



**HAL**  
open science

## Une Méthode Adjointe Appliquée à la Tomographie Magnétique d'une Pile à Combustible

Leonard Freisem, Olivier Chadebec, Gilles Cauffet, Yann Bultel, Sébastien Rosini

► **To cite this version:**

Leonard Freisem, Olivier Chadebec, Gilles Cauffet, Yann Bultel, Sébastien Rosini. Une Méthode Adjointe Appliquée à la Tomographie Magnétique d'une Pile à Combustible. 10ème Conférence Européenne sur les Méthodes Numériques en Electromagnétisme (NUMELEC 2024), Jul 2024, Toulouse, France. hal-04644009

**HAL Id: hal-04644009**

**<https://hal.science/hal-04644009v1>**

Submitted on 10 Jul 2024

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Une Méthode Adjointe Appliquée à la Tomographie Magnétique d'une Pile à Combustible

L. Freisem<sup>1</sup>, O. Chadebec<sup>1</sup>, G. Cauffet<sup>1</sup>, Y. Bultel<sup>2</sup> and S. Rosini<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, G2ELab, Grenoble, France

<sup>2</sup>Univ. Grenoble Alpes, Univ. Savoie-Mont Blanc, CNRS, Grenoble INP, LEPMI, Grenoble, France

<sup>3</sup>Univ. Grenoble Alpes, CEA LITEN, Grenoble, France

Email : leonard.freisem@g2elab.grenoble-inp.fr

**Résumé**—Cet article présente un nouvel algorithme inverse, qui se base sur la tomographie magnétique pour réaliser le diagnostic de stack de piles à combustible. L'objectif est de déterminer les résistivités internes locales des cellules du stack à partir de mesures magnétiques externes. Le problème inverse est résolu en minimisant la différence entre le champ magnétique simulé et le champ magnétique mesuré. Les sensibilités sont calculées à l'aide de la méthode de l'état adjoint et les premiers résultats sont présentés.

## I. INTRODUCTION

Une pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC) est un générateur de courant qui représente une alternative écologique aux combustibles fossiles. Un stack PEMFC se compose de plusieurs cellules connectées en série dont le vieillissement est un problème majeur et nécessite un diagnostic précis pour ajuster la commande du stack, remplacer des cellules défectueuses et optimiser ainsi sa fiabilité et sa durée de vie [1], [2]. La tomographie magnétique (MT) est une méthode de diagnostic non invasive du stack qui permet d'obtenir les densités de courants locales  $\mathbf{J}$ . Dans cette méthode, le champ magnétique externe  $\mathbf{B}_{mes}$  créé par le courant traversant le stack est mesuré à l'aide d'un réseau de capteurs placés autour de celui-ci. Un modèle numérique est ensuite inversé pour calculer les densités de courant locales dans le stack [1], [2], [3]. Dans cet article, nous présentons une nouvelle méthode non invasive pour retrouver les propriétés physiques au sein d'un stack. Alors que la plupart des travaux proposent des méthodes pour déterminer les densités de courant, l'originalité de notre approche réside dans l'identification directe des résistivités locales  $\rho_{local}$  à l'aide d'un algorithme d'optimisation non linéaire.

## II. MÉTHODOLOGIE

### A. Dispositif expérimental et paramétrisation du problème inverse

Pour mesurer le champ magnétique  $\mathbf{B}_{mes}$ , nous utilisons l'environnement expérimental présenté initialement par Ifrek et al. (voir Fig. 1a) [2]. 60 capteurs de champ magnétique sont placés autour du stack (voir les flèches sur Fig. 1b), dont 30 mesurent la composante axiale et 30 la composante radiale du champ magnétique en même temps. La région

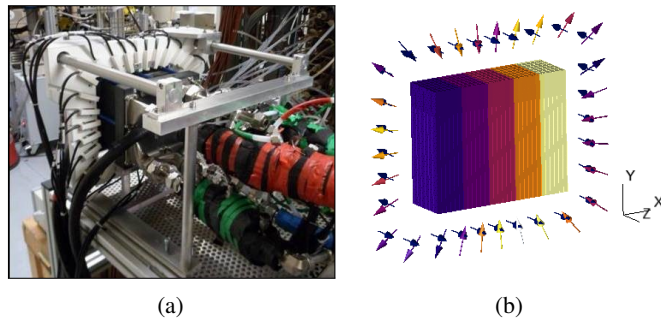


FIGURE 1 – Stack sur le banc d'essai (a) et modèle FEM du stack avec les capteurs de champ magnétique b)

active du stack est divisée en 25 régions volumiques le long du flux de courant (axe Z - voir le modèle de la méthode des éléments finis (FEM) sur la Fig. 1b) avec différentes résistivités. Notons que cette paramétrisation du problème inverse ne permet de déterminer que les défauts 2D, tels que l'assèchement qui affecte le stack sur toute sa longueur. Pour les défauts 3D, comme l'empoisonnement au catalyseur, des couches supplémentaires de régions volumiques doivent être ajoutées. La résolution du problème inverse implique la détermination des résistivités locales  $\rho_{local}$ , stockées dans  $\rho$ .

### B. Résolution du problème direct avec la méthode FEM

Dans cette section, la méthode numérique utilisée pour calculer le champ magnétique externe de la carte de résistivité est brièvement décrite. Un modèle FEM (voir Fig. 1b) est utilisé pour la résolution d'un problème électrocinétique afin de calculer la distribution du courant dans le stack. Le modèle FEM utilisé est divisé en 27 régions volumiques, deux pour les plaques terminales et 25 pour chaque résistivité locale du stack. La géométrie est discrétisée en 9960 éléments finis au total. La Figure 1b montre les 25 régions volumiques et les 60 capteurs autour du stack. Dans le contexte de l'optimisation, il est très important de travailler avec une alimentation en courant constant, même si la résistivité change. On choisit donc une méthode d'éléments finis avec une valeur de courant total imposée. Des fonctions de facettes sont utilisées pour l'interpolation de la densité de courant. Cette formulation assure fortement la conservation du courant, ce qui permet une évaluation précise du champ magnétique externe [4]. Suite au

calcul des densités de courant locales, le champ magnétique  $\mathbf{B}_{sim}$  sur chaque capteur est calculé avec une intégration numérique de la loi de Biot et Savart.

### C. Résolution du problème inverse

La partie originale de cet article est la nouvelle méthode inverse pour déterminer les résistivités locales dans le stack en utilisant la méthode de descente de gradient [5] pour reproduire  $\mathbf{B}_{mes}$ . Pour cela, nous définissons la fonction objective suivante :

$$r(\boldsymbol{\rho}) = \|\mathbf{B}_{mes} - \mathbf{A}\mathbf{J}(\boldsymbol{\rho})\|^2 + \alpha\|\mathbf{L}\boldsymbol{\rho}\|^2, \quad (1)$$

où  $r(\boldsymbol{\rho})$  représente le résidu qui doit être minimisé en faisant varier le vecteur de résistivité  $\boldsymbol{\rho}$ ,  $\mathbf{A}$  la matrice de Biot et Savart discrétisée et  $\mathbf{J}(\boldsymbol{\rho})$  les densités de courant dépendant des résistivités locales dans le stack. Ce problème est mal posé, et donc il doit être régularisé. Nous supposons une résistivité assez régulière sur les surfaces des cellules, donc un gradient régulé entre les régions volumiques adjointes. Par conséquent, nous ajoutons le terme de régularisation  $\alpha\|\mathbf{L}\boldsymbol{\rho}\|^2$ , avec  $\alpha$  comme facteur de régularisation et  $\mathbf{L}$  la matrice du gradient des résistivités. Les gradients du résidu ont l'expression suivante :

$$\frac{dr(\boldsymbol{\rho}, \mathbf{J}(\boldsymbol{\rho}))}{d\boldsymbol{\rho}} = 2(\mathbf{A}^T \mathbf{A}\mathbf{J}(\boldsymbol{\rho}) - (\mathbf{B}_{mes} \mathbf{A}^T)) \frac{\partial \mathbf{J}(\boldsymbol{\rho})}{\partial \boldsymbol{\rho}} + 2\alpha \mathbf{L}^T \mathbf{L}\boldsymbol{\rho}, \quad (2)$$

où  $\frac{\partial \mathbf{J}(\boldsymbol{\rho})}{\partial \boldsymbol{\rho}}$  est le terme clé à calculer. Pour éviter de calculer  $\frac{\partial \mathbf{J}(\boldsymbol{\rho})}{\partial \boldsymbol{\rho}}$  pour chaque région volumique, ce qui conduirait à la résolution de nombreux calculs FEM à chaque itération, nous appliquons la méthode de l'état adjoint pour obtenir les gradients en résolvant un seul système matriciel [6]. Les détails de la méthode seront donnés dans la version étendue de l'article. Un algorithme d'optimisation par descente de gradient pour obtenir  $\boldsymbol{\rho}$  est utilisé pour minimiser le résidu. Il s'agit de la méthode de Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shannon (BFGS) [7].

## III. APPLICATION DE LA MÉTHODE

### A. Validation sur un cas numérique

Pour la validation, nous avons défini une carte de résistivités numérique (voir Fig. 1b) avec un gradient constant du côté gauche vers le côté droit. Les colonnes sont affectées avec les mêmes valeurs de  $\boldsymbol{\rho} = [1.5 \ 1.25 \ 1 \ 0.75 \ 0.5]$ . Le problème direct est résolu et le champ sur les capteurs évalué. Ce champ est ensuite utilisé comme mesures virtuelles pour résoudre le problème inverse. Les résultats obtenus sont présentés sur la Fig. 2a. La carte de résistivités obtenue est un peu plus lisse comparée à celle qui est recherchée mais globalement satisfaisante.

### B. Application sur des mesures réelles

La méthode est maintenant appliquée à un cas réel. Les mesures réalisées autour d'un stack et présentées dans [2] ont été utilisées. Le stack a été alimenté avec un taux d'hydrogène trop bas (stœchiométrie d'hydrogène de 1.3 par rapport à

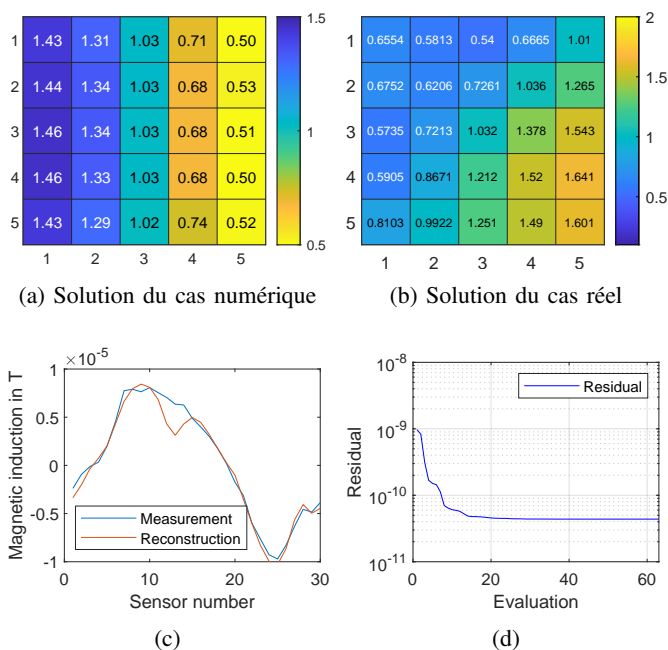


FIGURE 2 – Reconstruction des résistivités pour la validation numérique (a) et le cas réel (b). Champ mesuré (bleu) comparé avec le champ reconstruit (rouge) (c). Evolution du résidu en fonction des itérations (d).

une stœchiométrie de 2 pour un fonctionnement normal). Le champ mesuré est présenté dans la Fig. 2c en bleu. La carte des résistivités obtenue après la résolution du problème inverse est présentée dans Fig. 2b. L'entrée de l'hydrogène est localisée en haut à gauche et la sortie en bas à droite. Comme attendu, nous distinguons une résistivité qui augmente avec la diminution de l'hydrogène sur son parcours jusqu'à sa sortie. Le champ reconstruit est présenté en rouge sur la Fig. 2c. La figure 2d montre la convergence du résidu. L'algorithme converge rapidement en une vingtaine d'itérations.

## RÉFÉRENCES

- [1] M. Le Ny et al., "Current Distribution Identification in Fuel Cell Stacks From External Magnetic Field Measurements," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 49, no. 5, pp. 1925–1928, 2013.
- [2] L. Ifrek, S. Rosini, G. Cauffet, O. Chadebec, L. Rouveyre, and Y. Bultel, "Fault detection for polymer electrolyte membrane fuel cell stack by external magnetic field," *Electrochimica Acta*, vol. 313, pp. 141–150, 2019.
- [3] K.-H. Hauer, R. Potthast, and M. Wannert, "Algorithms for magnetic tomography—on the role of a priori knowledge and constraints," *Inverse Problems*, vol. 24, no. 4, p. 045008, Aug. 2008.
- [4] T.-T. Nguyen, G. Meunier, J.-M. Guichon, O. Chadebec, and T.-S. Nguyen, "An Integral Formulation for the Computation of 3-D Eddy Current Using Facet Elements," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 50, no. 2, pp. 549–552, Feb. 2014, doi : 10.1109/TMAG.2013.2282957.
- [5] H. B. Curry, "The method of steepest descent for non-linear minimization problems," *Quart. Appl. Math.*, vol. 2, no. 3, pp. 258–261, 1944, doi : 10.1090/qam/10667.
- [6] J. Cea, "Conception optimale ou identification de formes, calcul rapide de la dérivée directionnelle de la fonction coût," *M2AN - Modélisation mathématique et analyse numérique*, vol. 20, no. 3, pp. 371–402, 1986.
- [7] R. Fletcher, *Practical methods of optimization*, 2nd ed. Chichester ; New York : Wiley, 2008.