

## Diagnostic d'un stack de piles à combustible par mesure non invasive de champs magnétiques – Identification du mode de fonctionnement

### Le laboratoire G2Elab

Le Laboratoire de Génie Électrique de Grenoble (G2Elab, Univ. Grenoble Alpes, CNRS) est un acteur important dans le domaine de la recherche en Génie Électrique au niveau français et international. Avec plus de 100 personnels permanents, 100 doctorants et 50 masters, ses recherches couvrent l'ensemble du spectre d'applications du Génie Électrique, des matériaux aux systèmes, des actionneurs aux procédés, des micro systèmes aux grands réseaux d'énergie.

L'équipe MAGE (Modèles, Méthodes et Méthodologies Appliqués au Génie Électrique) développe des travaux de recherche autour de la modélisation, de l'optimisation et plus largement de la conception des composants et des systèmes du génie électrique. L'équipe est à l'origine de logiciel FLUX dédié au calcul de champs électromagnétiques « basse fréquence ». Elle héberge également l'Équipe de Recherche Technologique « champs magnétiques faibles » (ERT-CMF) qui vise à étudier les champs magnétiques de faibles niveaux, continus et basses fréquences, dans un contexte de caractérisation des sources avec des enjeux de réduction, de contrôle ou d'exploitation des signatures.

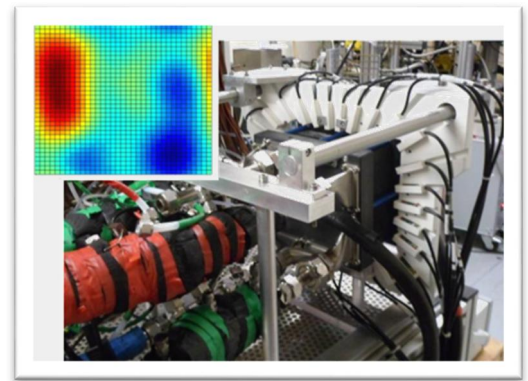
### Résumé Sujet de Thèse / Contexte

Reposant sur l'utilisation de l'hydrogène, le développement et le déploiement de la technologie pile à combustible (PAC) est aujourd'hui primordial pour disposer d'une énergie non carbonée. Dans ce contexte, il est nécessaire d'améliorer la fiabilité, la disponibilité et la durée de vie des piles à combustible en cherchant à optimiser leur fonctionnement et leur conception. Une solution passe par la détection et l'identification préventive des éventuelles défaillances susceptibles de se produire.

Cette connaissance de l'état de santé d'une pile à combustible passe par le développement de méthodes et d'outils de diagnostic qui soient les moins invasifs possible. Ces méthodes et outils de diagnostic doivent permettre, soit pendant les phases de fonctionnement, soit en phase de maintenance, de détecter et d'identifier de manière rapide et pertinente les différents modes de défaillance d'une pile à combustible de type PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell).

Les travaux précédemment réalisés ont montré la faisabilité d'intégrer aux systèmes PAC un ensemble de capteurs magnétiques non intrusifs (ne modifiant pas le fonctionnement du stack) permettant l'identification, la reconstruction des distributions internes de densité de courant et donc d'identifier de manière locale les dysfonctionnements susceptibles d'apparaître afin de diagnostiquer un défaut de mode de fonctionnement du système.

La mesure de champ magnétique externe est une technique relativement nouvelle et originale, qui consiste, en plaçant des capteurs magnétiques autour du stack, à mesurer le champ magnétique généré par les courants le traversant. Avec des mesures suffisamment pertinentes (nombre, position et précision), il est possible, en résolvant un problème inverse, de retrouver une image locale des courants à partir du champ magnétique et donc de réaliser un diagnostic.



Stack du CEA-Liten instrumenté avec des capteurs de champ magnétique et reconstruction de la densité de courant

Cette thèse propose de contribuer au développement d'une méthodologie originale d'estimation de l'état de santé d'une pile afin d'atteindre des cibles de performances, de fiabilité, de robustesse des piles à combustible. Elle s'inscrit dans le cadre d'une collaboration entre trois laboratoires Grenoblois (LEPMI, CEA/LITEN & G2Elab).

## Développement du sujet de thèse

---

Il s'agira de développer un outil et une méthodologie innovante et non invasive permettant de déterminer avec précision l'état de santé d'une pile de technologie PEMFC par la mesure du champ magnétique externe. Le travail de thèse devra permettre de traiter cette problématique à différents niveaux :

- Développement de méthodologies permettant la reconstruction de grandeurs électriques et physicochimiques internes à la pile à partir de mesures magnétiques externes,
- Analyses des données issues de campagnes de mesure réalisées de 2021 et 2022.
- Optimisation du système de capteurs en prévision du transfert industriel.

Développement de méthodologies permettant la reconstruction de grandeurs électriques et physicochimiques internes à la pile à partir de mesures magnétiques externes

- Mise au point d'une méthode de reconstruction de la distribution de densité de courant par mesure de champ magnétique externe sur Stack PEMFC.

Le but de cette étape consiste au développement d'une méthode de résolution du problème inverse qui à partir de ces mesures de champs magnétiques externes permet de calculer une carte de distribution des densités de courant représentative du fonctionnement du stack. Cette démarche a permis de dégager des résultats très intéressants en régime statique. Il faut désormais étudier le régime fréquentiel pour extraire d'autres caractéristiques plus proches de celles recherchées par les électrochimistes.

- Intégration de la spectrométrie d'impédance

L'idée est d'intégrer une approche comparable à la spectrométrie d'impédance électrochimique couramment utilisée pour la caractérisation des systèmes électrochimiques. Cela consistera à superposer un régime alternatif au régime Statique et identifier la réponse de la pile (les distributions de courant) en alternatif. Disposant ainsi sur chaque cellule de la mesure de tension, une impédance équivalente pourra ainsi être déterminée.

Analyses des données issues des campagnes de mesure de 2021 et 2022

- A ce jour, le projet ANR LOCALI, qui se termine en juin 2022 a permis de réaliser 2 campagnes de mesure sur une PAC. La première campagne a permis de définir une configuration de référence sur une pile saine "sans défaut" alors que la 2<sup>ème</sup> campagne de mesure a porté sur l'étude de cette pile avec un défaut connu sur une zone déterminée. Pour chacune des expérimentations, des mesures statiques mais aussi alternatives ont été réalisées. Ces jeux de mesures seront utilisés pour valider les outils développés dans la première étape.

Optimisation du nombre de capteurs.

La démarche actuelle de reconstruction des distributions de densité de courant s'appuie sur un ensemble de plusieurs capteurs dont les positions ont été déterminées empiriquement. Le but de cette étape consiste à réduire ce nombre de capteurs tout en maintenant une bonne qualité de reconstruction. Plusieurs axes pourront ainsi être explorés :

- L'exploitation des mesures réalisées avec les points de mesure actuels mais en réduisant le nombre de capteurs utilisés.
- La mise en œuvre de méthodes d'optimisation afin de trouver des localisations optimales. Cette approche pourra donner lieu à de nouvelles campagnes de mesures.

## Conditions d'accompagnement et collaborations

Le doctorant sera accueilli au G2Elab au sein de l'équipe MAGE. Il bénéficiera ainsi des compétences de l'équipe en modélisation électromagnétique mais aussi du savoir-faire en métrologie magnétique de l'ERT Champ magnétique faible. Le G2Elab dispose actuellement de tout l'équipement informatique et métrologique nécessaire pour mener à bien le travail. La thèse sera également co-encadrée par des chercheurs du LEPMI qui apporteront leurs compétences sur les stacks de piles à combustible. Des synergies avec le laboratoire Liten du CEA Grenoble seront également possibles dans le cadre de campagnes expérimentales réalisées sur des stacks industriels.

**Mots Clés :** PEMFC, Stack, Diagnostic, Champ Magnétique, Mesure non-invasive.

**Pré requis :** Magnétostatique, instrumentations magnétiques, modélisation et simulation numériques (éléments finis, ...), programmation (Matlab, Python, Java, . . .).

**Lieu de la thèse :** Laboratoire de Génie Électrique de Grenoble (G2Elab)  
**Date limite de candidature :** le 10 juin 2022  
**Durée :** 3 ans, d'octobre 2022 à septembre 2025  
**Financement :** Contrat doctoral financé par Grenoble INP-UGA  
**Ecole Doctorale :** EEATS (Electrical Engineering), spécialité Génie électrique

## Contacts Universitaires

G2Elab	
Nom : CAUFFET Gilles	Nom : CHADEBEC Olivier
Etablissement : Grenoble-InP - UGA	Etablissement : CNRS
e-mail : gilles.cauffet@g2elab.grenoble-inp.fr	e-mail : olivier.chadebec@g2elab.grenoble-inp.fr
Tél : 04 76 82 63 65	Tél : 04 76 82 62 91

LEPMI	
Nom : DRUART Florence	Nom : BULTEL Yann
Etablissement : Grenoble-InP - UGA	Etablissement : Grenoble-InP - UGA
e-mail : Florence.Druart@lepmi.grenoble-inp.fr	e-mail : Yann.Bultel@lepmi.grenoble-inp.fr
Tél : 04 76 82 65 43	Tél : 04 76 82 65 80

## Références bibliographiques

- [1] « Diagnostic non invasif de piles à combustible par mesure du champ magnétique proche », Thèse de doctorat de Mathieu Le Ny, UGA, 2012, <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00844407v2/document>
- [2] « Identification des défauts d'une pile à combustible par la mesure du champ magnétique externe : vers la détermination de défauts locaux », Thèse de doctorat de Lyes Ifrek, UGA, 2017, <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01744201>