ES a pu intégrer le réseau européen **FCTESTNET** qui regroupe 51 partenaires pour faire l'inventaire des méthodes et protocoles d'essais pour les piles et les systèmes suivant leurs natures et leurs applications. Le L2ES est leader dans deux workpackages. En effet, Daniel Hissel anime dans WP1 Transportation (sécurité, protocole des mesures entrées-sorties, test de générateurs pour les applications transport) et Marie-Cécile Péra intervient dans WP4 Balance of Plant (définition des paramètres et procédures des auxiliaires d'un générateur pile à combustible). Les différentes réunions de travail permettent de rencontrer de nombreux acteurs des systèmes pile à combustible. Il en sera de même pour les contrats qui vont débuter en 2005 **CELINA** et **FELICITAS** dans lesquels le L2ES va animer une tâche.

Daniel HISSEL participe à la Plate-forme Hydrogène pour le volet Education.

Publications et thèses**Publications and theses**

Les publications citées ci-après ne concernent que les travaux sur le système pile à combustible. Elles sont classées suivant les critères classiques et triées par année.

1. Articles dans des revues avec comité de lecture (P)**Revues internationales****International Journals**

- 2002 P1 **M.C.Péra, D.Hissel, J.M.Kauffmann**
 Fuel cell systems for electrical vehicles : an overview
VTS News, Feb. 2002, pp 9-14
- P2 **M.C. Péra, D. Hissel, J.M. Kauffmann**
 Fuel Cell Systems : Modeling and Experimental Validation
Acta Electrotechnica, Volume 43, Number 1, pp. 3-12, 2002. ISSN 1224-2497
- 2003 P1 **S.Jemeï, D.Hissel, M.C.Péra, J.M.Kauffmann**
 On-board fuel cell power supply modeling thanks to neural network methodology
Journal of Power Sources, Vol.124, issue 2, pp 479-486, 2003.
- P2 **M.Tekin, F.Harel, D.Hissel, R.Glises, M.C.Péra, J.M.Kauffmann**
 PEM fuel cell ancillaries: design, modelling and energy optimization
Electromotion, Volume 10, Number , July-September 2003, pp 348-352
- 2004 P1 **D.Hissel, M.C.Péra, J.M.Kauffmann**
 Automotive fuel cell power generators diagnosis
Journal of Power Sources, Vol 128, pp 239-246, 2004.
- P2 **L.Dumercy, M.C.Péra, R.Glises, D.Hissel, S.Hamandi, F.Badin, J.M.Kauffmann**
 PEFC stack operating in anodic end mode
Fuel Cells: from fundamentals to systems, Volume 4, Issue 4, 2004. Pages 352-357

Revues nationales**National Journal**

- 2004 Pn1 **H.Gualous, F.Harel, D.Hissel, J.M.Kauffmann**
 Etude et réalisation d'une alimentation auxiliaire de puissance (APU) associant pile à combustible et supercondensateurs.
REE, n°8, septembre 2004, pp 90-100

2. Communications avec comité de lecture et actes (C)**Congrès internationaux****International Conferences**

- 2001 C1 **M.C.Péra, D.Hissel, X.François, J.M.Kauffmann**
 Modelling of a Proton Exchange Membrane Fuel Cell power generation device for transportation.
ELECTROMOTION 2001, Bologna, June 19-20 2001, pp 529-533
- C2 **D.Hissel, M.C.Péra, X.François, J.M.Kauffmann, P.Baurens**
 Contribution to the modelling of automotive systems powered by polymer electrolyte fuel cells.
EAEC'01, European Automobile Engineers Cooperation, Bratislava, pp A319-A326
- C3 **X.François, M.C.Péra, D.Hissel, J.M.Kauffmann**
 Design of a test bench for a low power PEMFC
EPEFC Forum, Lucerne, Switzerland, July 2001, pp 491-499

- 2002 C1 **D.Hissel, S.Jemei, M.C.Péra, J.M.Kauffmann**
 Fuzzy diagnosis model of fuel cell power generators for automotive applications
Electrimacs, 7th International Conference on Modeling and Simulation of Electrical Machines, Converters and Systems, Montréal, 18-22 août 2002, p: 7, ISBN 2-921145-31-6 - CD-ROM
- C2 **S.Hamandi, M.C.Péra, D.Hissel, J.M.Kauffmann, F.Badin**
 Fuel cell systems for electrical vehicles : solutions, modelling and test benches design
MAGLEV 2002 Conference, Lausanne, ISBN 2-9700361-0-1, CD-ROM
- C3 **L.Bertoni, H.Gualous, D.Hissel, D.Bouquain, M.C.Péra, J.M.Kauffmann**
 A new design for an auxiliary power unit (APU) by associating supercapacitors and a proton exchange membrane fuel cell
MAGLEV 2002 Conference, Lausanne, ISBN 2-9700361-0-1, CD-ROM
- C4 **L.Bertoni, H.Gualous, D.Bouquain, D.Hissel, M.C.Péra, J.M.Kauffmann**
 Hybrid auxiliary power unit (APU) for automotive applications
IEEE-VTC'02 Vehicular Technology Conference, 22-25 Oct 2002, Vancouver, ISBN 0-7803-7468-1 - CD-ROM, 6 pages
- C5 **F.Harel, S.Jemei, X.François, M.C.Péra, D.Hissel, J.M.Kauffmann**
 Experimental investigations on PEMFC : a test bench design
FDFC'02 France Deutschland Fuel Cell Conference, Forbach, pp65-72
- C6 **M.Tekin, L.Dumercy, D.Hissel, M.C.Péra, R.Glises, J.M.Kauffmann, P.Schott, A.de Bernardinis, G.Coquery, F.Badin, A.Lachichi, B.Davat**
 Fuel cell system for transportation application : modelling and experimental validation
FDFC'02 France Deutschland Fuel Cell Conference, Forbach, pp136-147
- C7 **S.Jemei, D.Hissel, M.C.Péra, J.M.Kauffmann**
 Blackbox modeling of proton exchange membrane generator
IECON'02 Industrial Electronics Conference, 5-8 nov.2002, Seville, ISBN 0-7803-7475-4
- 2003 C1 **A.Djerdir, K.El Kadri, D.Hissel, M.C.Péra, Y.Aït Amirat, D.Bouquain, H.Gualous, A.Berthon, J.M.Kauffmann**
 PEM fuel cell and supercapacitors sizing for the power supply of a heavy duty AECV
5th International AECV Conference, Angers, 2-5 june 2003 pp 11
- C2 **M.Tekin, D.Hissel, M.C.Péra, J.M.Kauffmann**
 PEM fuel cell air management: modelling and experimental results
EPEFC'03 European Electrolyte Fuel Cell Forum, july 2003, Lucerne (Switzerland), pp 839-848, ISBN 3-905592 13-4
- C3 **R.Glises, D.Hissel, F.Harel, M.C.Péra, B.Moratin**
 Conception, modelling and realization of a PEM fuel cell hygrometry and temperature management system
EPEFC'03 European Electrolyte Fuel Cell Forum, july 2003, Lucerne (Switzerland), pp 783-792, ISBN 3-905592 13-4
- C4 **S.Hamandi, L.Dumercy, M.C.Péra, R.Glises, D.Hissel, J.M.Kauffmann, F.Badin**
 Anodic dead-end mode in a PEMFC modelling and experimental validation
EPEFC'03 European Electrolyte Fuel Cell Forum, july 2003, Lucerne (Switzerland), pp 491-499, ISBN 3-905592 13-4
- C5 **F.Harel, D.Hissel, M.C.Péra, A.De Bernardinis, R.Lallemand, G.Coquery**
 First experimental results on a 5kW PEMFC testing bench linked in constraints of the transportation systems
EPEFC'03 European Electrolyte Fuel Cell Forum, july 2003, Lucerne (Switzerland), pp 507-516, ISBN 3-905592 13-4
- C6 **L.Dumercy, R.Glises, H.Louahlia-Gualous, J.M.Kauffmann**
 Transient thermal computation of a PEM fuel cell by a nodal modelling
IEEE-VTC'03 Fall, nov 2003, Orlando (USA), CDROM, ISBN 0-7803-7955-1
- C7 **J.Garnier, M-C.Péra, D.Hissel, F.Harel, D.Candusso, N.Glandut, J.P.Diard, A.De Bernardinis, J.M.Kauffmann, G.Coquery**
 Dynamic PEM Fuel Cell Modeling for automotive applications
IEEE-VTC'03 Fall, nov 2003, Orlando (USA), CDROM, ISBN 0-7803-7955-1

- C8 **M.Tekin, D.Hissel, M.C.Péra, J.M.Kauffmann**
 Energy optimization of a fuel cell generator: modelling and experimental results
EPE'03 European Power Electronics Conference, sept 2003, Toulouse, CDROM ISBN 90-75815-07-7
- 2004 C1 **J.Garnier, M.C.Péra, D.Hissel, A.De Bernardinis, J.M.Kauffmann, G.Coquery**
 Dynamic behavior of a Proton Exchange Membrane Fuel Cell under transportation cycle load.
IEEE-ISIE 2004, Ajaccio, May 4-7, 2004, pp 329-333, ISBN 0-7803-8305-2(CD-ROM)
- C2 **S.Jemei, D.Hissel, M.C.Péra, J.M.Kauffmann**
 Dynamical recurrent neural network towards modeling of on-board fuel cell power supply
IEEE-ISIE 2004, Ajaccio, May 4-7, 2004, pp 471-476, ISBN 0-7803-8305-2(CD-ROM)
- C3 **M.Tekin, D.Hissel, M.C.Péra, J.M.Kauffmann**
 Energy management strategy for embedded fuel cell system using fuzzy logic
IEEE-ISIE 2004, Ajaccio, May 4-7, 2004, pp 501-506, ISBN 0-7803-8305-2(CD-ROM)
- C4 **F.Dubas, C.Espanet, A.Miraoui**
 Analytical Modeling of No-Load Flux Density in Surface Mounted Permanent Magnet Motors
ACEMP 2004, May 26-28, 2004, Istamboul, Turquie, pp. 283-290
- C5 **F.Dubas, C.Espanet, A.Miraoui**
 Maximization of No-Load Flux Density in Surface Mounted Permanent Magnet Motors
IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation 2004, Seoul, Korea, June 6-8, 2004, pp. 202
- C6 **F.Dubas, C.Espanet, A.Miraoui**
 Maximization of No-Load Flux Density in Surface Mounted Permanent Magnet Motors
ICEM 2004, September 5-8 2004, Cracovia, Poland, pp. 430-436
- C7 **H.Gualous, F.Harel, D.Hissel, M.C.Péra, J.M.Kauffmann**
 APU for automotive applications : state of art and prototype realization
Alternative Energy Systems for Automobiles, CD ROM Poitiers France 2004
- C8 **M.Tekin, D.Hissel, M.C.Péra, J.M.Kauffmann**
 Energy optimization of an embedded fuel cell system using particle swarm
IEEE Vehicular and Power Propulsion Conference, October 6-8, 2004, Paris, France, CD-ROM – 8p
- C9 **D.Candusso, F.Harel, A.De Bernardinis, M.C.Péra, D.Hissel, P.Schott**
 Characterization tests of a 5 kW PEMFC for transportation applications
Advances in Fuel Cell Systems, Munich, Germany, 2004
- C10 **S.Jemei, D.Hissel, M.C.Péra, J.M.Kauffmann**
 Embedded fuel cell generator: efficient modeling through dynamical recurrent neural network
FDFC 04, vol. 2, pp. 371-376, ISBN 2914279-16-7, Belfort, décembre 2004.
- C11 **J.Garnier, A.De Bernardinis, M.C.Péra, D.Hissel, D.Candusso, J.M.Kauffmann, G.Coquery**
 Study of a PEFC power generator modular architecture based on a multi-stack association
FDFC 04, vol. 2, pp. 83-88, ISBN 2914279-16-7, Belfort, décembre 2004.
- C12 **M.Tekin, D.Hissel, M.C.Péra, J.M.Kauffmann**
 Particle swarm optimization method applied for energy optimization of an embedded PEM fuel cell generator
FDFC 04, vol. 2, pp. 133-138, ISBN 2914279-16-7, Belfort, décembre 2004.
- C13 **D.Candusso, F.Harel, X.François, A.De Bernardinis, M.C.Péra, D.Hissel**
 Experimental study of a 5kW PEM fuel cell for transportation applications
FDFC 04, vol. 2, pp. 355-360, ISBN 2914279-16-7, Belfort, décembre 2004.
- C14 **A.Hernandez, D.Hissel, R.Outbib**
 Nonlinear state space modelling of a PEMFC
FDFC 04, vol. 2, pp. 433-438, ISBN 2914279-16-7, Belfort, décembre 2004.

- C15 **B.Wahdame, D.Candusso, J.M.Kauffmann**
 Study of gas pressure and flow rate influences on a 500W PEM fuel cell
 thanks to the experimental design methodology
FDFC 04, vol. 2, pp. 389-394, ISBN 2914279-16-7, Belfort, décembre 2004.

National Conferences

Congrès nationaux

- 2002 Cn1 **S.Hamandi, M.Tekin, D.Hissel, M.C.Péra, J.M.Kauffmann**
 Pile à combustible : une solution pour un véhicule propre et économique ?
GEVIQ'02, Marseille, 12-13 juin 2002, pp 146-151
- Cn2 **J.M.Kauffmann, G.Rey, X.François**
 Plate-forme nationale d'essais de piles à combustible pour des applications transports
CVELEC'02, 25-26 juin 2002, pp 55-65,
- Cn3 **L.Bertoni, H.Gualous, D.Bouquain, D.Hissel, M.C.Péra, J.M.Kauffmann**
 Etude et réalisation d'une alimentation auxiliaire de puissance
EPF'02, Montpellier, 13-15 novembre 2002, pp 275-280
- 2003 Cn1 **S.Jemei**
 Modélisation neuronale d'un système pile à combustible dédié au transport
JCGE'03, 5-6 juin 2003 Saint Nazaire, pp 33-37
- Cn2 **S.Hamandi**
 Contribution à la modélisation d'une pile à combustible dédiée aux applications transport
JCGE'03, 5-6 juin 2003 Saint Nazaire, pp 309-314
- Cn3 **M.Tekin**
 Modélisation et validation expérimentale d'un groupe motocompresseur pour pile à combustible
JCGE'03, 5-6 juin 2003 Saint Nazaire, pp 315-320
- Cn4 **F.Dubas, C.Espanet, A.Miraoui**
 Modélisation Analytique et Maximisation de l'Induction Magnétique à vide d'un moteur à Aimants Montés en Surface
EF'03, Gif sur Yvette, 9 – 10 déc 2003, Ref : 9 pp.1-7

Invited Papers

3. Conférences invitées avec actes (I) :

- 2001 I1 **G.Coquery, F.Badin, J.M.Kauffmann, D.Hissel, M.C.Péra**
 Fuel cells for transportation applications : from well to wheel
Japan-France Workshop on Polymer Electrolyte Fuel Cells, Tokyo, September 17-19, 2001
- I2 **J.Bulabois, G.Coquery, F.Badin, J.M.Kauffmann, D.Hissel, M.C.Péra**
 Fuel cells for transportation applications : from stack to wheel
Korea-France Joint Seminar on Fuel Cell and Hydrogen Technology, Kier, September 20, 2001
- I3 **M.Péra, D.Hissel, J.M.Kauffmann**
 Fuel cell systems for electrical vehicle
Vehicular Technology Conférence 2001, Atlantic City, October 8-10, 6 pages
- I4 **D.Hissel, S.Jemei, V.Hubert, X.François, M.C.Péra, J.M.Kauffmann**
 A diagnosis-oriented model of a fuel cell power generator dedicated to automotive applications
4th International Symposium on Automotive Engineering, Gwangju (Korea), November 30, 2001, pp 49-54
- 2003 I1 **M.Tekin, F.Harel, D.Hissel, R.Glises, M.C.Péra, J.M.Kauffmann**
 Fuel Cell System : ancillaries modelling and testing
Japan - France Workshop on Electrolyte Fuel Cells, Paris, 24-25 avril 2003
- I2 **D. Hissel, F. Badin**
 Vision from the research institutes
ELEDRIVE Workshop, Luzern, july 2003.
- 2004 I1 **J.M.Kauffmann**
 Road transportation – Hybrid vehicles
Steps toward a 2000 Watt par capita society – June 11 2004, Zürich

4. Directions d'ouvrages (DO) :

Books

- 2001 DO **Recent Advances in Material for Fuel Cell Systems**
 Coordination : J.F.Fauvarque, J.M.Kauffmann
 Collection Annales de Chimie, Sciences des Matériaux
 Vol 26, n°4, 2001, Elsevier

5. Autres publications (AP)

Other communications

- 2001 AP1 **M.C.Péra, D.Hissel, X.François, J.M.Kauffmann**
 Les piles à combustible : une solution pour les transports de demain
Mois de la Technologie – Belfort le 29 mai 2001, Besançon le 7 juin 2001
 AP2 **F. Badin, M.C.Péra**
 Plate-forme d'essais de systèmes pile à combustible de puissance
 adaptée aux applications transports
Edition Formation Entreprise, Piles à combustible, Grenoble – 12 juin 2001
 2002 AP1 **D.Hissel, M.C.Péra, J.M.Kauffmann**
 Pile à combustible et véhicule électrique
Colloque Transport Terrestre, Belfort, 24 avril 2002, pp 33-39
 2004 AP1 **J.M.Kauffmann**
 Les véhicules du futur : électriques, hybrides ou piles à combustible ?
Laissez-vous conter les transports, Belfort, 19 septembre 2004
 AP2 **M. Tekin, D. Hissel, M.C. Péra, J.M. Kauffmann**
 Optimisation énergétique par essaims particulaires d'un superviseur flou
 pour un système PAC embarqué
GDR MACS OEP'04, Aix-en-Provence, octobre 2004.

6. Rapports disponibles

Available Technical Reports

- 2003 Pn1 **F.Harel, X.François, S.Jemei, S.Moratin**
 Conception et réalisation d'un banc d'essais pour piles à combustible à
 membrane de faibles puissances.
Rapport INRETS-L2ES – LTE 0310

7. Habilitation de l'Université de Franche-Comté - HDR

HDR Thesis

- 2004 H1 **Hissel Daniel**
 Modélisation, optimisation énergétique et diagnostic de systèmes pile à
 combustible
 Université de Franche-Comté – 14 décembre 2004
Responsable : J.M.Kauffmann
 MCF Université de Technologie Belfort-Montbéliard

8. Doctorat de l'Université de Franche-Comté – Université de Technologie de Belfort-Montbéliard.

Ph. D. Theses

- 2004 T1 **Jemei Samir**
 Modélisation d'une pile à combustible de type PEM par réseaux de
 neurones
 14 octobre 2004
Encadrement : J.M.Kauffmann, D.Hissel, J.P.Lisse (PSA)
 Ingénieur de recherche
 T2 **Dumercy Laurent**
 Contribution à la caractérisation thermique et fluidique d'une pile à
 combustible à membrane échangeuse de protons PEMFC
 27 octobre 2004
Encadrement : J.M.Kauffmann, R.Glises, H.Louahlia-Gualous (FEMTO-ST CREST)
 ATER UTBM

T3 **Tekin Mestan**
 Contribution à l'optimisation énergétique d'un système pile à combustible embarqué
 10 décembre 2004
Encadrement : J.M.Kauffmann, D.Hissel
 ATER UTBM

Engineer Degrees

9. Mémoires CNAM

- 2002 MC1 **Bertoni Laurent**
 Unité auxiliaire de puissance hybride pour véhicule automobile.
 Elaboration d'un bus DC à partir de l'association d'une pile à combustible et de supercondensateurs
 5 décembre 2002
Encadrement : H.Gualous, D.Hissel
- 2003 MC1 **Moratin Stéphane**
 Conception, réalisation et modélisation d'un système permettant de contrôler la température et l'hygrométrie de l'air alimentant une pile à combustible de 500 W
 10 janvier 2003
Encadrement : R.Glises, D.Hissel

Master Degree Theses

10. DEA

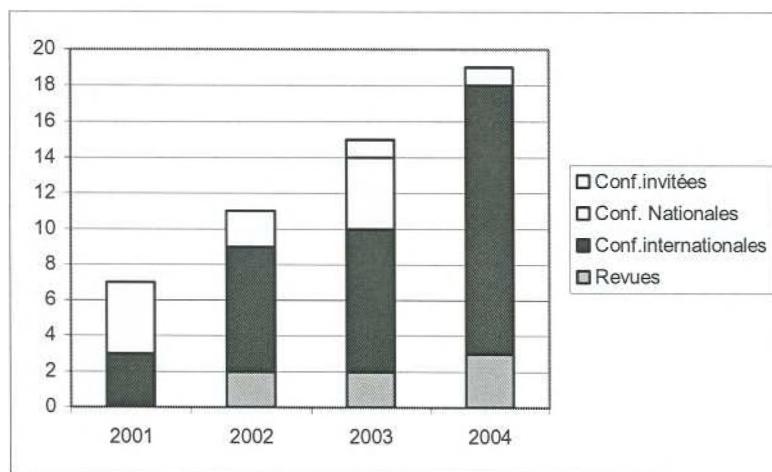
- 2001 D1 **Hubert Vincent**
 Diagnostic d'une pile à combustible
Encadrement : D.Hissel
- D2 **Jemei Samir**
 Mise en place et étude expérimentale d'une pile à combustible à membrane de 500W
Encadrement : M.C.Péra
- 2002 D1 **Bécoulet Julien**
 Diagnostic statique et dynamique d'une Pile à Combustible de type PEMFC
Encadrement : D.Hissel
- 2003 D1 **Hernandes Andres**
 Modélisation d'un groupe motocompresseur alimentant une pile à combustible, par réseaux de neurones
Encadrement : D.Hissel
- D2 **Metali Karim**
 Diagnostic fréquentiel d'un générateur pile à combustible
Encadrement : D.Hissel
- D3 **Vernoux Yannick**
 Modélisation d'une pile à combustible à oxyde solide
Encadrement : M.C.Péra
- 2004 D1 **Chnani Moussa**
 Etude de l'incidence des actionneurs et des organes de conditionnement des fluides sur le comportement d'un système pile à combustible
Encadrement : D.Candusso
- D2 **Maker Hattab**
 Simulation d'un système pile à combustible sur des profils de mission automobile
Encadrement : M.C.Péra
- D3 **Pascal Geoffroy**
 Modélisation des caractéristiques d'humidification de l'air.
Co-encadrement : R. Benelmir (LEMTA) (50%) – R. Glises (50%)

11. Bilan

Le nombre de publications suit l'évolution du nombre de personnes impliquées dans cette thématique avec un certain retard, ce qui est normal. Les travaux commencent à être publiés dans les revues spécifiques. L'approche système gène la publication d'articles de revues et les conférences internationales sont plus adaptées.

3 thèses ont été soutenues depuis le début des travaux. Ce nombre aurait pu être un peu plus important sans l'arrêt prématué de deux thésards soit pour raison personnelle (Fabrice Mathieu) soit pour inefficacité (Samer Hamandi).

9 DEA ont été encadrés soit une moyenne de deux par an à partir de 2001. Enfin une habilitation à diriger des recherches a été présentée au sein de l'équipe Système pile à combustible.



**Fuel cells and interfaces
for transportation
applications
9 – 10.11. 2000**

This first colloquium was organised to promote fuel cells activities in Belfort. 4 topics have been treated, performances of fuel cells and associated devices, production and storage of hydrogen, constraints in the field of transportation, intermediate storage and transient exchanges.

195 participants coming from 6 states

**Piles à combustible et Interfaces pour les transports
9 – 10 novembre 2000**

Ce premier colloque organisé à Belfort visait à faire connaître les activités encore naissantes du L2ES et du CNRT. Ce colloque qui avait eu le soutien du Ministère de la Recherche et de la Technologie, de la Délégation Générale de l'Armement, du Conseil Régional de Franche-Comté, du Conseil Général du Territoire de Belfort, de la Mairie de Belfort et de la Communauté d'Agglomération du Pays de Montbéliard a réuni 195 participants avec l'origine suivante : 40% entreprises privées, 20% entreprises et organismes parapublics, 30% laboratoires universitaires, 10% organismes publics. 10% des participants venaient des pays limitrophes.

Les 27 communications et les 3 conférences introducives ont permis de traiter les points suivants : les piles à combustible, la production et le stockage d'hydrogène, le stockage tampon d'énergie électrique, la modélisation et les applications des piles à combustible. Les actes qui font 200 pages ont été tirés à 260 exemplaires.

**FDFC'2004
29.11 – 02.12 2004**

Organised by Club PAC,
Réseau PACo, DLR, VDI,
L2ES

Topics

Applications: Transportation,
Stationary and portable, Fuel
cells market – Systems

Fuel cell materials (low and
high temperature)

Fuel cell electrochemistry

Fuel cell stacks

225 participants coming from
10 states.

**FDFC'2004 – France Deutschland Fuel Cell
Conference
29 novembre – 2 décembre 2004**

Le colloque international FDFC'2004 s'est déroulé du 29 novembre au 2 décembre 2004 au Centre des Congrès de Belfort. Il a été organisé par Club PAC, Réseau PACo, DLR, VDI et le L2ES qui a pris en charge toute la logistique depuis les résumés jusqu'aux actes du colloque en passant par l'organisation des journées. Les présentations ont été faites en anglais. Les actes édités sous 2 volumes font 448 pages (ISBN n° 2914279-16-7).

Les thématiques abordées sont les suivantes :

- Applications : transport, stationnaire et portable, systèmes
- Matériaux pour pile à combustible (hautes et basses températures)
- Electrochimie des piles à combustibles et cœurs de pile

Il y a eu 47 présentations orales réparties dans 8 sessions et 66 présentations affichées réparties dans 3 sessions.

Le nombre de participants était de 225 représentant 10 pays provenant pour 110 de labos universitaires, 42 de centres de recherche, 66 de l'industrie et 7 relevant d'administrations.

L'exposition a regroupé PSA, HELION, METROHM, ECO-CHEMIE, ESSTIN, DELPHI, INEVA, UTBM, L2ES.

Le colloque a été soutenu par le Ministère délégué à la Recherche, le Ministère de l'Economie, des Finances et de l'Industrie, l'ADEME, Le Conseil Régional de Franche-Comté, le Conseil Général du Territoire de Belfort, la Mairie de Belfort et INEVA.

Perspectives et projets à moyen terme

A court terme le L2ES doit mener à terme les travaux de recherche qu'il a commencés dans le cadre des thèses qui sont engagées tant sur le plan méthodologique (modèle d'état non linéaire, diagnostic, plans d'expérience) que d'architecture (générateur bipile, moteur rapide de compresseur et turbocompresseur).

Les études de vieillissement et d'influence des conditions environnementales vont se poursuivre pour obtenir des lois pouvant être intégrées dans le pilotage du système pile à combustible. Les causes de défaillance seront analysées en liaison avec le Laboratoire des Sciences du Génie Chimique de Nancy, dans le cadre d'une ACI CNRS, VITAPAC. Ces études sur l'influence des conditions environnementales sont directement corrélées avec le démarrage à froid des piles à combustible et de manière plus générale avec le processus de démarrage - arrêt d'un générateur pile à combustible.

Le L2ES continuera à s'investir dans la gestion scientifique et technique de la plate-forme. De nouveaux bancs d'essais sont à monter et la charge active de forte puissance, apte à renvoyer la puissance sur le réseau, doit être définie et installée. Les contrats qui démarrent en 2005 nous obligent également à installer de nouveaux capteurs (monoxyde de carbone), à définir de nouvelles procédures et à gérer l'utilisation des trois cellules de test de la plate-forme.

Le L2ES va mener à bien les cinq contrats qui démarrent, CELINA et SPACT 80 sont dans le droit fil des activités du laboratoire. APURROUTE permettra de maîtriser les piles à haute température, d'acquérir de nouvelles compétences de tests et de mesure et de mettre en œuvre la méthodologie des plans d'expérience. COREPAC est l'opportunité d'étudier le comportement d'une pile avec reformeur à partir de gaz naturel. FELICITAS est plus original et nécessite modélisation, couplage de modèles et validation sur un banc mixte basse et haute températures.

Nous ne nous intéressons pour le moment qu'à un certain nombre de composants du générateur. Le souhait est maintenant de les assembler et de définir le pilotage de ce générateur. L'expérience du Banc ECCE nous a montré que la mise en œuvre sur un véhicule ou un dispositif réel était très formateur et source de problématiques de recherche. SPACT 80 prévoit l'installation d'un générateur 80 kW d'abord sur un locotracteur après un certain nombre de tests sur banc fixe puis sur le banc ECCE. Nous aurons alors une validation en vraie grandeur et en situation réelle du comportement d'un générateur pile.

Nous sommes convaincus que l'hybridation (par supercondensateurs ou batteries) a une influence directe non seulement sur le pilotage du générateur pile à combustible mais également sur la conception du stack et nous travaillerons sur cette optimisation globale.

Une importante réflexion est menée par le Ministère délégué à la Recherche pour faire de Belfort un grand centre de recherche sur les systèmes pile à combustible par apport de compétences complémentaires. Le principe de création d'un « laboratoire commun » associant aux deux universités locales UFC et UTBM, l'INRETS, le CNRS, la Fédération Jacques Villermaux à Nancy et le CEA a été pris.

Les modalités de mise en œuvre ne sont pas encore définies, néanmoins le Ministère délégué à la Recherche souhaite anticiper et faire collaborer plus étroitement les laboratoires impliqués sous la forme d'un PPF qui est piloté par Nancy (B. Davat du GREEN). Trois axes ont été définis pour mener des

recherches amont sur les piles à combustible à membrane polymère pour les transports (le laboratoire pilote est souligné).

- Architecture de générateur pile
 - architecture thermique (LEMTA, FEMTO-ST)
 - architecture électrique (GREEN, L2ES)
- Phénomènes de vieillissement de piles à combustible (LSGC, L2ES)
- Modélisation multi-échelle et multi-physique de système pile à combustible (L2ES, FEMTO-ST, LEMTA, LSGC, GREEN)

On peut noter que ces 5 laboratoires coopèrent déjà dans le cadre de contrats et de thèses.

Conclusion

Nous avons fait le pari en 1999, en concertation avec l'INRETS, de nous lancer dans l'étude des systèmes pile à combustible en tant que nouveau générateur d'énergie électrique pour les transports. Les travaux réalisés en France dans le domaine étaient quasi inexistant. Il n'en était pas de même dans d'autres pays comme le Canada, les Etats-Unis ou l'Allemagne.

Cette orientation a nécessité de gros moyens puisqu'il a fallu, compte tenu des puissances pouvant être mises en jeu, concevoir et construire une plate-forme d'essais adaptée et présentant toutes les garanties de sécurité tant pour les biens que pour les personnes. Les collectivités locales et l'Etat se sont engagés résolument dans ce sens. L'outil qui a été mis en place est unique en France et par certains aspects, unique en Europe.

Le L2ES s'est impliqué à fond dans cette opération tant pour la conception de la plate-forme et de ses équipements que pour développer des activités de recherche sur les systèmes pile à combustible. Le tâtonnement et la prudence du début s'expliquent par la nouveauté du sujet mais également par le fait que le système pile à combustible ne faisait pas partie des priorités du Réseau PACo. En liaison avec l'INRETS, le L2ES a défini des thèmes de recherche adaptés aux besoins du transport et compatibles avec les compétences initiales. Trois thématiques se sont progressivement imposées, la modélisation à partir de grandeurs mesurables et pilotables, l'architecture et les auxiliaires d'un générateur pile à combustible, le diagnostic et la prise en compte du vieillissement pour assurer la fiabilité et la sûreté de fonctionnement du générateur. Toutes ces études nécessitent beaucoup d'expérimentation et le L2ES a développé les bancs d'essais adaptés. D'un stade d'apprentissage, le L2ES est passé progressivement à un stade de compétence comme en témoignent les travaux publiés, et l'ouverture vers des laboratoires complémentaires.

Les travaux sur les piles à combustible nécessitent de gros moyens en fonctionnement qui ne peuvent être obtenus que par des contrats. Après un démarrage avec une forte aide du Ministère, en particulier dans le cadre du Contrat de Plan Etat – Région, de nouveaux contrats ont pu être obtenus soit par le biais du CNRT soit directement, tant au niveau français qu'au niveau européen. Ils permettent de continuer à équiper la plate-forme d'essais, de la faire vivre mais également d'alimenter les travaux de recherche. D'une approche initiale tournée vers les piles basse température pour les applications transport, nous nous sommes diversifiés en nous intéressant également aux piles haute température et aux applications stationnaires.

Une réflexion est engagée actuellement pour amener sur Belfort des compétences complémentaires. L'outil de la plate-forme est opérationnel, les compétences du L2ES sont maintenant reconnues dans le domaine. Les travaux de recherche développés en propre ou en concertation avec d'autres laboratoires et les cinq contrats qui démarrent en 2005 nécessitent d'importants moyens humains. L'équipe qui travaille sur les thématiques spécifiques du système pile à combustible et sur les contrats est trop réduite. Et elle se doit d'être renforcée dans la thématique du générateur pile à combustible fiable, à longue durée de vie et adapté pour les applications transport et/ou stationnaire.

Après cinq années d'expérience, de travail mais aussi de doute, tous ceux qui se sont investis dans cette thématique, estiment qu'il fallait tenter cette aventure mais le chemin est encore long et les résultats concrets de mise en œuvre industrielle ne sont pas pour demain. De nombreux pays travaillent sur cette thématique, nous pouvons tenir notre place et faire en sorte que Belfort soit un pôle d'excellence dans ce domaine.

